

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 43, № 1, 2021

Головний редактор – Снєжкін Ю.Ф.

Редакційна колегія:

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

Редакційна рада:

Акулич О.В. (Беларусь)
Балтренас П.Б. (Литва)
Ліграні П. (США)
Міховські М. (Болгарія)
Пошкас С. (Литва)
Піоро І.Л. (Канада)
Сайред Н. (Великобританія)

ЗМІСТ

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

Снєжкін Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М.,
Новікова Ю.П.

Стан технологій очищення стічних вод в Україні та
світі5

Долінський А.А., Горобець В.Г., Переяславцева О.О.

Спосіб та обладнання для нагрівання і плавлення
вуглеводневих сумішей у різних галузях
промисловості (Огляд)13

Авраменко А.О., Ковецька М.М., Кондратьєва О.О.,
Сорокіна Т.В.

Теплообмін при плівковому кипінні рідини на
вертикальній нагрівальній стінці в пористому
середовищі20

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

Аналітичне дослідження механізму деформування та
руйнування крапель в зсувних течіях30

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Кураєва І.В.

Глобальне потепління – фізика і геополітика (Огляд) 1.
Антропогенна та природна концепції змін клімату.....38

Гелетуша Г.Г., Гайдай О.І.

Енергетичний та екологічний аналіз життєвого циклу
енергетичного використання поживних решток
кукурудзи51

Желєзна Т.А., Баштовий А.І.

Огляд актуальних напрямків досліджень в секторі
біоенергетики Міжнародного енергетичного агентства
(Огляд)59

Булій Ю.В., Ободович О.М., Сидоренко В.В.

Підвищення ступеню вилучення органічних домішок з
ректифікованого спирту68

Желєзна Т.А.

Європейський «зелений» курс і нові можливості для
розвитку відновлюваної енергетики75

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

Кобзар С.Г., Халатов А.А.

Використання технології «reburning» з продуктами
піролізу біомаси в якості палива допалення для
зниження емісії оксидів азоту від котла ТПП 31282

**ТЕРМОДИНАМІКА ТА ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ,
АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА**

Ободович О.М., Іваницький Г.К., Степанова О.Є.

Моделювання процесів нагрівання та плавлення
вуглеводневих сумішей з примусовим видаленням
розплаву90

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 43, № 1, 2021

Editor in Chief – Yu. Snezhkin

Editorial Board Members:

A. Avramenko
V. Babak – Associated Editor
B. Basok
B. Bondarenko
A. Dolinsky – Honorable Editor
S. Vasylenko
L. Vorobiov
V. Gorobec
L. Dekusha
V. Eremenko
V. Klimenko
S. Kovtun
P. Krukovsky
S. Kudrya
Y. Kuts
M. Myslovych
Ye. Pysmenny
N. Fialko
A. Khalatov
V. Shmorgun – Responsible Secretary

Advisory Editorial Board:

A. Akulich (Belarus)
P. Baltrenas (Lithuania)
P. Ligrani (USA)
M. Mitko (Bulgary)
P. Poskas (Lithuania)
I. Pioro (Canada)
N. Syred (United Kingdom)

CONTENTS

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

Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Paziuk V., Novikova Yu.
State of wastewater treatment technologies in Ukraine and
the world5

Dolinskiy A.A., Gorobets V.G., Pereiaslavl'tseva O.O.
Methods and equipment for heating and melting
hydrocarbon mixtures in various industries (Review)13

**Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A.,
Sorokina T.V.**
Heat transfer for film boiling of a liquid on a vertical heated
wall in a porous medium20

**Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L.,
Gozhenko L.P.**
Analytical study of the mechanism of droplet deformation
and breakup in shear flows30

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

Basok B.I., Baseyev Ye.T., Kurayeva I.V.
Global warming - physics and geopolitics (Review). 1.
Anthropogenic and natural concepts of climate change38

Geletukha G.G., Haidai O.I.
Energy and ecological analysis of the life cycle of energy
use of maize crop residues51

Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.
Overview of current directions of research by the
International energy agency in the bioenergy sector59

Bulii Yu.V., Obodovych O.M., Sydorenko V.V.
Increasing the degree of extraction of organic impurities of
rectified alcohol68

Zheliezna T.A.
European green deal and new opportunities for the
development of renewable energy75

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

Kobzar S.G., Khalatov A.A.

Use of the reburning technology with biomass pyrolysis
products as a reburning fuel to reduce emissions of nitrogen
oxides from TPP 312 boiler82

**THERMODYNAMICS AND TRANSFER
PROCESSES, NUCLEAR ENERGY**

Obodovych O.M., Ivanitsky G.K., Stepanova O.E.

Modeling of heating and melting processes of hydrocarbon
mixtures with forced removal of the melt90

УДК 662.739

СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

Снєжкін Ю.Ф., академік НАН України, Петрова Ж. А., докт. техн. наук,
Пазюк В. М., докт. техн. наук, Новікова Ю.П., аспірант

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>

В даній статті наведені технології із переробки активних мулових осадів в різних країнах світу, утилізація складає 70%, що суттєво вирішує екологічну проблему.

В данной статье приведены технологии по переработке активных иловых осадков в разных странах мира, утилизация составляет 70%, что существенно решает экологическую проблему.

This article presents technologies for the processing of activated sludge in different countries, utilization is 70%, which significantly solves the environmental problem.

Бібл. 24, табл. 2, рис. 1.

Ключові слова: очисні споруди, стічні води, мулові осади, технологія, утилізація.

Проблема очищення стічних вод

Очисні споруди є потенційним джерелом отримання додаткових сировинних ресурсів, що розглядаються сьогодні як відходи, а також нетрадиційних енергоносіїв, потенціал яких повною мірою не використовується, перш за все, через недоліки сучасних технологій очищення стічних вод. Загалом можна стверджувати, що системи водовідведення працюють як техноекосистеми першого виду (відкриті системи, що на вході споживають ресурси і енергію, а на виході створюють продукт і відходи, що не піддаються рециклінгу).

В Україні за 2016 рік у поверхневій водній об'єкти скинуто близько $7,7 \cdot 10^9$ м³ стічних вод. З них забруднених – близько $1,6 \cdot 10^9$ м³ (21 %), підприємствами промисловості – близько $4,5 \cdot 10^9$ м³. У процесі очищення тільки на комунальних (міських та селищних) каналізаційних очисних спорудах України за цей рік утворилось $45 \cdot 10^6$ м³ біологічно та бактеріологічно забрудненого осаду (зі значним умістом патогенних мікроорганізмів, таких як яйця гельмінтів, аскарид тощо), що також потребує утилізації.

Установлено, що широко використовувані в Україні технології біологічного очищення не забезпечують видалення біогенних елементів. Щорічно разом зі стічними водами у поверхневій водній об'єкти надходить: завислих речовин – $45 \cdot 10^6$ кг; нафтопродуктів – $400 \cdot 10^6$ кг; сульфатів – $800 \cdot 10^6$ кг; хлоридів – $670 \cdot 10^6$ кг; азоту – $10 \cdot 10^6$ кг; нітратів – $60 \cdot 10^6$ кг; нітритів – $2 \cdot 10^6$ кг; СПАР – $0,25 \cdot 10^6$ кг; заліза – $0,770 \cdot 10^6$ кг; фосфатів – $7 \cdot 10^6$ кг [1].

На станціях очищення стічних вод утворюються, окрім очищеної води, група речовин, яку називають осадами стічних вод (ОСВ). Для обробки великих

об'ємів стічних вод використовують системи очищення, засновані на утворенні активного мулу або мулового осаду, який залишається роками на звалищах, які потрібно переробляти [2 – 4].

Бортницька станція аерації (БСА) є єдиною очисною спорудою стічних вод м. Києва та прилеглих міст і селищ Київської області. Запроектована і побудована в 60-і роки минулого століття на 3 млн. т. осадів БСА, сьогодні в ній за різними оцінками знаходиться біля 10 – 14 млн. т. Вся ця маса утримується загороджувальними дамбами, висоту яких вимушені постійно нарощувати через цілодобове надходження зі станції аерації 10000 м³ осадів. Якщо врахувати перепад висот у 46 м між муловими картами і р. Дніпро, то наслідки у випадку прориву дамб будуть катастрофічними. Єдиним необхідним шляхом виходу з цієї ситуації є переробка осадів.

Необхідність проведення досліджень в даній галузі пов'язано з тим, що:

- відбувається збільшення джерел утворення мулових осадів, розширюється географія їх розповсюдження, відповідно, щорічно збільшується об'єм утворення мулових відкладень, як в абсолютних величинах, так і на душу населення;

- ускладнюється склад мулового осаду, що включає в себе все більшу кількість екологічно небезпечних компонентів;

- складається все більш негативне відношення до «традиційних» способів утилізації даного типу відходів – вивезення на звалище;

- законодавство створює жорсткі умови до збереження відходів різного походження;

- недостатньо впроваджені інноваційні технології із утилізації відходів;

- застосовуються нові економічні підходи, що передбачають збільшення ціни за утилізацію відходів і допуску до систем переробки відходів приватних виробництв і великих інвесторів.

Виходячи з вищенаведеного, необхідно розробити комплексну переробку мулових відкладень, що включає в сукупності соціальні, економічні, технологічні, інженерні аспекти і дозволяє забезпечити екологічну безпеку запропонованих рішень на основі світових технологій.

Методи утилізації стічних вод в світі

В індустріально розвинутих країнах на одного мешканця в рік утворюється біля 19 – 20 кг сухих речовин осадів стічних вод. Як видно з таблиці 1, наприклад, при близькій чисельності населення в таких країнах як Франція (54,2 млн. людей) і Англія (56,1 млн. людей) виробництво осадів відрізняється в 2,4 рази: у Франції –

510 тис. т., а в Англії – 1240 тис. т. Україна при населенні 42,22 млн. людей має вищу за сумарну кількість осадів які виробляються в Франції та Англії, а саме – 1802 тис. т. за рік. Лідерами вироблення осадів стічних вод є Росія, США та Німеччина [5 - 7].

Як видно з таблиці 2, досить вагомий відсоток осадів стічних вод заховують на звалищах.

Знешкодження/утилізація осадів стічних вод відбувається за допомогою використання в сільському господарстві (use in agriculture), захоронення на звалищах (disposition), викиду в океан (dumping), або спалювання (incineration).

В табл. 2 вказані способи утилізації осадків стічних вод у розвинутих країнах світу.

В майбутньому країни планують зменшити захоронення на звалищах. В Німеччині планують збільшити використання відходів в сільському господарстві від

Таблиця 1. Кількість осаду стічних вод в різних країнах світу

Країна	Кількість осаду, млн. тон/рік	Джерело
Росія	77,678	[8]
США	7,000	[9,10]
Німеччина	2,750	[11, 12]
Японія	2,300	[13]
Південна Корея	1,902	[5]
Україна	1,802	[14]
Англія	1,240	[11, 12]
Італія	0,800	[11, 12]
Франція	0,510	[12]
Австрія	0,320	[10, 11]
Іспанія	0,300	[11, 12]
Швеція	0,180	[10]

Таблиця 2. Основні методи утилізації осадів стічних вод (в %) [7]

Країна	Використання в с/г	Захоронення на звалищах	Спалювання	Скидання в море, океан
Англія	53	16	7	24
Австрія	20	49	31	-
Німеччина	25	55	15	5
Данія	45	28	18	9
США	25	25	35	15
Італія	20	60	-	20
Франція	23	46	31	-
Фінляндія	40	41	-	19
Швейцарія	50	30	20	-
Швеція	60	30	-	10

25 до 40%. В Фінляндії з загальної кількості осадів, які використовуються у вигляді добрив, одна третина вноситься на поле та одна третина при облаштуванні магістральних доріг; 17% – для міського озеленення і біля 16% компостується [5 - 7].

В розвинутих країнах, таких як Японія та США основним методом утилізації осадів стічних вод є спалювання. Основна перевага методу: мала площа, необхідна для утилізації, незалежність від клімату і часу року, а також мала кількість зольного продукту, що можна безпечно використовувати в дорожньому будівництві.

Крім традиційних способів утилізації осадів стічних вод, наведених в таблиці 2, у світі використовують нові не менш ефективні методи.

На рисунку 1 зображена класична схема обробки стічних вод, яка включає в себе зернисту камеру для виділення твердих часток, первинні та вторинні засоби очищення, аеротенки для біологічного очищення. З первинних відстійників отримується осад та активний мул для подальшої обробки, де спочатку проходить анаеробне перетворення з додатковим отриманням біогазу, далі зневоднюється та поступає для використання в сільському господарстві або для спалювання. Таку схему обробки стічних вод доцільно використовувати на активних відходах.

У країнах Європейського союзу значну перевагу надають аеробній та анаеробній обробці осадів стічних вод. Найчастіше анаеробну обробку осадів стічних вод застосовують в Іспанії, Великій Британії, Італії, Фінляндії та Словаччині, а технології аеробного перетворення осадів стічних вод – у Чехії та Польщі [15].

Дослідженнями встановлено, що під час аеробного перетворення в осаді стічних вод у великій кількості

утворюються гумінові кислоти, а під час анаеробного – білки та ароматичні амі-нокислоти, що є складовою органо-мінеральних добрив у сільському господарстві [16].

В країнах з високою температурою повітря переробка осадів стічних вод відбувається методом компостування в неглибоких траншеях з примусовою подачею кисню і слабким підігрівом всієї суміші. Термін компостування в умовах Лос-Анджелеса складає три місяці [2].

У деяких країнах Європейського Союзу спостерігається тенденція до зростання обсягів утилізації осадів стічних вод у сільському господарстві. Так, у Німеччині в якості добрива використовуються осадки стічних вод - стабілізовані, компостовані та пастеризовані. Пастеризація здійснюється шляхом їх нагрівання до 65-70°C протягом 20-30 хвилин, що призводить до знищення в них яєць гельмінтів та патогенних мікроорганізмів. Також використовують спосіб спалювання активного мулу як заміників нафти та кам'яного вугілля. Крім того, у Німеччині і Австрії велику увагу приділяють саме розробці установок спільного компостування відходів та осаду стічних вод [17].

В сучасних умовах багато країн застосовують спалювання твердих побутових відходів та осадів стічних вод. Але при цьому вміст твердих речовин в осаді повинен бути не нижчим 40%, а сумарна вологість не більшою за 60%. Попередньо перед спалюванням їх необхідно зневоднити та висушити. Для спалювання осадів застосовують в спеціальних печах (циклонні, барабанні, піч з киплячим шаром). Газоподібні продукти спалювання, такі як окиси сірки, миш'як, важкі метали, а також сірководень і хлор забруднюють атмосферу.

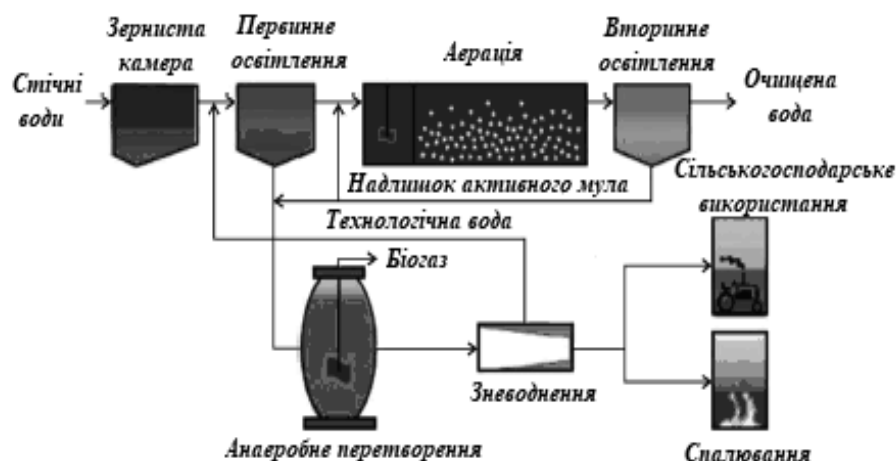


Рис. 1. Класична схема обробки стічних вод

Викид в атмосферу при переробці 1 т відходів складає 27 кг токсичних речовин. Розрахунки підтверджують, що кількість теплової енергії, яка витрачається на спалювання відходів, на 30% перевищує ту енергію, яка отримана при їх утилізації [18].

У Європі набирає все більшу популярність технологія виробництва біовугільних гранул, або АСВ пелет (від англ. Accelerated Carbonized Biomass). В результаті використання цієї технології у біомасі, в тому числі органічних відходах, підвищуються теплота згоряння, енергоємність і поліпшуються параметри горіння. З цієї позиції є цікавим процес карбонізації осадів стічних вод, і в цьому аспекті їх термічна обробка на мулових майданчиках веде не тільки до зменшення обсягів накопичення, але й дає можливість подальшого використання осадів у якості альтернативного палива [19].

Новим наукоємним процесом переробки суміші побутових відходів та осадів стічних вод є низькотемпературний піроліз, який реалізується в Японії, Італії, Німеччині та інших країнах. Піроліз відходів відбувається при температурі 250 - 400°C. Особливістю низькотемпературного піролізу є те, що перероблюваний осад переходить в вуглеводень, спочатку – в газоподібний стан, а після його конденсації отримується основний продукт «сира нафта» [7].

В країнах Європи та у Сполучених Штатах Америки практикують технологію обробки органічних відходів у біогазових установках, основою яких є метантенк. Для ефективної дії сирий осад має завантажуватись попередньо підігрітим і змішаним із збродженим осадом. Співвідношення суміші сирого та збродженого осаду повинно при цьому складати співвідношення 1:10. Біогазова технологія вважається однією з найефективніших способів знезараження та переробки органічних відходів різного походження, з одночасним отриманням біогазу, електроенергії та екологічно чистих добрив [17]. В залежності від класу органічних речовин, що містяться в стічних водах, змінюється склад біогазу і частка метану в ньому.

Останні 40 років в економічно розвинутих країнах – США, Канада, Чехія проводяться дослідницькі роботи з цієї тематики. Встановлено, що активний мул (муловий осад), який утворюється після біологічного очищення стічних вод має високі кормові властивості. Внесення 2 – 3% добавки активного мулу в раціон курей та свиней підвищують приріст на 20% [7].

В Ізраїлі рідкий заброджений осад широко використовується для закріплення рухомих пісків. В багатьох інших країнах з його допомогою створюють

грунтовий шар в піщаних районах. На таких штучно створених землях будуються спортивні майданчики та парки [20].

Новою, але досить дієвою є технологія утилізації осаду із застосуванням вермікультури, що дає змогу суттєво підвищити ефективність очищення та знезараження осаду, зменшити викиди осадів на мулові майданчики. Виготовлення з осаду вермікомпосту є економічним з точки зору ефективності. Вартість переробки однієї тони сухої речовини мулу за допомогою черв'яків складає в середньому 120 грн і виявляється дешевшою порівняно з вартістю його традиційної обробки на полях зрошування або за допомогою обезводнення і компостування. Так як 100% мулового осаду викликає загибель черв'яків, було запропоновано включити біомасу, зокрема листовий спад у співвідношенні 60 до 40% до маси мулового осаду, що є оптимальним [21].

Також у США існує декілька технологій з отриманням відновлювальної енергії, які пов'язані з обробкою осадів стічних вод. Ці технології включають виробництво електричної та теплової енергії, отриманої внаслідок анаеробного перетворення осадів стічних вод [22].

В Україні, на відміну від інших країн, існує проблема так званих мулових майданчиків з «застарілими» муловими осадами, які зберігалися роками і через це майже повністю позбулися органічних домішок, що суттєво ускладнює процес їх переробки. В той час, як у «свіжих» мулових осадах – біля 80% органічних та 20% мінеральних домішок [23]. Території, передбачені для зберігання мулових осадів в Україні в більшості випадків є переповненими і не справляються з безперервними муловими потоками, через що необхідні додаткові площі – понад 120 га /рік [24]. У м. Києві, наприклад, осади не вивозилися більш як 25 років, у м. Херсоні – 25 років, а у м. Сміла – більш як 30 років.

Технології очищення стічних вод в Україні

Одна із наймасовіших технологій очищення стічних вод в Україні передбачає відстоювання стічних вод з утворенням осаду, який в подальшому обробляється метановим зброджуванням для знешкодження патогенних мікроорганізмів, розкладання жироподібних речовин тощо. Відділена у відстійниках вода направляється до аеротенків, де контактує з активним мулом. Регенований активний мул подається до контактних резервуарів зі споруд регенерації, як правило таких самих аеротенків, як і контактні споруди. Після змішування з активним мулом, під час чого мул абсорбує завислі речовини стічних вод, суміш розділяється у вторинних відстійниках, де утворюється очищена стічна вода та

вторинний осад. Останній розділяється на два потоки – найбільша частина направляється на регенерацію і потім змішується зі стічними водами, а менша становить надлишковий активний мул і є основною частиною осадів, які утворюються на станціях очищення. Через великий їх об'єм мул обробляється шляхом аеробної стабілізації і направляється на мулові майданчики, що виводить з обороту значні площі земель та створює екологічну небезпеку як навколишньому середовищу так і самій людині.

Висновки

Аналіз сучасних технологій очищення стічних вод показує, що в світі немає технології переробки застарілих мулових осадів, а в Україні ці технології наразі є недосконалими.

Тому пропонується :

- на основі проведеного літературного огляду проаналізувати сучасний стан існуючих технологій та обладнання отримання біопалива для можливого їх використання в технологіях виробництва композиційного біопалива;
- розробити підготовку сировини до сушіння;
- дослідити тепломасообмінні процеси при сушінні композиційної сировини на основі торфу, застарілих мулових осадів та біомаси;
- розробити технологію гранулоутворення композиційного палива на основі торфу, застарілих мулових осадів та біомаси.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міністерство з питань комунального господарства України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2012 році. – Київ, 2013. – 450 с.
2. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. – М.: Мир, 2006. – 480 с.
3. Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А.Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
4. Лихачев Н.И. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика / Н.И. Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др. Под ред. В. Н. Самохина. – 2 изд. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.
5. Ahn Y.H., Choi H.C. Municipal sludge management and disposal in South Korea: status and a new sustainable approach // *Water Science and Technology* – 2004. – V. 50(9). – Pp. 245–253.
6. Евилевич А. З., Евилевич М. А. Утилизация осадков сточных вод – Л.: Стройиздат, 1988. – 248 с.
7. Пахненко Е.П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения [Электронный ресурс]. URL:<http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2968-7-ch.pdf>
8. Ковальская А.И. Обеспечение экологической безопасности утилизации иловых осадков // *Экология урбанизированных территорий*. – 2011. – №4. – стр.70–72.
9. McClellan K.R., Halden R.U. Pharmaceuticals and personal care products in archived U.S. biosolids from the 2001 EPA National Sewage Sludge Survey // *Water Research* – 2010. – V. 44(2). – Pp. 658–668.
10. Berbecea A., Radulov I., Sala F. Res. J. Agricultural use of sewage sludge pros and cons // *Agricult.* – 2008. – V. 40(2). – Pp. 15–20.
11. Chang A.C., Page A.L. Developing human health-related chemical guidelines for reclaimed wastewater and sewage sludge applications in agriculture. – Geneva: World Health Organization, 1995. – 114 p.
12. Vesilind P.A., Spinosa L., Part I. (Ed.). Sludge production and characterization. Production and regulations. Sludge into biosolids. Processing, disposal and utilization. – London: IWA Publishing, 2001. – Pp. 3–18.
13. Wang J.Y., Stabnikova O., Tay S.T., Ivanov V., Tay J. H. Biotechnology of intensive aerobic conversion of sewage sludge and food waste into fertilizer // *Water Science and Technology* – 2004. – V. 49(10). – Pp. 147–154.
14. Нездойминов В. И., Чернышева А. В. Миграция ионов тяжелых металлов при использовании осадков городских сточных вод в качестве удобрения // *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. – 2010. – Т. 82, № 2. – С. 150 – 157.
15. Kaletnik H. M., Honcharuk T. V. Prospects of sewage water use in Vinnytsia to feed the field crops: domestic and foreign experience // *Balanced Natural Resources*. – 2016. – V. 6(3). – Pp. 42–47.
16. Du H., Li F. Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge // *Chemosphere*. – 2017. – V. 168 – Pp. 1022–1031.
17. Европейская практика обращения с отходами: проблемы, решения, перспективы / Региональное Энергетическое Партнерство. – Санкт-Петербург, 2005. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://govorusa.com/books/evropeyskaya-praktika-obrascheniya-s-othodami>
18. Паёнк Т. Законодательство Европейского Союза в области утилизации осадков [Текст] // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2003. – № 1. – С. 37 – 41.
19. Энергия природы. Заметки с III весеннего биотопливного конгресса «Леспромформ». – 2009. – № 2 (60). – С. 124 – 129.
20. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод [Монографія]. – Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. – 662 с.

21. Пашутина Е.Н., Давыдов С.И. Некоторые вопросы утилизации осадков сточных вод города Луганска // Науковий вісник Луганського НАУ, Серія Біологічні науки. – Луганськ: Елтон-2. – 2010. – №19. – С. 84-87.

22. Kalogo Y., Monteith H. Energy and Resource Recovery from Sludge. – IWA Publishing, 2012. – 192 p.

23. Благоразумова А.М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод, 2-е изд., испр. и доп. – СПб: Издательство «Лань», 2014. – 208 с.

24. Сучкова Н. Г. Анализ состояния проблемы рекультивации иловых площадок очистных сооружений городов и перспективы для Харьковского региона // Сб. докладов Международного конгресса «ЭТЭВК-2007» – Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации. Ялта, 22–26 мая 2007 г. – К. : НДКТУ-УМГ, 2007. – С. 279–284.

STATE OF WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES IN UKRAINE AND THE WORLD

Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Paziuk V., Novikova Yu.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>

In sewage treatment plants, sludge is formed during wastewater treatment, in addition to treated water. They are dumped on silt sites, which occupy large areas and almost all overcrowding. The content of large amounts of minerals and toxic substances in sediments leads to the deterioration of underwater waters and land, which in turn leads to the deterioration of ecology and life in Ukraine. An urgent task in Ukraine is to create a comprehensive processing of sludge, which includes economic, technological, social and environmental aspects.

The main methods of sludge disposal are use in agriculture, landfilling, incineration and dumping into the sea or ocean. The country is gradually trying to abandon the burial. European Union countries also process sludge aerobically and anaerobically. During these processes, components of organo-mineral fertilizers are created that can be used in agriculture. As fertilizers, sludge is composted, stabilized and pasteurized. Combustion of sludge allows to obtain a substitute for coal and oil. To increase the heat of combustion and improve combustion parameters to sludge sludge add coal, biomass. Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and household waste, which allows to obtain "crude oil". One of the methods is processing in biogas plants to obtain both biogas and environmentally friendly fertilizers. To increase the efficiency of treatment and reduction of sludge disposal of used stagnation-ments vermiculture.

Analysis of the literature allows us to conclude that there are methods of disposal of sludge, which have become widespread in various countries around the world, such as fertilizers, alternative fuels, landfills and others. When disposing of sludge, it is possible to produce biogas, electricity and heat, which reduces energy costs for the process.

References 24, tables 2, figures 1.

Key words: treatment plants, wastewater, sludge, technology, utilization.

1. *Ministerstvo z pytan komunalnoho hospodarstva Ukrainy. Natsionalna dopovid pro yakist pytnoi vody ta stan pytnoho vodopostachannia v Ukraini u 2012 rotsi* [Ministry of Public Utilities of Ukraine. National report on drinking

water quality and drinking water supply in Ukraine in 2012], Kiev. 2013. 450 p. (Ukr.)

2. *Khencze M., Armoe's P., Lya-Kur-Yansen J., Arvan E'. Ochistka stochny'kh vod* [Wastewater treatment], Mos-cow, Mir [World]. 2006. 480 p. (Rus.)

3. *E'kologicheskaya biotekhnologiya* [Environmental Biotechnology] / Ed. Forstera K.F., Vejza D.A.Dzh, Leningrad, Khimiya [Chemistry]. 1990. 384 p. (Rus.)

4. *Likhachev N.I. Kanalizaciya naselenny'kh mest i promy'shlenny'kh predpriyatij. Spravochnik proek-tirovshhika* [Sewerage of settlements and industrial enterprises. Designer handbook] / N.I. Likhachev, I.I. Larin, S.A. Khaskin et al. Ed.V. N. Samokhina. 2nd ed., Moscow, Stroyizdat, 1981. 639 p. (Rus.)

5. *Ahn Y.H., Choi H.C. Municipal sludge management and disposal in South Korea: Status and a new sustainable approach*, Water Science and Technology, 2004. V. 50(9). P. 245–253.

6. *Evilevich A. Z., Evilevich M A. Utilizaciya osadkov stochnykh vod* [Disposal of sewage sludge], Leningrad, Stroyizdat. 1988. 248p. (Rus.)

7. *Pakhnenko E.P. Osadki stochny'kh vod i drugie netradiczionny'e organicheskie udobreniya* [Waste water sedi-ments and other non-traditional organic fertilizers], Electronic resource URL: <http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2968-7-ch.pdf>. (Rus.)

8. *Koval'skaya A.I. Obespechenie e'kologicheskoy bezopasnosti utilizaczii ilovy'kh osadkov* [Ensuring the ecological safety of the disposal of silt sediments], E'kologiya urbanizirovanny'kh territorij [Ecology of urbanized territories], 2011. №4. P.70–72. (Rus.)

9. *McClellan K.R., Halden R.U. Pharmaceuticals and personal care products in archived U.S. biosolids from the 2001 EPA National Sewage Sludge Survey*, Water Research, 2010. V. 44(2). P. 658–668.

10. *Berbeca A., Radulov I., Sala F. Res. J. Agricultural use of sewage sludge pros and cons*, Agricult, 2008, V. 40(2). P. 15–20 .

11. *Chang A.C., Page A.L. Developing human health-related chemical guidelines for reclaimed wastewater and sewage sludge applications in agriculture*, Geneva, World Health Organization, 1995. 114 p.

12. *Vesilind P.A., Spinosa L., Part I. (Ed.). Sludge production and characterization. Production and regulations. Sludge into biosolids. Processing, disposal and utilization*, London, IWA Publishing, 2001. P. 3–18.

13. *Wang J.Y., Stabnikova O., Tay S.T., Ivanov V., Tay J. H. Biotechnology of intensive aerobic conversion of sewage sludge and food waste into fertilizer*, Water Science and Technology, 2004. V. 49(10). P. 147–154.

14. *Nezdojminov V. I., Chernysheva A. V.* Migraciya ionov tyazhelykh metallov pri ispol'zovanii osadkov gorodskikh stochnykh vod v kachestve udobreniya [Migration of heavy metals ions by using urban sewage sludge as fertilizer], *Visnyk Donbaskoi Nacionalnoi Akademii budivnytstva i arkhitektury* [Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2010. V. 82(2). P. 150–157. (Rus.)
15. *Kaletnik H. M., Honcharuk T. V.* Prospects of sewage water use in Vinnytsia to feed the field crops: domestic and foreign experience, *Balanced Natural Resources*, 2016. V. 6(3), P. 42–47.
16. *Du H., Li F.* Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge, *Chemosphere*, 2017. V. 168. P. 1022–1031.
17. *Evropeyskaya praktika obrashheniya s otkhodami: problemy, resheniya, perspektivy* [European practice of waste management: problems, solutions, prospects] / *Regional'noe Energeticheskoe Partnerstvo* [Regional Energy Partnership], St. Petersburg, 2005. Electronic resource URL: <http://govorusha.com/books/evropeyskaya-praktika-obrascheniya-s-otkhodami>. (Rus.)
18. *Payonk T.* Zakonodatel'stvo Evropejskogo Soyuza v oblasti utilizacii osadkov [Legislation of the European Union in the field of sludge disposal], *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2003. № 1. P. 37 – 41. (Rus.)
19. *Energia prirody* [Energy of nature]. *Zametki s III vesnogo biotoplivnogo kongressa «Lesprominform»* [Notes from the III spring biofuel congress "Lesprominform"], 2009. № 2 (60). P. 124–129. (Rus.)
20. *Kovalchuk V.A.* Ochystka stichnykh vod [Wastewater treatment] [Monograph], Rivne, VAT «Rivnenska drukarnia» [OJSC "Rivne Printing House"], 2002. 662 p. (Ukr.)
21. *Pashutina E.N., Davy'dov S.I.* ekotory'e voprosy' utilizacii osadkov stochny'kh vod goroda Luganska [Some questions of utilization of sediments of sewage of the city of Lugansk], *aukovyi visnyk Luhanskoho NAU, Seriya Biolohichni nauky* [Scientific herald of Lugansk NAU, Series Biological sciences], Lugansk, Elton-2, 2010. №19. P. 84–87. (Rus.)
22. *Kalogo Y., Monteith H.* Energy and Resource Recovery from Sludge, IWA Publishing, 2012. 192 p.
23. *Blagorazumova A.M.* Obrabotka i obezvozhivanie osadkov gorodskikh stochny'kh vod [Treatment and dehydration of urban wastewater sludge], 2nd ed., revised. and additional, St. Petersburg, Lan' [Doe], 2014. 208 p. (Rus.)
24. *Suchkova N. G.* Analysis of the problem of treatment plant sludge fields reclamation and perspectives for Kharkiv region, Abstract of the International congress – Ecology, Technology, Economy Water Supply and Sanitation, Yalta, Ukraine, 2007. P. 22–26. (Rus.)

Отримано 27.01.2020

Received 27.01.2020

УДК 536.242; 536.4

СПОСІБ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАГРІВАННЯ І ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ПРОМИСЛОВОСТІ (ОГЛЯД)

Долінський А.А.,¹ д.т.н., академік НАНУ, Горобець В.Г.,² д.т.н., Переяславцева О.О.,¹ к.т.н.¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03680, Україна²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв оборони 15, Київ, 03041, Україна<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.2>

Представлено аналіз способів та обладнання, в якому проводиться нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей у фармацевтичній, харчовій та нафтопереробній промисловостях. Вказані недоліки використання такого обладнання.

Представлен анализ способов и оборудования, в котором проводится нагревание и плавление углеводородных смесей в фармацевтической, пищевой и нефтеперерабатывающей промышленности. Указаны недостатки использования такого оборудования.

The analysis of methods and equipment in which heating and melting of hydrocarbon mixtures in the pharmaceutical, food and oil refining industries is carried out. The disadvantages of using such equipment are indicated.

Бібл. 9, рис. 6.

Ключові слова: нагрівання, плавлення, вуглеводневі суміші, фармацевтична, харчова, нафтопереробна промисловості.

МЛФ – м'які лікарські форми;

НТД – науково-технічна документація;

ТЕН – трубчастий електронагрівник.

Вступ. Процеси нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей (вазелін, парафін, ланолін, жири, нафтопродукти) великого значення набули у багатьох галузях промисловості, зокрема у фармацевтичній – при виготовленні м'яких лікарських форм, нафтопереробній – при зливанні нафтопродуктів з цистерн, харчовій при плавленні у жиротопках, при переробці полімерів та ін.

Процеси нагрівання та плавлення є трудомісткими та енергозатратними, тому що необхідно перевести речовини або суміші з твердого стану до достатньо плинного, щоб забезпечити їх подальше транспортування до наступних стадій виробництва.

Переважно обладнання закуповується за кордоном, на придбання якого витрачаються великі кошти. Застарілі технології та здебільшого використання імпортного дорогого обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення є вітчизняною проблемою. Тому є необхідність у аналізі та вивченні проблем та недоліків обладнання, що виникають при здійсненні процесів нагрівання та плавлення у різних галузях промисловості.

У фармацевтичному виробництві частіше доводиться готувати комбіновані м'які лікарські форми (МЛФ), які містять компоненти, розчинні або нерозчинні в основі або у воді. Все це обумовлює технологію отримання мазей і застосуванню апаратури. Відмінними осо-

бливостями виробництва МЛФ в заводських умовах є те, що їх готують у спеціальних цехах із застосуванням складного устаткування за технологіями, які забезпечують їх стабільність не менше двох років, відповідно до розробленої та затвердженої нормативно-технічної документації НТД.

Виробництво МЛФ сконцентровано на фармацевтичних фабриках або великих хіміко-фармацевтичних заводах. У заводському виробництві м'яких лікарських форм використовується широкий асортимент основ і складне спеціальне обладнання. У технології МЛФ важливими є такі фактори: ступінь дисперсності лікарських речовин, вибір сплавлених компонентів основи, спосіб введення лікарських речовин в основу, час, швидкість та порядок змішування компонентів, температурний режим та інші параметри. Вони впливають на консистенцію, реологічні властивості, однорідність, стабільність при зберіганні та фармакотерапевтичну ефективність мазей [1].

Технологічний процес виробництва МЛФ на хіміко-фармацевтичних підприємствах складається із таких основних стадій: санітарна обробка виробництва; підготовка сировини і матеріалів (лікарських речовин, основи, упаковки тощо); введення лікарських речовин в основу; гомогенізація мазей; стандартизація готового продукту; фасування, маркування та упаковка готової продукції.

Важливою стадією в технології отримання м'яких лікарських форм є підготовка основи, тобто розплавлення компонентів вуглеводневої суміші основи. В залежності від фармакологічної дії МЛФ застосовуються гідрофобні, гідрофільні основи та їх суміші. Значення і роль основ в технології виробництва МЛФ важливі і різноманітні. Основи забезпечують необхідну масу мазей і, відповідно, належну концентрацію лікарських речовин, м'яку консистенцію, істотно впливають на їх стабільність. Ступінь вивільнення лікарських речовин з мазей, швидкість і повнота їх всмоктування багато в чому залежать від природи, складу і властивостей основи.

Для плавлення компонентів вуглеводневої суміші використовують різноманітні реактори з обігрівом оболонки (рис. 1) [2].

Реактори з обігрівом оболонки призначені для плавлення і змішування компонентів вуглеводневих сумішей.



Рис. 1. Реактори з обігрівом оболонки

Плавлення здійснюється електричними нагрівальними елементами (ТЕНами). Теплоізоляція реакторів виконана у вигляді сорочки. Процес змішування здійснюється конвекційним і механічним способами. Реактори обладнані мішалками та забезпечені системою вентиляції.

Але, при роботі на такому обладнанні неможливо домогтися рівномірного прогріву всієї маси речовини, а отже, і якісної теплової обробки. Тому подібне обладнання проблематично використовувати для теплової обробки речовин з високою в'язкістю і низьким коефіцієнтом теплопровідності.

Також використовуються установки (рис. 2), що представляють собою ванну, в якій знаходиться змішувик для пари, решітка з соплами, продуктивний насос та механізм для перекидання бочки. Частина речовини вручну завантажується у ванну, в якій плавиться за допомогою перегрітого пару у змішувнику. Ємність з речовиною за допомогою механізму для перекидання перевертається та ставиться на сопла. Продуктивним насосом в сопла подається розплав речовини і розмиває її у ємності.

Суттєвими недоліками такої установки є нерівномірний прогрів всієї маси вуглеводневої суміші, трудомісткість, бо потребує ручного завантаження речовини, та контамінаційна небезпечність.

Реактори та ванни на даний час витісняються плоскими силіконовими, міканітовими (слюдяними) нагрівачами та обігрівачами у вигляді оболонки, яка повністю покриває ємність, що знайшли широке застосування на підприємствах при виготовленні кремів, косметики для розплавлення воску, вазеліну, жирів і інших речовин. Ці способи зараз є найбільш простим

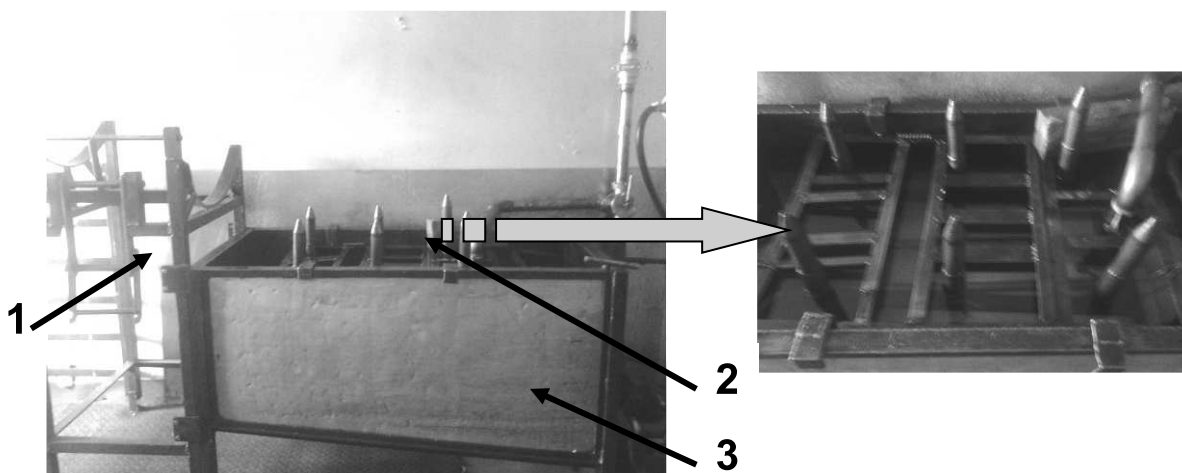


Рис. 2. Ванна з перекидним механізмом для ємності з речовиною:

1 – механізм для перекидання ємності; 2 – решітка з соплами; 3 – змішувик для пари

рішенням для нагрівання речовин, що зберігаються в металевих або пластикових ємностях.

Американською фірмою “BRISKHEAT” [3] розроблений нагрівальний елемент з скловолоконним силіконовим покриттям, що розташовується на зовнішній поверхні ємності (рис. 3) для здійснення процесу плавлення.

Циліндричний нагрівач розташовується на чисту, суху поверхню ємності. Відкривається з’єднувальна застібка-липучка на нагрівачі і розміщується на зовнішній поверхні ємності з регульованим термовимикачем у верхній третині нагрівача. Нагрівач повинен бути розташований на ємності, щоб він охоплював її від підлоги до верхньої її частини. Далі з’єднувальна застібка-липучка закріплюється, таким чином обігрівач впритул буде обв’язаний без провисання.

Застосування таких нагрівальних елементів призводить до нерівномірного плавлення речовини у ємності (речовина буде розплавлятися спочатку біля стінок ємності, а в середині залишатися не розплавленою).

В харчовій промисловості процеси нагрівання і плавлення використовуються для розплавлення в’язких речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, таких як жири та олії. Об’єктом плавлення можуть бути різні речовини як рослинного і тваринного, так і мінерального походження. Відомо, що кінетика процесу нагрівання та плавлення залежить не тільки від властивостей речовини, а й від застосовуваного методу плавлення. Структурні і морфологічні зміни речовин, які відбуваються при цих процесах, мають велике значення, тому що визначають якість одержуваного продукту.

Все це обумовлює різні вимоги до процесу плавлення кожної речовини, а отже, до режиму його проведення і вимагає розробки відповідного обладнання.

Вимоги до обладнання для нагрівання та плавлення в’язких речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності визначаються не тільки такими загальними вимогами як економічність, простота, зручність обслуговування, а й специфічними вимогами, які є визначальними – збереження початкових властивостей продукту: зовнішнього вигляду, кольору, смаку, запаху, біохімічних та харчових властивостей і якості, збільшення терміну зберігання, забезпечення відповідних бактеріальних норм.

Тому ні параметри теплового впливу на речовину, ні тривалість процесу нагріву не можуть бути обрані довільно, а повинні встановлюватися для кожної конкретної речовини на основі досліджень процесів тепломасообміну. Багато олій і жирів є термолабільними речовинами. Вони не витримують високих температур та тривалого нагрівання.

В харчовій промисловості використовуються жироплавители для плавлення жирів (рис. 4), які представляють собою двоствінний резервуар, встановлений вертикально на опорах. Внутрішня ванна укладена в теплову сорочку з вбудованими ТЕНами. Для зручної експлуатації і підвищення продуктивності теплопередавальні трубки розташовані під нахилом, що сприяє просуванню і обливанню речовини розплавленою масою продукту. Також передбачений кожух (кришка над теплопередавальною трубою) та рециркуляційний трубопровід з насосом. В такій установці продукти

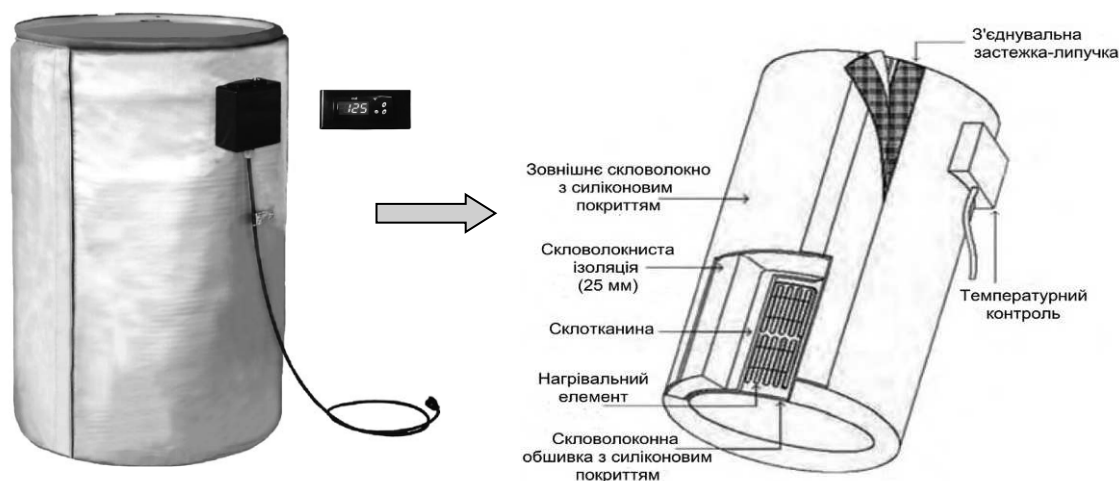


Рис. 3. Нагрівальний елемент з повним покриттям ємності для проведення процесів нагрівання та плавлення

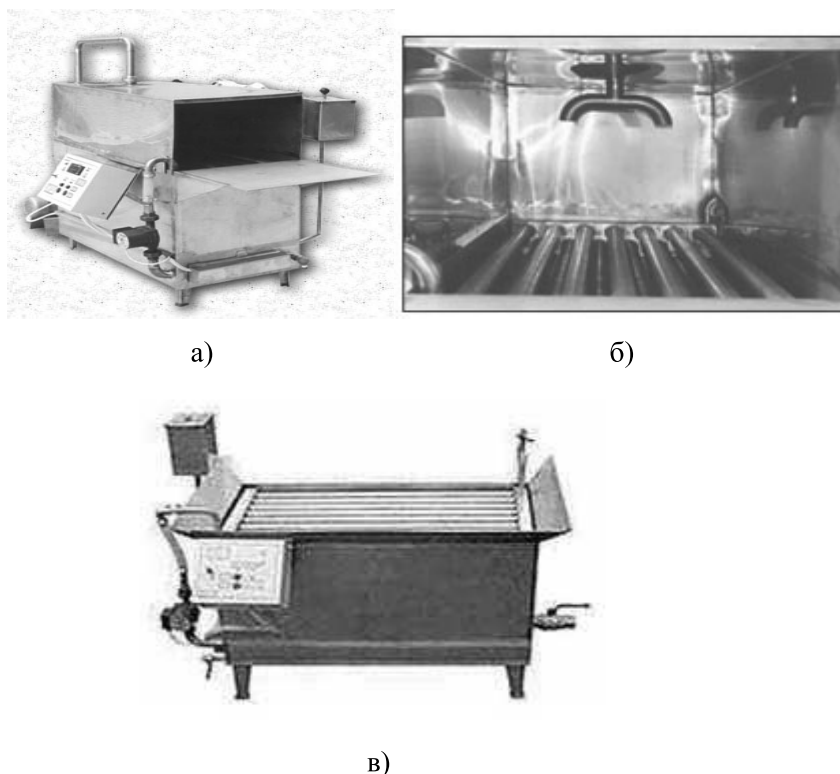


Рис. 4. Установки для нагрівання і плавлення жирів:
а – загальний вид установки з торцевою загрузкою; б – трубна решітка, по якій циркулює гарячий теплоносій; в – загальний вид установки відкритого типу

для плавлення встановлюються на трубну решітку, в яку подається гаряча вода. За мірою розплавлення продукт стікає на похиле дно, де доплавляється за рахунок нагрітої сорочки. Температуру теплоносія можна регулювати в межах від 0 до 150 °С в залежності від технології та продукту плавлення. Жироплавитель оснащений пультом керування, який включає в себе двоканальний вимірювач-регулятор температури теплоносія та насос для поливу твердого продукту розплавом.

Такі жироплавители (жиротопки) використовуються в масложировій, кондитерській, косметичній та інших промисловостях [4].

В таких установках передача тепла здійснюється в нестаціонарному режимі з великим перепадом температур, що призводить до змін фізико-хімічних властивостей оброблюваного середовища. Також контамінаційно небезпечним є ручне завантаження продукту.

У нафтопереробній промисловості за допомогою обігріву цистерн з продуктом вирішується одне з найбільш складних і трудомістких завдань, яке пов'язано з операціями зливу-наливання нафтопродуктів з низьким коефіцієнтом теплопровідності. Ці операції зв'язані

із значними матеріальними і енергетичними витратами, а також тривалим простоем ємностей і цистерн, що знаходяться під завантаженням. Сукупно ці проблеми, що пов'язані з загальноприйнятою технологією транспортування, зливу у сховища, зберігання і подачі на спалювання мазутного палива, призводять до величезних масштабів непрямих втрат.

В'язкі нафтопродукти доставляються до місця зливу в спеціальних цистернах (рис. 5), обладнаних нагрівачами і тепловою ізоляцією, що дозволяє в процесі транспортування зберігати тепло, яке мав продукт при наливанні в цистерну, або в нафтопродукт. При завантаженні в цистерни вносять дорогі присадки, які знижують в'язкість і температуру його застигання. Налив і, особливо, злив високов'язких нафтопродуктів (мазуту, бітуму, важкої нафти та ін.) вимагає їх попереднього розігрівання, застосування зливно-наливного спеціального обладнання, а також оснащення цистерн і ємностей засобами розігріву. Відсутність засобів розігрівання призводить до збільшення часу обробки цистерн та ємностей і неповного зливу з них нафтопродуктів. Частина цих залишків безповорот-

но втрачається через неможливість утилізації. Значна кількість нафтопродуктів залишається на стінках транспортних ємностей, зменшуючи їх вантажомісткість і погіршуючи якість продукту, який знову завантажується.

Відомі такі методи розігріву нафтопродуктів з низьким коефіцієнтом теплопровідності в залізничних цистернах [5]: підігрівом відкритою парою; цистерни з паровою сорочкою; височастотний нагрів нафтопродукту; циркуляційний підігрів; розігрів цистерн у закритих тепляках.

Циркуляційний розігрів використовується в установці для вивантаження з залізничних цистерн високов'язкого мазуту з твердим залишком (рис. 6), який представляє собою застиглий в торцях цистерни мазут [6]. Принцип дії установки ґрунтується на циркуляції мазуту, відібраного з цистерни, його розігріву і повер-

нення гарячого мазуту в цистерну для розмиву твердого залишку. Ця установка дозволяє уникнути обводнення мазуту за рахунок розігрівання не паром, а самим гарячим продуктом, що пройшов через теплообмінник, а також видалити застиглий нафтопродукт з торців цистерни.

Височастотний нагрів нафтопродукту при зливі з цистерн є недоцільним, тому що його застосування пов'язано з великими витратами енергії.

Розігрівання цистерн з нафтопродуктом гострою парою, що подається безпосередньо в продукт, є одним з найпоширеніших способів. Але він призводить до обводнення нафтопродукту, що зливається з цистерни, до декількох десятків відсотків, що, у свою чергу, після зливу продукту з цистерн вимагає час на його відстій і вживання дорогих деемульгаторів для видалення води,

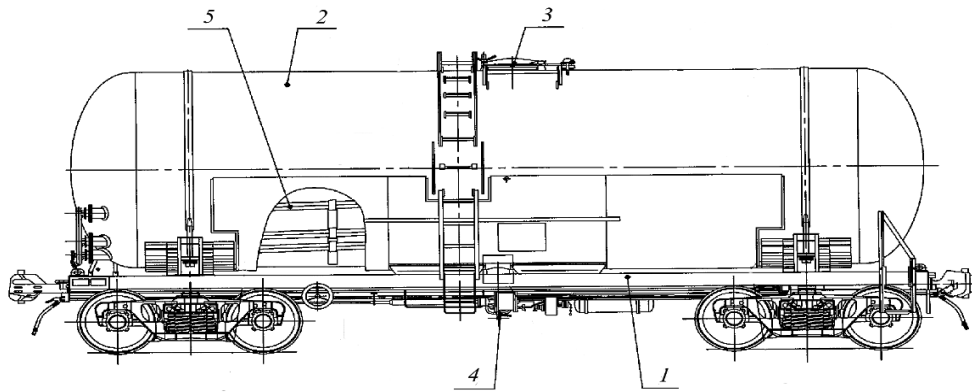


Рис. 5. Схема залізничної цистерни для нафтопродуктів:

1 – платформа; 2 – цистерна; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – зливний пристрій;
5 – підігрівальні трубки

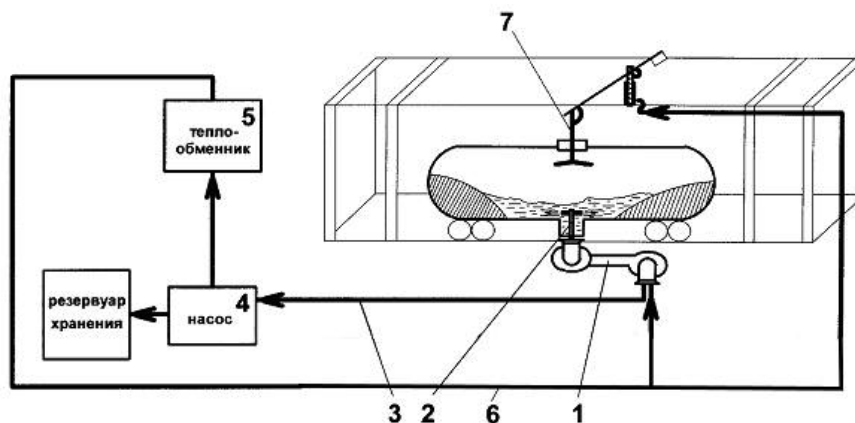


Рис. 6. Установка для вивантаження із залізничної цистерни високов'язкого мазуту:

1 – пристрій нижнього зливу; 2 – гідромонітор з форсунками; 3 – зливний колектор;
4 – насос; 5 – теплообмінник; 6 – нижній напірний трубопровід

що знижує його споживчі якості. У холодну погоду під час розігрівання залізничних цистерн гострою парою, вміст води в мазуті може досягати 10...15 %. Під час подальшого зберігання мазут додатково обводнюється атмосферною вологою. Аналізи якості мазуту показують, що вміст води в пробах, відібраних на рівні 4...5 м від днища, досягає 5 %, а в придонних шарах 12 %. При недостатньому підігріванні відстоювання води у високов'язкому мазуті, що має високу густину, стає практично неможливим і з великою вірогідністю можна вважати, що до споживачів поступає надмірно обводнений мазут. Якість мазуту може погіршати і при змішуванні його в ємностях нафтобаз з мазутом, в якому внаслідок тривалого зберігання якісні характеристики не відповідають стандартним вимогам. Змішування ж вуглеводнів різного природного походження, що мають несумісну структурну будову молекул, може привести до швидкої втрати стабільності палива. Тому кожна операція по змішуванню палива несе в собі невизначеність за якістю кінцевого продукту.

Розігрівання в тепляках здійснюється підігрітим повітрям, яке нагрівається в тепляках випромінюванням трубчастих екранів, які обігріваються парою. Цей спосіб хоч і має ряд переваг у порівнянні з розігрівом відкритим паром (зменшення часу розігріву, відсутність обводнення, зменшення забруднення території мазутозливу), але є енергоємним.

Нафтопродукт у цистернах з паровою сорочкою, в яких пара під тиском підводиться до штуцера сорочки і заповнює її по всій довжині цистерни та розігріває нафтопродукт, може бути злитий у 2,2...4,2 рази швидше без обводнення, ніж з цистерн звичайної конструкції, але конструкція цистерни з паровою сорочкою призводить до збільшення маси цистерн приблизно на 5 %.

Висновки

Аналіз існуючих способів та обладнання для нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей у фармацевтичній, харчовій та нафтопереробній промисловостях показав, що, незважаючи на велику різноманітність, використання представленого обладнання має ряд суттєвих недоліків: енергозатратність, трудомісткість, енергоємність та ін. А, у сукупності з використанням застарілих технологій та імпортного дорогого обладнання для здійснення процесів нагрівання та плавлення дає поштовх до розробки інноваційних способів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей і відповідного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чуешов В.И., Гладух Е.В., Ляпунова О.А., Сайко И.В., Сичкарь А.А., Рубан Е.А., Крутских Т.В. Промышленная технология лекарств: электронный учеб. – Харьков, 2010. – Режим доступа: <http://ztl.pp.ua/html/medication/index.html>.
2. *Промвит ТМ* Оснащение фармацевтических предприятий. Плавитель жира [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://promvit.com.ua/plavitel-obemom-50-l/>.
3. Сайт корпорации “BRISKHEAT” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.briskheat.com/>.
4. *Жиротопки (плавители масла, жира)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.agro-mash.ru/0811_jirot_vit.htm.
5. Адамов В.А. Сжигание мазута в топках котлов. – Л.: Недра, 1989. – 304 с.: ил.
6. Пат. 48964 (RU), МПК7 В 67 D 5/04, В 65 G 69/20. Установка для выгрузки из железнодорожной цистерны высоковязкого мазута с твердым остатком / заявитель и патентообладатель: Колыхалин В.М. – № 2005116214/22; заявл. 20.05.05; опубл. 10.11.05.

METHODS AND EQUIPMENT FOR HEATING AND MELTING HYDROCARBON MIXTURES IN VARIOUS INDUSTRIES (REVIEW)

Dolinskiy A.A.¹, Gorobets V.G.², Pereiaslavl'tseva O.O.¹

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Marii Kapnist str., 2a, Kyiv, 03680, Ukraine*

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.2>

The analysis of the methods and equipment in which the heating and melting of hydrocarbon mixtures in the pharmaceutical, food and oil refining industries is carried out has shown that reactors, baths, electric heaters, heating chambers, etc. are traditionally used for heating and melting hydrocarbon mixtures. Such methods are time consuming and energy consuming, large temperature gradients are observed, which leads to overheating of one part of the substance and underheating of another. In addition, the process of loading mixtures into boilers and their subsequent unloading is problematic and unsafe for contamination. Often containers with such substances are kept in unheated or poorly heated rooms (warehouses, workshops, etc.) and are too viscous to be unloaded from the container and transported to the next stages of production, which makes it difficult and slows down their melting. Most of the equipment is purchased abroad, for the purchase of which large funds are spent. The discovered existing problems give impetus to the development of new methods and equipment for the implementation of heating and melting processes.

References 6, figures 6.

Key words: heating, melting, hydrocarbon mixtures, pharmaceutical, food, oil refining industries.

1. Chueshov V.I., Gladukh E.V., Lyapunova O.A., Sajko I.V., Sichkar A.A., Ruban E.A., Krutskikh T.V. [Industrial drug technology]: elektronnyj ucheb. – Kharkov, 2010. – Access mode: <http://ztl.pp.ua/html/medication/index.html>. (Rus.)

2. PromvitTM Equipment for pharmaceutical enterprises. Fat melter [Electronic resource]. – Access mode: <https://promvit.com.ua/plavitel-obemom-50-l/>. (Rus.)

3. Corporation website “BRISKHEAT” [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.briskheat.com/>. (Rus.)

4. Fat melters (melters of oil, fat) [Electronic resource]. – Access mode: http://www.agro-mash.ru/0811_jirot_vit.htm. (Rus.)

5. Adamov V.A. Fuel oil combustion in boiler furnaces. – L.: Nedra, 1989. – 304 p.: il. (Rus.)

6. Patent 48964 (RU), MPK7 B 67 D 5/04, B 65 G 69/20. [Installation for unloading of high-viscosity fuel oil with solid residue from a railway tank car]. заявитель i patentoobladatel: Kolykhalin V.M. – № 2005116214/22; заявл. 20.05.05; opubl. 10.11.05. (Rus.)

Отримано 05.02.2021

Received 05.02.2021

УДК: 532.536

ТЕПЛООБМІН ПРИ ПЛІВКОВОМУ КИПІННІ РІДИНИ НА ВЕРТИКАЛЬНІЙ НАГРІВАЄМІЙ СТІНЦІ В ПОРИСТОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України, Ковецька М.М., канд. техн. наук, Кондратьєва О.О., канд. техн. наук, Сорокіна Т.В., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.3>

Представлены результаты моделирования теплообмена при пленочном кипении жидкости в пористой среде на вертикальной нагреваемой стенке. Получено аналитическое решение задачи с использованием модели пористой среды в приближении Дарси-Бринкмана

Приведено результати моделювання теплообміну при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі на вертикальній нагріваній стінці. Отримано аналітичне рішення задачі з використанням моделі пористого середовища в наближенні Дарсі - Брінкмана.

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

Бібліографія 18, рис. 2, табл. 2.

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

c – теплоємність при постійному тиску;
 d_n – діаметр пори;
 g – гравітаційне прискорення;
 G – масова витрата;
 h – коефіцієнт тепловіддачі;
 k – теплопровідність пари;
 K – проникність;
 L_v – теплота пароутворення;
 $\mathbf{j}$ – одиничний вектор;
 p – тиск;
 q – тепловий потік;
 T – температура;
 t – час;
 u – x -компонента швидкості;
 μ – динамічна в'язкість пари;
 ρ – густина пари;
 $\Delta\rho$ – різниця густини рідини і пари;

ϕ – пористість;
 $\mathbf{V}$ – вектор швидкості;
 x, y – декартові координати;
 δ – товщина плівки;
 η – безрозмірна перемінна.
Безрозмірні параметри:
 Ja – число Якоба;
 Nu – число Нуссельта;
 Ra – число Релея;
 Re – число Рейнольдса.

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

Вступ

Дослідження процесів теплообміну при течії двофазних теплоносіїв через пористе середовище актуальні для різних інженерних додатків в геотермальних системах, системах захоронення ядерних відходів, системах зберігання і транспорту теплової енергії [1]. Моделювання процесів теплообміну в пористих середовищах при кипінні і конденсації – задача досить складна. Використовуються як математичні моделі двофазної суміші, так і моделі з роздільним описанням фаз.

Результати досліджень кипіння і конденсації в пористому середовищі теплової труби, які отримані

з використанням математичної моделі двофазної суміші, представлені в роботі [2]. Задача розв'язується в наближенні пограничного шару. Представлені розподіли насичення для режимів кипіння і конденсації, дано порівняння з результатами інших авторів. В роботі [3] представлені результати теоретичного та експериментального досліджень процесів тепломасопереносу в капілярно-пористих середовищах теплових труб, що працюють в умовах невагомості. Моделювання процесів в тепловій трубі зводиться до розв'язання спряженої задачі теплообміну з початковими і граничними умовами в зонах джерела і стоку теплоти.

Результати розрахунків порівнюються з отриманими автором експериментальними даними. В результаті встановлені основні закономірності теплообміну в зоні паровідвідних каналів.

В роботах [4–8] розглядаються проблеми впливу локальної теплової нерівноважності (Local Thermal Non-Equilibrium) (LTNE) на процес охолодження в пористих середовищах при зміні фази охолоджуючої рідини. Представлено математичні моделі тепломасопереносу двофазної суміші в пористому тілі, які враховують різницю між температурою теплоносія і температурою пористої матриці. Проведено чисельне моделювання тепломасообміну в пористих середовищах при високих теплових потоках [4]. Розрахунки показали, що в області однофазної течії теплоносія температура пористого тіла практично співпадає з температурою теплоносія. В двофазній області температури істотно відрізняються в області переходу до перегрітої пари. В роботі [5] відмічається, що враховувати термічну нерівноважність при моделюванні течії двофазних потоків в пористому тілі необхідно при високих теплових потоках (вище 1 МВт/м^2) і високих швидкостях. В роботі [6] представлені результати чисельного моделювання процесу тепломасопереносу в пористому середовищі на основі математичної моделі з роздільною течією фаз і врахуванням термічної нерівноважності. Результати розрахунків показали, що різниця температури твердого тіла і рідини не перевищує 1 К у всій області за виключенням границі розділу між двофазним потоком і паром. В роботах [7,8] досліджується двофазний потік в пористому середовищі на основі моделі

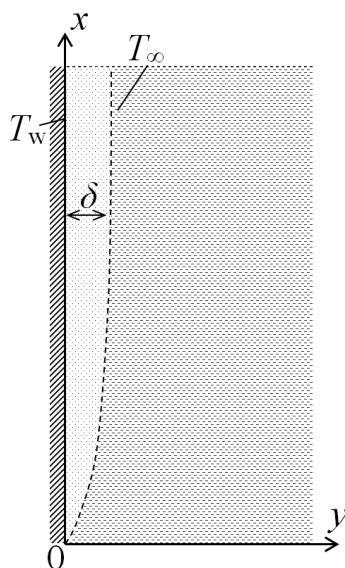


Рис. 1. Схема області плівкового кипіння

двофазної суміші з урахуванням і без врахування локальної термічної нерівноважності. Проаналізовано вплив параметрів процесу на розподіл температури і насичення. Показано, що тепловий потік, число Рейнольдса і теплопровідність твердої фази сильно впливають на початок і завершення процесу фазового переходу, в той же час як вплив пористості незначний.

Теплообмін при плівковому кипінні на поверхні, що нагрівається, при течії нанорідини досліджується в роботах [9–11].

Математична модель

Робота присвячена проблемі теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагріваємій стінці, що межує з пористим середовищем (рис. 1). Щільність теплового потоку на стінку – вище критичного, тому рідина в пористому середовищі випаровується і утворює шар (плівку) пари між рідкою фазою та нагрітою стінкою. Вісь координати x міститься на стінці.

Пара в плівці тече вгору у напрямку більшого значення x . Товщина δ парової плівки невелика порівняно з довжиною стінки [12], що виправдовує моделювання плівки в наближенні прикордонного шару. Температура пари і рідини на зовнішній границі плівки T_∞ , тобто при $y = \delta$, дорівнює температурі насичення при заданому тиску. Температура стінки вища, ніж температура рідини: $T_w > T_\infty$. Використовується одотемпературна модель теплообміну в пористому тілі, згідно якої приймається рівність температур теплоносія і пористої матриці. Задача буде вирішена за таких припущень: пористе середовище є ізотропним; силами інерції в паровій плівці можна знехтувати порівняно із силами в'язкості та силами тяжіння; теплопровідність і конвективний тепломасоперенос в паровій плівці в потоковому напрямку (тобто x -координата) є практично незначними в порівнянні з теплопередачею в напрямку, ортогональному стінки (тобто по координаті y); тертя відсутнє на межі між рідинною та паровою фазами; ефекти поверхневого натягу на зовнішній межі парової плівки незначні.

Стационарний процес течії і теплообміну в плівці біля нагрітої стінки можна описати за допомогою модифікованої моделі Дарсі–Брінкмана–Форхаймера. Згідно роботи [13] математична модель Дарсі–Брінкмана–Форхаймера має наступний вигляд

$$\rho \frac{1}{\phi} \nabla \left(\frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}}{\phi} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{\mu}{K} \mathbf{V} - \frac{c_F \rho}{K} |\mathbf{V}| \mathbf{V} + g \Delta \rho \mathbf{j}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (2)$$

$$(\rho c)_{eff} \mathbf{V} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T), \quad (3) \quad u = 0, \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{k_{eff}}, \quad \text{для } y = 0 \quad (10)$$

де

$$(\rho c)_{eff} = (1 - \phi)(\rho c)_s + \phi(\rho c)_p, \quad \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{для } y = \delta \quad (11)$$

$$k_{eff} = (1 - \phi)k_s + \phi k \quad (4)$$

k_s – теплопровідність пористого середовища. Беручи до уваги припущення, викладені вище, можна спростити систему рівнянь (1) – (3). В наближенні прикордонного шару рівняння руху та енергії запишуться

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} - \mu \frac{u}{K} - \frac{c_F \rho}{\sqrt{K}} u^2 = -g \Delta \rho \quad (5) \quad dG = \frac{q_w}{L_v} dx. \quad (12)$$

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = 0, \quad (6)$$

де c_F – безрозмірна константа спротиву Форхаймера [13]. Режим течії в пористому середовищі можливо класифікувати використовуючи число Рейнольдса, визначеного на основі середньої швидкості і проникності [13] $Re_K = u_{av} \rho \sqrt{K} / \mu$. Відповідно до цієї класифікації, для $Re_K < 1$ потік рідини може бути описаний виключно законом Дарсі, для $Re_K > 1$, необхідно враховувати квадратичну поправку Форхаймера. В роботах [15,16] показано, що для чисел Рейнольдса $Re_K < 1$ квадратичний спротив (третій член) в лівій частині рівняння (5) набагато менше лінійного спротиву (другий член). Таким чином, рівняння (5) можна привести до виду

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} - \mu \frac{u}{K} = -g \Delta \rho, \quad (7) \quad T = T_w - (T_w - T_\infty) \frac{y}{\delta}, \quad (15)$$

що відповідає моделі Дарсі-Брінкмана. При розв'язанні системи рівнянь (6), (7) розглядаються два види граничних умов на стінці:

постійна температура стінки $T_w = \text{const}$

$$u = 0, \quad T = T_w, \quad \text{для } y = 0 \quad (8)$$

$$\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0, \quad T = T_\infty \quad \text{для } y = \delta \quad (9)$$

і постійний тепловий потік на стінки $q_w = \text{const}$

На міжфазній межі пара - рідина задається умова відсутності механічної взаємодії. Задача збільшення масової витрати через парову плівку при кипінні вирішується з використанням наступного рівняння балансу маси [17]

Щоб проаналізувати вплив пористості середовища на теплообмінні процеси спочатку розглянемо розв'язання задачі плівкового кипіння на вертикальній нагріваній поверхні при відсутності пористого середовища [16,17]. Для граничних умов (8) – (11) автор роботи [17] визначив профіль швидкості в плівці пари, отримав рівняння для товщини плівки, розподілу температури і числа Нуссельта в наступному вигляді

$$u = \frac{g \Delta \rho \delta^2}{\mu} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^2}{2\delta^2} \right). \quad (13)$$

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4k_{eff} \mu \Delta T x}{g L_v \rho \Delta \rho}}, \quad (14)$$

$$Nu_0 = \frac{hx}{k_{eff}} = \sqrt[4]{\frac{1}{4} Ra Ja}, \quad (16)$$

де Nu_0 – число Нуссельта при відсутності пористого середовища, числа Релея и Якоба визначаються як

$$Ra = \frac{g x^3 \rho \Delta \rho c_p}{k_{eff} \mu}, \quad Ja = \frac{L_v}{c_p \Delta T}.$$

Граничні умови (10), (11) ($q_w = \text{const}$) також дають профіль швидкості у вигляді (13). Далі з допомогою рівняння (12) можливо отримати

$$\frac{dG}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\int_0^\delta \rho u dy \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{g \rho \Delta \rho \delta^3}{3\mu} \right) = \frac{q_w}{L_v}. \quad (17)$$

Інтегрування цього рівняння при граничній умові

$$\delta = 0 \quad \text{для} \quad x = 0 \quad (18)$$

дає наступну залежність для товщини плівки пари

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3q_w \mu x}{g L_v \rho \Delta \rho}}. \quad (19)$$

Для температурного профілю отримаємо наступну залежність

$$T = T_\infty + \frac{q_w}{k_{eff}} (\delta - y). \quad (20)$$

На основі рівнянь (19) і (20) можна отримати співвідношення для числа Нуссельта

$$Nu_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{3} RaJa}. \quad (21)$$

Отримані результати представлені в табл. 1.

Далі розглянемо плівкове кипіння теплоносія на вертикальній нагрітій стінці при наявності пористого середовища. Загальне рішення однорідного рівняння (7) можна записати у вигляді

$$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} + C_1 \cosh\left(\frac{y}{\sqrt{K}}\right) + C_2 \sinh\left(\frac{y}{\sqrt{K}}\right). \quad (22)$$

При відсутності механічної взаємодії між парою і рідиною, що рухається, на зовнішній межі парової плівки, рівняння (22) з урахуванням граничних умов (8) – (11), дає наступний профіль швидкості

$$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{y-\delta}{\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{\delta}{\sqrt{K}}\right)} \right) = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh(Da^{-1/2}(1-\eta))}{\cosh(Da^{-1/2})} \right), \quad (23)$$

де

Таблиця 1. Характеристики тепловіддачі при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій стінці у відсутності пористого середовища

	$T_w = \text{const}$	$q_w = \text{const}$
Гранична умова на стінці	$T = T_w$ $u = 0$	$\left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{k_{eff}}$ $u = 0$
Гранична умова на межі пара-рідина	$T = T_\infty$ $\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0$	$T = T_\infty$ $\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0$
Профіль температури	$T = T_w - (T_w - T_\infty) \frac{y}{\delta}$	$T = T_\infty + \frac{q_w}{k_{eff}} (\delta - y)$
Профіль швидкості	$u = \frac{g\Delta\rho\delta^2}{\mu} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^2}{2\delta^2} \right)$	
Умова фазового переходу	$d \int_0^\delta \rho u dy = \frac{q_w}{L_v} dx$	
Товщина плівки	$\delta = \sqrt[4]{\frac{4k_{eff}\mu\Delta T x}{g L_v \rho \Delta \rho}}$	$\delta = \sqrt[3]{\frac{3q_w \mu x}{g L_v \rho \Delta \rho}}$
Число Нуссельта	$Nu_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{4} RaJa}$	$Nu_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{3} RaJa}$

$Da = \frac{K}{\delta^2}$ – число Дарсі, $\eta = \frac{y}{\delta}$ – безрозмірна координата. Проникність K визначається через пористість по формулі [18] $K = \frac{d_n^2 \varphi^3}{180(1-\varphi)^2}$.

Профіль швидкості (23) дозволяє отримати співвідношення для масової витрати через парову плівку

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

Далі розглянемо окремо граничні умови на стінці $T_w = \text{const}$ і $q_w = \text{const}$.

Гранична умова $T_w = \text{const}$

Для умови $T_w = \text{const}$ диференціальне рівняння (12) для товщини плівки має вигляд

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{g \rho K \Delta \rho}{\mu} (\delta - \sqrt{K} \tanh(Da^{-1/2})) \right) = k_{eff} \frac{\Delta T}{L_v \delta},$$

де ефективна теплопровідність пористого середовища, що заповнена паром, визначається співвідношенням (4). Рішення цього рівняння при граничній умові (18) дозволяє отримати наступне трансцендентне рівняння для товщини плівки

$$K \ln \left(\cosh \left(\frac{\delta}{\sqrt{K}} \right) \right) + \frac{\delta^2}{2} - \delta \sqrt{K} \tanh \left(\frac{\delta}{\sqrt{K}} \right) = \frac{k_{eff} \Delta T \mu x}{g L_v K \rho \Delta \rho}, \quad (24)$$

або

$$\ln \left(\cosh \left(\frac{1}{\sqrt{Da}} \right) \right) + \frac{1}{2Da} - \frac{1}{\sqrt{Da}} \tanh \left(\frac{1}{\sqrt{Da}} \right) = \frac{k_{eff} \Delta T \mu x}{g L_v K^2 \rho \Delta \rho} = \frac{1}{Da_x^2 Ra Ja}, \quad (25)$$

$$\text{де } Da_x = \frac{K}{x^2}.$$

Лінійний температурний профіль (15) дає наступне рівняння для числа Нуссельта $Nu = \frac{x}{\delta}$. (26)

В результаті комбінації рівнянь (25) і (26) отримаємо

$$2Da_x \ln \left(\cosh \left(\frac{1}{Nu \sqrt{Da_x}} \right) \right) + \frac{1}{Nu^2} - \frac{2\sqrt{Da_x}}{Nu} \tanh \left(\frac{1}{Nu \sqrt{Da_x}} \right) = \frac{2}{Da_x Ra Ja} = \frac{2}{Ra_v Ja}, \quad (27)$$

або

$$2 \ln \left(\cosh(S^{-1}) \right) + \frac{1}{S^2} - \frac{2}{S} \tanh(S^{-1}) = \frac{1}{2Da_x^2 Nu_0^4},$$

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

Таким чином, у нас є трансцендентне рівняння для знаходження числа Нуссельта як функції від локального числа Дарсі і числа Нуссельта Nu_0 , визначеного при відсутності пористого середовища, рівняння (16). Автори роботи [14] використовували безрозмірні числа Релея Ra_v і Якоба для описання теплопередачі в пористому середовищі. С урахуванням цього ми також можемо переписати рівняння (27) у вигляді

$$2M^2 \ln \left(\cosh \left(\frac{1}{MN} \right) \right) + \frac{1}{N^2} - \frac{2M}{N} \tanh \left(\frac{1}{MN} \right) = \frac{2}{Ja}, \quad (28)$$

де

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

Це ще одне трансцендентне рівняння для числа Нуссельта. Нажаль, це рівняння не може бути вирішено аналітично. Однак його можливо вирішити аналітично в окремих крайніх випадках. Спочатку ми проаналізуємо крайній випадок малої проникності пористого середовища: $K \rightarrow 0$ і $Da \rightarrow 0$.

Крайній випадок $Da \rightarrow 0$

Після розкладання лівої частини рівняння (24) або (25) в ряд Макларена можна отримати наступне співвідношення для товщини плівки

$$\delta = \sqrt{\frac{2k_{eff} \Delta T \mu x}{g L_v K \rho \Delta \rho}}. \quad (29)$$

Це дає рівняння для числа Нуссельта у вигляді

$$Nu = \sqrt{\frac{1}{2} Ra_v Ja} . \quad (30)$$

Число Нуссельта в пористих середовищах можна виразити за допомогою числа Нуссельта, що отримане при відсутності пористого середовища. Тоді рівняння (30) можна привести до виду

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt{2Da_0} = \sqrt[4]{2Da} , \quad (31)$$

де $Da_0 = \frac{K}{\delta_0^2}$, і δ_0 – товщина плівки пари в потоці

рідини без пористого середовища.

Як і очікувалось, рівняння (30) і (31) вказують на те, що теплообмін вироджується, якщо проникність пористого середовища наближається до нуля.

Крайній випадок $Da \rightarrow \infty$

Розкладання в ряд лівої частини рівняння (24) або (25) при $Da \rightarrow \infty$ дає

$$\delta^4 - \frac{4\delta^6}{9K} = \frac{4k_{eff}\mu x}{gL_v\rho\Delta\rho} \Delta T = \delta_0^4, \quad (32)$$

де δ_0 – товщина плівки згідно рівнянню (14). Рівняння (32) можна переписати

$$\frac{\delta^4}{\delta_0^4} - \frac{4\delta_0^2}{9K} \frac{\delta^6}{\delta_0^6} = \bar{\delta}^4 - \frac{4}{9} \frac{\bar{\delta}^6}{Da_0} = 1. \quad (33)$$

Заміна

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_0} = \sqrt{z}$$

дозволяє привести рівняння (33) до виду

$$z^2 - \frac{4z^3}{9Da_0} = 1. \quad (34)$$

Це кубічне рівняння (34) має три корені. Фізичне значення має такий корінь

$$\bar{\delta}^2 = \frac{3}{4} \left(Da_0 + \frac{3^{1/3}(-1)^{2/3} Da_0^2}{F} - 3^{-1/3}(-1)^{1/3} F \right), \quad (35)$$

де

$$F = 3Da_0^3 - 8Da_0 + 4\sqrt{4Da_0^2 - 3Da_0^4}.$$

Враховуючи відношення

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{\delta_0}{\delta} = \bar{\delta}^{-1} \quad (36)$$

Можна додатково визначити число Нуссельта за допомогою рівняння (35).

Існує більш простий спосіб отримати співвідношення для числа Нуссельта. Для умови $K \rightarrow \infty$ вірно припущення $Da_0 \approx Da$. В результаті можна отримати

$$\bar{\alpha} = \frac{\delta_0}{\sqrt[4]{1 - \frac{4}{9Da}}} \approx \frac{\delta_0}{\sqrt[4]{1 - \frac{4}{9Da_0}}}. \quad (37)$$

Це приводить до наступного рівняння

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{4}{9Da}} \approx \sqrt[4]{1 - \frac{4}{9Da_0}}. \quad (38)$$

Для $Da > 1,5$ відносна різниця між рівняннями (36) і (38) менш 3%.

Гранична умова $q_w = const$

Для граничної умови $q_w = const$ диференціальне рівняння (12) для товщини плівки має вигляд

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{g\rho K \Delta\rho (\delta - \sqrt{K} \tanh(Da^{-1/2}))}{\mu} \right) = \frac{q_w}{L_v}. \quad (39)$$

Розв'язання рівняння (39) за граничної умови (18) приводить до наступного трансцендентного рівняння товщини плівки

$$\delta - \sqrt{K} \tanh\left(\frac{\delta}{\sqrt{K}}\right) = \frac{q_w \mu x}{gL_v K \rho \Delta\rho}. \quad (40)$$

Використовуючи (20), можна отримати з рівняння (40) наступне

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

Далі це призводить до рівняння

$$\frac{1}{S^2} - \frac{2}{S} \tanh(S^{-1}) = \frac{2}{3\text{Da}_x^2 \text{Nu}_0^4}$$

і в результаті отримуємо

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

Крайній випадок $\text{Da} \rightarrow 0$

У цьому випадку товщину плівки можна виразити як

$$\delta = \frac{q_w \mu x}{g K L_v \rho \Delta \rho},$$

а число Нуссельта має вигляд

$$\text{Nu} = \sqrt{\text{Ra}_v \text{Ja}} \quad (41)$$

або

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} = 3\text{Da}_0 = \sqrt[3]{3\text{Da}}.$$

На рис. 2 представлено порівняння залежності числа Нуссельта від числа Якоба, розрахованої за формулою (41), з даними роботи [14]. Отримані результати якісно узгоджуються з результатами роботи [14].

Крайній випадок $\text{Da} \rightarrow \infty$

Для цього випадку рівняння для товщини плівки має вигляд

$$\delta^3 - \frac{2\delta^5}{5K} = \frac{3q_w \mu x}{g L_v \rho \Delta \rho} = \delta_0^3.$$

Це рівняння трансцендентне, його розв'язання можна отримати допустивши, що $\text{Da}_0 \approx \text{Da}$

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[3]{1 - \frac{2}{5\text{Da}}}}.$$

Отримаємо наступне рішення для числа Нуссельта

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{2}{5\text{Da}}} \approx \sqrt[3]{1 - \frac{2}{5\text{Da}_0}}.$$

Рішення, що отримані в рамках моделі Дарсі-Брінкмана, представлені в табл. 2.

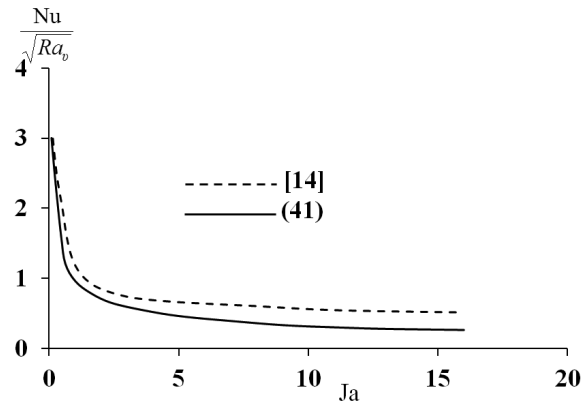


Рис. 2. Залежність числа Нуссельта від числа Якоба

Висновки

Робота присвячена дослідженню теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагріваній стінці в пористому середовищі, при зміні параметрів пористого середовища і умов нагріву стінки.

Отримано аналітичне рішення задачі з використанням моделі пористого середовища в наближенні Дарсі-Брінкмана. Порівняння коефіцієнтів тепловіддачі при плівковому кипінні рідини в пористому середовищі і при відсутності пористого середовища показало, що суттєва різниця спостерігається при малих числах Дарсі $\text{Da} < 2$.

Показано, що різке зменшення тепловіддачі при плівковому кипінні в пористому середовищі спостерігається при $\text{Da} < 5$. Отримані результати для чисел Нуссельта демонструють якісне узгодження з результатами роботи [14].

Робота виконана за фінансової підтримки програми наукових досліджень НАН України «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок», 2020 – 2021 р. Проект «Розроблення науково-технічних засад інтенсифікації тепломасообміну в пористих середовищах для матеріалів будівельних конструкцій та теплоенергетичного обладнання»

Таблиця 2.

		$T_w = \text{const}$	$q_w = \text{const}$
Гранична умова на стінці		$T = T_w$ $u = 0$	$\left(\frac{dT}{dy}\right)_{y=0} = -\frac{q_w}{k_{eff}} \quad u = 0$
Гранична умова на межі пара-рідина		$T = T_\infty$ $\left(\frac{du}{dy}\right)_{y=\delta} = 0$	$T = T_\infty$ $\left(\frac{du}{dy}\right)_{y=\delta} = 0$
Профіль швидкості		$u = \frac{gK\Delta\rho}{\mu} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{y-\delta}{\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{\delta}{\sqrt{K}}\right)} \right)$	
Рівняння для товщини плівки		$K \ln\left(\cosh\left(\frac{\delta}{\sqrt{K}}\right)\right) + \frac{\delta^2}{2} - \delta\sqrt{K} \tanh\left(\frac{\delta}{\sqrt{K}}\right) = \frac{k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_v K \rho \Delta\rho}$	
Товщина плівки пари	<u>$Da \rightarrow 0$</u>	$\delta = \sqrt{\frac{2k_{eff}\Delta T\mu x}{gL_v K \rho \Delta\rho}}$	$\delta = \frac{q_w \mu x}{gKL_v \rho \Delta\rho}$
	<u>$Da \rightarrow \infty$</u>	$\bar{\delta}^2 = \frac{3}{4} \left(Da_0 + \frac{3^{1/3}(-1)^{2/3} Da_0^2}{F} - 3^{-1/3}(-1)^{1/3} F \right)$ $F = 3Da_0^3 - 8Da_0 + 4\sqrt{4Da_0^2 - 3Da_0^4}$ $\delta = \frac{\bar{\delta}}{\sqrt[4]{1 - \frac{4}{9Da}}}$	$\delta = \frac{\delta_0}{\sqrt[3]{1 - \frac{2}{5Da}}}$
Рівняння для числа Нуссельта		$2M^2 \ln\left(\cosh\left(\frac{1}{MN}\right)\right) + \frac{1}{N^2} - \frac{2M}{N} \tanh\left(\frac{1}{MN}\right) = \frac{2}{Ja}$ $M = Da_x \sqrt{Ra_v}$ $N = \frac{Nu}{\sqrt{Ra_v}}$	
Число Нуссельта	<u>$Da \rightarrow 0$</u>	$Nu = \sqrt{\frac{1}{2} Ra_v Ja}$ $\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt{2Da_0} = \sqrt[4]{2Da}$	$Nu = \sqrt{Ra_v Ja_v}$ $\frac{Nu}{Nu_0} = 3Da_0 = \sqrt[3]{3Da}$
	<u>$Da \rightarrow \infty$</u>	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[4]{1 - \frac{4}{10Da}}$	$\frac{Nu}{Nu_0} = \sqrt[3]{1 - \frac{2}{5Da}}$

ЛІТЕРАТУРА

1. *Singh H., Myong R.S.* Critical Review of Fluid Flow Physics at Micro- to Nano-scale Porous Media Application in the Energy Sector. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 1. P.1–31
2. *Hari R., Jolly T., Muraleedharan C.* Analysis of Two-Phase Flow in the Capillary Wick Structure of Flat Heat Pipe with Different Orientation. *International Journal of Thermal Technologies*. 2015. Vol.5. No.1. P.63–69
3. *Kuceev B.M.* Теплоперенос и фазовые превращения в мелкопористых капиллярных структурах. Автореферат дис. Доктора физ.-мат. наук. Екатеринбург. 2001. 42 с.
4. *Shi J.X., Wang J.H.* A numerical investigation of transpiration cooling with liquid coolant phase change. *Transport Porous Med.* 2011. Vol. 87(3). P. 703–716.
5. *Yuki K., Abei J., Hashizume H., Toda S.* Numerical investigation of thermofluid flow characteristics with phase change against high heat flux in porous media. *J Heat Trans. T ASME*. 2008. Vol.130(1). P.012602 (1–12)
6. *Xin C., Rao Z., You X., Song Z., Han D.* Numerical investigation of vapor–liquid heat and mass transfer in porous media. *Energy Conversion and Management*. 2014. 78. P.1–7
7. *Alomar O.R., Trimis D., Mendes M., Ray S.* Numerical simulation of complete liquid-vapor phase change process inside porous media: A comparison between local thermal equilibrium and non-equilibrium models. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2017. Vol. 112. P. 222 – 241.
8. *Alomar O.R., Mendes M.A.A., Ray S., Trimis D.* Numerical investigation of complete evaporation process inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 129. P.56 – 72.
9. *Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Tyrinov, A.I., Blinov, D.G.* Heat transfer at film condensation of moving vapor with nanoparticles over a flat surface. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 82. P. 316–324.
10. *Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Moskalenko, A.A., Lohvynenko, P.N., Kovetska, Yu.Yu.* Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 139. P. 87–98.
11. *Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P.* Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity. *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28 (3). P.034104
12. *Kim, H., Buongiorno, J., Hu, L-W., McKrell, T.* Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, P.1542–1553.
13. *Nield, D.A., Bejan, A.* Convection in Porous Media. 3th Edition. New York: Springer. 2006.
14. *Cheng, P., Verma, A.K.* The effect of subcooled liquid of film boiling about a vertical heated surface in a porous medium. 1981. Vol. 24. P. 1151–1160.
15. *Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Tyrinov, A.I., Blinov, D.G.* Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *Int. J. Thermal Sciences*. 2015. Vol. 92. P. 106–118.
16. *Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P., Kravchuk A.V.* Mixed convection in a vertical flat microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 106. P. 1164–1173
17. *Bromley, L.A.* Heat transfer in stable film boiling. *Chem. Eng. Prog.* 1950. Vol. 46. P. 211–227.
18. *Nield D.A., Bejan A.* Convection in Porous Media. - 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640 p.

HEAT TRANSFER FOR FILM BOILING OF A LIQUID ON A VERTICAL HEATED WALL IN A POROUS MEDIUM

Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A., Sorokina T.V.

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.3>

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

An analytical solution was obtained for the problem of fluid flow and heat transfer using the porous medium model in the Darcy-Brinkman. It was shown that heat transfer at film boiling in a porous medium was less intensive than in the absence of a porous medium (free fluid flow) and further decreased with the decreasing permeability of the porous medium. A sharp decrease in heat transfer was observed for the Darcy numbers lower than five. The analytical predictions of heat transfer coefficients qualitatively agreed with the data [14] though demonstrated lower values of heat transfer coefficients for the conditions of the constant wall temperature and constant wall heat flux.

References 18, figures 2, tables 2.

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

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

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

3. Kiseev V.M. Heat and mass transfer and phase transformations in fine-porous capillary structure [Teplo- i massopereenos i fazovy'e prevrashheniya v melkoporisty'kh kapillyarny'kh strukturakh]. Avtoreferat dis. Doktora fiz.-mat. nauk. Ekaterinburg. 2001. P.42 (in Rus.)

4. Shi J.X., Wang J.H. A numerical investigation of transpiration cooling with liquid coolant phase change. *Transport Porous Med.* 2011. Vol. 87(3). P. 703–716.

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

6. Xin C., Rao Z., You X., Song Z., Han D. Numerical investigation of vapor–liquid heat and mass transfer in porous media. *Energy Conversion and Management*. 2014. 78. P.1–7

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

8. Alomar O.R., Mendes M.A.A., Ray S., Trimis D. Numerical investigation of complete evaporation process inside porous evaporator using staggered and non-staggered grid arrangements. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 129. P.56 – 72.

9. Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Tyrinov, A.I., Blinov, D.G. Heat transfer at film condensation of moving vapor with nanoparticles over a flat surface. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 82, P. 316–324.

10. Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Moskalenko, A.A., Lohvynenko, P.N., Kovetska, Yu.Yu. Instability of a vapor layer on a vertical surface at presence of nanoparticles. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 139. P. 87–98.

11. Avramenko, A.A., Tyrinov, A.I., Shevchuk, I.V., Dmitrenko N.P. Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity. *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28 (3). P.034104

12. Kim, H., Buongiorno, J., Hu, L-W., McKrell, T. Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53, P.1542–1553.

13. Nield, D.A., Bejan, A. *Convection in Porous Media*. 3th Edition. New York: Springer. 2006.

14. Cheng, P., Verma, A.K. The effect of subcooled liquid of film boiling about a vertical heated surface in a porous medium. 1981. Vol. 24. P. 1151–1160.

15. Avramenko, A.A., Shevchuk, I.V., Tyrinov, A.I., Blinov, D.G. Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *Int. J. Thermal Sciences*. 2015. Vol. 92. P. 106–118.

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

17. Bromley, L.A. Heat transfer in stable film boiling. *Chem. Eng. Prog.* 1950. Vol. 46. P. 211–227.

18. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. – 4th Edition, New York: Springer. 2013. 640P.

Отримано 27.01.2021

Received 27.01.2021

УДК: 532.529

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ДЕФОРМУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ КРАПЕЛЬ В ЗСУВНИХ ТЕЧІЯХ

Іваницький Г.К., докт. техн. наук, Целень Б.Я., канд. техн. наук, Радченко Н.Л., канд. техн. наук,
Гоженко Л.П., канд. техн. наук.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.4>

Представлено математичну модель, що описує деформацію краплі рідини, яка перебуває у зсувному потоці іншої рідини. Приймається, що деформована крапля має форму витягнутого еліпсоїда обертання. Отримано простий критерій руйнування крапель в зсувних потоках. Модель дозволяє прогнозувати поведінку деформованих крапель в зсувних потоках в широкому діапазоні режимів течії і теплофізичних параметрів обох рідких фаз.

Представлена математическая модель, описывающая деформацию капли, находящуюся в сдвиговом потоке другой несмешивающейся с ней жидкости. Принимается, что деформированная капля имеет форму удлинённого эллипсоида вращения. Получен простой критерий разрушения капель в сдвиговых потоках. Модель позволяет прогнозировать поведение деформированных капель в сдвиговых потоках в широком диапазоне режимов течения и физических параметров обеих жидких фаз.

A mathematical model is presented that describes the deformation of a spherical fluid drop located in a shear flow of another liquid immiscible with it. The deformed drop is assumed to have the shape of an elongated ellipsoid of revolution. A simple criterion for the destruction of drops in shear flows is obtained. It is shown that the model makes it possible to predict the behavior of deformed drops in shear flows in a wide range of flow regimes and physical parameters of both liquid phases.

Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: зсувні потоки, деформація крапель, руйнування дисперсій, моделювання.

a – головна піввісь еліпса;
 b – мала піввісь еліпса;
 Ca – капілярне число;
 D – ступінь деформації;
 F – сила;
 G – зсувна швидкість;
 P – тиск;
 R – радіус;
 S – площа поверхні;
 w – відносна швидкість;
 x, y, z – декартові координати;

α – кут орієнтації краплі;
 λ – відношення в'язкостей фаз;
 μ – динамічна в'язкість;
 ρ – густина;
 σ – поверхневий натяг.

Індекси нижні:

c – суцільна фаза;
 d – дисперсна фаза;
 s – центр мас.

Вступ.

Проблема деформування і руйнування крапель в зсувних потоках становить науковий і практичний інтерес і привертає пильну увагу протягом останніх десятиліть. Крім численних практичних потреб, вивчення деформації крапель залишається класичним прикладом задачі про вільні границі в механіці рідини. З теоретичної точки зору задача деформування крапель надзвичайно складна. Рівняння руху потрібно вирішувати для течії як всередині, так і в околиці краплі з граничними умовами на поверхнях, форма яких заздалегідь не відома і визначається в процесі вирішення. Докладний огляд і аналіз публікацій по деформуванню та руйнуванню крапель в зсувних течіях, починаючи з

основоположних досліджень Дж. Тейлора [1], міститься в роботах [2,3]. Нові цікаві результати по даній проблемі [4-6], присвячені питанням моделювання та оптимізації процесів емульгування стосовно виробництва монодисперсних емульсій.

Фізична задача деформування крапель визначається трьома безрозмірними числами: числом Рейнольдса для краплі $Re=(\rho_c GR^2)/\mu_c$, капілярним числом $Ca=\mu_c GR/\sigma$ і відношенням в'язкостей $\lambda=\mu_d/\mu_c$. Тут R – радіус недеформованої сферичної краплі; $G=dv_x/dy$ – зсувна швидкість; ρ_c – густина безперервної фази; μ_d і μ_c – динамічні в'язкості суцільної та дисперсної фази; σ – поверхневий натяг. Критерій руйнування крапель зазвичай асоціюється з критичним капілярним числом

Ca_{cr} [1-9]. При докритичних значеннях капілярного числа ($Ca < Ca_{cr}$) крапля стабілізується у формі витягнутого еліпсоїда. При надкритичних значеннях ($Ca > Ca_{cr}$) крапля необоротно розтягується і швидко руйнується, утворюючи дочірні крапельки і малі фрагменти. Встановлено, що Ca_{cr} є складною функцією відношення в'язкостей $\lambda = \mu_d / \mu_c$. Основна мета відомих експериментальних і теоретичних досліджень полягала, переважно, у визначенні критерію руйнування краплі в умовах повзучої зсувної течії і розподілу за розмірами фрагментів краплі, утворених в результаті її дроблення при надкритичних режимах [1-3,7,10]. Чисельні дослідження з даної проблеми базуються, в основному, на використанні методу граничних інтегралів, який дозволяє перетворити течії всередині і в оточенні краплі в форму, яка включає тільки елементи самої поверхні (2-6). Моделювання руйнування проводилося також з використанням методів вирішення решіткових рівнянь Больцмана [7]. Незважаючи на великі досягнення в області чисельних досліджень процесів деформації і дроблення крапель в зсувних течіях, до цього часу без відповіді залишаються багато важливих якісних питань. Зокрема, досі не визначено механізми руйнування краплі і як вони залежать від параметрів системи, включаючи ступінь деформації краплі.

Мета роботи і постановка завдань дослідження.

Мета роботи полягає в детальному вивченні кінетики деформування крапель рідини в зсувному потоці іншої рідини і визначення ролі основних діючих чинників, які впливають на перебіг процесу. Особливу увагу приділено аналізу критичних умов початку необоротної деформації крапель, що приводить до їх руйнування. Дослідження проведено на основі створеної загальної математичної моделі, яка описує деформацію рідинних та газових дисперсій в нестационарних рідинних або газових течіях.

Принципи побудови математичної моделі.

Дана модель будується на основних положеннях розробленої в ІТТФ НАНУ математичної моделі деформації рідких дисперсій в нестационарних прискорених рідких та газових потоках [9]. Базовим положенням тієї моделі є припущення, що на всіх стадіях деформації крапля приймає форму еліпсоїда обертання. В моделі [9] деформація краплі розглядається як переміщення центрів мас півкраплин, розділених площиною, що проходить через геометричний центр краплі і ортогональна до напрямку швидкості потоку x . Коли центри мас

півкраплин переміщуються уздовж координати x в напрямку центру краплі, сферична крапля деформується в сплюснений еліпсоїд, а коли вони переміщуються в протилежному напрямі, - крапля приймає форму видовженого еліпсоїда. Ці положення використовуються при розробці моделі поведінки крапель в зсувних потоках.

Розглянемо одновірну плоску зсувну течію рідини з густиною ρ_c і в'язкістю μ_c . Швидкість потоку v_x спрямована вздовж координати x , а зсувна швидкість $G = dv_x/dy$ - вздовж координати y , причому для плоскої течії $G = \text{const}$. В потоці рідини знаходиться крапля іншої нерозчинної в ній рідини, котра переміщується з потоком в напрямі x зі швидкістю потоку $v_x(y_0)$, де y_0 - координата центру краплі. Розміщуючи початок декартових координат в центрі краплі ($x_0=0, y_0=0$), будемо розглядати тільки рух потоку відносно краплі, вважаючи її нерухомою. Для плоскої зсувної течії поле швидкостей потоку відносно краплі $w_x(y-y_0) = v_x(y_0)$ симетричне. При обтіканні краплі потоком на її поверхню з боку оточуючої рідини діє гідродинамічна сила F_ζ . Очевидно, що розподіл тиску з боку рідини по поверхні краплі має бути симетричним відносно центру краплі (x_0, y_0). Сили F_ζ що діють на кожну півкраплину вздовж координати x , рівні за величиною, але протилежні за напрямком.

Змінінню форми краплі під дією сил F_ζ протидіють капілярна сила F_σ , яка прагне повернути краплю до сферичної форми, а також сила в'язкості рідини краплі F_μ , пропорційна швидкості деформації. На рис. 1 показано основні параметри даної моделі. Деформована крапля розглядається як еліпсоїд обертання з головною піввіссю a і малими півосями $b = \sqrt{R^3/a}$. Як і в

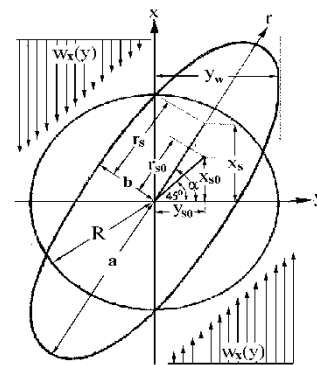


Рис. 1. Схематичне зображення переміщення центру мас півкраплини $r_s(t)$ і зміни кута орієнтації $\alpha(t)$ в процесі деформації сферичної краплі в зсувних течіях.

базовій моделі [11], ступінь деформації визначається параметром a/R , який часто застосовується іншими дослідниками при аналізі деформування крапель в зсувних потоках. Деякі автори [2-4,10] застосовують традиційне визначення ступня деформації $D=(a-b)/a+b$, запропоноване ще Дж. Тейлором [1]. Ступені деформації a/R та D пов'язані між собою співвідношенням $D=(a^3/R^3-1)/(a^3/R^3+1)$.

При розтягуванні краплі потоком в напрямку x координата у центру півкраплини не змінюється ($y_s=y_{s0}=\text{const}$). Як видно з рис. 1, відстань між центром мас півкраплин і геометричним центром самої краплі визначається як

$$r_s(\tau) = \sqrt{x_s^2 + y_{s0}^2}. \quad (1)$$

Не важко розрахувати, що параметр $r_s(\tau)$, котрий задає поточне положення центра мас півкраплин, пов'язаний із довжиною a співвідношенням $r_s=3a/8$. Для недеформованих краплин ($a=R$) положення центру мас півсфери визначається у вигляді $r_{s0}=3R/8$. Як випливає з рівняння (1) і показано на рис. 1, напрямок $\vec{r}$ не збігається з напрямком потоку x . Орієнтацію краплі прийнято визначати кутом α між напрямком вектора $\vec{r}$ і позитивним напрямом осі y [1-3, 10]. Кут α - є одним з важливих параметрів моделі, оскільки ефективність впливу зсувного потоку на деформування краплі залежить від орієнтації краплі в потоці. Згідно експериментальним даним нескінченно мала деформація сферичної краплі в зсувних течіях відбувається під кутом 45° відносно координати x . Тому початкові координати центру мас півкраплин $x_{s0} = r_{s0} \sin 45^\circ = 3\sqrt{2}R/16$ і $y_{s0} = r_{s0} \cos 45^\circ = 3\sqrt{2}R/16$. По мірі видовження краплі її головна вісь повертається в напрямку потоку. Відповідно до рис. 1, кут $\alpha(\tau)$, пов'язаний із ступенем деформації a/R і з параметром $r_s(\tau)$ співвідношеннями

$$\alpha = \arctg(x_s/y_{s0}) = \arccos(R\sqrt{2}/a) = (3R/8r_s). \quad (2)$$

Як зазначено вище, деформування крапель в зсувних потоках відбувається внаслідок спільної дії трьох сил - гідродинамічної сили F_ζ , капілярної сили F_σ і сили в'язкості крапельної рідини F_μ .

Дія гідродинамічних сил

Сила F_ζ , що розтягує краплю в напрямку x , пропорційна лобовому опору півкраплини потоку і визначається як $F_\zeta = \bar{\zeta} \cdot \bar{p}_x S_{yz}$, де $\bar{\zeta}$ - усереднений коефіцієнт гідродинамічного опору; $\bar{p}_x$ - усередне-

ний по поверхні гідродинамічний тиск; S_{yz} - площа проекції півкраплини на площину YZ , що проходить через центр краплі. Ця проекція є півеліпсом з малою віссю b і великою віссю y_w , який описується рівнянням $z = b \cdot z = \sqrt{1 - y^2/y_w^2}$. Параметр y_w - це відстань від осі x до площини XZ , яка дотикається до поверхні даного еліпсоїда (рис. 1). В кожній точці поверхні краплі величина локального тиску $p_x(y) = p_c w_x^2(y)/2 = \rho_c (G \cdot y)^2/2$. Тоді гідродинамічна сила F_ζ визначається наступним чином

$$F_\zeta = \int \bar{\zeta} p_x(S_{yz}) dS_{yz} = \frac{\rho_c G^2}{2} \int_0^{y_w} y^2 z(y) dy = \frac{\rho_c \pi b (y_w)^3 G^2}{8}, \quad (3)$$

де $y_w = a \cdot [(R/a)^3 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha]$, а коефіцієнт гідродинамічного опору ζ розраховується з рівняння

$$\zeta = \left(\frac{16}{\text{Re}} + \frac{2,2}{\text{Re}^{0,5}} + 0,6 \right) \left(\frac{1,5\mu_d + \mu_c}{\mu_d + \mu_c} \right) \quad (4)$$

Число Рейнольдса для зсувного потоку визначається з формули $\text{Re} = \rho_c G R^2 / \mu_c$.

Дія сил в'язкості рідини краплі.

Вплив в'язкості крапельної рідини μ_d на деформацію краплі під дією зовнішніх сил детально розглянуто в [9] з використанням тензорного рівняння дисипації енергії одиничного об'єму нестисливої рідини. Там же наведено рівняння, яке описує швидкість в'язкої дисипації енергії $dE_\mu/d\tau$ в залежності від в'язкості μ_d , радіуса краплі R і градієнта швидкості ∇v . Стосовно даної задачі сила в'язкості F_μ , розраховується з рівняння

$$F_\mu = \frac{dE_\mu}{d\tau} = \frac{dE_\mu}{dr_s} \frac{dr_s}{d\tau} = \frac{4\pi R^3 \mu_{ef}}{r_s^2} \cdot \frac{dr_s}{d\tau} \quad (5)$$

Тут $\mu_{ef} = \mu_d + 0,6\mu_c$ - ефективна в'язкість, яка враховує внесок приєднаної маси суцільної рідини, що прилягає до поверхні краплі в загальну дію в'язких сил [9].

Дія капілярних сил.

Враховуючи, що всі три діючі на краплю сили спрямовані вздовж осі x і прикладені до центрів мас півкраплин, капілярна сила F_σ розглядається як відношення приросту енергії поверхні краплі при її деформуванні $dE_s = \sigma dS$ до зміщення центру мас півкраплини dr_s . Виконаний в роботі [11] теоретичний аналіз, показав, що при деформації сферичної краплі у форму видовженого еліпсоїда капілярна сила визначається з рівняння

$$F_{\sigma} = \sigma \frac{dS}{dr_s} = \frac{16\pi R^3 \sigma}{3a^2} \left[\frac{0,5(R/a)^{3/2}(1 - 4(R/a)^3) \arcsin e}{e^3} \right] + \frac{1,5}{e^2} - 1 \quad (6)$$

де $e = \sqrt{1 - b^2/a^2} = \sqrt{1 - R^3/a^3}$ – ексцентриситет еліпса з півосями a і b .

Критерій руйнування краплі.

При вивченні поведінки краплі в зсувних течіях найбільш важким і найменш розробленим питанням є обґрунтування умов переходу від докритичного режиму деформації, коли крапля стабілізується в кінцевій формі розтягнутого еліпсоїда, до надкритичних режиму, коли відбувається необоротне видовження краплі, що веде до її руйнування. Як зазначено вище, цей перехід зазвичай асоціюється з критичним капілярним числом Ca , яке є складною аналітично не визначеною функцією відношення в'язкостей λ і числа Рейнольдса. В рамках даної моделі отримано простий критерій руйнування крапель в зсувних течіях. На рис. 2 представлено залежності капілярної сили F_{σ} від ступеня деформації краплі a/R , розраховані за рівнянням (6) для трьох систем: 1 – краплі диметикону в касторовій олії; 2 – краплі толуолу у воді; 3 – краплі води у моторному маслі при різних режимах. Ці дані розкривають важливу, невідому раніше особливість впливу капілярних сил на деформування краплі, коли $a/R > 1$. На рис. 2 видно, що при різних фізичних властивостях суцільної і дисперсної рідини залежність $F_{\sigma} = f(a/R)$ має максимум при строго визначеному значенні $(a/R)_{cr} = 2,2$, яке не залежить ні від теплофізичних і реологічних характеристик обох фаз, ні від розміру крапель і швидкості зсуву течії, і може роз-

глядатися як фізична константа. Це значення критичної константи відповідає також і руйнуванню газових бульбашок в зсувних потоках різних рідин. Перевищення цього критичного значення призводить до незворотної деформації подальшого руйнування надмірно подовженою краплі, навіть після припинення динамічного дії з боку потоку.

Отриманий результат переконливо пояснює механізм так званого «вибуху», який позначає умови зсувної течії, що відповідають початку безперервного необоротного видовження краплі. Цей ефект вперше спостерігався в експериментах Дж. Тейлора [1], а після реєструвався іншими дослідниками [2-5, 10]. Показано, що краплина в потоці може як завгодно довго перебувати в потоці в стабільному стані видовженого еліпсоїда, але достатньо лише трохи збільшити швидкість зсуву F_{σ} і крапля починає швидко («вибухово») розтягуватися до кінцевого руйнування.

В якості ілюстрації на рис. 3 приведені фотографії крапель диметикону в процесі їх послідовного розширення в зсувному потоці (течії Куєтта) касторової олії в докритичному ($Ca=0,98Ca_{cr}$) (а) та в надкритичному ($Ca=1,01Ca_{cr}$) режимі течії (б) за даними роботи [6]. Аналіз фотографій на рис. 3 доводить, що форма стабілізованою краплі відповідає умові $a/R \approx 2,2$.

Аналіз фотографій і графічних даних по деформації крапель в зсувних течіях, наведених в роботах різних авторів, також вказує на те, що форма крапель стабілізованих в докритичному режимі при числах Ca близьких до Ca_{cr} відповідає значенням $a/R=2,0-2,3$ [2-4,6,8]. Слід зазначити, що критерій руйнування крапель в зсувних течіях $(a/R)_{cr}=2,2$ одержано в рамках моделі

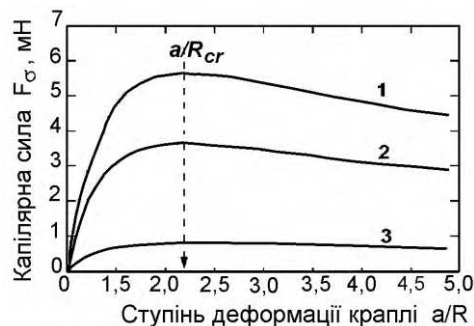


Рис. 2. Характер зміни величини капілярної сили F_{σ} в процесі деформації крапель в зсувних потоках за умови перевищення критичного значення $(a/R)_{cr}$ при різних режимах:

- 1 - $\rho_d=965$ кг/м³; $\rho_c=980$ кг/м³; $\mu_d=0,05$ Па·с; $\mu_c=0,62$ Па·с; $\sigma=9,1$ мН/м; $R=0,3$ мм; $G=0,2$ с-1.
- 2 - $\rho_d=800$ кг/м³; $\rho_c=1000$ кг/м³; $\mu_d=0,6$ мПа·с; $\mu_c=1,0$ мПа·с; $\sigma=35$ мН/м; $R=0,3$ мм; $G=439$ с-1.
- 3 - $\rho_d=1000$ кг/м³; $\rho_c=1000$ кг/м³; $\mu_d=1,0$ мПа·с; $\mu_c=200$ Па·с; $\sigma=29$ мН/м; $R=1$ мм; $G=77$ с-1.

в припущенні, що крапля на будь-якій стадії деформації має форму еліпсоїда обертання. Зрозуміло, що в реальних течіях, особливо при високих ступенях деформації краплі, правомірність цього припущення порушується.

Аналіз результатів.

Нижче обговорюються результати чисельних розрахунків, виконаних в рамках цієї моделі для різних режимів обтікання краплі. Проведено порівняння з відомими експериментальними даними інших авторів по деформації крапель в зсувних течіях. Для перевірки ступеня достовірності поданої вище моделі був виконаний обчислювальний експеримент, який відтворює умови натурного експерименту, проведеного авторами роботи [8]. У цих експериментах досліджувалася деформація крапель різних в'язких органічних рідин ($R=0,15 = 0,8$ мм) в повзучих зсувних течіях касторової олії ($Re < 0,001$, $G=0,1 - 5$ с⁻¹).

На рис. 4 представлено розрахункові залежності $a/R=f(\tau)$ і $\alpha=f(\tau)$ для умов деформування краплі димети-

кону в зсувному потоці касторової олії. При невисоких швидкостях зсуву G краплина швидко стабілізується у формі видовженого еліпсоїда при значеннях (a/R) від 0,5 до 2 і кутах орієнтації α від 60° до 80°. Але при малих збільшеннях G (від 0,55 до 0,56 с⁻¹) виконується умова $a/R > (a/R)_{cr}$ і відбувається різке необоротне видовження ("вибух") краплі, а напрямок її орієнтації наближається по асимптоті до напрямку потоку ($\alpha=90^\circ$). Характерно, що при $a/R < (a/R)_{cr}$ збільшення ступеня деформації a/R подовжує час стабілізації, а при $a/R > (a/R)_{cr}$ швидкість деформування різко зростає.

В роботі [8] в ході кожного дослідів на кіноплівці фіксувалося зміна форми краплі, визначався ступінь її деформації у вигляді параметра D і кута орієнтації α витягнутої краплі в залежності від капілярного числа Ca в діапазоні $Ca < 0,4$. На рис. 5 наведено порівняння розрахованої нами в рамках моделі теоретичної залежності $D=f(Ca)$ з експериментальними даними [8] для одного з режимів. Видно, що експериментальні

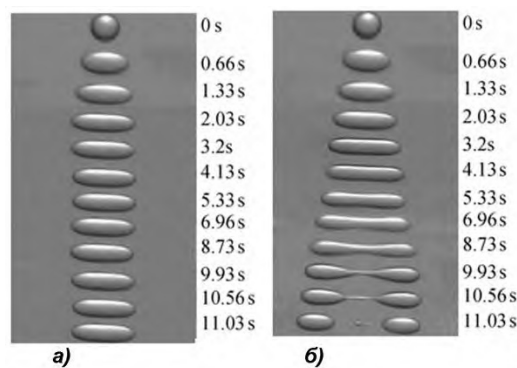


Рис. 3. Фотографії послідовних стадій деформації краплі диметикону в зсувній течії касторової олії при докритичному (а) та надкритичному (б) значенні капілярного числа Ca . По даним роботи [6].

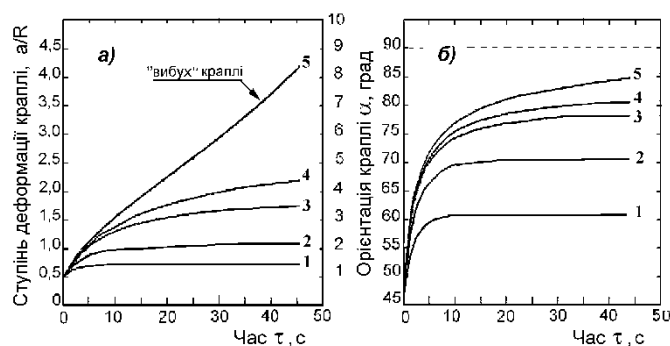


Рис. 4. Зміна ступеня деформації a/R (а) і кута орієнтації α (б) при деформуванні крапель диметикону в зсувному потоці касторової а при різних значеннях швидкості зсуву G : 1 – 0,305 с⁻¹; 2 – 0,460 с⁻¹; 3 – 0,530 с⁻¹; 4 – 0,550 с⁻¹; 5 – 0,570 с⁻¹. Теплофізичні параметри системи: $\rho_d=965$ кг/м³; $\rho_c=0,98$ 103 кг/м³; $\eta=0,05$ Па.с; $\mu_c=0,62$ Па.с; $\sigma=4,1$ мН/м;

точки доволі добре співпадають з розрахунковими кривими. Модель з хорошою точністю прогнозує змінення ступеня деформації D і кута орієнтації краплі α зі збільшенням капілярного числа Ca в зазначеному діапазоні. Цей діапазон ($Ca < 0,4$) відноситься до докритичного режиму течії ($Ca < Ca_{cr}$) і тому значення параметра D , представлені на рис 5, знаходяться нижче визначеного нами критичного значення $(aR)_{cr} = 2,2$, яке за розрахунками відповідає критичному значенню $D_{cr} = 0,53$.

В роботі [8] відсутня інформація щодо часу стабілізації форми деформованої краплі або настання моменту "вибуху краплі". Раніше було встановлено, що при проведенні таких досліджень в якості базової тимчасової шкали слід використовувати величину G^{-1} . Для досліджуваного в [8] інтервалу швидкостей зсуву ($0,1 \div 5 \text{ c}^{-1}$) це якраз і відповідає секундному масштабу часу.

Для оцінки здатності моделі описувати зсувну деформацію в більш широких інтервалах необхідно провести спеціальні чисельні дослідження з порівняння поведінки крапель в повзучому і в інерційному режимах зсувних течій. а також в перевірці справедливості припущення про можливість використання параметра в якості базової тимчасової шкали не тільки для стокивського обтікання краплі, але і для інерційних режимів. Слід зауважити, що до теперішнього часу відсутні публікації, що стосуються моделювання кінетики процесу деформації крапель в інерційних зсувних потоках.

Висновки.

Представлена модель може бути використана при аналізі процесів руйнування крапель емульсії і подрібненні газових дисперсій в зсувних потоках з ви-

соким швидкостями зсуву. Як відомо, високі значення зсувних напружень спостерігаються безпосередньо поблизу стінки каналу або трубопроводу при великих швидкостях потоку, поблизу обертових лопатей пропелерних мішалок а також при течії рідини у вузьких зазорах, зокрема в зазорі між ротором і статором в апаратах роторного типу. Результати аналізу підтверджують достовірність моделі і справедливості фізичних положень, використаних при її розробці. Модель здатна передбачати характер деформування крапель і умови їх руйнування в зсувних течіях при відомих режимних параметрах з більшим ступенем точності, ніж існуючі емпіричні співвідношення. Результати даного дослідження можуть знайти застосування в промисловості, наприклад, при створенні і обробці емульсій та рідинно-рідинних дисперсій.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Taylor G.I.* The formation of emulsions in definable fields of flow. // Proc. Royal. Soc. London, Ser.A.–1934.–Vol.146, P.501–523.
2. *Bentley B.J., Leal L.G.* An experimental investigation of drop break-up in two-dimension stationary flow. // J.Fluid Mech.–1986.–V.167, P.241–283.
3. *de Bruijn R.A.* Deformation and breakup of drops in simple shear flows. –Tech. University of Eindhoven.–1989. 274 p.
4. *Wannaborworn S., Mackley M.R., Renardy Y.* Experimental observation and matching numerical simulation for the deformation and breakup of immiscible drops in oscillatory shear. // J. Rheol. –2002. –Vol.46 (5), September/October.–P.1279-1293.

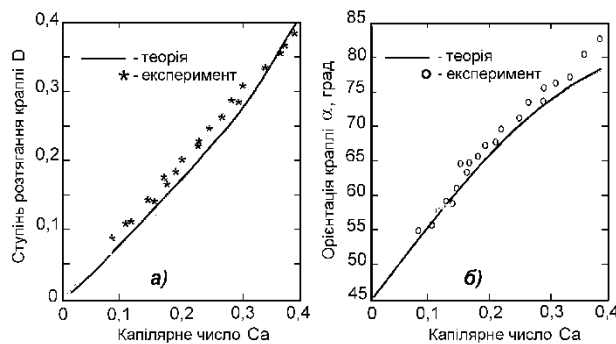


Рис. 5. Залежності ступеня деформації D (а) і кута орієнтації α (б) від капілярного числа Ca при деформуванні крапель диметикону ($R=0,3 \text{ мм}$) в зсувному потоці касторової олії. Порівняння результатів розрахунку по моделі (суцільні лінії) з експериментальними даними роботи [10]. Теплофізичні параметри системи наведено у підпису до рис. 4.

5. *Cristinia V., Guido S., Alfani A., Bławdziewicz J., Loewenberg M.* Drop breakup and fragment size distribution in shear flow. // *J. Rheol.* –2003.–Vol 47(5), September/October. –P.1283-1298.
6. *Lin Changzhi, Guo Liejin* Experimental study of drop deformation and breakup in simple shear flows. // *Chin. Jour. Chem. Eng.* – 2007, Vol.1, N.5.–P.1–5.
7. *A. Komrakova A., Shardt O., Eskin D., Derksen J.* Lattice Boltzmann simulations of drop deformation and breakup in shear flow. // *Int. J. Multiphase Flow.* –2014.–Vol.59, P.24–43.
8. *Torza S., Cox R.G., Mason S.G.* Particle motions in sheared suspensions. XXVII. Transient and steady deformation and burst of liquid drops. // *J. Colloid Interface Sci.* – 1972. –Vol.38, P.395–411.
9. *Иваницкий Г.К.* Моделирование процессов деформирования и дробления капель при движении в жидкости. // *Промышленная. теплотехника.* –1997. –Т.19, N1.–С.8–16.

ANALYTICAL STUDY OF THE MECHANISM OF DROPLET DEFORMATION AND BREAKUP IN SHEAR FLOWS

Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L.,
Gozhenko L.P.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.4>

The problem of drop deformation and breakup in shear flow represents academic and practical interest and has attracted close attention over the intervening decades. Drop breakup is important for a wide range of engineering and biomedical applications including production and processing of emulsions, aerosols, etc. Although drop breakup operations are widely used in various industries, however, till quite presently there is no unequivocal treatment of the physical mechanism, which causes the fragmentation of dispersions in shear flows. In this paper the principles of constructing a mathematical model, which predicts the evolution of initially spherical droplet in shear flows of viscous liquid over a wide range of flow regimes as well physical parameters of both liquid phases, are considered. A mathematical model is presented that describes the deformation of a single drop suspended in another immiscible liquid under the combined action of three forces, namely, hydrodynamic force, capillary force and dissipative viscous force. The influence of each of these forces on the process of droplet deformation is discussed in the paper.

The focus of the study is to more deeply analyze the dynamics of droplet deformation in shear flows and the transitional effects associated with current droplet shapes. Particular attention is paid to the analysis of critical conditions for the onset of irreversible deformation of droplets, which leads to their destruction. The deformed droplet is assumed to be in the form of prolate ellipsoid of revolution. The drop deformation is regarded as motion of the centers mass of the half-drops, symmetrical with respect to the drop center.

The results of numerical calculations for droplet deformation in shear flows in comparison with experimental data of other authors are presented. A simple criterion for destruction of droplets in shear flows has been obtained. The

results of the analysis confirm the reliability of the model and the competency of the assumption made. The model is able to predict the nature of droplet deformation and the conditions for their destruction in shear flows with known operating parameters with a greater degree of accuracy than the existing empirical relationships.

References 9, figures 5.

Key words: shear flow, droplet deformation and fragmentation, modeling.

1. *Taylor G.I.* The formation of emulsions in definable fields of flow. // *Proc. Royal. Soc. London, Ser.A.*-1934.-Vol.146, P.501-523.
2. *Bentley B.J., Leal L.G.* An experimental investigation of drop break-up in two-dimension stationary flow. // *J.Fluid Mech.*-1986.-V.167, P.241-283.
3. *de Bruijn R.A.* Deformation and breakup of drops in simple shear flows. -Tech. University of Eindhoven.-1989. 274 p.
4. *Wannaborworn S., Mackley M.R., Renardy Y.* Experimental observation and matching numerical simulation for the deformation and breakup of immiscible drops in oscillatory shear. // *J. Rheol.* -2002. -Vol.46 (5), September/October.-P.1279-1293.
5. *Cristinia V., Guido S., Alfani A., B?awdziewicz J., Loewenberg M.* Drop breakup and fragment size distribution in shear flow.// *J. Rheol.* -2003.-Vol 47(5), September/October. -P.1283-1298.
6. *Lin Changzhi, Guo Liejin* Experimental study of drop deformation and breakup in simple shear flows. // *Chin. Jour. Chem. Eng.* - 2007, Vol.1, N.5.-P.1-5.
7. *A. Komrakova A., Shardt O., Eskin D., Derksen J.* Lattice Boltzmann simulations of drop deformation and breakup in shear flow. // *Int. J. Multiphase Flow.* -2014.-Vol.59, P.24-43.
8. *Torza S., Cox R.G., Mason S.G.* Particle motions in sheared suspensions. XXVII. Transient and steady deformation and burst of liquid drops. // *J. Colloid Interface Sci.* - 1972. -Vol.38, P.395-411.
9. *Ivanitsky G.K.* [Modeling the processes of deformation and breakup of drops when moving in a liquid], *Promyshlennaya teplotechnika*, [Industrial heat Engineering], 1997, V.19, N1. P.8-16.

Отримано 05.02.2021
Received 05.02.2021

УДК 551.582.1

ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ – ФІЗИКА І ГЕОПОЛІТИКА (ОГЛЯД)

1. АНТРОПОГЕННА ТА ПРИРОДНА КОНЦЕПЦІЇ ЗМІН КЛІМАТУ

Басок Б.І.¹, чл.-кор. НАН України, **Базєєв Є.Т.¹**, канд. техн. наук, **Курасва І.В.²**, доктор геол. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Булаховського, 2, Київ, 03164, Україна, basok@ittf.kiev.ua²Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П.Семененка НАН України, пр. Акад. Палладіна, 34, Київ, 03142, Україна, office.igmr@gmail.com<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.5>

Глобальне потепління клімату і т. зв. «парниковий ефект» – одна з найбільш обговорюваних проблем фізики та геополітики, яка викликала протестні екологічні рухи в світі. Використано авторитетні літературні джерела з аналізом антропогенних і природних факторів глобального потепління, в т. ч. з поясненням фізичних процесів, що проявляються при сонячно-геомагнітній активності та інших природних явищах. Визначено основні причини і механізми природного та техногенного характеру по фактичному зростанню емісії парникових газів і глобальної температури в 20-столітті та наведено їх оціночні дані на період до 2100 року.

Глобальное потепление климата и т. н. «парниковый эффект» – одна из наиболее обсуждаемых проблем физики и геополитики, вызвавшая протестные экологические движения в мире. Использованы авторитетные литературные источники с анализом антропогенных и природных факторов глобального потепления, в т. ч. с объяснением физических процессов, проявляющихся при солнечно-геомагнитной активности и других природных явлениях. Определены основные причины и механизмы природного и техногенного характера по фактическому росту эмиссии парниковых газов и глобальной температуры в 20-веке и приведены их оценочные данные на период до 2100 года.

Global warming and so-called the “greenhouse effect” is one of the most discussed problems of physics and geopolitics, which has caused protest environmental movements in the world. Authoritative literature sources with the analysis of anthropogenic and natural factors of global warming are used, including with the explanation of the physical processes which are shown at solar-geomagnetic activity and other natural phenomena. The main causes and mechanisms of natural and man-made nature for the actual growth of greenhouse gas emissions and global temperature in the 20th century are identified and their estimates for the period up to 2100 are given.

Бібліографія 37, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: зміна клімату, глобальне потепління, парникові гази, антропогенна та природна концепції.

Вступ. До проблем сучасного світу – нерівності між багатими і бідними країнами, перенаселенню, виснаженню природних ресурсів додалася і проблема глобального потепління. Останню тісно пов'язують з антропогенним впливом сфери енергетики на клімат.

Енергетика, як одна з галузей економіки та життєзабезпечення, була і залишається базовою основою розвитку суспільства. Зі збільшенням чисельності населення планети зростає і споживання енергоресурсів. Одночасно перетворення енергоресурсів в різні, зручні для використання види енергоносіїв, не обходиться без негативних наслідків для навколишнього середовища. З'являється ряд проблем планетарного масштабу з тривожними прогнозами. До однієї з них, що викликають підвищений інтерес протягом останніх десятиліть, було віднесено помітну зміну клімату, і зокрема, інструментально виявлене глобальне потепління, що стало предметом наукових та соціально-громадських дискусій і обговорень на ряді міжнародних форумів в рамках Міжнародної програми з екології [1].

Проблематика. З середини ХХ століття помітно посилюється тренд підвищення глобальної приземної температури (рис. 1) – одного з показників кліматичної системи Землі.

Наведені на рис. 1 прогностичні моделі RCP, що лежать в основі висновків Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК, останній звіт 2014 р.), представляють фізично обґрунтований діапазон можливих зростань глобальної температури протягом наступних кількох десятиліть. Це явище (глобальне потепління) було пояснено посиленням парникового ефекту внаслідок підвищення в атмосфері Землі концентрації так званих парникових газів, що викликають такий ефект (CO₂, CH₄, N₂O, O₃ і ін., рис. 2, [2]). Виявлений зв'язок між підвищенням концентрації CO₂ в атмосфері і зростанням глобальної температури став предметом розгляду вищезазначених ініціатив з аналізу клімату. З'явилися численні публікації в ЗМІ та наукових виданнях з викладом необоротних драматичних для планети і її окремих районів наслідків:

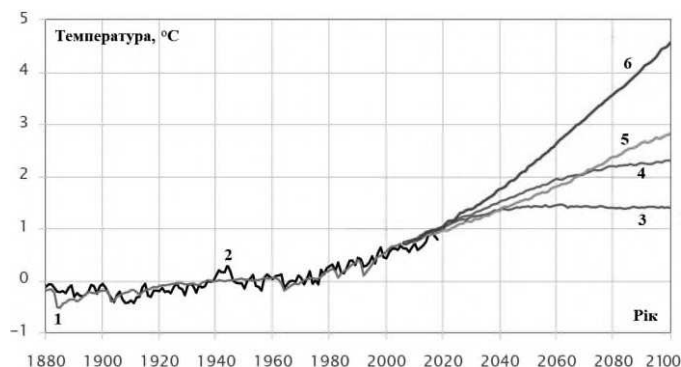


Рис. 1. Глобальна температурна аномалія (°C відносно базової лінії 1901-2000 рр.).

1 – дані (NOAA/CIRES 20CR V2, <https://climateanalyzer.org/clim/explore/>) реаналізу та моделювання NOAA (Національне управління океанічних і атмосферних досліджень – федеральне відомство в структурі Міністерства торгівлі США) та CIRES (інститут досліджень в області наук про навколишнє середовище при університеті Колорадо, США); 2 – експериментальні дані температури повітря на висоті 2 м від рівня суші для північної півкулі Землі; 3-6 – прогнози температурного росту по спряженим моделям СМІР5 для числових експериментів RCP (репрезентативний шлях концентрацій), 3 – RCP2.6 (пік в 2050 рр. і подальше зниження викидів парникових газів, температура в 2100 р. – 1,39 °C), 4 – RCP4.5 (2,3 °C), 5 – RCP6.0 (2,81 °C) і 6 – RCP8.5 (викиди тривають без змін, 4,56 °C).

- підйом рівня світового океану внаслідок танення льодовиків, що призведе до затоплення низинних просторів територій ряду прибережних і острівних країн, підвищенню кислотності океанів;

- порушення біологічної різноманітності: деякі види тварин і рослин не зможуть пристосуватися до нових умов і можуть зникнути, що в свою чергу може викликати зниження врожайності ряду сільськогосподарських культур;

- нестача питної води, міграція комах і як наслідок поширення епідемій (лихоманка, малярія);

- зміна клімату ускладнить доступ до водних і продовольчих ресурсів, що може привести до загострення міждержавних відносин;

- збільшення витрат енергії на кондиціонування в містах.

Знаходяться і позитивні ефекти глобального потепління:

- скоротиться опалювальний сезон – знизиться витрата енергоресурсів;

- північний кордон землеробства пересунеться в більш високі широти;

- потепління в Арктиці полегшить судноплавство і освоєння родовищ вуглеводневих ресурсів на морському шельфі.

Програми адаптації та боротьби з глобальним потеплінням, обговорення систем торгівлі квотами на викиди парникових газів породжують в суспільстві тривоги, протести «зелених» і впливають на світову і регіональну політику і, безумовно, економіку.

Глобальне потепління і клімат як такі стали розглядатися як проблема фізики та геополітики. Організація Об'єднаних Націй, наукові інституції та спільноти виступили з низкою ініціатив з проблеми клімату:

- 1979 р. Перша всесвітня конференція з питань клімату;

- 1988 р. Резолюція ГА ООН № 43/53 закликає до «... охорони глобального клімату в інтересах нинішнього і майбутнього поколінь людства». Створення МГЕЗК з метою збору і оцінки наукової інформації про клімат;

- 1990 р. Перша оціночна доповідь МГЕЗК. Резолюція ГА ООН № 45/212 з закликом до розробки і підписання Глобального договору в сфері клімату;

- 1992 р. На Саміті Землі прийнята Рамкова Конвенція ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) – вступила в силу у 1994 році;

- 1997 р. Підписано Кіотський протокол (додаток до РКЗК ООН) з кількісними національними зобов'язаннями щодо зниження викидів – в дії з 2004 року (перша фаза 2008-2012 рр. і друга фаза – до 2017 року);

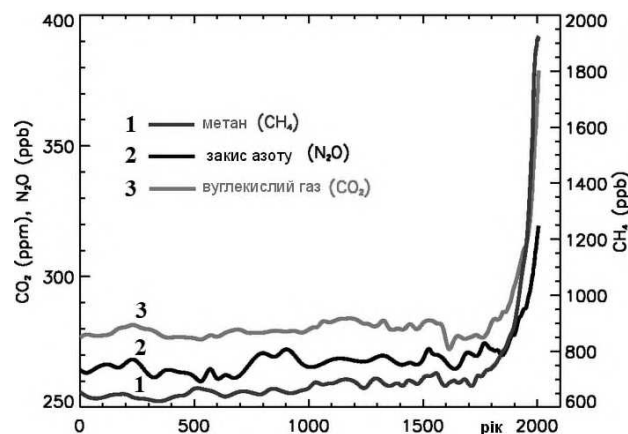


Рис. 2. Концентрації основних парникових газів в атмосфері за останні 2000 років [2]

• 2015 р. Паризька конференція – нова угода по спільним зусиллям щодо стримування кліматичних змін і зростання температури.

Мета. Ні Кіотський протокол, ні Паризькі угоди не обійшлися без розбіжностей між учасниками цих кліматичних самітів. Країни мають різні можливості розвитку своїх економік, що не дозволяє пред'являти до них однакові вимоги. Країни, що розвиваються, вважають, що головну відповідальність за зміну клімату повинні нести розвинені країн – вони є головними продуцентами парникових газів. Країни з багатими родовищами традиційних вуглеводнів, які порівняно легко добуваються, насторожено сприймають заклики до скорочення викидів парникових газів і переходу до відновлюваних джерел енергії.

Сучасний погляд на глобальне потепління зводиться до наступних положень:

1. Основна причина глобального потепління – монотонне зростання концентрації парникових газів (в основному вуглекислого газу) в атмосфері Землі.

2. Тренд підвищення концентрації парникових газів визначається збільшенням їх антропогенної емісії при спалюванні вуглеводневих енергоресурсів.

3. Глобальне потепління загрожує негативними наслідками для навколишнього середовища і економіки.

4. Необхідно вдосконалювати політику скорочення антропогенної емісії парникових газів.

Для прогнозів глобальної зміни клімату в даний час в якості наукової бази використовуються результати наукових досліджень МГЕЗК, створеної в 1988 році Міжнародною метеорологічною організацією і ООН (в групу входило близько 2500 дослідників і експертів з усього світу). Починаючи з 1990 року МГЕЗК періодично готує наукові оглядові доповіді з прогнозами оцінок зростання концентрації діоксиду вуглецю

в атмосфері і збільшення глобальної температури до кінця XXI століття. Опубліковані доповіді 1990, 1995, 2001, 2007, 2014 років, планується шоста доповідь (2021-2022 рр.). В кінці 2019 року на кліматичному саміті ООН були представлені чергові матеріали по сучасному стану і проблемам динаміки клімату.

МГЕЗК виходить з антропогенної концепції глобального підвищення приземної температури і розглядає сценарії динаміки атмосферних концентрацій антропогенних емісій. Огляди групи показують, що кількість антропогенних викидів, концентрація атмосферних парникових газів і середня глобальна температура залежать від соціально-економічних сценаріїв розвитку майбутнього світу. На реалізацію сценаріїв в свою чергу впливає цілий ряд невизначеностей – чисельність населення, темпи економічного зростання, впровадження нових ресурсоефективних і енергозберігаючих технологій, альтернативних напрямків технологічних змін в енергетиці: інтенсивне використання викопних видів палива або збалансоване використання всіх енергоресурсів. Облік такого роду ключових невизначеностей в модельних дослідженнях МГЕЗК призводить до того, що можливі прогнозовані оцінки підвищення атмосферної концентрації парникових газів і глобальної температури до кінця XXI століття варіюються в досить широкі межі.

Залежно від сценаріїв розвитку світової енергетики прогнозувалося до 2100 року у порівнянні з кінцем XX століття збільшення концентрації CO_2 від 400 до 790 млн.⁻¹ і температури на 1...4 °C [1]. Були і більш тривожні прогнози – підвищення концентрації CO_2 від 540 до 970 млн.⁻¹ і температури на 1,4...5,8 °C [3]. Відносно безпечним вважається підвищення концентрації CO_2 до 470 млн.⁻¹ [4], і глобальної температури на 1,7 [4], 1,5...1,7 °C [5], на 2 °C [6]. Допускав-

ся значний розкид і в оцінці такого важливого показника як чутливість до зміни вмісту парникових газів в атмосфері при подвоєнні концентрації CO_2 – (1,5...5,5 °C) [7], (1,5...4,5 °C) [1].

Такі розмиті показники прогнозів зміни концентрації діоксиду вуглецю і глобальної приземної температури визначаються обмеженістю наукових знань про механізми складних, недостатньо вивчених природних процесів в природі, важко прогнозованих трендів розвитку світової економіки та енергетики в умовах невизначеності ряду факторів. Цю обставину відзначено і в Кліматичній конвенції, один з ключових пунктів якої говорить: «...відзначити наявність ряду невизначеностей в прогнозах кліматичних змін, зокрема щодо тимчасових, амплітудних і регіональних особливостей» [1]. Рекомендувалося посилити наукові дослідження, удосконалити моделі вуглецевого циклу і клімату, уточнити невизначеності щодо глобального потепління [1]. У міру розвитку науки, раніше висунуті теорії піддавалися все більшій критиці і чимало з них в подальшому були відкинуті. Тому мета роботи – оцінити стан проблеми, представити результати останніх досліджень і рекомендувати заходи щодо можливого зниження парникового ефекту.

Матеріали та методи. У вересні 2019 року (Нью-Йорк, США) відбувся кліматичний саміт ООН, покликаний прискорити процес підписання і ратифікації Паризької угоди. Напередодні (квітень 2019 року) провідні вчені Всесвітньої Метеорологічної організації ООН представили звіт про останні зафіксовані дані щодо глобального потепління. Температура піднялася на 1,1 °C у порівнянні з 1850-1900 рр. і на 0,2 °C у порівнянні з 2011-2015 рр., що призвело до танення льодовиків, підвищення рівня океану. Зростання концентрації парникових газів з 2015 по 2019 рр. перевищує темпи зростання в попередні п'ять років на 20 %. Щорічні втрати маси льоду в Арктиці збільшилися в 6 разів – з 40 Гт у 1979-1990 роках до 252 Гт на рік в 2009-2019 роках [8].

Не всі фахівці і наукові колективи поділяють такий драматичний підхід і висновки МГЕЗК. Частина з них, не відносячи себе до противників реальності антропогенного впливу на підвищення температури, оцінює тривожні прогнози цієї групи по збільшенню концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері та підвищенню температури до кінця XXI століття як явно завищені, що не враховують тенденції зниження світового енергоспоживання, яка з'явилася в останні десятиліття, а пропозицію про необхідність прийняти вже зараз превентивні заходи по обмеженню викидів – як недостатньо аргументовані. За різними сценаріями і моделям до кінця століття гло-

бальне середньорічне потепління складе 1,2...2,6 °C і 0,9...1,2 °C [9], а чутливість глобальної кліматичної системи – 1,9 °C [7].

Найбільш послідовними опонентами МГЕЗК виступили наукові групи від Російської академії наук [5, 10, 11] і науково-дослідної лабораторії глобальних проблем енергетики Московського енергетичного інституту [12]. Використовуючи принципово різні методики, ці наукові групи прийшли практично до однакових результатів в прогнозних оцінках збільшення концентрації CO_2 в атмосфері і підвищення глобальної температури до 2100 року. Результати прогнозів МГЕЗК були оцінені як помилкові і сценарії глобального потепління як драматичні. Огляд робіт опонентів з порівняльним аналізом основних розбіжностей з висновками МГЕЗК наведено в [13, 14]. Розбіжності стосуються двох основних проблем, а саме: визначення чутливості кліматичної системи і прогнозу концентрації CO_2 в атмосфері. Від ступеня наукової аргументації висновків з цих проблем залежить обґрунтованість пропонованих заходів і рішень по обмеженню викидів двоокису вуглецю, що підлягають узгодженню на міжнародному рівні.

Разом з антропогенною концепцією глобального потепління (підхід МГЕЗК) розглядається і природна концепція потепління клімату. Не заперечуючи впливу антропогенних викидів на збільшення глобальної температури, прихильники природної концепції потепління клімату вважають, що все ж таки визначальними факторами підвищення приземної температури є природні, пов'язані з космогенними циклічними процесами, з сонячно-земною взаємодією (обертання Землі навколо Сонця, прецесія осі обертання Землі, цикли сонячної активності та ін.) [15-20]. Є й підходи, що змінюють місцями причини та наслідки глобального потепління, а саме: зміни атмосферної концентрації діоксиду вуглецю – наслідок глобальних змін температури планети, а не їх причина. Прогрів Світового океану повинен призводити до зменшення розчинності CO_2 в морській воді і викиду надлишку CO_2 в атмосферу [15, 21].

Варто відзначити, що в цьому контексті велику кількість як вітчизняних, так і зарубіжних вчених геологічного профілю визначають як ключовий чинник генерації парникових газів процеси глибинної дегазації Землі (ГДЗ). На думку українських геологів [22], ГДЗ – головна рушійна сила ендегенних геологічних процесів, а скрізьформаційні флюїдопровідні системи (тріщини, розломи в земній корі) є основними каналами ГДЗ в літосфері. Уявлення про мантийні плюми, як про базові (мега) труби дегазації, система яких контролює глобальні процеси ГДЗ, дозволяє об'єднати практично

всі основні аспекти ендегенного рудоутворення, нафтогенезу і формування парникових газів на Землі. При цьому вивчення процесів ГДЗ реалізується переважно за допомогою сучасних геофізичних методів досліджень.

На противагу гіпотезі про переважання на Землі парникових газів техногенного походження і ключовому впливу антропогенних факторів на зміну планетарної температури, російський геолог А.В. Ніколаєв [23] стверджує, що саме відновлені гази (H_2 , CH_4 , H_2S), які є похідними висхідного потоку вихідного флюїду в надрах Землі, взаємодіючи з киснем силікатів мантії і гірських порід земної кори, викликають виділення тепла, а також ініціюють магматичні і гідротермальні процеси. При цьому частина висхідного флюїду проривається до верхніх горизонтів земної кори, а його похідні у вигляді струменів водню, гелію, метану, сірководню досягають земної поверхні і потрапляють безпосередньо в атмосферу.

Уявлення про процеси ГДЗ в зв'язку зі змінами глобальної температури активно досліджуються вченими-геофізиками. Зокрема, наукові результати, викладені в [24], підтверджують теорію щодо утворення флюїдів у верхній частині астеносфери і подальшого вивільнення парникових газів в атмосферу Землі крізь тріщини і розломи. Була розглянута сукупність процесів, які протікають в мантії від часу утворення астеносфери до її кристалізації. Запропонована і теоретично обґрунтована модель, в якій астеносферу розглядають як відкриту систему, а тонкий шар на її покрівлі – як реактор, в якому відбувається акумуляція активних компонентів. Саме відносно невелика потужність шару максимального плавлення забезпечує вплив на диференціацію розплаву елементів, вміст яких у мантії в цілому незначний. Крізь реакційний об'єм проходить потік активних компонентів, в ньому відбуваються фізико-хімічні взаємодії. Далі в процесі активізації значна частина продуктів реакцій вивільняється до земної поверхні у вигляді розплавів (ексгаліцій).

Результати. Глобальне потепління як проблема фізики досить докладно розглянуте в [15]. Нижче коротко проанотовані основні положення [15].

Термін «клімат» («нахил» – з грецької) ввів давньогрецький астроном Гіппарх (190-120 рр. до нової ери), що розділив Землю на п'ять широтних зон – полярні, помірні і тропічну, що відрізнялися нахилом сонячних променів (тобто висотою Сонця над горизонтом). Гумбольдт (Німеччина) запропонував враховувати вплив підстильної поверхні суші і океану на атмосферу. Докучаєв (1857-1903) розвинув і деталізував теорію широтної і вертикальної географічної, в тому числі

кліматичної зональності поверхні суші. Були побудовані численні кліматичні карти середніх температур, опадів, атмосферного тиску для різних сезонів, для року і т. п.

З сучасних позицій клімат визначається як статистичний ансамбль станів, які кліматична система океан-суша-атмосфера (ОСА) проходить за періоди часу в декілька (близько трьох) десятиліть. Міжнародними метеорологічними конференціями (Варшава 1935 р., Вашингтон 1957 р.) було рекомендовано для визначення сучасного клімату атмосфери вибирати тридцятирічні періоди осереднення.

Основним джерелом енергії для процесів в кліматичній системі Землі є падаючий на Землю потік сонячного випромінювання (інсоляція). Його значення (сонячна стала) на середній відстані від Землі до Сонця дорівнює близько $1367 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Цьому відповідає світимість Сонця (повна потужність сонячного випромінювання) близько $3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ і ефективна температура сонячного випромінювання 5770 К .

Основна задача теорії клімату – визначити поля температури в кліматичній системі ОСА з властивими їм коливаннями в часі. Цій задачі підпорядковані дві інші, а саме:

1. визначення глобальних горизонтальних неоднорідностей поля температури, що створюються різницею інсоляцій в екваторіальних і полярних зонах при згладжуючому впливі великомасштабних рухів, що генеруються температурними неоднорідностями, і відповідного теплообміну в атмосфері і океані.

2. визначення вертикальних неоднорідностей температурного поля, включаючи «парниковий ефект», що створюються на Землі (з майже прозорої для основної частки сонячного випромінювання земною атмосферою) нагріванням її поверхні і згладжуючим впливом вертикального теплообміну внаслідок термічної конвекції, домінуючої в нижніх шарах атмосфери, променевого переносу власного випромінювання поверхні землі і атмосфери, домінуючого у верхніх шарах.

Суть вищезазначеного парникового ефекту полягає в наступному. У нижньому десятикілометровому шарі атмосфери температура в середньому зменшується з висотою, тому що сонячне короткохвильове випромінювання поглинається в атмосфері слабо і, досягаючи поверхні Землі, нагріває її, а власне довгохвильове випромінювання, навпаки, сильно поглинається в атмосфері, підвищуючи її температуру. Цей процес не є рівномірним – в одних регіонах температура змінюється швидше, в інших – повільніше.

В атмосфері Землі на висотах близьких до 5 км фіксується температура 255 К . Середня приповерхнева

температура шару повітря на висоті метеорологічного пункту близька до 288 К. Різниця цих температур в 33К характеризується як парниковий ефект (за аналогією з таким ефектом в парниках, теплицях). За інших рівних умов, чим більше парниковий ефект, тим тепліші нижні шари атмосфери. Без парникового ефекту приповерхнева температура не перевищувала б -18°C , а це означає відсутність умов для життя. Вода на земній поверхні існувала б тільки у вигляді льоду. Таким чином, головними механізмами, що забезпечують стабільність температури на поверхні Землі, є сонячне випромінювання і парниковий ефект.

Довгохвильове випромінювання інтенсивно поглинається цілим рядом наявних в атмосфері так званих парникових газів, основними з яких є водяна пара (найбільш ефективний поглинач), діоксид вуглецю CO_2 , метан CH_4 , закис азоту N_2O , озон O_3 і інші (таблиця). Як видно з таблиці, головним парниковим газом є водяна пара, а не вуглекислий газ. Властивості водяної пари як парникового газу було відзначено Д. Тіндалем ще в 1863 році [15]. Вуглекислий газ є другим за значимістю, але втричі меншим за обсягом парникового ефекту (див. табл.). Глобальне ж потепління пов'язане з посиленням парникового ефекту.

Роль вуглекислого газу, як парникового, була показана С. Арреніусом (1896 р.) і Т. Чемберленом (1899 р.). Збільшення концентрації CO_2 в період 1956-1997 рр. з 315 до 360 млн.^{-1} стало підставою висунути гіпотезу про антропогенний внесок у потепління клімату саме вуглекислого газу внаслідок спалювання викопного палива. Вперше про таку гіпотезу заявив Д. Каллендор ще у 1938 р. Головний же парниковий газ (водяна пара) не став предметом пильної уваги при розгляді зв'язку температури і вмісту водяної пари в атмосфері. У той же час в цілому ряді авторитетних джерел відстоюється осо-

блива, домінуюча роль саме водяної пари в підвищенні глобальної температури [15, 25, 26].

Значний внесок у вібрацію клімату вносять завислі в атмосфері частки – аерозоль природного (до 90%) і антропогенного походження. При цьому, аерозоль може викликати як парниковий так і антипарниковий ефекти. Якщо аерозоль пропускає більшу частину теплового випромінювання Землі, то температура атмосфери під аерозольним шаром може виявитися нижче, ніж за відсутності аерозолу (антипарниковий ефект). Але при деяких поєднаннях властивостей аерозолу (просторова і часова мінливість характеристик) він може посилювати парниковий ефект [15]. Крім водяних крапельок і кристалів водяного льоду в хмарах визначають наступні види тропосферного аерозолу:

1. морський аерозоль – частинки солі, які випарувалися з бризків води морських хвиль. Інтенсивність їх утворення значна (до $1 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1}$) і визначається в основному швидкістю вітру. Аерозоль досить швидко осідає або вимивається, не проникаючи через «хмарний фільтр» на висоті до 3-х км.

2. сульфатний аерозоль – субмікронні частинки, що містять сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, бісульфат NH_4HSO_4 і сірчану кислоту в водному розчині. Вони утворюються в атмосфері в реакціях окислення відновлених з'єднань сірки, що виділяються океанським фітопланктоном. Сульфатні частки вносять найбільший внесок в антипарниковий ефект.

3. пустельний аерозоль – мінеральний пил з частинок глинистих мінералів під час пилових буревіїв. Середня концентрація частинок – 300 мкг/м^3 , але в поверхневому шарі під час бурі зростає в 3...10 разів.

4. біогенний аерозоль – летючі органічні речовини, що виділяються рослинами, особливо вічнозеленими, а також деякими бактеріями, грибами і комахами.

Таблиця. Парникові гази атмосфери Землі

Парниковий газ	Концентрація чи вміст парникового газу	Внесок в парниковий ефект, градусів Цельсія
Водяна пара, H_2O	$2,5 \text{ г} \cdot \text{Кг}^{-1}$	20,6
Діоксид вуглецю, CO_2	355 чнм	7,2
Озон, O_3	343 ED*	2,4
Закис азоту, N_2O	0,28 чнм	1,4
Метан, CH_4	1,3 чнм	0,8
Сірчистий газ, SO_2	$2 \cdot 10^{-3}$ чнм	0,8
Фреон, чотирихлористий вуглець, аміак та ін.	$1 \cdot 10^{-4}$ чнм	0,8

* ED – одиниця Добсона. $1 \text{ ED} = 2,7 \cdot 10^{16} \text{ молекул см}^{-2}$ [15]

Емісія таких речовин може бути до $0,2 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1}$ середня концентрація в атмосфері невисока (близько 50 мкг/м^3).

5. димовий аерозоль – дим, сажа та інші продукти згоряння при лісових, степових та інших пожежах. Сумарні викиди в широкому діапазоні – $(0,003-0,150 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1})$.

6. вулканічний аерозоль – сульфатний аерозоль з вулканічних газів і вулканічний попіл – викинуті в атмосферу частинки роздроблених і розпорошених вибухами гірських порід. Вихід такого аерозолу близько $0,004 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1}$.

Є також два види антропогенного аерозолу. Кількість його на порядок менша природного, але викиди їх можна порівняти з природними. Промисловий сульфатний аерозоль – частинки, що утворюються в атмосфері з сірчастого газу SO_2 при спалюванні палива, особливо вугілля, на електростанціях, при виплавці металів, виробництві сірчаної кислоти та в інших технологіях. Промисловий пил – викиди гірничодобувної промисловості, цементних, металургійних і інших заводів. Ці два види промислового аерозолу становлять не менше $0,045 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1}$.

В межах України характерним прикладом території з значною кількістю промислового пилу в атмосферному повітрі є м. Маріуполь [27]. Індекс забруднення атмосфери тут становить 17,7 умовних одиниць, і за цим параметром місто є абсолютним лідером серед інших промислових регіонів країни. При цьому валовий вміст важких металів в пилових викидах становить (мг/кг): Mn – 4300, Ni – 60, Co – 4, V – 210, Cr – 600, Mo – 4, Cu – 286, Pb – 1088, Zn – 5825, Sn – 26.

Антипарниковий ефект аерозолу в цілому невеликий, хоча сильні виверження вулканів і великі лісові пожежі (Росія, Бразилія, 2019 рік) вносять істотний внесок у вібрацію клімату [15].

При всій простоті визначення поняття «парниковий ефект» ... «прямий розрахунок парникового ефекту виявляється важкою справою через складність спектрів поглинання парникових газів» [15]. Фізика парникового ефекту досить детально представлена в [15]. Згідно [15] необхідно вирішувати завдання по визначенню глобальних горизонтальних неоднорідностей поля температури внаслідок різниці інсоляцій в екваторіальній і полярних зонах, а також вертикальних неоднорідностей температурного поля, включаючи парниковий ефект, внаслідок вертикального теплообміну за рахунок термічної конвекції (з урахуванням вертикального перенесення звичайної теплоти і прихованої теплоти випаровування, теплоти ка переноситься водяною парою). Для цього розглядають і описують «горизонтальні» процеси тепло- і масопереносу між екваторіальною і полярною зо-

нами і вертикальні процеси радіаційно-конвективного тепло- і масопереносу по вертикалі, включаючи парниковий ефект водяної пари і малих газових домішок, та радіаційного теплопереносу в атмосфері, замуненою аерозольною суспензією з включенням її антипарникового ефекту. *«Переконали розрахунки парникового ефекту можливі, звичайно, лише при використанні повних (тривимірних нестационарних) чисельних моделей загальної циркуляції атмосфери з детальним описом променистого і конвективного теплообміну, при обліку хмарності і аерозолу»* [15]. Зараз же для якісного розуміння суті парникових процесів побудована оціночна теорія, що викладена в [15].

Немає єдиної думки фахівців і про природу парникового ефекту. Як відомо, МГЕЗК пояснює підвищення глобальної температури монотонним зростанням концентрації в атмосфері парникових газів, головним чином, діоксиду вуглецю, внаслідок їх антропогенних викидів. Не всі в науковому співтоваристві поділяють підхід МГЕЗК про визначальну роль антропогенних викидів в підвищенні глобальної температури. Наявність парникового ефекту ніхто не заперечує, але по іншому визначають природу такого ефекту. Наприклад, фахівці з фізичної оптики нижньої атмосфери пояснюють природу сучасного глобального потепління впливом факторів сонячно-магнітної активності (спалахи на Сонці, магнітні бурі) [25]. Потік мікрохвиль з іоносфери утворює в тропосфері з кластерів водяної пари конденсаційно-кластерну димку, що переходить в оптично тонку хмарність (у вигляді «молодих» перистих хмар), яка екранує потік тепла в космос з нижньої тропосфери і підстильної поверхні. Відбувається розігрів приземного повітря і поверхні світового океану [25]. Пари води – основний парниковий газ в тропосфері і його зміст набагато більше (до 36...70 %) у порівнянні (9...26 %) для CO_2 , (4...9 %) метану або (3...7 %) озону [25]. Таким чином, кластероутворення з парів води, що призводить до створення оптично тонкої хмарності, стає основною причиною сучасного глобального потепління в епоху проходження в кінці ХХ-го початку ХХІ століття як сонячної так і геомагнітної активності. Викид парникових газів антропогенного походження (головним чином діоксиду вуглецю, метану), може посилювати ефект глобального потепління.

Як зазначається в [25], дослідження сонячно-геомагнітної активності і техногенного електромагнітного шуму (що виникає в тому числі в передавальних пристроях мобільного зв'язку) дозволять краще зрозуміти механізм впливу порівняно слабких впливів на біосферу і навколишнє середовище, зокрема, і на погоднокліматичні характеристики.

Є й інші дослідження про зв'язок потепління зі збільшенням хмарності [28]. На основі аналізу метеорологічних і аерологічних даних, отриманих на станції Восток (Антарктида), були виявлені значні варіації рівня хмарного покриву і температури повітря, пов'язані з варіаціями рівня галактичних космічних променів і міжпланетного магнітного поля. «Посилення хмарності на висотах нижче 8 км викликає потепління приземної температури атмосфери, ймовірно, за рахунок парникового ефекту, відсутність вихолоджування поверхні Землі» [28].

Сценарії антропогенного посилення глобального парникового ефекту, термічні, гідрологічні режими і основні висновки для можливих температурних змін клімату в Україні були розглянуті на початку 90-х років ХХ століття і представлені в [29]:

1. при глобальному антропогенному потеплінні приблизно на 1°C (в першій чверті ХХІ століття) в південних районах України рівень потепління практично збігатиметься з глобальним, а в північних – може посилитися до 40%.

2. широтний градієнт температур на території України буде по абсолютній величині зменшуватися до 10 % (в сучасну епоху широтний градієнт приземної річної температури – близько $0,8^{\circ}\text{C}$ на 1° широти).

3. якщо річна глобальна температура підніметься на 3°C (близько середини ХХІ століття), то температурний режим північних областей України може стати подібним температурному режиму її південних регіонів.

Відзначається, що отримані рядом дослідників результати математичного моделювання динаміки земної кліматичної системи для створення сценаріїв RCP регіональних змін клімату при антропогенному посиленні парникового ефекту поки малонадійні. Труднощі тут – в недостатньо глибокій вивченості всієї сукупності фізичних процесів, які формують широтно-довготний розподіл полів температури та інших кліматичних параметрів (суми опадів, мінливість погоди та ін.)

Публікація прогнозів через десять років показала, що в Україні підвищення середньої приземної температури в період 1900–2000 рр. склало $0,4 \dots 0,6^{\circ}\text{C}$, причому по регіонах: північний схід – близько 1°C , полісся і лісостеп – $0,7 \dots 0,9^{\circ}\text{C}$, степ – $0,2 \dots 0,3^{\circ}\text{C}$. За порами року: взимку – $1,2^{\circ}\text{C}$, навесні – $0,8^{\circ}\text{C}$, влітку – $0,2 \dots 0,3^{\circ}\text{C}$. Виявлений негативний тренд числа морозних днів і деконтиненталізація клімату. Прогнозні оцінки зміни середньої приземної температури в Україні до 2050 року зводяться до того, що підвищення складе $1,5 \dots 2,0^{\circ}\text{C}$, причому в січні для півдня – $2,0^{\circ}\text{C}$, для півночі – $2,8^{\circ}\text{C}$ і в липні для України – $0,5 \dots 1,0^{\circ}\text{C}$ [30].

Недавній прогноз для потепління в Україні по ряду періодів до 2100 року наведено на рис. 3. Видно, що результати інструментальних вимірювань підвищення температури і прогнози потепління в Україні в цілому відповідають трендам зміни глобальної температури, і перед Україною стоять ті ж виклики і ризики, якими стурбований світ [31].

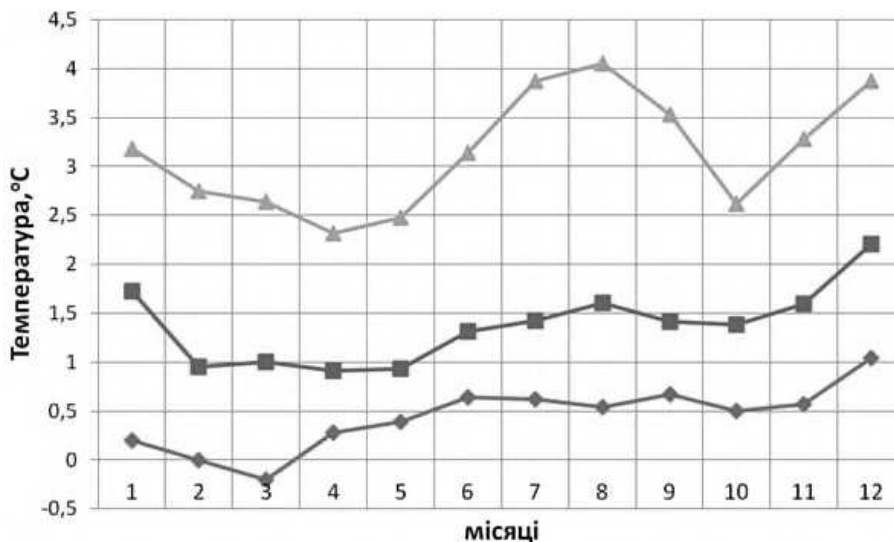


Рис. 3. Проєкції змін середніх місячних температур повітря в Україні з довірчими інтервалами по ансамблю з 10 РКМ (регіональні числові кліматичні моделі) щодо 1991–2010 рр. [31]. Позначення: ◆ – 2011–2030 рр. (середнє значення – $0,44^{\circ}\text{C}$), ■ – 2031–2050 рр. (середнє – $1,57^{\circ}\text{C}$), ▲ – 2051–2100 рр. (середнє – $3,15^{\circ}\text{C}$)

Але не всі фахівці з клімату поспішають оголошувати про прийдешні катастрофи. Уточнюється методологія, поглиблюється і розширюється теорія і практика досліджень, вдосконалюється інструментарій досліджень. Достовірні на перший погляд висновки беруться під сумнів. Здавалося б, можна достовірно визначити площу морських льодовиків в Арктиці – одного з ключових індикаторів клімату. Існують широко розвинена авіарозвідка, супутникові спостереження. Однак похибка при вимірюваннях і розрахунках досягає, наприклад, для Арктичного басейну 10% – в цілому близько 1 млн. км². Причина такої похибки – великі моря талої води шаром в 1...2 м в полярне літо на поверхні льоду. Талий шар води «екранує власне випромінювання льоду, в такій ситуації льодові спостереження в інфрачервоному діапазоні неможливі» [32].

Визначаються нові напрямки і об'єкти досліджень навколишнього середовища, що впливають на клімат внаслідок природної емісії парникових газів. У 2010 р. виконані унікальні дослідження в Арктиці з вивчення причин і механізмів виникнення «метанового максимуму» в атмосфері Північної півкулі. Виявлені чинники і встановлені закономірності надходження в атмосферу величезних кількостей метану на мілководних акваторіях арктичних морів, дають підстави вважати метановий фактор одним з основних при розгляді причин глобальних змін клімату на Землі, а також пояснюють природу раніше встановлених аномалій [33].

У порівнянні з матеріалами щодо антропогенної концепції зміни клімату які широко публікуються, менш доступні (і менш помітні) для громадськості публікації в спеціальних журналах про результати досліджень іншого чинника впливу на клімат – сонячно-земної взаємодії. Природному впливу на глобальне потепління саме такого фактора фахівці з фізики атмосфери і океану, геомагнетизму і аеронмії відводять вирішальну роль.

Зараз основним трендом досліджень природи і характеру динаміки глобального потепління стають міждисциплінарні дослідження на стику, здавалося б, досить далеких дисциплін. Так, наприклад, виконавцями програми «Глобальні та регіональні зміни клімату та природного середовища пізнього кайнозою Сибіру» були десять інститутів Сибірського відділення РАН– Археології та етнографії, геології та мінералогії ім. В.С. Соболева, Нафтогазової геології і геофізики ім. А.А. Трофимука, Геохімії ім. А.П. Виноградова, Лісу ім. В.Н. Сукачова, Лімнологічного, Ядерної фізики ім. Г.І. Будкера, Обчислювального моделювання, Земної кори, Мерзлотоведення ім. П.І. Мельникова.

Проведені дослідження підтверджують спільність ходу і єдиний механізм кліматичних змін як в середніх широтах Північної Азії, так і всієї планети. Ці результати переконливо свідчать, що сучасне потепління має природний характер, його рівень поки не перевищив порогу природних змін клімату, що відбувалися протягом навіть останніх 1000 років, а тим більше четвертинного періоду [34].

В [19] проведено порівняльний аналіз отриманих результатів і висновків обговорюваних концепцій. *«Як прихильників, так і противників антропогенного потепління не можна звинуватити в некоректному трактуванні наявних даних. ... Тому для вибору між концепціями необхідно залучити додатковий набір даних (палеокліматичних реконструкцій)».*

Для реконструкції був обраний період 500-1900 рр., в якому потенційний антропогенний вплив на клімат – зневажливо малий. Проведений аналіз динаміки глобальної температури показав, що на зазначеному вище часовому інтервалі «не спостерігалось циклічних процесів такого поєднання і періодичності і амплітуди, яке могло б призвести до потепління, яке спостерігається в ХХ столітті, а значить, його не можна пояснити без причини антропогенного чинника». *«... Однак і ігнорувати природну циклічність не варто, оскільки вона визначає ряд специфічних рис сучасної кліматичної динаміки, або знижуючи, або збільшуючи темпи зміни температури»* [19].

З урахуванням спрямованої антропогенної і циклічних природних компонент був виконаний прогноз динаміки глобальної температури в ХХІ столітті. Були використані прогнозні оцінки емісії вуглецю і змін атмосферної концентрації CO₂ в залежності від майбутньої динаміки антропогенних емісій, яка в свою чергу визначається багатьма факторами: технологічним прогресом та інноваціями в енергетиці, темпами розвитку світової економіки, результатами реалізації запланованих заходів, прийнятих на міжнародних кліматичних самітах, геополітичними турбулентностями і т. п. (див. посилання [12] в [19]).

В залежності від різних сценаріїв розвитку енергетики за прогнозними оцінками зростання температури в ХХІ столітті складе 2,2; 1,8; і 1,0 °С. Прогноз МГЕЗК для тих же умов – 3,6; 2,8 і 1,8 °С. Розбіжність в оцінках є суттєвою, тому що за багатьма пропозиціями, висловленими на останніх кліматичних самітах, і зокрема, на Паризькій нараді в 2015 р, небезпечна зміна потепління не повинна перевищувати 2 °С. Така межа в 2 °С за двома сценаріями (більш жорстким по динаміці викидів CO₂) за прогнозами МГЕЗК буде перевищена в

2050 році і за менш жорстким сценарієм – в 2060 році. Згідно [19] таке перевищення за двома сценаріями настане в 2070 році, а за останнім сценарієм – не матиме місце. Таким чином, є час для вирішення проблем пов'язаних, з антропогенної емісією парникових газів, хоча для першого сценарію (більш жорсткого) залишилося не так багато – близько 30-ти років.

Висновки. Глобальне потепління, ставши однією з найбільш гостро обговорюваних проблем сучасності, викликало дискусії серед фахівців з клімату щодо причин, що породжують глобальне потепління і наслідки такої зміни клімату. Є прихильники як антропогенного, так і природного впливу на клімат. І ті й інші відстоюють свої концепції, приводячи, з їх точки зору, переконливі аргументи. Але треба спиратися на «науковий метод в політиці: велике мистецтво – це не переконувати себе в тому, що ми не зробили жодної помилки, ігнорувати їх, приховувати і звинувачувати інших людей, а взяти на себе відповідальність за помилки, вчитися на них і застосовувати цей досвід так, щоб уникнути помилок в майбутньому [35]. Треба дотримуватися і такого принципу, як «Скільки б сил не було витрачено на вашу теорію, не можна ігнорувати дані, що суперечать їй» або «Слід звертати більше уваги на пошук даних, що суперечать вашій теорії, ніж доказів, що підтверджують її» [36].

Безсумнівно, є протистояння точок зору прихильників антропогенної і природної концепції глобального потепління. Вчені мають свої гіпотези, ведуть дискусії, до проблеми підключається широка громадськість. Форми протесту збагачують навіть словниковий запас. У 2019 році з'явилося «слово року»: кліматичний страйк (Climate strike). Протести – це теж трибуна громадської експертизи. Але головне при вирішенні соціально значущих проблем – дотримуватися принципу: від громадянської сміливості і гучного патетики – до наукової доказовості там, де можуть домінувати емоційні перегини. Тільки так можна зняти небезпеку руйнівних моментів, які можуть проявлятися при масовому залученні людей в громадські рухи.

Незважаючи на існуючу серед фахівців неоднозначність висновків про природу глобального потепління і оцінок значущості ролей антропогенного і природного факторів в зміні клімату, ступеня небезпеки таких змін, відсутність в міжнародному співтоваристві узгодженої позиції щодо прийняття та виконання рішень, визначених кліматичними самітами, (зокрема, Паризьких угод), довгострокова енергетична політика України повинна бути спрямована на підвищення енергоефективності використання енергоресурсів з необхідними заходами з охорони навколишнього середовища на всіх

етапах паливного циклу; від видобутку енергоресурсів до споживання енергії. Можна підтримати твердження: «Навіть якщо глобального потепління не було, з точки зору провідних країн світу його слід було б вигадати, оскільки для його запобігання вживаються заходи які сприяють розробці нових енергетичних технологій, заснованих на поновлюваних джерелах енергії» [37].

Автори висловлюють подяку доктору географічних наук Бойченко С.Г. за корисні дискусії при написанні цієї статті.

Фрагментарно дана стаття написана в рамках виконання: цільової комплексної міждисциплінарної програми наукових досліджень НАН України з розробки наукових основ раціонального використання природно-ресурсного потенціалу та сталого розвитку і цільової програми наукових досліджень НАН України «Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії».

ЛІТЕРАТУРА

1. *Мировая энергетика будущего – время действовать.* Документы МИРЭС 2000. Мировой энергетический Совет. Справочный перевод. 2000. 175 с.
2. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4).* Інтернет-ресурс: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.
3. *Флавін К. та ін. Стан світу 2002.* Пер. з англійської: ВГО «Україна. Порядок денний на XXI століття та інститут сталого розвитку» - Київ, Інтелсфера. 2002. 289 с.
4. *Терешин А.Г., Клименко А.В., Клименко В.В.* Золотой век газа и его влияние на мировую энергетику, глобальный цикл углерода и климат. Теплоэнергетика. 2015. №5. С. 3-13.
5. *Демерчян К.К., Демерчян К.С., Кондратьев К.Я.* Темп роста концентрации CO₂ и уточнение его прогнозных оценок. Известия РАН. Энергетика. 2001. №1. С. 3-35.
6. *Елисеев А.В.* Глобальный цикл CO₂ // Eliseev_A_V_theses_26042017. Pdf
7. *Клименко В.В., Терешин А.Г.* Мировая энергетика и глобальный климат в XXI веке в контексте исторических тенденций: Пределы роста. Универсальна и глобальная история. Эволюция Вселенной, Земли, жизни, общества. Под ред. Л.Е. Гринина, И.В. Ильина, А.В. Коротаева. Волгоград: Учитель, 2012. – С. 608-621. - 688 с.
8. *Інтернет-ресурс:* <https://www.segodnya.ua/world/wnews/temperatura-na-planete-podnyalas-na-1-1-0s-v-onbyut-trevogu-1335122.html>

9. Аржанов М.М. и др. Оценка климатических изменений в Северном полушарии в XXI веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 6. С. 643- 654.
10. Демерчян К.С., Демерчян К.К., Данилевич Я.Б., Кондратьев К.Я. Глобальное потепление, энергетика и геополитика. Известия РАН. Энергетика. 2002. №3. С. 18-46.
11. Демерчян К.С., Кондратьев К.Я. Научная обоснованность прогнозов влияния энергетики на климат. Известия РАН. Энергетика. 1999. №6. С. 3-46.
12. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Энергетика и климат на рубеже веков: прогнозы и реальность. Теплоэнергетика. 2001. №10. С. 61-66.
13. Базеев Е.Т. Киотский протокол: препятствия на пути реализации (к вопросу неоднозначности прогнозных оценок изменения концентрации парниковых газов в атмосфере Земли и повышения приземной температуры. Обзор). Труды международного энергоэкологического конгресса «Энергетика. Экология. Человек». 27-28 марта 2003 года. Киев. 2003. С. 67-71.
14. Базеев Е.Т., Диденко В.М. Парниковый эффект и теплоэнергетика Украины. Політичні, економічні та екологічні проблеми енергетичної безпеки і транспортування енергоресурсів в Україні. Збірник наукових праць міжнародної науково-практичної конференції. 24-26 жовтня 2000 р., м. Київ. РВПС НАН України, 2001. 268 с.
15. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики. Успехи физических наук. 2000. Т. 170, № 4. С. 419-445.
16. Иванов В., Богуславський С., Совга О., Жоров В. Світовий океан як стабілізатор клімату Землі. Вісник НАН України. 2004. №3. С.32-37.
17. Лосев К.С. Парадоксы борьбы с глобальным потеплением. Вестник РАН. 2009. Т. 79, №1. С 36-40.
18. Большаков В.А., Капица А.П. Уроки развития орбитальной теории климата. Вестник РАН. 2011. Т. 81, № 7. С. 603-612.
19. Замолотчиков Д.Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления. Вестник РАН. 2013. Т. 83, №3. С. 227-235.
20. Корабльєв О.И. Марс и Венера: разные судьбы планет земной группы. Вестник РАН. 2016. Т. 86, № 7. С 587-599.
21. Сорохтин О.Г. Эволюция климата Земли и происхождение ледовых эпох. Вестник РАН. 2006. Т. 76. №8. С. 699-706.
22. Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславський В.М. Очерки дегазации Земли. Київ, 2018. 632 с.
23. Николаев А.В. Проблемы геотомографии. Москва, 1997. С. 4-38.
24. Усенко О.В. Формирование расплавов. Геодинамический процесс и физико-химические взаимодействия. Київ, 2014. 237 с.
25. Авакян С.В. Супрамолекулярная физика окружающей среды: климатические и биофизические эффекты. Вестник РАН. 2017. Т. 87, № 5. С. 456-466.
26. Барцев С.И., Белолитецкий П.В., Дегерменджи А.Г. и др. Новый взгляд на динамику климата Земли. Вестник РАН. 2016. Т. 86, № 3. С. 244-251.
27. Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Самчук А.І., Войтюк Ю.Ю., Манічев В.Й. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища м. Маріуполь (еколого-геохімічні аспекти). Київ, 2014. 168 с.
28. Вовк В.В., Егорова Л.В., Трошичев О.А. Связь атмосферных характеристик в Антарктиде с факторами космической погоды. Геомагнетизм и аэрономия 2008. Т. 48, №4. С 561-565.
29. Волощук В., Скрипник М. Глобальний парниковий ефект і кліматичні умови України. Вісник НАН України. 1993. №9. С. 43-46.
30. Ліпінський В.М. Глобальна зміна клімату та її відгук в динаміці клімату України. Матеріали міжнародної конференції «Інвестиції та зміна клімату: можливості для України, 10–12 липня 2002 р. – К.: Інвестиції з питань зміни клімату. 2002. С. 177-185.
31. Підвищення стійкості до зміни клімату сільськогосподарського сектору Півдня України. Сентендре, Угорщина. Regional environmental center. Жовтень 2015. 73 с.
32. Матишев Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В. Климат и большие экосистемы Арктики Вестник РАН. 2017. Т. 87, №2. С. 110-120.
33. Сергиенко В.И. Выступление на общем собрании РАН (стенограмма). Вестник РАН. 2011. Т.81, № 10. С. 893.
34. Фомин В.М., Молодин В.И., Ерминов В.Д. Междисциплинарные исследования – главный тренд развития науки в России. Вестник РАН. 2015. Т. 85, №11. С. 993-1004.
35. Понтер К. Нищета историцизма. Вопросы философии. 1992. №9. С. 22-48.
36. Харре Р. Социальная эпистемология: передача знаний посредством речи. Вопросы философии. 1992. №9. С. 49–60.
37. Миронов Н. Меры и вызовы глобальной энергетической безопасности. Мировая энергетика. 2007. №4. С. 50-51.

GLOBAL WARMING – PHYSICS AND GEOPOLITICS (Review).

1. Anthropogenic and natural concepts of climate change

Basok B.I.¹, Baseyev Ye.T.¹, Kurayeva I.V.²

¹The Institute of Engineering Thermophysics, 2, Bulakhovskogo, Kyiv, 03164, Ukraine, basok@ittf.kiev.ua

²M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, 34, Prosp. Academician Palladin, Kyiv, 03142, office. igmr@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.5>

Introduction. Global warming and so-called the “greenhouse effect” is one of the most discussed problems of physics and geopolitics, which has caused protest environmental movements in the world.

Problem Statement. Widely discussed are both anthropogenic (the emission of greenhouse gases into the atmosphere) and the natural concepts of global warming with the dramatic effects of climate change on the planet and individual regions.

Purpose. Evaluate the state of the problem, to present the results of research and measures to possible reduction of the greenhouse effect.

Materials and methods. Authoritative literature sources with the analysis of anthropogenic and natural factors of global warming are used, including with the explanation of the physical processes which are shown at solar-geomagnetic activity and other natural phenomena.

Results. The main causes and mechanisms of natural and man-made nature for the actual growth of greenhouse gas emissions and global temperature in the 20th century are identified and their estimates for the period up to 2100 are given.

Conclusions. Most likely, the effect of global warming on the planet's climate is totally due to natural causes of cosmogenic origin and somewhat exacerbated by the effects of industrial development of mankind. For the final solution of this problem it is necessary to fully and adequately conduct more in-depth complex experimental and theoretical-model studies taking into account various factors of geological, climatic, meteorological, thermophysical, astrophysical nature and application of modern methods of mathematical physics, statistics and probability theory. reasonable measures to adapt the economy and life to climate change.

References 37, table 1, figures 3.

Keywords: climate change, global warming, greenhouse gases, anthropogenic and natural concepts.

1. *World energy of the future - time to act.* Documents WEC 2000. World Energy Council. Reference translation. (2000) [in Russian].

2. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4)* URL: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml

3. *Flavin K. et al. (2002). State of the World 2002.* Translated from English: VGO «Ukraine. The Agenda for the 21st Century and the Institute for Sustainable Development». Kyiv, Intelsfera [in Ukrainian].

4. *Tereshin A.G., Klimenko A.V., Klimenko V.V. (2015). The golden age of gas and its impact on global energy, the global carbon cycle and climate.* Thermal Engineering., №5, 3-13 [in Russian].

5. *Demerchyan K.K., Demerchyan K.S., Kondratiev K.Ya. (2001). The growth rate of CO₂ concentration and the refinement of its forecast estimates.* News of the Russian Academy of Sciences. Energy., №1, 3-35 [in Russian].

6. *Eliseev A.V. Global CO₂ cycle.* Eliseev_A_V_theses_26042017. Pdf [in Russian].

7. *Klimenko V.V., Tereshin A.G. (2012). World energy and the global climate in the 21st century in the context of historical trends: The limits of growth. Universal and global history. The evolution of the universe, earth, life, society.* Ed. L.E. Grinin, I.V. Ilyin, A.V. Korotaev. Volgograd: Teacher, 608-621 [in Russian].

8. *Internet resource* URL: <https://www.segodnya.ua/world/wnews/temperatura-na-planete-podnyalas-na-1-1-0s-v-oon-byut-trevogu-1335122.html>

9. *Arzhanov M.M. et al. (2012). Climate change assessment in the Northern Hemisphere in the 21st century under alternative scenarios of anthropogenic impact.* News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean. V. 48. № 6, 643- 654 [in Russian].

10. *Demerchyan K.S., Demerchyan K.K., Danilevich Ya.B., Kondratiev K.Ya. (2002). Global warming, energy and geopolitics.* News of the Russian Academy of Sciences. Energy., №3, 18-46 [in Russian].

11. *Demerchyan K.S., Kondratiev K.Ya. (1999). The scientific validity of forecasts of the impact of energy on climate.* News of the Russian Academy of Sciences. Energy., №6, 3-46 [in Russian].

12. *Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G. (2001). Energy and climate at the turn of the century: forecasts and reality.* Thermal Engineering., №10, 61-66 [in Russian].

13. *Baseyev E.T.* (2003). Kyoto Protocol: obstacles to implementation (to the question of the ambiguity of forecast estimates of changes in the concentration of greenhouse gases in the Earth's atmosphere and an increase in surface temperature. Overview). Proceedings of the International Energy-Ecological Congress "Energy. Ecology. Human". March 27-28, 2003. Kiev, 67-71 [in Russian].
14. *Baseyev E.T., Didenko V.M.* (2001). Greenhouse effect and heat power of Ukraine. Political, economic and environmental problems of energy security and transportation of energy resources in Ukraine. Collection of scientific papers of the international scientific-practical conference. October 24-26, 2000, Kyiv. RVPS of NAS of Ukraine [in Russian].
15. *Monin A.S., Shishkov Yu.A.* (2000). Climate as a problem of physics. Advances in physical sciences. V. 170, № 4, 419-445 [in Russian].
16. *Ivanov V., Boguslavsky S., Sovga O., Zhorov V.* (2004). World Ocean as a stabilizer of the Earth's climate. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine. №3, 32-37 [in Ukrainian].
17. *Losev K.S.* (2009). Paradoxes of the fight against global warming. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 79, №1, 36-40 [in Russian].
18. *Bolshakov V.A., Kapitsa A.P.* (2011). Lessons from the development of the orbital theory of climate. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 81, № 7, 603-612 [in Russian].
19. *Zamolodchikov D.G.* (2013). Natural and anthropogenic concepts of modern warming. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 83, №3, 227-235 [in Russian].
20. *Korablev O.I.* (2016). Mars and Venus: different fates of the planets of the earth group. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 86, № 7, 587-599 [in Russian].
21. *Sorokhtin O.G.* (2006). The evolution of the Earth's climate and the origin of the ice eras. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 76, №8, 699-706 [in Russian].
22. *Shestopalov V.M., Lukin A.E., Zgonnik V.A., Makarenko A.N., Larin N.V., Boguslavsky V.M.* (2018). Essays on the degassing of the Earth. Kyiv [in Russian].
23. *Nikolaev A.V.* (1997). Problems of geotomography. Moscow, 4-38. [in Russian].
24. *Usenko O.V.* (2014). The formation of melts. Geodynamic process and physicochemical interactions. Kyiv, [in Russian].
25. *Avakyan S.V.* (2017). Supramolecular environmental physics: climatic and biophysical effects. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 87, № 5. 456-466 [in Russian].
26. *Bartsev S.I., Belolipetskiy P.V., Degermendzhi A.G.* et al. (2016). A new look at the dynamics of the Earth's climate. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 86, № 3, 244-251 [in Russian].
27. *Karmazinenko S.P., Kuraeva I.V., Samchuk A.I., Voityuk Yu.Yu., Manicheva V.I.* (2014). Heavy metals in environmental components. Mariupol (ecological and geochemical aspects). Kyiv [in Ukrainian].
28. *Vovk V.V., Egorova L.V., Troshichev O.A.* (2008). The relationship of atmospheric characteristics in Antarctica with space weather factors. Geomagnetism and Aeronomy. V. 48, №4, 561-565 [in Russian].
29. *Voloschuk V., Sripnik M.* (1993). Global greenhouse effect and climatic conditions of Ukraine. Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine. №9, 43-46 [in Ukrainian].
30. *Lipinskiy V.M.* (2002). Global climate change and its response in the dynamics of Ukraine's climate. Proceedings of the International Conference "Investment and Climate Change: Opportunities for Ukraine, July 10-12, 2002, Kyiv: Climate Change Investments, 177-185 [in Ukrainian].
31. *Increasing the climate resilience of the agricultural sector of the South of Ukraine.* Szentendre, Hungary. Regional environmental center. October 2015 [in Ukrainian].
32. *Matishev G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V.* (2017). Climate and large ecosystems of the Arctic. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 87, №2. 110-120 [in Russian].
33. *Sergienko V.I.* (2011). Speech at the general meeting of the RAS (transcript). Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 81, № 10, 893 [in Russian].
34. *Fomin V.M., Molodin V.I., Erminov V.D.* (2015). Interdisciplinary research is the main trend in the development of science in Russia. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. V. 85, №11, 993-1004 [in Russian].
35. *Popper K.* (1992). The Poverty of Historicism. Problems of Philosophy. №9, 22-48 [in Russian].
36. *Harre R.* (1992). Social epistemology: knowledge transfer through speech. Problems of Philosophy. №9, 49-60 [in Russian].
37. *Mironov N.* (2007). Measures and challenges of global energy security. World energy. №4, 50-51.

Отримано 07.02.2021
Received 07.02.2021

УДК 620.92

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК КУКУРУДЗИ

Гелетуха Г.Г., канд. техн. наук, Гайдай О.І., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.6>

Виконано енергетичний та екологічний аналіз виробництва теплової енергії з поживних решток кукурудзи. З використанням методики оцінки життєвого циклу розглянуто випадки використання тюків, гранул та брикетів з рослинної біомаси в якості палива в котлі потужністю 500 кВт. Виконано розрахунок коефіцієнту перетворення енергії та скорочення викидів парникових газів.

Выполнен энергетический и экологический анализ производства тепловой энергии с поживных остатков кукурузы. С использованием методики оценки жизненного цикла рассмотрены случаи использования тюков, гранул и брикетов из растительной биомассы в качестве топлива в котле мощностью 500 кВт. Выполнен расчет коэффициента преобразования энергии и сокращения выбросов парниковых газов.

Energy and ecological analysis of thermal energy production from corn residues was performed. Using the life cycle assessment methodology, the cases of using bales, pellets and briquettes from plant biomass as fuel in a boiler with a capacity of 500 kW were considered. The calculation of the energy yield coefficient and greenhouse gas emissions reduction has been performed.

Бібл. 3, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: біомаса, біопаливо, рослинні залишки, кукурудза, енергетичний аналіз, екологічний аналіз, життєвий цикл, скорочення викидів парникових газів, коефіцієнт перетворення енергії.

ПП – побічна продукція;

CED – сукупні витрати енергії;

EYC – коефіцієнт перетворення енергії;

NR – невідновлювана енергія.

Актуальність роботи обумовлена тим, що біомаса, яка виробляється чи використовується в енергетичних цілях, має бути отримана з врахуванням критеріїв сталого розвитку. Для твердої біомаси такі критерії встановлюються в новій редакції Директиви Європарламенту 2018/2001/ЕС щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел. В якості критеріїв сталості розглядаються показники енергетичної та екологічної ефективності впровадження тієї чи іншої технології. Тому **метою даної роботи** є аналіз ефективності впровадження технології виробництва теплової енергії з поживних решток кукурудзи з врахуванням критеріїв сталості, як з сировини, яка володіє значним енергетичним потенціалом в умовах України. **Завданням** роботи є кількісний розрахунок показників енергетичної та екологічної ефективності та порівняння їх зі значеннями які відповідають критеріям сталого розвитку. **Методом дослідження** є аналіз життєвого циклу виробництва теплової енергії з поживних решток кукурудзи.

Методика оцінки енергетичної та екологічної ефективності впровадження біоенергетичних технологій

Об'єктивне порівняння енергетичної ефективності впровадження різних технологій отримання енергії із

біомаси повинно проводитись за методологією оцінки життєвого циклу [1] та з розрахунком балансу між загальним споживанням первинної енергії під час виробництва продукту та сумарним виробництвом енергії як кінцевим продуктом. Методика оцінки енергетичної ефективності, що базується на використанні показника сукупних витрат енергії (CED, CED_{NR}) та коефіцієнту перетворення енергії (EYC, EYC_{NR}), детально описана у роботі [2]. Розраховані з використанням методики оцінки життєвого циклу значення коефіцієнту перетворення енергії для виробництва теплової енергії з поживних решток кукурудзи будуть порівнюватись з наступними значеннями: **згідно рекомендацій міжнародного енергетичного агентства, для досягнення сталого розвитку біоенергетики у майбутньому коефіцієнт перетворення енергії EYC_{NR} для енергоустановок на ВДЕ має складати як мінімум більше 2, ринкове значення – більше 5.**

Директива Європарламенту 2018/2001/ЕС [3] щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел містить методику для розрахунку балансу парникових газів палива, отриманого з біомаси, що використовується для виробництва теплової та електричної енергії та

оохолодження. Згідно запропонованої методики викиди парникових газів розглядаються для таких оди-ночних процесів як: посадка, збір урожаю, поперед-ня підготовка та транспортування біомаси. Також враховуються викиди, що пов'язані із прямими змінами у землекористуванні у випадку, коли такі зміни відбулися після 2008 року. До балансу не включаються викиди від спалювання біомаси як палива та будь-які викиди, що пов'язані з непрямими впливами. На відміну від рідких біопалив методика розрахунку викидів ПГ для біомаси та біогазу включає також фінальний етап їх перетворен-ня в теплову та/чи електричну енергію.

Викиди парникових газів від виробництва твердої та газоподібної біомаси перед її перетворенням у тепло-ву енергію розраховуються за наступною формулою:

$$E = e_{cc} + e_1 + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}, \text{ гСО}_{2\text{ек}}/\text{т}_{\text{біом.}} \quad (1)$$

де E – загальні викиди від виробництва палива до його енергетичного перетворення;

e_{cc} – викиди від збору/посадки сировини для вироб-ництва біопалива;

e_1 – сумарні викиди від зміни вуглецевого запасу спричиненого змінами у землекористуванні;

e_p – викиди від переробки/обробки сировини;

e_{td} – викиди від транспортування біомаси;

e_u – викиди під час використання палива, що явля-ють собою парникові гази під час спалювання біомаси;

e_{sca} – скорочення викидів від акумулювання ву-глецю у ґрунті, що пов'язане з покращенням ведення сільського господарства;

e_{ccs} – скорочення викидів внаслідок уловлювання та геологічного зберігання вуглецю;

e_{ccr} – скорочення викидів внаслідок уловлювання та заміщення вуглецю.

Викиди, що мають місце при виготовленні облад-нання та техніки не враховуються до загального балан-су.

Викиди парникових газів при використанні біопалива для виробництва теплової енергії, включаю-чи етап енергетичного перетворення, розраховується за наступною залежністю:

$$EC_h = E/\eta_h \quad (2)$$

де EC_h – загальні викиди парникових газів при виробництві теплової енергії як кінцевого продукту, $\text{гСО}_{2\text{ек}}/\text{МДж}_{\text{вир.}}$;

η_h – ефективність виробництва теплової енергії, що визначається як відношення теплової енергії, виробленої для забезпечення економічно доцільної потреби в тепловій енергії, до річного споживання палива.

Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії із біопалива розраховується наступним чином:

$$\text{СКОРОЧЕННЯ} = (EC_{F(h)} - EC_h) / EC_{F(h)}, \% \quad (3)$$

де $EC_{F(h)}$ – загальні викиди парникових газів при виробництві теплової енергії;

$EC_{F(h)}$ – загальні викиди ПГ при використанні викопних палив для виробництва теплової енергії.

Вторинна біомаса та відходи лісового та сільського господарства, включаючи гілки та верхів'я дерев, соло-му, жом, лушпиння соняшника, качани, горіхову лушпи-ну та відходи від переробки, включаючи сирий гліцерин, повинні розглядатись як такі, що мають нульовий ба-ланс викидів парникових газів до моменту збору даних видів сировини.

З рекомендаціями, що містяться в Директиві Європарламенту 2018/2001/ЕС при виробництві теплової енергії із біопалива викиди парникових газів ма-ють порівнюватись з наступними показниками викидів від систем на викопних паливах $EC_{F(h)}$: $80 \text{ гСО}_{2\text{ек}}/\text{МДж}_{\text{тепл.ен.}}$. Для біопалив, що використовуються для виробництва теплової енергії, коли може бути продемонстровано пряму фізичну заміну вугілля, для цілей розрахунку, показник $EC_{F(h)}$ повинен становити $124 \text{ гСО}_{2\text{ек}}/\text{МДж}_{\text{тепл.ен.}}$. Аналогічний коефіцієнт при виробництві теплової енергії для умов України не знайдений в офіційних документах. В директиві вказано, що значення показника $EC_{F(h)}$ на рівні $80 \text{ гСО}_{2\text{ек}}/\text{МДж}$ враховує те, що більшість теплової енергії до 2020 року у Європейському союзі виробля-тиметься з природного газу, що є ідентичним також для України. Тому в даній роботі значення викидів парни-кових газів при використанні біомаси для виробництва теплової енергії буде порівнюватись з даною величи-ною.

Біоенергетична технологія може вважатися екологічно доцільною, якщо її впровадження при-зводить до зменшення викидів парникових газів у порівнянні із застосуванням викопного палива. Згідно нових вимог Директиви Європарламенту щодо спри-яння використання ВДЕ зниження викидів парнико-вих газів при використанні біопалива для виробницт-ва електроенергії, теплової енергії та охолодження повинно становити щонайменше 70 % для установок, що починають функціонувати з 1 січня 2021 року до 31 грудня 2025 року, і 80% для установок, що починають функціонувати з 1 січня 2026 року.

Енергетичний аналіз використання пожнивних решок кукурудзи у тюках, гранулах та брикетах для виробництва теплової енергії

Енергетичний та екологічний аналіз використання ПП кукурудзи виконано для трипрохідної системи на базі

прес-підбирача великих прямокутних тюків: зернозбиральний комбайн + трактор з мульчувачем-валкуєтворювачем + трактор з прес-підбирачем великих прямокутних тюків. Збір побічної продукції кукурудзи на зерно з поля повинен відбуватись відразу після збору основного урожаю, щоб не заважати основній діяльності по сівоzmінам. Згідно типових сівоzmін господарств збір відходів з полів може тривати не більше 14 днів. Далі побічна продукція транспортується на основний склад (зберігається весь річний об'єм заготівлі), а потім (у перед опалювальний та опалювальний сезон) – на склад котельні.

Життєвий цикл використання побічної продукції у якості палива у тюках та гранулах/брикетах для виробництва теплової енергії представлено на рисунку 1.

Річне споживання первинної енергії упродовж сировинних циклів ($E_{\text{сир}}$) використання ПП у вигляді тюків, гранул/брикетів описується системами математичних співвідношень (4), де кожне з рівнянь системи відповідає за один з елементарних потоків або операцій, що мають місце під час підготовки біомаси до використання в енергетичних цілях.

Так, для пожнивних решток у вигляді енергетичних тюків річне споживання первинної енергії становить:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{сир}} = \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{\text{вал}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{вал}} \cdot Q_p^H; \\ E_{\text{тук}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{тук}} \cdot Q_p^H; \\ E_{\text{зб}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{зб}} \cdot Q_p^H; \\ E_{\text{ван1}} = 1,25 \cdot V \cdot b_{\text{ван1}} \cdot Q_p^H; \\ E_{\text{тр1}} = V \cdot E_{\text{ткм1}} \cdot n_1; \\ E_{\text{збер1}} = V \cdot e_{\text{а.в.}}; \\ E_{\text{тр2}} = V \cdot E_{\text{ткм2}} \cdot n_2; \\ E_{\text{ван2}} = 2,5 \cdot V \cdot b_{\text{ван2}} \cdot Q_p^H; \\ E_{\text{збер2}} = \frac{16,8 \cdot V \cdot e_{\text{збер.нав.}}}{\tau}; \\ E_{\text{под}} = 3 \cdot e_{\text{под}} \cdot V. \end{array} \right. \quad (4)$$

де $E_{\text{вал}}$, $E_{\text{тук}}$, $E_{\text{зб}}$, $E_{\text{ван1}}$, $E_{\text{тр1}}$, $E_{\text{збер1}}$, $E_{\text{тр2}}$, $E_{\text{ван2}}$, $E_{\text{збер2}}$, $E_{\text{под}}$ – споживання первинної енергії при: валкуванні кукурудзиння на полі; тюкуванні кукурудзиння; під час збору тюків з поля; їх завантаженні на транспортний засіб; транспортуванні тюків на центральний склад;

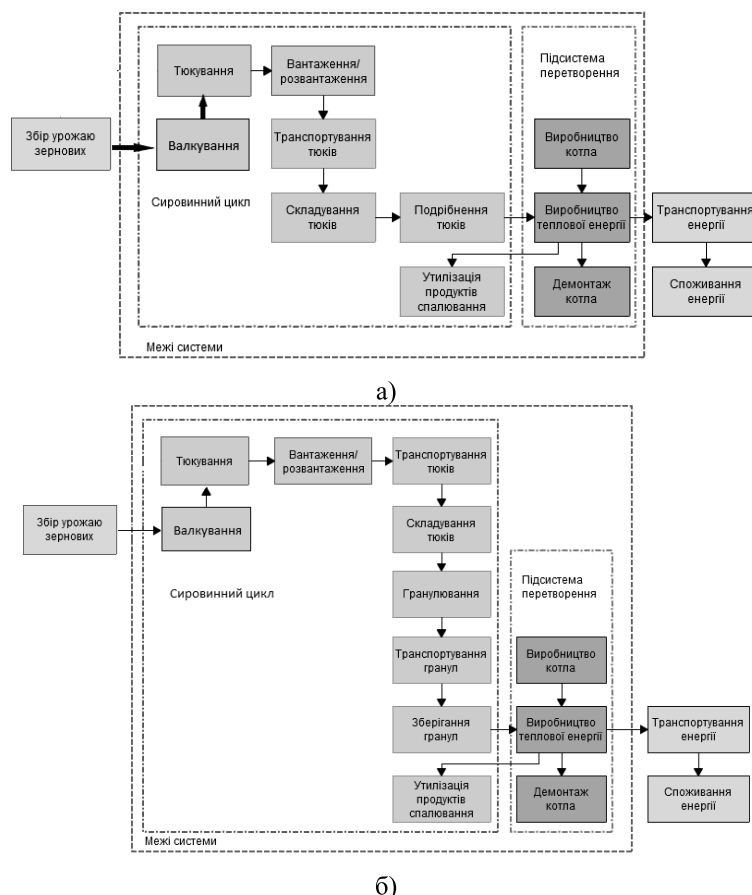


Рис. 1. Схема життєвого циклу використання побічної продукції кукурудзи: а) у тюках, б) у гранулах/брикетах для виробництва теплової енергії

зберіганні тюків на центральному складі під агроволоком; транспортуванні тюків до споживача; операціях з вантаженням тюків на центральному складі та складі котельної; зберіганні тижневого запасу тюків на складі котельної; подрібненні тюків перед подачею в котел, ГДж/рік;

B – річне споживання палива котельною установкою, т/рік; $b_{вал}$, $b_{тук}$, $b_{зб}$, $b_{ван}$ – питомі витрати палива обладнанням, яке використовується для валкування, тюкування, збору та навантаження сировини, л/т; Q_n^p – нижча теплотворна здатність дизельного пального, МДж/л; n_1 – відстань транспортування тюків від місця їх виготовлення до центрального складу, км; n_2 – від центрального складу до котельної, км; τ – навантаження енергетичної установки, год/рік; $E_{т-км}$ – енергоємність транспортної роботи, МДж/т·км; $e_{а.в.}$ – питомі витрати первинної енергії при виробництві агроволока, МДж/т; $e_{збер.нав.}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві складу: енергоємність металічних та бетонних конструкцій, споживання пального та електроенергії при будівництві, МДж/т; $e_{под}$ – питомі витрати електроенергії на подрібнення тюків, МДж/т.

- Для пожнивних решток кукурудзи у вигляді гранул або брикетів річне споживання первинної енергії під час сировинного циклу становить:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{сир} = \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{вал} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{вал} \cdot Q_n^p; \\ E_{тук} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{тук} \cdot Q_n^p; \\ E_{зб} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{зб} \cdot Q_n^p; \\ E_{ван1} = 1,5 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{ван1} \cdot Q_n^p; \\ E_{тр1} = V_{гр/бр} \cdot E_{ткм1} \cdot n_1; \\ E_{збер1} = 1,2 \cdot V_{гр/бр} \cdot e_{а.в.}; \\ E_{ван2} = 3 \cdot V_{гр/бр} \cdot b_{ван2} \cdot Q_n^p; \\ E_{гр/бр} = 3 \cdot V_{гр} \cdot e_{гр/бр}; \\ E_{тр2} = V_{гр/бр} \cdot E_{ткм2} \cdot n_2; \\ E_{збер2} = \frac{72 \cdot V_{гр/бр} \cdot e_{збер2}}{\tau}. \end{array} \right. \quad (5)$$

де $V_{гр/бр}$ – річне споживання гранул/брикетів котельною установкою, т/рік; n_1 – відстань транспортування тюків з кукурудзиння від місця їх збору до місця гранулювання/брикетування, км; n_2 – відстань транспортування біопалива до споживача, км; $e_{збер2}$ – питомі витрати первинної енергії при будівництві бункера для гранул/складу для брикетів (зберігання місячного запасу гранул/брикетів, термін експлуатації споруди 10 років), МДж/т_{гр/бр}; $e_{гр/бр}$ – питомі витрати первинної невідновлюваної енергії на гранулювання/брикетування (витрати електроенергії в технологічному обладнанні), МДж_{пер}/т_{гр/бр}.

Сукупні витрати первинної енергії у підсистемі перетворення визначаються за залежністю:

$$E_{пер} = E_{к/кн} + E_{екс.} + E_{ел.}, \text{ [ГДж/рік]} \quad (6)$$

де E_k – затрати первинної енергії та стадії спорудження та демонтажу установки, ГДж; κ_n – розрахунковий період експлуатації обладнання, років; $E_{екс.}$ – витрати первинної енергії на ремонт та обслуговування котельного обладнання, ГДж/рік; $E_{ел.}$ – власне енергоспоживання, ГДж/рік.

$$\left\{ \begin{array}{l} CED_{NR} = E_{сир} + E_{пер}; \\ E_{сир} = B \cdot \sum_{i=1}^n E_i; \\ E_{пер} = E_{екс.} + E_{ел.} + \kappa_n \cdot E_k; \\ CEP = \sum W_i \cdot \tau_i; \\ ced_{NR} = \frac{CED_{NR}}{CEP}; \\ EYC_{NR} = \frac{CEP}{CED_{NR}}; \\ ced_{NR} < 0,2, EYC_{NR} > 5. \end{array} \right. \quad (7)$$

Розрахунково-методична модель визначення енергетичної ефективності з врахуванням критеріїв сталого розвитку зображується сукупністю співвідношень (7). На основі отриманої розрахунково-методичної моделі та з використанням сукупності рівнянь (4, 5) було проведено дослідження енергетичної ефективності виробництва теплової енергії у котлі потужністю 500 кВт з використанням у якості палива тюків, гранул та брикетів з пожнивних решток кукурудзи.

Отримані значення коефіцієнта перетворення невідновлюваної енергії (табл. 1) при відстані транспортування готового біопалива до 150 км відповідають рекомендованому діапазону значень, та знаходяться в межах 4,62...12,71. Варто зазначити, що у порівнянні з використанням пожнивних решток кукурудзи у тюках енергетичні показники для гранул та брикетів є нижчими. Зниження показників пояснюється великими витратами первинної енергії на гранулювання/брикетування – 55% всіх витрат первинної енергії (при транспортуванні біопалива на відстань 50 км) (рис. 2). Проте, у порівнянні з виробництвом гранул показники енергетичної ефективності для брикетів є кращими, що пов'язано з меншими первинними витратами енергії на брикетування, в порівнянні з гранулюванням, та меншим споживанням енергії на власні потреби котельної установки (паливо завантажується вручну).

З даних на рис. 2 видно, що найбільші витрати первинної енергії викопного палива відбуваються на стадіях заготівлі, попередньої обробки сировини

та транспортуванні готового палива. Також, вагомою складовою є виробництво енергії в котельній установці. Витрати енергії на виготовлення, демонтаж, обслуговування та ремонт котельної установки становлять 2...4% від усіх затрат первинної енергії викопного палива протягом життєвого циклу продукту.

Як видно з залежності, представлені на рис. 3, брикети завжди мають гірші значення питомих при-

ведених сукупних витрат первинної енергії у межах їх рекомендованих значень в порівнянні з тюками, проте дещо кращі значення в порівнянні з гранулами. При відстані транспортування більше 500 км брикети стають кращими ніж тюки з точки зору енергетичної ефективності їх використання для виробництва теплової енергії. В порівнянні з гранулами, брикети завжди мають кращі показники енергетичної ефективності, як в межах допустимих, так і рекомендованих значень.

Таблиця 1. Енергетична ефективність життєвого циклу виробництва теплової енергії з ПП кукурудзи

Показники енергетичної ефективності	Відстань транспортування, км														
	0	10	50	100	150	0	10	50	100	150	0	10	50	100	150
Тюки з ПП кукурудзи					Гранули з ПП кукурудзи					Брикети з ПП кукурудзи					
CED, ГДж/рік	6810	6838	6948	7086	7224	7732	7753	7838	7943	8049	7821	7842	7927	8138	8244
ced	1,33	1,34	1,36	1,39	1,41	1,51	1,52	1,53	1,55	1,57	1,53	1,53	1,55	1,57	1,59
EYC=1/ced	0,75	0,75	0,74	0,72	0,71	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63
CED _{NR} , ГДж/рік	402	430	540	678	816	790	811	896	1002	1107	716	737	822	927	1033
ced _{NR}	0,08	0,08	0,11	0,13	0,16	0,16	0,16	0,18	0,20	0,22	0,14	0,14	0,16	0,18	0,20
EYC _{NR} =1/ced _{NR}	12,71	11,89	9,47	7,54	5,36	6,47	6,30	5,71	5,11	4,62	7,14	6,94	6,22	5,51	4,95



Рис. 2. Розподілення витрат первинної енергії викопного палива (CED_{NR}) за стадіями життєвого циклу виробництва теплової енергії з пожнивних решток кукурудзи

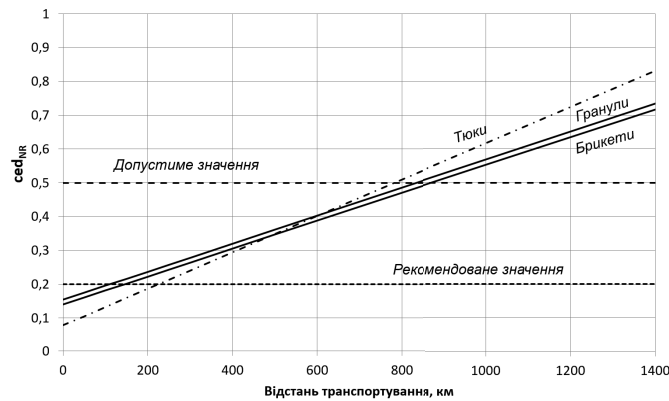


Рис. 3. Залежність $ced_{гр}$ від відстані транспортування поживних решток кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів

Екологічний аналіз використання поживних решток кукурудзи у тюках, гранулах та брикетах для виробництва теплової енергії

Розрахунок скорочення викидів ПГ у роботі виконаний у відповідності до рекомендацій наданих у Директиві Європейського Парламенту та Ради 2018/2001/ЕС щодо сприяння використання відновлюваних джерел енергії з врахуванням особливостей життєвого циклу виробництва теплової енергії з твердого біопалива.

Викиди ПГ від виробництва твердої біомаси перед її перетворенням у теплову енергію (ε) для різних видів твердого біопалива, що розглядаються у роботі, становлять:

Для тюків з поживних решток кукурудзи:

$$\varepsilon = K_{в.д.} \cdot Q_n^p \cdot (b_{вал} + b_{тук} + b_{зб} + b_{зав1} + b_{тр1} + b_{зав2} + b_{тр2}) + K_{в.ел.} \cdot (b_{под} + b_{кот}), \text{ гСО}_{2-скв.}/\text{т} \quad (8)$$

де $b_{вал}$; $b_{тук}$; $b_{зб}$; $b_{тр1}$; $b_{зав1}$; $b_{тр2}$; $b_{зав2}$ - витрати дизельного пального обладнанням, що здійснює валкування, тюкування, збір, перевезення та завантаження поживних решток, л/т; Q_n^p - нижча теплота згорання дизельного пального, МДж/л; $K_{в.д.}$ - коефіцієнт викидів парникових газів при використанні дизельного пального 74,1 т/ТДж; $K_{в.ел.}$ - питомі викиди двооксиду вуглецю при використанні електричної енергії споживачами, які віднесені до 2 класу споживачів 1,227 кг $\text{CO}_{2-скв.}/\text{кВт}\cdot\text{год}$; $b_{под}$, $b_{кот}$ - споживання електричної енергії подрібнювачем тюків та котельною установкою, кВт·год/т.

Для гранул/брикетів з поживних решток кукурудзи:

$$\varepsilon = K_{в.д.} \cdot Q_n^p \cdot (b_{вал} + b_{тук} + b_{зб} + b_{тр1} + b_{ван} + b_{тр2}) + K_{в.ел.} \cdot (b_{кот} + b_{гр/бр}), \text{ гСО}_{2-скв.}/\text{тбіом} \quad (9)$$

де, $b_{гр/бр}$ - питомі витрати електроенергії на гранулювання/брикетування, кВт·год/т.

Скорочення викидів ПГ при виробництві теплової енергії із біомаси виражається у процентному

співвідношенні у порівнянні з загальними викидами ПГ при використанні викопних палив для виробництва теплової енергії, які, згідно рекомендацій Європейської комісії приймаються на рівні 80 $\text{гСО}_{2-скв.}/\text{МДж}_{вир}$.

На основі аналізу співвідношень (1-3, 8-9) та з врахуванням всього життєвого циклу виробництва теплової енергії розроблено розрахунково-методичну модель оцінки потенціалу скорочення викидів парникових газів:

$$\begin{cases} \varepsilon = K_{в.д.} \cdot \Sigma E_{диз.} + K_{в.ел.} \cdot \Sigma E_{ел.}; \\ EC_h = \frac{\varepsilon \cdot B}{Q_1}; \\ \Delta \varepsilon = \frac{EC_{Fh} - EC_h}{EC_{Fh}}; \\ \Delta \varepsilon > 70\%. \end{cases} \quad (10)$$

На рис. 4 наведено порівняння питомих викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з поживних решток кукурудзи у вигляді великих тюків, гранул та брикетів. Видно, що на етапі перевезення гранульованої та брикетованої біомаси відбуваються дещо нижчі викиди парникових газів у порівнянні з перевезенням тюків. Проте додатковий етап гранулювання та брикетування, під час якого споживається електрична енергія, призводить до значного підвищення питомих викидів парникових газів протягом життєвого циклу використання поживних решток кукурудзи для виробництва енергії.

Виробництво теплової енергії з твердого біопалива в котлі потужністю 500 кВт забезпечує значне скорочення викидів парникових газів при використанні біопалива з поживних решток кукурудзи у вигляді тюків на 83...91 %; гранул на 73...79%; брикетів на 75...81% в залежності від відстані транспортування біопалива (табл. 5).

Скорочення викидів парникових газів при використанні поживних решток кукурудзи у вигляді гранул

є дещо нижчим в порівнянні з використанням тюків, що пояснюється додатковими викидами на етапі гранулювання. Проте, їх значення цілком задовольняє вимогам сталості, що розглядаються в даній роботі. Скорочення викидів парникових газів при використанні поживних решток кукурудзи у вигляді брикетів є дещо нижчим в порівнянні з використанням тюків, та вищим ніж в випадку виробництва та використання гранул.

Висновки

Виконано порівняння енергетичної ефективності та скорочення викидів парникових газів при використанні ПП кукурудзи у вигляді тюків, гранул та брикетів для виробництва теплової енергії. Отримано такі основні результати:

- Коефіцієнт перетворення енергії (невідновлюваної), що відповідає життєвому циклу використання ПП кукурудзи в якості палива для виробництва теплової енергії, знаходиться в діапазоні: 5,4...12,7 – для великих тюків; 4,6...6,5 – для гранул та 4,9...7,1 – для брикетів (при відстані транспортування готового палива до 150 км).

- Використання ПП кукурудзи у вигляді великих тюків при відстані транспортування сировини до 50 км забезпечує зниження споживання первинної енергії викопного палива у 10 та більше разів. Використання гранул та брикетів зменшує споживання первинної енергії викопного палива у понад 5 разів.

- Питомі викиди парникових газів при спалюванні біомаси для виробництва теплової енергії знаходяться в діапазоні 10...20 г CO_{2-екв.}/МДж, що у 6...17 раз менше в порівнянні з використанням природного газу. Скорочення викидів парникових газів при використанні поживних решток у тюках в якості палива становить 82...91 %; у гранулах 73...79 %; у брикетах 75...81 % за умови транспортування біомаси на відстані, рекомендовані для забезпечення сталого розвитку за енергетичними показниками (до 150 км).

- Гранулювання та брикетування поживних решток кукурудзи доцільне лише у межах допустимих значень показників енергетичної ефективності та у випадку необхідності їх транспортування на відстань більше 500...600 км у порівнянні з тюками.

ЛІТЕРАТУРА

1. *International Organization for Standardization.* (1997). *Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework* (Vol. 14040). ISO.

2. *Гелетуша Г.Г., Желєзна Т.А., Дроздова О.І.* Комплексний аналіз технологій виробництва енергії з біомаси // *Промислова теплотехніка.* – 2012, т. 34, No 1, с.87–95.

3. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC

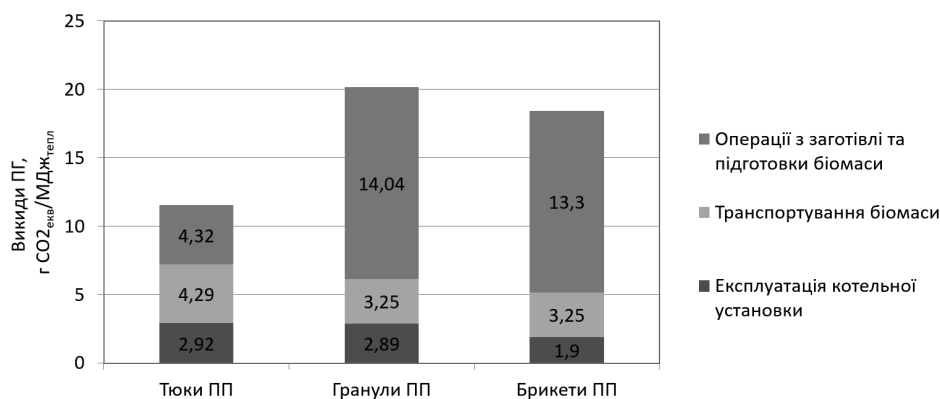


Рис. 4. Питомі викиди парникових газів протягом життєвого циклу використання поживних решток для виробництва теплової енергії

Таблиця 2. Скорочення викидів парникових газів при виробництві теплової енергії з поживних решток кукурудзи

Вид біопалива	Скорочення викидів ПГ, %			
	Відстань транспортування, км			
	0	50	100	150
Тюки	90,95	88,27	85,60	82,92
Гранули	79,32	77,34	75,36	73,37
Брикети	81,00	78,97	76,94	74,91

ENERGY AND ECOLOGICAL ANALYSIS OF THE LIFE CYCLE OF ENERGY USE OF MAIZE CROP RESIDUES

Geletukha G.G., Haidai O.I.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.6>

Maize crop residues have significant energy potential in Ukraine. The purpose of this work is to analyze the energy and environmental efficiency of thermal energy production from corn residues, taking into account the sustainability criteria. The task of the work is to quantitatively calculate energy and environmental efficiency indicators and compare them with values that meet the criteria of sustainable development. Using the life cycle assessment methodology, the cases of using bales, pellets and briquettes from plant biomass as fuel in a boiler with a capacity of 500 kW were considered. The calculation of the energy conversion factor and reduction of greenhouse gas emissions has been performed. It is shown that at distances of transportation of finished biofuel not exceeding 150 km, energy indicators (energy yield coefficient, specific cumulative energy demand) are within the recommended values corresponding to sustainable development. The distribution of primary energy consumption of fossil fuels by stages of the life cycle of thermal energy production from maize crop residues is

shown. Reductions of greenhouse gas emissions from the introduction of heat production technologies from maize crop residues meet the new requirements of the European Parliament and of the Council Directive on the promotion of the use of energy from renewable sources on the use of renewable energy sources. It is shown that in general the production of pellets and briquettes from corn residues is energetically inexpedient when transporting biomass at a distance that meets the criteria of sustainable development.

References 3, tables 2, figures 4.

Keywords: biomass, biofuels, crop residues, maize, energy analysis, ecological analysis, life cycle, reduction of greenhouse gas emissions, energy conversion factor.

1. *International Organization for Standardization*. (1997). *Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework* (Vol. 14040). ISO.

2. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drozdova O.I.* Kompleksnyi analiz tekhnologii vyrobnytstva enerhii z biomasy [Complex analysis of bioenergy technologies], *Promyshliennaia tieplotiekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2012, V. 34, № 1, P. 87-95. (Ukr.)

3. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC

Отримано 16.01.2021

Received 16.01.2021

УДК 620.92

ОГЛЯД АКТУАЛЬНИХ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В СЕКТОРІ БІОЕНЕРГЕТИКИ МІЖНАРОДНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО АГЕНТСТВА

Желєзна Т.А., канд. техн. наук, Баштовий А.І., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.7>

Проаналізовано актуальні теми досліджень в секторі біоенергетики, що виконуються експертами Міжнародного Енергетичного Агентства. Представлено рекомендації для України щодо подальших напрямків наукової і практичної діяльності для розвитку біоенергетичного сектору.

Проанализированы актуальные темы исследований в секторе биоэнергетики, проводимые экспертами Международного Энергетического Агентства. Представлены рекомендации для Украины по дальнейшим направлениям научной и практической деятельности для развития биоэнергетического сектора.

The current directions of research in the bioenergy sector performed by experts of the International Energy Agency are analyzed. Recommendations for Ukraine on further areas of scientific and practical activities for the development of the bioenergy sector are presented.

Бібл. 15, табл. 3.

Ключові слова: біоенергетика, біомаса, біопаливо, біоетанол, біонафта, газифікація.

ГГ – генераторний газ;
ГТУ – газотурбінна установка;
ЗТ – «зелений» тариф;
МЕА – Міжнародне Енергетичне Агентство;
ОЕЗ – олійноекстракційний завод;
ОЖЦ – оцінка життєвого циклу;
ПГ – парникові гази;
ПГУ – парогазова установка;
ТЕС – теплова електростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;
ТПВ – тверді побутові відходи;
ORC – органічний цикл Ренкіна;
е/е – електроенергія.

Індекси нижні:

екв. – еквівалент;
ел – електричний;
т – тепловий.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю скорочення споживання викопних палив і зменшення викидів парникових газів за рахунок переходу на відновлювані джерела енергії, зокрема біомасу. Метою роботи є визначення перспективних напрямків досліджень в біоенергетиці для розширення потенційних видів технологій і секторів для впровадження біоенергетичних проєктів в Україні. Методи дослідження включають вивчення літературних, статистичних та інших даних, аналіз нормативно-правових актів.

Програма спільних досліджень «Біоенергетика» Міжнародного Енергетичного Агентства

Програма досліджень «Біоенергетика» МЕА (IEA Bioenergy) є платформою, що з 1978 року об'єднує і координує діяльність Міжнародного Енергетичного Агентства та провідних світових експертів для вивчення актуальних проблем розвитку біоенергетичного сектору в рамках визначених завдань [1]. Особлива увага

приділяється питанням сталого розвитку, зменшення викидів парникових газів і протидії зміні клімату. Кожне із завдань Програми виконується протягом трьох років у відповідності із планом пріоритетних напрямків досліджень. За результатами виконання робіт готуються звіти, проводяться семінари, розробляються рекомендації для подальшого розвитку відповідного напрямку. Після цього приймаються плани нових тем досліджень для кожного завдання на наступні три роки.

Протягом поточного періоду 2019-2021 рр. дослідження проводяться в рамках 11 завдань, у томі числі таких як «Спалювання біомаси» (завдання 32), «Газифікація біомаси і відходів» (завдання 33), «Підвищення матеріальної та енергетичної цінності відходів в рамках циркулярної економіки» (завдання 36), «Комерціалізація моторних біопалив I і II покоління» (завдання 39), «Комплексна переробка біомаси і циркулярна економіка» (завдання 42), «Інтеграція сталого постачання біопалив в біоекономіку» (завдання 43),

«Біоенергетика та пов'язані з нею питання клімату і сталості в контексті біоекономіки» (завдання 45) та ін. [2]. Крім того, виконуються п'ять спецпроектів за наступними темами: отримання високотемпературних теплоносіїв з біомаси у промисловості; сталий розвиток ринку відновлюваних газів; відновлюваний водень в мережі; внесок моторних біопалив II покоління до декарбонізації сектору транспорту до 2030 року і пізніше; роль біоенергетики в утриманні росту середньорічної температури на планеті в межах менше 2 °С.

На сьогодні в рамках Програми досліджень «Біоенергетика» МЕА вже закінчено роботи по 5 завданням і 12 спецпроектів, в яких детально розглянуто соціально-економічні чинники для впровадження біоенергетичних проєктів, техніко-економічне обґрунтування біоенергетичних проєктів, плантації енергетичних рослин зі швидким обігом, деревне біопаливо і сталість лісового господарства та інші питання [3]. Нижче представлено поточні результати виконання деяких завдань IEA Bioenergy, які можуть бути корисними для розвитку біоенергетики України.

Аналіз життєвого циклу виробництва біоетанолу другого покоління

Рідкі біопалива II покоління, отримані з лігноцелюлозної сировини, мають низку переваг над біопаливами I покоління. Основними з них є відсутність конкуренції за сировину з виробництвом продуктів харчування і зменшений вплив на зміну клімату через більше скорочення викидів парникових газів при отриманні цих біопалив. Величину скорочення емісії парникових газів можна визначити в рамках аналізу життєвого циклу виробництва певного виду біопалива. Хоча принципова методика ОЖЦ є єдиною, існують різні моделі її практичного втілення, які на виході можуть давати неоднакові результати. Тому важливим є розуміння особливостей кожної з моделей для можливості вибору

найбільш оптимальної для конкретних умов оцінки.

В роботі [4] (завдання 39 IEA Bioenergy) проведено порівняльний аналіз чотирьох моделей ОЖЦ виробництва біоетанолу II покоління з точки зору розрахунку викидів парникових газів: GHGenius (Канада), GREET (США), New EC (ЄС) і VSB (Бразилія). Всі ці моделі, окрім VSB, є доступними для загального користування.

Результати розрахунку емісії ПГ за вказаними моделями ОЖЦ представлено в табл. 1. Для випадку виробництва біоетанолу з соломи пшениці модель GHGenius показує вищий результат (18,53 г CO_{2-екв.}/МДж біоетанолу), ніж модель New EC (13,68 г CO_{2-екв.}/МДж). Це пояснюється врахуванням заміщення NPK (азот, фосфор, калій), пов'язаного із видаленням соломи з поля, а також більшими прийнятими значеннями енерговитрат при виробництві біопалива. Для варіанту отримання біоетанолу з кукурудзиння і лісових відходів модель GHGenius також дає вищі результати у порівнянні з іншими. Причиною є використання більших значень енерговитрат для виробництва біопалива, меншим перекладанням частини загальних викидів ПГ з основного продукту (біоетанолу) на побічні продукти, а також відсутністю врахування уникнення емісії N₂O і NO_x через вилучення кукурудзиння і емісії ПГ, пов'язаної зі зміною землекористування. Загалом, в роботі [4] зроблено висновок про можливість гармонізації моделей, в яких використовуються однакові види сировини, шляхом узгодження лише кількох параметрів та операцій.

Для України являє інтерес застосування моделей ОЖЦ виробництва біоетанолу II покоління, в яких використовуються види сировини, потенціал яких є найбільшим в країні. Це моделі GHGenius і GREET для кукурудзиння, а також GHGenius і New EC для соломи пшениці. Наразі в Україні виробництво рідких моторних біопалив II покоління відсутнє, але цей напрямок буде розвиватися через необхідність виконання вимог

Табл. 1. Питомі викиди парникових газів при виробництві біоетанолу II покоління, г CO_{2-екв.}/МДж біоетанолу [4]

Вид сировини	Модель оцінки життєвого циклу			
	GHGenius	GREET	New EC	VSB
Солома пшениці	18,53	–	13,68	–
Побічна продукція виробництва кукурудзи на зерно (кукурудзиння)	22,92	7,32	–	–
Солома цукрової тростини	–	–	–	7,18
Деревні відходи лісового походження	11,42	7,07	–	9,88
Цукрова тростина*	–	–	–	19,45

* Передбачено виробництво біоетанолу II покоління з соломи цукрової тростини, інтегроване у виробництво біоетанолу I покоління з цукрової тростини.

Директиви ЄС RED I, а в перспективі – RED II [5]. В Верховній Раді України розглядається проєкт Закону «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» (№ 3356 від 17.04.2020) [6]. Законопроєкт встановлює обов'язкову частку рідкого біопалива (біокомпонентів) в обсягах бензинів автомобільних і визначає критерії сталості виробництва рідкого біопалива. Нажаль серед цих критеріїв відсутня вимога по обсягу скорочення викидів CO_2 , хоча вона повинна бути згідно вимог Директив ЄС RED I і RED II.

Перспективи розвитку і комерціалізації технологій газифікації біомаси та відходів

Термохімічна газифікація являє собою процес часткового окислення вуглецевмісної сировини з отриманням газоподібного енергоносія. В якості окисника можуть використовуватися повітря, кисень, пара або суміші цих речовин. Газоподібний продукт має багато напрямків використання – від виробництва теплової і електричної енергії до отримання моторних палив та хімічних речовин. Залежно від технології газифікації, що застосовується, отримують генераторний газ, що містить широкий спектр вуглеводнів, або синтез-газ, який складається, в основному, з CO і H_2 . Вибір технології газифікації залежить, головним чином, від виду та обсягу наявної сировини, а також напрямку застосування отриманого газоподібного продукту. Так, технологія газифікації у щільному шарі сировини з низхідним рухом газу найбільш придатна для подальшого виробництва електроенергії в установках невеликої потужності. Газифікація у щільному шарі сировини з висхідним рухом газу рекомендується для подальшого виробництва теплової енергії в установках невеликої і середньої потужності. Технологія газифікації в киплячому шарі і в потоці широко використовується на великих ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією біомаси. В газифікаторах зі щільним шаром може застосовуватися сировина з крупними частинками, тоді як при газифікації в потоці частинки сировини повинні бути дуже маленькими [2].

В рамках завдання 33, експерти Програми досліджень «Біоенергетика» МЕА відслідковують стан розвитку технологій газифікації біомаси та відходів у світі, аналізують потенціал розвитку та комерціалізації цих технологій. Результати дослідження свідчать про кілька сталих тенденцій в даній сфері. По-перше, відбувається розширення сировинної бази. Якщо раніше в якості сировини для газифікації зазвичай використовувалася лише чиста деревна біомаса, то зараз все

більше застосовуються різні види відходів, наприклад, ТПВ, осад стічних вод. По-друге, розширюється сфера використання газоподібного продукту. Традиційне виробництво тепла і електроенергії доповнюється отриманням газоподібних та рідких біопалив, а також сумісним спалюванням з викопними паливами. По-третє, активно розвиваються ідеї впровадження гібридних систем, де газифікація біомаси реалізується разом з іншими технологіями відновлюваної енергетики. Прикладом такої системи є електроліз з використанням «зеленої» електроенергії від вітрових або сонячних електростанцій для отримання водню, який, в свою чергу, застосовується в технології газифікації для підвищення виходу моторних біопалив. Крім того, динамічно росте кількість працюючих невеликих установок термохімічної газифікації біомаси (наразі в світі їх налічується більше 1500), тоді як кілька великих установок було нещодавно зупинено через економічні причини (табл. 2) [7].

Наразі найбільш розповсюдженим напрямком залишається виробництво теплової і електричної енергії з генераторного газу. Але потенціал подальшого розвитку і комерціалізації технологій газифікації біомаси полягає в отриманні синтез-газу, його очищенні і виробництві біометану та рідких біопалив II покоління (наприклад, рідини Фішера-Тропша) (табл. 3). Даний напрямок є перспективним для України з точки зору можливості заміщення природного газу і нафтових моторних палив.

Використання технологічної пари з біомаси у промисловості

Промисловість є одним з секторів, де є великий потенціал для декарбонізації шляхом переходу на відновлювані джерела енергії, зокрема, біомасу. Зазвичай, біоенергетичні проєкти успішно реалізуються на підприємствах, забезпечених власною біомасовою сировиною, яка є побічним продуктом основного виробництва. Прикладами таких підприємств є олійноекстракційні заводи (лушпиння соняшника), цукрові заводи (жом цукрового буряку), деревообробні підприємства (відходи деревини) тощо. В рамках завдання 32 експертами платформи «Біоенергетика» МЕА досліджено можливі шляхи переходу з викопних палив на біопалива на промислових підприємствах, не забезпечених власною біомасовою сировиною, або таких, що мають лише відходи, важко придатні для енергетичного використання. Зокрема, розглянуто випадок, коли для виробничого процесу необхідна технологічна пара. Проаналізовано успішні приклади європейських проєктів по застосуванню технологічної пари з біомаси на підприємстві

Табл. 2. Установки газифікації біомаси з двома киплячими шарами [7]

Місце розташування	Використання ГГ	Потужність	Рік запуску	Постачальник обладнання	Статус установки
Гюссінг (Австрія)	Газовий двигун	8 МВт (по сировині – деревна тріска) 2 МВт _{ел.}	2002	AE&E, Repotec	Зупинена у 2016 р. через закінчення дії ЗТ на е/е
Оберварт (Австрія)	Газовий двигун / ORC / H ₂	8,5 МВт (по сировині) 2,8 МВт _{ел.}	2008	Ortner Anlagenbau	Зупинена у 2015 р.
Зенден / Ульм (Німеччина)	Газовий двигун / ORC	14 МВт (по сировині) 5 МВт _{ел.}	2011	Repotec	Тимчасово зупинена у 2019 р.
Бургелс (Італія)	Газовий двигун	2 МВт (по сировині) 0,5 МВт _{ел.}	2012	Repotec, RevoGas	Діюча
Гетеборг (Швеція)	Виробництво біометану з синтезгазу	32 МВт (по сировині: деревні відходи) 20 МВт (по біометану)	2013	Repotec / Valmet	Зупинена у 2018 р.
Каліфорнія (США)	Дослідна установка	1 МВт (по сировині)	2013	GREG	Діюча
Гая / Ліон (Франція)	Виробництво біометану з синтезгазу (дослідна установка)	0,5 МВт (по сировині: деревна біомаса)	2016 (побудовано)	Repotec	Тестування, підготовка до запуску
Нонгбуа (Тайланд)	Газовий двигун	4 МВт (по сировині: деревна тріска, стрижні кукурудзи) 1 МВт _{ел.}	2018	GRETHA	Діюча

Табл. 3. Реалізовані та поточні проекти по виробництву біометану і рідини Фішера-Тропша з використанням синтез-газу [2, 8]

Назва (розташування) / статус	Сировина	Кінцевий продукт	Технологія / постачальник
BioTFuel (Дюнкерк, Франція) / Демонстраційна установка, плановий запуск у 2021 р.	торефікована біомаса (солома, лісові відходи, енергетичні рослини)	рідина Фішера-Тропша	Газифікація в потоці під тиском (PRENFLO) / Thyssen Krupp
Fulcrum Bioenergy (Невада, США) / Комерційна установка, плановий запуск у 2021 р.	ТПВ	рідина Фішера-Тропша	Непряма газифікація в киплячому шарі / TRI
Red Rock Bio (Орегон, США) / Комерційна установка, плановий запуск у 2021 р.	деревні відходи лісового походження	рідина Фішера-Тропша	Паровий реформінг / TCG Global
GoGreenGas (Свіндон, Об'єднане Королівство) / Діюча комерційна установка з 2019 р.	ТПВ	біометан	Киплячий шар і плазмовий конвертер / APP

по виробництву картопляних продуктів, молокозаводі, паперовій фабриці та фабриці по виготовленню картонних виробів.

Підприємство РЕКА Kroef (Нідерланди) використовує насичену пару для обробки сирової картоплі при виробництві різних видів напівфабрикатів. З 2015 року базова потреба у парі (10,2 т/год, 20 бар, 215 °C) забезпечується паровим котлом Vyncke 10 МВт з похило-перештовхувальною решіткою, який працює на суміші місцевих палив – низькоякісної деревної тріски (50%) і відходів компостування (50%). Котельня установка, що належить регіональній компанії по переробці відходів від догляду за зеленими насадженнями, обладнана конденсатором і сучасною системою очищення димових газів. Для зменшення емісії NO_x застосовується вибіркова некаталітична редукція (SNCR) та вибіркова каталітична редукція (SCR). Крім того, система очищення димових газів включає циклон, тканинний фільтр і пристрій для вприскування бікарбонатів. Незважаючи на високі капітальні витрати, робота котельної установки виявилася економічно доцільною через повну завантаженість протягом року і використання дешевої місцевої біомаси (обсягом близько 27 тис. т/рік). За рахунок генерації пари з біомаси, економія природного газу складає 8,2 млн м^3 /рік, а зниження викидів CO_2 – 14,5 тис. т/рік. Основні характеристики даного проєкту (потужність, вид біопалива, вид споживача технологічної пари) є типовими, що забезпечує можливість його успішної реплікації в інших країнах Європи [9].

На молокозаводі FrieslandCampina (Нідерланди) пара застосовується для сушки молочного порошку. Пара (40 т/год, 20 бар) продукується паровим котлом Stork Thermeq потужністю 29 МВт, в якому реалізовано сумісне спалювання піролізної рідини (70% по теплоті згорання) і природного газу (30%) [10]. Піролізна рідина, або біонафта, є рідким продуктом процесу швидкого піролізу деревної біомаси, втіленого компанією BTG Bioliquids / Emurgo BV на установці 25 МВт у м. Генгело за 30 км від молокозаводу. Біонафта транспортується до споживача автоцистернами; на території молокозаводу розташовано сховище об'ємом 100 м^3 . Котел із сумісним спалюванням біопалива і природного газу працює з кінця 2015 року, в результаті чого загальне скорочення споживання природного газу вже досягло близько 30 млн м^3 , а зменшення емісії CO_2 – 60 тис. т. Для FrieslandCampina рушійною силою для використання біонафти став намір зменшити свій «вуглецевий» слід. Це рішення було прийнято в період заміни старого парового котла на при-

родному газі. Енергетична щільність піролізної рідини є набагато вищою порівняно з вихідною сировиною (біомасою), що дає їй перевагу при транспортуванні і зберіганні. Цей фактор є важливим для підприємства-споживача, розташованого в центрі селища [11].

Паперова фабрика Nordic Paper (Швеція) збудувала і у 2010 році запустила власну ТЕЦ потужністю 23 МВт_т + 3 МВт_{ел} на твердих побутових відходах. ТПВ постачаються з сусідніх муніципалітетів Швеції (60%) і Норвегії (40%), кордон з якою знаходиться на відстані лише 23 км. Перед доставкою ТПВ сортуються із видаленням металу, скла, пластику і паперу. Сховище на території ТЕЦ дає можливість зберігати 1600 т відходів, що забезпечує повних 7 днів роботи установки. Вироблена пара (6 бар, 180 °C) використовується для сушки паперу на фабриці, а 5% загального обсягу – для забезпечення централізованого тепlopостачання сусіднього селища. Електроенергія обсягом 20 ГВт·год/рік споживається на власні потреби підприємства Nordic Paper. Тверді побутові відходи як паливо були вибрані з економічних міркувань – їх застосування на ТЕЦ із «вхідною» платою (gate fee) близько 50 євро/т дало можливість повністю замінити мазут і вдвічі скоротити покупку дорогої електроенергії з мережі. Подова зола з ТЕЦ утилізується як будівельний матеріал на полігонах ТПВ, а летка зола транспортується до Норвегії для використання в процесі нейтралізації промислових кислотних відходів [12].

На фабриці Eska по виготовленню картонних виробів (Нідерланди) великі обсяги технологічної пари застосовуються в процесах сушки. Для забезпечення енергетичних потреб підприємства було споруджено ГТУ, що складається з газифікатора з циркулюючим киплячим шаром, газової турбіни і котла-утилізатора. ГТУ виробляє пару високого тиску і електроенергію з RDF – паперових відходів із включеннями пластику. Газифікатор є гнучким щодо якості палива (вологість, зольність, вміст пластику у відходах) і забезпечує низький рівень емісії твердих частинок ($< 5 \text{ мг/нм}^3$ при 6% O_2) та NO_x ($< 150 \text{ мг/нм}^3$). Утилізація паперових відходів фабрики для виробництва енергії дозволила на 30% зменшити споживання природного газу, на 20% – загальне споживання первинної енергії, на 80% – обсяг відходів для вивезення з території підприємства, на 20% – загальну емісію CO_2 від діяльності фабрики. Подова зола від роботи газифікатора використовується у цементній промисловості, а летка зола застосовується як покривний матеріал при захороненні небезпечних відходів [13].

Рекомендації для України

Результати практично всіх досліджень програми «Біоенергетика» МЕА, включаючи представлені вище, є важливими і актуальними для України. Вони дозволяють розширити види технологій та секторів для потенційного впровадження біоенергетичних проєктів, а також показують перспективні напрямки для науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт. Так, наприклад, в Україні вже досягнуто певних результатів в дослідженні технологій газифікації та швидкого піролізу біомаси [14, 15], і висновки робіт експертів «Біоенергетика» МЕА свідчать про доцільність продовження наукової і практичної діяльності в цих напрямках.

Розглянуті приклади європейських проєктів по виробництву і використанню технологічної пари з біомаси є актуальними для України, оскільки в країні працює велика кількість промислових підприємств аналогічного виду, і є значний потенціал різних видів біомаси, доступний для потреб енергетики. На сьогодні в Україні вже реалізовано багато біоенергетичних проєктів у секторі промисловості, зокрема, на олійноекстракційних заводах, цукрових заводах, підприємствах деревообробної промисловості. Прикладами таких успішних проєктів є ТЕЦ 1,7 МВт_{ел} + 33,6 МВт_т на лушпинні соняшнику на Кропивницькому ОЕЗ (2006 р.), БГУ 3 МВт_{ел} на жомі цукрового буряку на Юзефо-Миколаївському цукровому заводі (Вінницька обл., 2019 р.), ТЕЦ 2,2 МВт_{ел} на деревній трісці та відходах на меблевій фабриці «Мебель-Сервіс» (Львівська обл., 2018 р.), котельня 4 МВт на деревних відходах на меблевій фабриці «Ламелла» (Закарпатська обл., 2002 р.) і багато інших. Влітку 2020 року було запущено найбільшу в Україні ТЕС на біомасі потужністю 16 МВт_{ел}. Ця ТЕС «Аякс-Дніпро» на лушпинні соняшнику розташована біля ОЕЗ «Потоки» (м. Дніпро, 2020 р.). Яскравим прикладом успішного біоенергетичного проєкту також є біогазова установка 15,6 МВт_{ел} на Теофіпольському цукровому заводі, основною сировиною для якої є жом цукрового буряку. Перша черга установки 5,1 МВт_{ел} запущена у 2017 р., а друга (10,5 МВт_{ел}) розпочала роботу у 2018 р.

Всі наведені приклади в Україні відносяться до випадку використання власної біомасової сировини для виробництва енергії. Але існує багато промислових підприємств, не забезпечених власною біомасою, які хотіли б зменшити свій «вуглецевий» слід і перейти на використання відновлюваних джерел енергії. Технічні та організаційні рішення по залученню біомаси для енергетичних потреб, представлені в результатах

дослідження експертів «Біоенергетика» МЕА в рамках спецпроєкту «Отримання високотемпературних теплоносіїв з біомаси у промисловості» [9, 11-13], можуть стати в нагоді цим підприємствам.

Висновки

Платформа «Біоенергетика» МЕА координує діяльність Міжнародного Енергетичного Агентства та провідних світових експертів в секторі біоенергетики для вивчення нагальних проблем та перспектив розвитку сектору. Результати проведених досліджень є актуальними для України з точки зору можливого розширення видів технологій та секторів для впровадження біоенергетичних проєктів, а також напрямків для подальших науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт.

ЛІТЕРАТУРА:

1. C. Philibert. International energy technology collaboration and climate change mitigation. IEA, 2004
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.7418&rep=rep1&type=pdf>
2. Annual Report 2019. IEA Bioenergy, 2020
<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/05/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2019-Rev-26-May-2020.pdf>
3. Annual Report 2009. IEA Bioenergy, 2010
<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/IEA-Bioenergy-2009-Annual-Report.pdf>
4. A. Bonomi, O. Cavalett, B. C. Klein et al. Technical Report. Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools Phase 2, Part 2: biochemical 2G ethanol production and distribution, 2019
<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/11/Task-39-Phase-2.2-Ethanol-2G-Comparison-of-Biofuel-Life-Cycle-Analysis-Tools.pdf>
5. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Драгнев С.В., Баитовий А.І. Основні тенденції та перспективи розвитку ринку моторних біопалив в ЄС та в Україні // Теплофізика та теплоенергетика. – 2020, т. 42, № 1, с. 69-76. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2020.5>
6. Проєкт Закону «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» (№ 3356 від 17.04.2020)
http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=68617
7. J. Hrbek. Status report on thermal gasification of biomass and waste 2019. IEA Bioenergy Task 33 special report, 2019 <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-2019-status-report-on-thermal-gasification-of-biomass-and-waste/>

8. *M. Materazzi, R. Taylor*. The GoGreenGas case in the UK / Substitute Natural Gas from Waste: Technical Assessment and Industrial Applications of Biochemical and Thermochemical Processes, 2019, p. 475-495
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128155547000180>
9. *J. Koppejan*. Industrial Process Heat: case study 1. Combustion of wood chips and composting residues for process steam generation in a potato processing industry. IEA Bioenergy, 2020
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Wood-chips-combustion-for-process-steam-in-a-potato-processing-industry_CS1_T32.pdf
10. *M. Rinket, A. Toussaint*. Experience with firing pyrolysis oil on industrial scale. PyNe newsletter No. 31, 2012
<http://www.pyne.co.uk/Resources/user/PyNe%20July%202012%20-%20Issue%2031.pdf>
11. *L. van de Beld, A. Toussaint*. Industrial Process Heat: case study 3. Process steam in a dairy factory via fast pyrolysis bio-oil. IEA Bioenergy, 2020
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/High-temperature-heat-from-pyrolysis-oil-final_CS3_T34_.pdf
12. *H. Bristav*. Industrial Process Heat: case study 4. Waste-to-Energy for the production of steam for paper production. IEA Bioenergy, 2020
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Waste-to-Energy-for-the-production-of-steam-for-paper-production_CS4_T36.pdf
13. *S. Grootjes, B. Vreugdenhil, B. Bodewes*. Industrial Process Heat: case study 2. Gasification of paper reject to displace natural gas usage in a pulp and paper process. IEA Bioenergy, 2020
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Gasification-of-paper-reject-to-displace-natural-gas-usage-in-a-pulp-and-paper-process_CS2_T33.pdf
14. *Желєзна Т.А., Гелету́ха Г.Г., Зубенко В.І., Дроздова О.І.* Аналіз режимних умов низькотемпературного абляційного піролізу біомаси // Промислова теплотехніка. – 2012, т. 34, № 2, с.67-71.
15. *Гелету́ха Г.Г., Жовмір М.М., Желєзна Т.А., Зубенко В.І.* Експериментальне дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі // Промислова теплотехніка. – 2013, т. 35, № 1, с.87-92.

OVERVIEW OF CURRENT DIRECTIONS OF RESEARCH BY THE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY IN THE BIOENERGY SECTOR

Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.7>

The aim of the work is to identify promising areas of research in bioenergy to expand potential types of technologies and sectors for the implementation of bioenergy projects in Ukraine. Current research topics of the Bioenergy Program of the International Energy Agency are analyzed, and some of the obtained results are considered. Special attention in the studies within the Program is paid to the issues of sustainable development, decarbonization of energy, and circular economy. The results of almost all the studies are important and relevant for Ukraine. They show promising areas for further research and development, as well as help to identify new types of potential bioenergy projects. At present, Ukraine has already implemented a large number of bioenergy projects in the industry at enterprises that have biomass raw materials as a by-product of the main production. Examples of such enterprises are oil extraction plants, sugar factories, woodworking enterprises. But there are many companies not provided with their own biomass that would like to reduce their carbon footprint by switching to renewable energy. Technical and organizational solutions for mobilizing biomass for energy studied within the IEA Bioenergy's inter-task project "Bioenergy for high temperature heat in industry" may be very useful to these enterprises.

References 15, tables 3.

Key words: bioenergy, biomass, biofuel, bioethanol, pyrolysis oil, gasification.

1. C. Philibert. International energy technology collaboration and climate change mitigation. IEA, 2004
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.7418&rep=rep1&type=pdf>
2. Annual Report 2019. IEA Bioenergy, 2020
<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/05/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2019-Rev-26-May-2020.pdf>
3. Annual Report 2009. IEA Bioenergy, 2010
<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/IEA-Bioenergy-2009-Annual-Report.pdf>

4. A. Bonomi, O. Cavalett, B. C. Klein et al. Technical Report. Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools Phase 2, Part 2: biochemical 2G ethanol production and distribution, 2019

<https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/11/Task-39-Phase-2.2-Ethanol-2G-Comparison-of-Biofuel-Life-Cycle-Analysis-Tools.pdf>

5. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahnev S.V., Bashtovyi A.I. Osnovni tendentsii ta perspektyvy rozvytku rynku motornykh biopalyv v YeS ta v Ukraini [Potential and prospects for using agribiomass for energy in Ukraine], Thermophysics and Thermal Power Engineering. – Vol. 42, No. 1 (2020). – P. 69-76. (Ukr.)

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

6. Proekt Zakonu pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo oboviazkovosti vykorystannia ridkoho biopalyva (biokomponentiv) u haluzi transportu (№ 3356 vid 17.04.2020) [Draft Law On Amendments to certain legislative acts of Ukraine regarding mandatory use of liquid biofuel (bio-components) in the transportation industry (No. 3356 of 17.04.2020)] (Ukr.)

http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=68617

7. J. Hrbek. Status report on thermal gasification of biomass and waste 2019. IEA Bioenergy Task 33 special report, 2019 <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-publication-2019-status-report-on-thermal-gasification-of-biomass-and-waste/>

8. M. Materazzi, R. Taylor. The GoGreenGas case in the UK / Substitute Natural Gas from Waste: Technical Assessment and Industrial Applications of Biochemical and Thermochemical Processes, 2019, p. 475-495

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128155547000180>

9. J. Koppejan. Industrial Process Heat: case study 1. Combustion of wood chips and composting residues for process steam generation in a potato processing industry. IEA Bioenergy, 2020

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Wood-chips-combustion-for-process-steam-in-a-potato-processing-industry_CS1_T32.pdf

10. M. Rinket, A. Toussaint. Experience with firing pyrolysis oil on industrial scale. PyNe newsletter No. 31, 2012

<http://www.pyne.co.uk/Resources/user/PyNe%20July%202012%20-%20Issue%2031.pdf>

11. L. van de Beld, A. Toussaint. Industrial Process Heat: case study 3. Process steam in a dairy factory via fast pyrolysis bio-oil. IEA Bioenergy, 2020

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/High-temperature-heat-from-pyrolysis-oil-final_CS3_T34_.pdf

12. *H. Bristav*. Industrial Process Heat: case study 4. Waste-to-Energy for the production of steam for paper production. IEA Bioenergy, 2020

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Waste-to-Energy-for-the-production-of-steam-for-paper-production_CS4_T36.pdf

13. *S. Grootjes, B. Vreugdenhil, B. Bodewes*. Industrial Process Heat: case study 2. Gasification of paper reject to displace natural gas usage in a pulp and paper process. IEA Bioenergy, 2020

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Gasification-of-paper-reject-to-displace-natural-gas-usage-in-a-pulp-and-paper-process_CS2_T33.pdf

14. *Zheliezna T.A., Geletukha G.G., Zubenko V.I., Drozdova O.I.* Analiz rezhymnykh umov nyzkotemperaturnoho abliatsiinoho pirolizu biomasy [Analysis of operating conditions for low-temperature ablative pyrolysis of biomass], Industrial Heat Engineering. – Vol. 34, No. 2 (2012). – P. 67-71. (Ukr.)

15. *Geletukha G.G., Zhovmir M.M., Zheliezna T.A., Zubenko V.I.* Eksperymentalne doslidzhennia shvydkoho pirolizu biomasy v abliatsiinomu shnekovomu reaktori [Experimental study of fast pyrolysis of biomass in an ablating screw reactor], Industrial Heat Engineering. – Vol. 35, No. 1 (2013). – P. 87-92. (Ukr.)

Отримано 16.01.2021

Received 16.01.2021

УДК 663.551

ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЮ ВИЛУЧЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ДОМІШОК РЕКТИФІКОВАНОГО СПИРТУ

Булій Ю.В.¹, канд. техн. наук, Ободович О.М.², докт. техн. наук, Сидоренко В.В.², канд. техн. наук

¹Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.8>

У виробничих умовах визначені оптимальні технологічні режими для ефективного вилучення органічних домішок в бражній, епіюраційній, ректифікаційній, розгінній колонах і колоні кінцевого очищення. Запропоновані способи, що дозволяють зменшити в епіюраті концентрацію альдегідів на 40 %, ізопропілового і метилового спиртів – на 74 %, а вищих спиртів сивушної олії – на 42,3%. Встановлено, що збільшення зони пастеризації в ректифікаційній колоні до 10 тарілок дозволяє зменшити в товарному спирті концентрацію альдегідів на 32,3%, метанолу на 30 %, а вищих спиртів сивушної олії на 15 %.

В производственных условиях определены оптимальные технологические режимы для эффективного извлечения органических примесей в бражной, эпирационной, ректификационной, разгонной колоннах и колонне окончательной очистки. Предложены способы, позволяющие уменьшить в эпиурате концентрацию альдегидов на 40 %, изопропилового и метилового спиртов – на 74 %, а высших спиртов сивушных масел – на 42,3 %. Установлено, что увеличение зоны пастеризации в ректификационной колонне до 10 тарелок позволяет уменьшить в товарном спирте концентрацию альдегидов на 32,3 %, метанола на 30 %, а высших спиртов сивушного масла на 15 %.

The optimum technological regimes for effective extraction of organic impurities in mash, epuration, rectification, accelerating and final clearance have been determined under production conditions. The methods which allow to decrease concentration of aldehydes by 40 %, isopropyl and methyl alcohols - by 74 %, and higher alcohols of sivush oils - by 42,3 % are offered. It has been established that increase of pasteurization zone in rectification column up to 10 plates allows to decrease concentration of aldehydes in commercial alcohol by 32,3 %, concentration of methanol by 30 % and higher alcohols of sivush oil by 15 %.

Бібліографія 10, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: органічні домішки, етиловий спирт, масообмін, колона, ректифікація.

Спиртова промисловість є ключовою у харчовій промисловості. Сучасні спиртові заводи виробляють етиловий ректифікований та денатурований спирт, сировину для антисептиків, біоетанол, спирт етиловий-сирець, фракцію головну етилового спирту, сивушне масло, діоксид вуглецю. Продукція спиртових заводів використовується у 150 галузях промисловості. Програмою розвитку спиртової галузі України передбачено приватизацію спиртових заводів, науково-технічне оновлення виробництва, впровадження інноваційних ресурсо- і енергозберігаючих, екологічно безпечних технологій, зниження собівартості і підвищення якості кінцевого продукту, освоєння нових конкурентоспроможних видів продукції, в тому числі і паливного етанолу (біоетанолу). Отримання ректифікованого етилового спирту високої якості є пріоритетним напрямом для подальшого розвитку спиртової галузі. Вирішення цієї актуальної задачі можливе при умові більш глибокого вилучення та концен-

трування летких домішок спирту на тарілках колонного обладнання брагоректифікаційних установок (БРУ).

Для цього процеси перегонки бражки і очищення спирту проводять в автоматизованому режимі, використовують закритий обігрів колонного обладнання, збільшують кількість контактних пристроїв: в бражній колоні від 25 до 28...30, епіюраційній – від 40 до 51...57, ректифікаційній – від 78 до 88...90, сивушній – від 60 до 80, розгінній – від 40 до 60 тарілок, проводять гідроселекцію домішок в розгінній та епіюраційній колонах, збільшують зону пастеризації спирту в ректифікаційній колоні від 3-5 до 10-15 тарілок, типову БРУ дооснащують колоною кінцевого очищення, дія якої відбувається в режимі повторної епіюрації, використовують масообмінні колонні апарати циклічної дії та ін. Разом з тим підвищення ступеню вилучення летких домішок потребує збільшених витрат гріючої пари та гарячої пом'якшеної води для проведення гідроселекції [1].

В колонах БРУ одночасно з виділенням летких домішок спирту завдяки реакції етерифікації відбувається новоутворення органічних сполук, які погіршують його якість та зменшують вихід кінцевого продукту. Так, під час перегонки дозрілої бражки разом з виділенням летких органічних домішок, супровідних спирту, відбувається новоутворення низки речовин, які ускладнюють подальше очищення спирту. Так, під час взаємодії спиртів, кислот і альдегідів, продуктів розпаду амінокислот, сірчистих з'єднань та інших складових бражки в бражній колоні відбувається утворення естерів, альдегідів і ацеталей органічних кислот. За підвищеної температури в епіюраційній і ректифікаційній колонах разом з вилученням головних, проміжних і кінцевих домішок відбувається новоутворення спиртів, естерів та альдегідів.

Походження органічних летких домішок може бути різним. Деякі з них потрапляють в БРУ із сировиною, водою і паром, інші утворюються під час протікання хімічних та біохімічних реакцій в процесах бродіння, перегонки бражки і очистки спирту, а також під час зберігання ректифікованого спирту в металевих резервуарах. Присутність навіть невеликої кількості новоутворених в ректифікаційній колоні головних домішок унеможливорює відбір якісного ректифікованого спирту із конденсатора цієї колонії, тому спирт зазвичай відбирають із верхніх тарілок її концентраційної частини [2].

Рух летких домішок, супутніх спирту етилового, по колонах БРУ схематично показано на рис. 1.

Теоретичні розробки П.С. Циганкова і П.Л. Шияна доводять, що ступінь розділення органічних домішок та етилового спирту залежить від різниці значень їх

коефіцієнтів випаровування. Для головних домішок (естерів та альдегідів) ця різниця приймає максимальні значення за низької концентрації спирту у розчинах – 6...8 % об. Для ефективного видалення проміжних домішок (вищих спиртів) концентрацію етилового спирту у розчинах зменшують до 4...5 % об. Для збільшення коефіцієнтів випаровування кінцевих домішок (метилового спирту) доцільно здійснювати помірну гідроселекцію та забезпечити концентрацію етанолу на тарілках в межах 60% мол. і вище. Із практичного досвіду сумісної переробки головних та сивушних фракцій відомо, що для підвищення ступеню видалення головних та частини проміжних домішок в розгінній колоні необхідно збільшити витрати гріючої пари в середньому на 28,7% (від 2,56 до 3,59 кг/кг безводного спирту) [3].

З метою отримання більш очищеного від головних та частини проміжних домішок епіурату в останній роки використовують спосіб екстрактивної ректифікації бражного дистилату. Проведення гідроселекції в епіюраційній колоні дозволяє створити умови для підвищення коефіцієнтів ректифікації летких домішок, супутніх етилового спирту, та забезпечити їх максимальне видалення з головною фракцією спирту етилового. За умови отримання спирту сортів «Люкс» або «Пшенична сльоза» мінімальний відбір головної фракції із конденсатора епіюраційної колонії становить 5 % від кількості ректифікованого спирту. При включенні в схему брагоректифікації розгінної колонії відбір головної фракції збільшують до 8...10 %. Для підвищення ступеню вилучення летких домішок спирту з головною фракцією проводять гідроселекцію домішок в епіюраційній колонії. Для цього на верхню тарілку ко-

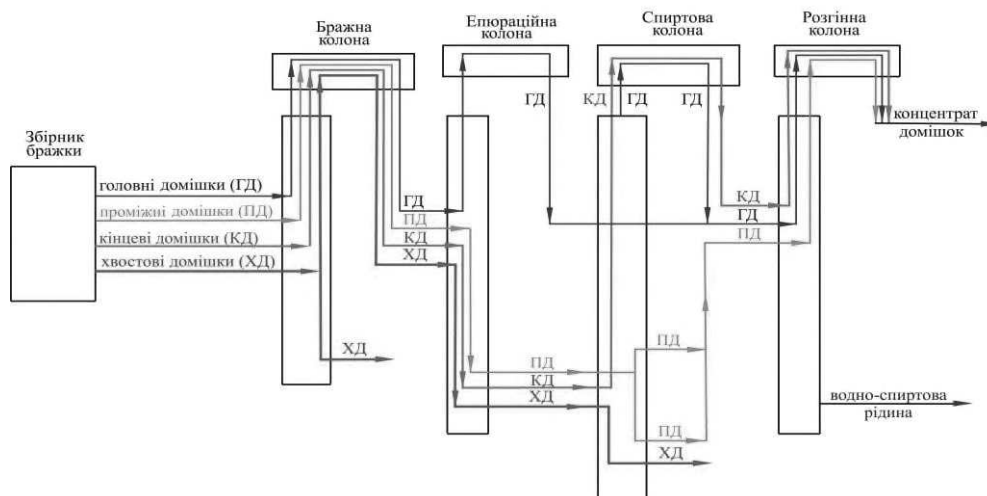


Рис. 1. Рух летких домішок спирту по колонах БРУ

лони безперервно подають гарячу воду в кількості, що забезпечує концентрацію етилового спирту в епюраті 22...29 % об. Для проведення гідроселекції зазвичай використовують пом'якшену воду або конденсат пари з температурою 90...92 °С. Лютерну воду використовують в меншій мірі через значний вміст в ній органічних кислот, які сприяють новоутворенню органічних домішок. З метою зменшення витрат пом'якшеної води або конденсату пари та енерговитрат на нагрівання води до вищевказаної температури за умови високого ступеню очистки кубової водно-спиртової рідини від домішок для проведення гідроселекції останню подають у верхню зону концентраційної частини епюраційної колони.

В умовах високої конкурентоздатності товарного ректифікованого спирту як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках збуту в умовах сьогодення визначальними показниками його якості є концентрація в готовому продукті альдегідів, естерів та вищих спиртів сивушної олії, а саме ізопропилового і метилового спиртів. Концентрація останніх не повинна перевищувати 1,5 мг/дм³ та 0,0007 % відповідно.

Метою роботи було визначенням оптимальних технологічних режимів розгонки спиртовмісних напівпродуктів і побічних продуктів брагоректифікації в розгінній колоні, епюрації бражного дистилату в епюраційній колоні, концентрування ректифікованого спирту в спиртовій колоні та його повторної епюрації в колоні кінцевого очищення, за яких вміст органічних домішок в спирті етиловому ректифікованому був би найменшим.

Матеріали і методи. Методи досліджень – аналітичні, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів та методики досліджень, що застосовуються у виробництві ректифікованого етилового спирту. Концентрацію летких домішок спирту визначали на газовому хроматографі з колонкою HP FFAP 50 m×0,32 m. Аналіз дослідних проб виконували згідно ДСТУ 4222:2003 «Горілки, спирт етиловий та водно-спиртові розчини. Газохроматографічний метод визначення вмісту мікрокомпонентів».

Виклад основних результатів досліджень. Дослідження проводили у виробничих умовах Чуднівської філії ДП «Житомирський лікеро-горілчаний завод». Діюча БРУ непрямої дії включала типові бражну, епюраційну, ректифікаційну колони, а також розгінну колону (РК) циклічної дії, оснащену лускоподібними тарілками. Періодичний перелив рідини з тарілки на тарілку в розгінній колоні відбувався завдяки примусовій роботі переливних пристроїв, які містили рухомі елементи і були зв'язані з приводними

механізмами (пневмоциліндрами двобічної дії типу DNT 63-100-PPV-N3). Механізми рухались почергово відповідно до програми контролера М340 фірми «Schneider Electric». Робота мехатронних підсистем на основі пневмоавтоматики відбувалася згідно заданого алгоритму за допомогою програмного забезпечення мікропроцесорного ПЛК М24 і SCADA робочого місця оператора. Інноваційна технологія циклічної ректифікації і конструкція РК були запропоновані співробітниками Національного університету харчових виробництв в тісній співпраці з ТОВ «ТІСЕР» і співробітниками інституту технічної теплофізики НАН України [6-8]. Фрагмент РК з приводними механізмами для управління рухомими клапанами тарілок показано на рис. 2.

В розгінну колону подавали головну фракцію (ГФ) в кількості 46,5 дм³ абсолютного алкоголю (а.а) на годину із конденсатора епюраційної колони, погони із конденсатора сепаратора CO₂ в кількості 16,7 дм³ а.а/год, із конденсатора бражної колони в кількості 29,2 дм³ а.а/год і сивушний спирт в кількості 7,8 дм³ а.а/год. Загальні витрати погонів живлення становили 125,4 дм³/год або 100,2 дм³/год в перерахунку на а.а. Для гідроселекції головних та частини проміжних домішок на верхню тарілку розгінної колони безперервно подавали конденсат пари. Естеро-сивушний концентрат відбирали з верхньої частини декантатора, альдегідно-метанольний концентрат – із конденсатора колони. Загальна кількість сивушно-естеро-альдегідного концентрату (СЕАК) становила 2,5 дм³/год. Водно-спиртову суміш із нижньої частини декантатора подавали у вигляді флегми на верхню тарілку колони.



Рис. 2. Фрагмент розгінної колони циклічної дії

Встановлено, що найбільш ефективне звільнення кубової рідини від летких домішок спирту відбувалося за концентрації етилового спирту в рідині 4 % об. При цьому в повній мірі видалялися естери, а ступінь видалення альдегідів і вищих спиртів сивушного масла була максимальною. Фізико-хімічні показники бражного дистиляту (БД), кубової водно-спиртової рідини (КВСП) і СЕАК приведені в таблиці 1.

Для максимального звільнення епюрату від естерів, альдегідів і верхніх проміжних домішок (вищих спиртів сивушного масла) проводили гідроселекцію в епюраційній колоні. Враховуючи ефективну ступінь очищення кубової рідини розгінної колоні від домішок з метою зменшення витрат гарячого конденсату на верхню тарілку епюраційної колоні безперервно подавали кубову рідину в кількості, що забезпечувала концентрацію етилового спирту в епюраті 26 % об. За таких умов зростала ступінь вилучення і кратність концентрування цих домішок, в тому числі ізопропілового спирту – домішки, яка є визначальною при оцінці якості готової продукції. Під час досліджень встановлено, що проведення подвійної гідроселекції дозволяє зменшити концентрацію ізопропілового і метилового спиртів в епюраті (Е2) на 74 %, вищих спиртів сивушного масла — на 42,3 % порівняно з епюратом (Е1), отриманим без проведення гідроселекції в епюраційній колоні. При цьому повністю видалялись естери, а концентрація альдегідів в епюраті зменшилась на 40 % (табл. 1).

Для визначення оптимального режиму для інтенсивного вилучення органічних домішок під час концентрування етилового спирту в ректифікаційній колоні зону пастеризації збільшували від 5 до 10 тарілок. В ході досліджень відбирали дослідні проби з 3, 5, 7 і 10-ї тарілок, рахуючи зверху, і визначали фізико-хімічні показники ректифікованого спирту для встановлення їх відповідності вимогам ДСТУ 4221:2003 для спирту «Люкс» хроматографічним методом [5].

Встановлено, що найкращі показники мала проба спирту, який відбирали з 10-ї тарілки, рахуючи зверху колоні. Для підвищення органолептичних показників ректифікованого спирту і зменшення концентрації в ньому метилового спирту до складу БРУ була включена додаткова колона – колона кінцевого очищення, яка працювала в режимі повторної епюрації. Результати хроматографічного аналізу дослідних проб 1 і 2 ректифікованого спирту, які відбирались з 5-ї і 10-ї тарілок ректифікаційної колоні і проби 3, що відбиралась з 4-ї тарілки, рахуючи знизу, колоні кінцевого очищення, приведені в табл. 2.

Із даних табл. 2 видно, що показники дослідних проб 1, 2 і 3 відповідали вимогам ДСТУ 4221:2003 [9]. Збільшення зони пастеризації в ректифікаційній колоні до 10 тарілок за рахунок збільшення загальної їх кількості дозволило зменшити в товарному спирті концентрацію альдегідів на 32,3 %, метилового спирту – на 30 %, вищих спиртів сивушної олії – на 15 %. Таким чином, підтверджено, що більш якісний спирт етиловий

Таблиця 1. Фізико-хімічні показники бражного дистиляту, кубової водно-спиртової рідини розгінної колоні, концентрату домішок і епюрату

Група домішок	Концентрація, мг/дм ³				
	БД	КВСП	СЕАК	Е1	Е2
етиловий спирт, % об.	48,8	4,0	72,5	40,0	26,0
альдегіди	61,4	2,7	90886,9	4,5	1,8
естери	186,4	-	82370,4	1,6	-
метанол, %	0,044	0,13	16,72	0,027	0,010
сивушна олія	18820,0	1212,7	766063,2	7786,3	4492,1
ізопропіловий спирт	4,9	0,07	607,8	4,6	1,2

Таблиця 2. Фізико-хімічні показники проб спирту з 5, 10-ї тарілок спиртової колоні і 4-ї тарілки колоні кінцевого очищення

Домішки	Концентрація, мг/дм ³		
	Проба 1	Проба 2	Проба 3
альдегіди	0,31	0,21	0,18
метиловий спирт	0,001	0,0007	0,0003
ізопропіловий спирт	1,94	1,65	0,93

ректифікований можливо отримати після його додаткового очищення від домішок в колоні кінцевого очищення (проба 3).

Для перевірки достовірності отриманих результатів досліджень, експлуатаційних характеристик БРУ у обраному технологічному режимі роботи колонного обладнання, що забезпечує високу ступінь очищення спирту етилового ректифікованого від летких домішок, проводили хроматографічний аналіз проб бражки (Б), бражного дистиляту (БД), емпурату (Е), головної фракції (ГФ), ректифікованого спирту (РК), кубової водно-спиртової рідини розгінної колони (КВСП) і естери-сивушного концентрату (КЕС). Результати хроматографічного аналізу дослідних проб наведені у табл. 3.

Аналіз отриманих результатів доводить, що впровадження запропонованих технологічних заходів дозволяє підвищити ступінь вилучення і кратність концентрування летких домішок спирту та гарантувати виробництво спирту етилового ректифікованого сорту «Люкс». При цьому отриманий естери-сивушний концентрат домішок відповідав вимогам ТУ У 24.6-30219014-004 –2005 [10].

Висновки. Для підвищення ступеню вилучення органічних домішок необхідно забезпечити концентрацію етилового спирту в кубовій частині розгінної колони, яка не перевищує 4% об.; зону пастеризації в ректифікаційній колоні збільшити до 10 тарілок, зменшити концентрацію етанолу в емпураті до 22...29 % шляхом проведення гідроселекції домішок; для гідроселекції в емпуратній колоні використовувати звільнену від домішок кубову рідину розгінної колони. За таких умов органолептичні і фізико-хімічні показники ректифікованого спирту відповідають нормативним для спирту «Люкс». Для отримання спирту сорту «Пшенична сльоза» доцільно передбачити включення в схему БРУ колони кінцевого очищення в режимі повторної емпуратії. Для підвищення якості ректифікованого спирту і зменшення енерговитрат шляхом подовження часу контакту на тарілках пари та рідини перспективним напрямком є використання масообмінного обладнання циклічної дії. Запропоновані заходи вимагають обов'язкового забезпечення постійного контролю технологічних параметрів і передбачають роботу технологічного обладнання в автоматизованому режимі.

Таблиця 3. Концентрація летких органічних домішок в колонах БРУ непрямої дії

Найменування домішки	Концентрація, мг/дм ³						
	Б	БД	Е	ГФ	РК	КВСП	КЕС
Альдегіди:	205	41,9	3,7	475,3	0,14	6,3	2270,6
ацетальдегід	185	23,5	3,7	366,7	0,14	6,3	1525,2
метилацетат	20	18,4	сліди	108,6	—	сліди	745,4
Естери:	3200	1445,8	7518,9	8364,4	—	сліди	76397,8
етилацетат	3187	1079,5	7187,7	8306,1	—	сліди	75880,8
ізоамілацетат	13	1,63	сліди	38,8	—	сліди	305,7
етилбутират	сліди	304,8	331,2	7,7	—	сліди	198,5
ізобутилацетат	сліди	сліди	сліди	1,7	—	сліди	12,8
Метанол, % об.	0,015	0,033	0,083	2,2	0,0007	0,07	1,2
Сивушна олія:	6320	21781,8	18203,2	2091,6	0,66	1845,9	7608,9
ізопропанол	1,1	1,0	1,1	0,4	0,66	2,4	10,5
н-пропанол	416,5	2053,7	1053,9	322,2	—	70,9	358,2
ізобутанол	1480,5	4505,9	4211,1	1888,4	—	393,4	6450,5
н-бутанол	5,7	76,6	74,9	0,5	—	2,7	2,9
ізоамілол	4416,6	15152,1	12862,2	90,1	—	1376,6	786,8
Нетипові:	4,9	17,0	4,8	181,1	—	сліди	207,1
акролеїн	сліди	6,1	сліди	181,1	—	сліди	196,4
бутилформіат	сліди	сліди	сліди	сліди	—	сліди	7,8
кротональдегід	сліди	сліди	сліди	сліди	—	сліди	2,9
1-гексанол	4,9	11,4	4,8	сліди	—	сліди	сліди
Етанол, % об.	10,0	45,0	27,1	93,0	96,3	4,0	75,4

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Цыганков П.С.* Руководство по ректификации спирта / П.С. Цыганков, С.П. Цыганков // М.: ПИЩЕПРОМИЗДАТ, 2001. — 400 с.
2. *Технологія спирту*/ В.О. Маринченко, В.А. Домарецький, П.Л. Шиян та ін. // під ред. проф. В.О. Маринченко. — Вінниця: «Поділля—2000», 2003. — 496 с.
3. *Шиян П.Л.* Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія. / П.Л. Шиян, В.В. Сосницький, С.Т. Олійнічук. — К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. — 424 с.
4. *Инструкция по теххимическому и микробиологическому контролю спиртового производства.* — [Введена в действие с 01.07. 1986 г.]. — Утверждена начальником подотдела спиртовой, дрожжевой и ликеро-водочной промышленности СССР В.В. Ильиничем 15 января 1986 г. — М.: Агропромиздат, 1986. — 399 с. — (Нормативный документ Госагропрома СССР).
5. *Горілки, спирт* етиловий та водно-спиртові розчини. Газохроматографічний метод визначення вмісту мікрокомпонентів : ДСТУ 4222:2003. — [Чинний від 2004-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2003. — 18 с.
6. *Оптимизация процесса перегонки спиртовой бражки* / Ю.В. Булій, П.Л. Шиян, А.П. Дмитрук, А.М. Куц // Химия и технология пищи. — Каунас: ПИКТУ, 2015. — Т. 49, №1. — С. 20-28.
7. *Патент України 137555 B01D 3/00.* Спосіб вилучення етилового спирту із головних та сивушних фракцій / Ю.В. Булій, А.П. Дмитрук, П.А. Дмитрук. — Заявл. 17.04.19; Опубл. 25.10.19; Бюл. № 20/2019. — 8 с.
8. *Патент UA на корисну модель № 136560 B01D 3/00.* Спосіб масообміну між рідиною і паром в колонному апараті/ Ю.В. Булій, А.П. Дмитрук, П.А. Дмитрук П.А. — Заявл. 01.03.2019; Опубл. 27.08.2019; Бюл. № 16/2019. — 4 с.
9. *Спирт етиловий* ректифікований. Технічні умови: ДСТУ 4221:2003. — [Чинний від 2008-01-01]. — К.: Держспоживстандарт України, 2007. — 12 с.
10. *Концентрат естеров-сивушний.* Загальні технічні умови: ТУ У 24.6-30219014-004:2005. — 17 с.

INCREASING THE DEGREE OF EXTRACTION OF ORGANIC IMPURITIES OF RECTIFIED ALCOHOL

Bulii Yu. V.¹, Obodovych O. M.², Sydorenko V. V.²

¹National University of Food Technology, 68, Volodymyrska str., Ukraine, Kyiv, 01601, Ukraine

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.8>

Obtaining high quality rectified ethyl alcohol is a priority for the further development of the alcohol industry. The solution to this urgent problem is possible under the condition of deeper extraction and concentration of volatile alcohol impurities on the plates of the column equipment of the Distillation/Rectification Unit.

In the columns of the Distillation/Rectification Unit simultaneously with the release of volatile alcohol impurities due to the esterification reaction is the formation of organic compounds that degrade its quality and reduce the yield of the final product. Thus, during the interaction of alcohols, acids, and aldehydes, the breakdown products of amino acids, sulfur compounds, and other components of the brew in the fermentation column are the formation of esters, aldehydes, and acetals of organic acids.

The aim of the work was to determine the optimal technological modes of distillation of alcohol-containing intermediate products and by-products of the distillation/rectification process in the accelerating column, epuration of wash distillate in the epuration column, the concentration of rectified alcohol in the alcohol column, and its repeated epuration in the column of final clearance, under which the content of organic impurities in rectified ethyl alcohol would be the lowest.

Materials and methods. Research methods were analytical, chemical, physico-chemical with the use of instruments and research methods used in the production of rectified ethyl alcohol. The concentration of volatile alcohol impurities was determined on a gas chromatograph with a column of HP FFAP 50 m × 0.32 m. It is determined that to increase the degree of extraction of organic impurities it is necessary to ensure the concentration of ethyl alcohol in the column bottom of the accelerating column, which does not exceed 4% vol.; pasteurization zone in the rectification column increase to 10 plates, reduce the concentration of ethanol in the epurate to 22-29% by hydroselction of impurities; for hydroselction in the epuration column use free of impurities bottom products of the accelerating column. To

improve the quality of rectified alcohol and reduce energy consumption by extending the contact time on the plates of steam and liquid, a promising direction is the use of mass transfer equipment of cyclic mode. The proposed measures require constant monitoring of technological parameters and provide for the operation of technological equipment in an automated mode.

References 10, tables 3, figures 2.

Key words: organic impurities, ethyl alcohol, mass transfer, column, rectification.

1. Cygankov P.S., Cygankov S.P. [Alcohol rectification guide]. Moscow: PISHhEPROMIZDAT, 2001. 400 p. (Rus.)

2. Marynchenko V.O., Domaretskyi V.A., Shyian P.L. at al. [Alcohol technology]. / In V.O. Marynchenko, (Ed.). Vinnitsa: «Podillya - 2000», 2003. 496 p. (Ukr.)

3. Shyian P.L., Sosnytskyi V.V., Oliinichuk S.T. [Innovative technologies of the alcohol industry. Theory and practice: a monograph.]. Kyiv: Publishing house «Askaniia», 2009. 424 p.

4. [Instructions for technochemical and microbiological control of alcohol production] [Regulatory document of the USSR Gosagroprom]. Moscow, Agropromizdat, 1986. 399 p. DSTU 4222:2003. (Rus)

5. Horilky, spyrt etylovyi ta vodno-spyrtovi rozchyny. Hazokhromatohrafichniy metod vyznachennia vmistu mikrokomponentiv [State Standart 4222:2003. Vodka, ethyl alcohol and water-alcohol solutions. Gas chromatographic method for determining the content of microcomponents.]. Kyiv, Derzhstandart Ukraine, 2003, 18 p. (Ukr.)

6. Bulii Yu.V., Shyian P.L., Dmitruk A.P., Kucz A.M. [Optimization of the distillation process of alcohol brew]. Khimiya i tekhnologiya pishhi [Chemistry and technology of food]. Kaunas: PIKTU, 2015. 49(1). pp. 20-28. (Rus.)

7. Bulii Yu.V., Dmitruk A.P., Dmitruk P.A. [Method of extracting ethyl alcohol from main and fusel fractions]. Patent Ukraine, № 137555, 2019. (Ukr.)

8. Bulii Yu.V., Dmitruk A.P., Dmitruk P.A. [The method of mass transfer between liquid and vapor in a column apparatus]. Patent Ukraine, № 136560, 2019. (Ukr.)

9. DSTU 4221:2003 Spyrt etylovyi rektyfikovanyi. Tekhnichni umovy. [State Standart 4221:2003 Rectified ethyl alcohol. Specifications.]. Kyiv. Derzhstandart Ukraine, 2007, 12 p. (Ukr.).

10. Estero-fusel concentrate. General technical conditions. TU U 24.6-30219014-004:2005, 17 p. (Ukr.).

Отримано 04.02.2021

Received 04.02.2021

УДК 620.92

ЄВРОПЕЙСЬКИЙ «ЗЕЛЕНИЙ» КУРС І НОВІ МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ РОЗВИТКУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Желєзна Т.А., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>

Проаналізовано передумови, основні цілі і задачі Європейського «зеленого» курсу. Розглянуто можливості розвитку відновлюваної енергетики в рамках цього курсу. Представлено рекомендації для України щодо прийняття довгострокових кліматичних та енергетичних цілей.

Проанализированы предпосылки, основные цели и задачи Европейского «зеленого» курса. Рассмотрены возможности развития возобновляемой энергетики в рамках этого курса. Представлены рекомендации для Украины относительно принятия долгосрочных климатических и энергетических целей.

The preconditions, main goals and objectives of the European Green Deal are analyzed. Possibilities for the development of renewable energy within the European Green Deal are considered. Recommendations for Ukraine on the adoption of long-term climate and energy goals are presented.

Бібл. 15, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: відновлювана енергетика, відновлювані джерела енергії, біомаса, біогаз, декарбонізація, парникові гази.

ВВП – валовий внутрішній продукт;

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;

ВЕ – відновлювана енергетика;

ВЕС – вітрова електростанція;

ВКЕ – валове кінцеве енергоспоживання;

ЄЗК – Європейський «зелений» курс;

ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;

НВВ – національно визначений внесок;

НДДКР – науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи;

ПГ – парникові гази;

СЕС – сонячна електростанція;

ТЕС – теплова електростанція;

ЦТ – централізоване теплопостачання.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю декарбонізації енергетики шляхом впровадження відновлюваних джерел енергії як дієвого інструменту скорочення споживання викопних палив та викидів парникових газів. **Метою** роботи є розробка рекомендацій для України щодо встановлення довгострокових інтегрованих кліматичних та енергетичних цілей і визначення шляхів їх досягнення. **Методи дослідження** включають вивчення літературних, статистичних та інших даних, аналіз нормативно-правових актів.

Основні цілі і задачі Європейського «зеленого» курсу

Європейський «зелений» курс являє собою комплексну стратегію переходу до сталої економіки, чистої енергетики і кліматичної нейтральності Європи, тобто нульових викидів парникових газів, до 2050 року. Прийняттю цього курсу передувало кілька етапів послідовної політики ЄС у відповідних секторах. В цьому контексті слід зазначити Білу книгу з розвитку ВДЕ (1997 р.), яка фактично заклала основу стратегії Євросоюзу в секторі відновлюваної енергетики [1]. В Білій книзі

було поставлено мету досягти 12% ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії ЄС до 2010 року. Наступним стратегічним документом, який визначив цілі до 2020 року, стала Директива 2009/28/ЄС з відновлюваної енергетики (RED I, 2009 р.) [2]. В документі було зазначено наступні цілі: досягти 20% відновлюваних джерел енергії у ВКЕ, 10% ВДЕ на транспорті, підвищити енергоефективність на 20%, скоротити викиди парникових газів на 20% відносно рівня 1990 року. У 2018 році було прийнято оновлену редакцію цієї Директиви (RED II), в якій зазначено нові цілі до 2030 року – 32% відновлюваних джерел у ВКЕ і 14% ВДЕ на транспорті [3]. Окрім Білої книги і Директиви з відновлюваної енергетики існує багато інших офіційних документів, що визначали стратегію розвитку окремих сегментів відновлюваної енергетики ЄС протягом останніх 15-20 років. Серед них можна зазначити Директиву з відновлюваної електроенергетики 2001/77/ЄС (2001 р.), Директиву з моторних біопалив 2003/30/ЄС (2003 р.), План дій з розвитку біоенергетики (2005 р.), Інтегровану енергетичну та кліматичну стратегію ЄС (2007 р.) [4].

Напередодні рубежу 2020 року Європейський Союз вже досягнув непоганих показників – 19,7% ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні (2019 р.) і 23% скорочення викидів парникових газів від рівня 1990 року (2018 р.) при рості ВВП на 61% за цей же період. Але було чітке усвідомлення того, що цього недостатньо, що треба рухатися далі і прикладати набагато більше зусиль для розвитку відновлюваної енергетики і декарбонізації економіки. За описаних передумов було розроблено Європейський «зелений» курс, концепцію якого було представлено Єврокомісією у грудні 2019 року.

Характерною особливістю Європейського «зеленого» курсу є його всебічність, оскільки він охоплює всі галузі економіки, особливо стосуючись секторів транспорту, енергетики, сільського господарства, будівництва, а також металургії, цементної, текстильної та хімічної промисловості. ЄЗК – це дорожня карта досягнення

сталого економіки із скороченням до нуля викидів парникових газів в Європі до 2050 р. і «роз'єднанням» економічного росту із обсягом споживання ресурсів. Останнє спостерігається наразі в Данії і Німеччині, де ріст ВВП вже багато років не супроводжується збільшенням енергоспоживання (рис. 1, 2) [5, 6]. Європейський «зелений» курс ставить за мету досягти цього на рівні Євросоюзу.

Заходи, заплановані Європейським «зеленим» курсом, є комплексними і спрямованими на перехід до низьковуглецевої енергетики, покращення стану довкілля та захист навколишнього природного середовища, всебічне скорочення викидів парникових газів, досягнення сталої промисловості, сільського господарства, сектору транспорту і будівництва. В рамках реалізації ЄЗК вже розроблено і прийнято низку документів, у тому числі стратегії ЄС щодо інтеграції енергетичної системи, розвитку «зеленої» енергетики, виробництва відновлюваного водню, скорочення викидів метану та інші стратегічні документи. Важливою подією ЄЗК стало узгодження в кінці 2020 року нової мети по зменшенню викидів парникових газів до 2030 року – на 55% від рівня 1990 року (попередня ціль була 40%). Проведені оцінки свідчать про те, що сама така проміжна ціль дасть можливість досягти кліматичної нейтральності Європи до 2050 року [7].

Розвиток відновлюваної енергетики як складової Європейського «зеленого» курсу

Невід'ємною складовою практичної реалізації Європейського «зеленого» курсу є розвиток відновлюваної енергетики. На виробництво і використання енергії припадає більше 75% загальної емісії парникових газів в ЄС, тому декарбонізація енергетичної системи є безперечною передумовою для досягнення поставлених кліматичних цілей. Згідно стратегії «Чиста

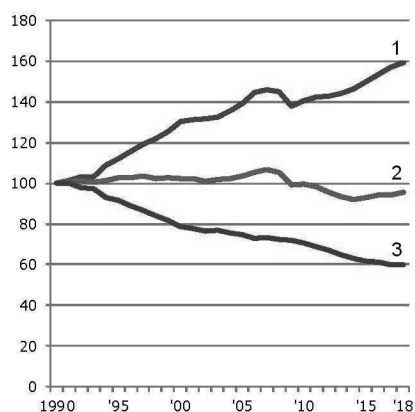


Рис. 1. Динаміка зміни ВВП і валового енергоспоживання в Данії [5]:
1 – ВВП; 2 – валове енергоспоживання;
3 – валове енергоспоживання/ВВП

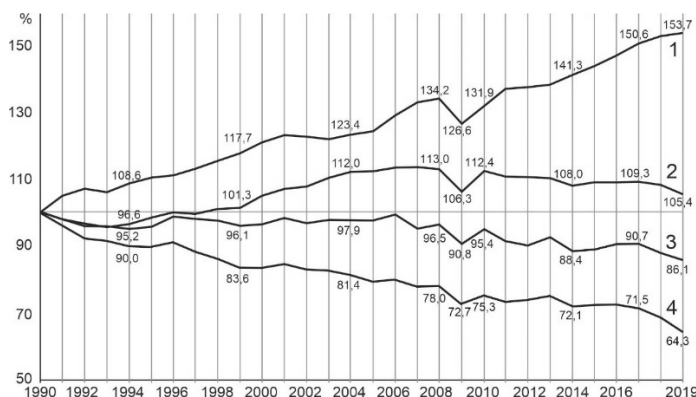


Рис. 2. Динаміка зміни ВВП (1), валового енергоспоживання (2), споживання первинної енергії (3) і викидів парникових газів (4) в Німеччині [6]

енергія», в енергетичній сфері пріоритет буде віддаватися впровадженню ВДЕ, підвищенню енергоефективності, надійності та доступності постачання енергії, створенню повністю інтегрованої енергетичної системи і ринку ЄС [8].

Поточна енергетична система ЄС характеризується лінійними односторонніми потоками енергії із значними її втратами. Інтегрована енергосистема майбутнього базуватиметься на трьох основних принципах: скидна енергія повністю утилізується, більшість електроенергії є «зеленою», в секторах, які важко піддаються електрифікації, застосовується біопаливо та інші види «чистого» палива. Прикладами секторів, що важко піддаються декарбонізації шляхом електрифікації, є важка промисловість і вантажний транспорт в частині перевезення важких вантажів. Стратегія «Чиста енергія» передбачає стале використання потенціалу біомаси, біопалив, «зеленого» водню і синтетичних палив, а також стимулювання виробництва біогазу і біопалив з сільськогосподарських залишків [8, 9].

Цільова підтримка прискореного розвитку виробництва біогазу, у тому числі впровадження пілотних проєктів в сільських регіонах, передбачено також Стратегією скорочення викидів метану. Метан є другим після діоксиду вуглецю газом за впливом на зміну клімату. Сільське господарство, сектор поводження з відходами і енергетика відповідальні за 98% викидів метану, викликаних діяльністю людини, в Європі. Саме тому метановою стратегією ЄЗК заплановано впровад-

ження широкого комплексу заходів, спрямованих на скорочення викидів даного парникового газу в цих секторах [10].

В рамках Європейського «зеленого» курсу окрема увага приділена реалізації потенціалу офшорної відновлюваної енергетики. Офшорна ВЕ почала свій розвиток у 1991 році із встановлення біля південного узбережжя Данії першої в світі демонстраційної ВЕС, і на сьогодні практично досягла комерційного рівня в сегменті стаціонарних ВЕС. Інші технології офшорної ВЕ знаходяться на різних стадіях розвитку – від початкової (плавучі СЕС, виробництво біодизелю, біоетанолу і біогазу з водоростей) до передкомерційної (плавучі ВЕС та ін.) (табл. 1) [11].

Виробництво і використання відновлюваного водню вважається перспективним напрямком розвитку «чистої» енергетики в Євросоюзі. Воднева стратегія Європейського «зеленого» курсу включає три етапи. До 2024 р. планується встановлення не менше 6 ГВт електролізерів і виробництво до 1 млн т відновлюваного водню. Протягом 2025-2030 рр. передбачається ріст встановленої потужності електролізерів до 40 ГВт і отримання до 10 млн т відновлюваного водню. Після 2030 р. очікується широкомасштабне використання водню у секторах, що важко піддаються декарбонізації [12].

Для ефективнішого фінансування проєктів відновлюваної енергетики в рамках Європейського «зеленого» курсу впроваджено новий механізм, який окрім державних інвестицій передбачає також приватні. З початку 2021 року кожна країна-член ЄС зможе

Табл. 1. Технології, що підтримуються Стратегією офшорної відновлюваної енергетики в рамках ЄЗК і стадії їх розвитку [11]

Стадія розвитку технології	Вид технології та її характеристики
Комерційна	Стаціонарні ВЕС. Мають більшу продуктивність, ніж наземні ВЕС. ЄС є світовим лідером у виробництві обладнання і використанні цієї технології.
Рання передкомерційна	Плавучі ВЕС. Гнучкіші, ніж стаціонарні офшорні ВЕС щодо напрямку вітру і особливостей узбережжя.
	Технології перетворення постійного струму для подачі в мережу. Такі технології (наприклад, високовольтні перетворювачі постійного струму) здатні передавати великі обсяги «зеленої» електроенергії на материк.
	Використання енергії хвиль. Розроблено кілька технологій із значним потенціалом декарбонізації енергоспоживання на островах.
Дослідно-конструкторські роботи	Використання енергії припливів. Виробництво електроенергії є стабільним, що має позитивний вплив на роботу електромережі.
Початкові НДДКР	Плавучі СЕС. Технологія має значний потенціал розвитку.
	Використання водоростей для виробництва біопалив (біодизелю, біоетанолу, біогазу). Перспективна технологія на початковій стадії розвитку.

фінансувати проекти «зеленої» енергетики не тільки у себе, але і в інших країнах ЄС, що потенційно потребуватиме менших вкладень. Впроваджені проекти будуть зараховуватися по певній методиці до виконання цілі по частці ВДЕ кожній країні, що приймала участь у даному заході [13].

Рекомендації для України

Запровадження Європейського «зеленого» курсу є вагомим подією, яка визначає довгострокову політику ЄС щодо питань клімату та енергетики. На виконання цілей ЄЗК вже розроблено велику кількість стратегій, у тому числі стосовно енергетичного сектору. Аналіз підходів до розробки і запровадження ЄЗК, вивчення підготовлених документів і запланованих шляхів досягнення поставлених цілей може бути дуже корисним для України. Це стосується, в першу чергу, прикладу проведення послідовної політики щодо розвитку відновлюваної енергетики, встановлення довгострокових цілей, правильного вибору пріоритетних напрямків, запровадження дієвих механізмів підтримки.

В Україні на сьогодні немає офіційно затверджених цілей з розвитку ВДЕ на період після 2035 року. В Енергетичній стратегії України до 2035 року (прийнятій у 2017 р.) зазначено мету досягти 25% ВДЕ у загальному постачанні первинної енергії у 2035 р. При цьому прогнозується, що ЗППЕ спочатку буде скорочуватися з 132,3 до 82,3 млн т н.е. протягом 2010-2020 рр., а потім збільшиться до 96 млн т н.е. у 2035 р. Це викликає певні питання, бо наразі для росту ЗППЕ немає об'єктивних причин. Стратегією заплановано зниження енергоемності ВВП від поточних 0,28 до 0,13 т н.е./тис. дол. США до 2035 року. Можна зазначити, що в документ закладено непогані цілі по розвитку ВДЕ і зменшенню енергоемності ВВП, але міжнародний досвід показує, що треба обґрунтовувати і ставити більш довгострокові цілі та визначати шляхи їх досягнення. Експерти неодноразово наголошували на необхідності перегляду діючої Енергетичної стратегії, отже можна рекомендувати зробити це з розширенням горизонту планування до 2050 року.

Україна як член Європейського енергетичного співтовариства взяла зобов'язання імплементувати Директиву 2009/28/ЕС (Розпорядження КМУ від 03.09.2014 № 791-р). Нажаль, цей процес відбувався дуже повільно, в результаті чого склалася ситуація, що в ЄС була прийнята нова Директива RED II, а Україна ще не завершила імплементацию Директиви RED I. В Директивах RED I і RED II одним з критеріїв сталості виробництва рідких моторних біопалив є досягнуте скорочення викидів парникових газів, при чому в новій версії документу 2018 року ці вимоги підсилено.

В Україні у 2020 р. було зареєстровано законопроект «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо обов'язковості використання рідкого біопалива (біокомпонентів) у галузі транспорту» (№ 3356 від 17.04.2020), в якому зафіксовано обов'язкові частки рідкого біопалива (біокомпонентів) в обсягах бензинів автомобільних та критерії сталості виробництва рідкого біопалива. У визначенні термінів до цього законопроекту зазначено, що «критерії сталості – вимоги, яким відповідають рідкі біопалива (біокомпоненти) та біогаз, призначені для використання в галузі транспорту, зокрема, показникам скорочення обсягів викидів парникових газів від використання зазначених видів біопалива та заборони використання окремих земельних ділянок для отримання сировини, необхідної для виробництва таких видів біопалива». Однак у тексті проекту закону відсутні будь-які вимоги щодо скорочення викидів ПГ від використання рідких біопалив. При цьому треба зазначити, що у попередньому аналогічному законопроекті, який був відізнаний, ці вимоги містилися. Рекомендується доопрацювати поточний законопроект із включенням до нього критеріїв сталості стосовно скорочення емісії парникових на рівні, принаймні, показників Директиви RED I. Також рекомендується розглянути можливість прийняття Україною зобов'язань щодо імплементации Директиви RED II.

Невдовзі після запровадження Європейського «зеленого» курсу, в Україні у січні 2020 р. було представлено проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу до 2050 року [14]. Це комплексний документ, по своїй суті подібний до матеріалів ЄЗК. В проекті Концепції зазначено мету досягти кліматично нейтральної економіки України до 2070 року. Проміжною ціллю при такому переході стане скорочення викидів парникових газів в 2030 році до рівня, який буде визначено в другому НВВ країни відповідно до вимог кліматичної Паризької угоди 2015 року. Наразі другий НВВ України ще не затверджений; експертами озвучується і обговорюється діапазон 36...42 % від рівня викидів парникових газів у 1990 році. Перший (поточний) НВВ становить 60% від рівня емісії ПГ у 1990 році.

В проекті Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року інтегровано кліматичні та енергетичні цілі, що відповідає підходам, які застосовуються в Євросоюзі. Зазначено, що розвиток відновлюваної енергетики у поєднанні з підвищенням енергоефективності є потужним інструментом декарбонізації національних і глобальної економік. Для України запропоновано ціль досягти 70% ВДЕ у

виробництві електроенергії до 2050 року. Передбачається повне заміщення вугільних ТЕС за рахунок розвитку сонячної та вітрової генерації, електростанцій на біомасі; скорочення до нуля споживання вуглецеємних енергоресурсів і максимальне використання ВДЕ в сільському та лісовому господарстві; суттєвий ріст застосування біомаси, біопалив, інших ВДЕ в інших секторах економіки; впровадження когенераційних установок на біомасі та біогазі в системах ЦТ та інші заходи.

Нажаль, проєкт Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року не знайшов свого подальшого розвитку і дотепер знаходиться у статусі громадського обговорення. Незважаючи на безумовні позитивні сторони цього документу, до нього є певні коментарі і пропозиції, детально викладені в роботі [15]. Зокрема, пропонується додати біометан до переліку відновлюваних газів, виробництво яких заплановано в Концепції; доповнити перелік обладнання перспективних систем ЦТ котлами на біомасі; передбачити використання біоетанолу та біодизелю на транспорті на весь горизонт планування до 2050 р. Таким чином, нагально рекомендується доопрацювати даний документ з урахуванням зауважень, наведених в роботі [15], і затвердити його на офіційному рівні.

Висновки

Європейський «зелений» курс визначає шлях до кліматичної нейтральності Європи, передбачаючи широке впровадження відновлюваних джерел енергії, побудову інтегрованої енергетичної системи, реалізацію комплексних заходів із скорочення викидів парникових газів. Для України ЄЗК є прикладом проведення послідовної політики щодо розвитку відновлюваної енергетики, встановлення довгострокових цілей, правильного вибору пріоритетних напрямків, запровадження дієвих механізмів підтримки. Рекомендується доопрацювання і офіційне затвердження Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року як документу, який найбільш комплексно визначає довгострокові кліматичні та енергетичні цілі країни.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Energy for the future: renewable sources of energy*. White paper for a community strategy and action plan, COM(97) 599 final, 1997. http://aei.pitt.edu/1130/1/energy_white_paper_COM_97_599.pdf
2. *Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC*, 2009. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>
3. *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>
4. N. Scarlat, J.-F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario et al. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015, v. 51, p.969-985. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006346>
5. *Energy in Denmark* 2018. Danish Energy Agency, 2020. <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/energyindenmark2018.pdf>
6. K. Appunn, Y. Haas, J. Wettengel. Germany's energy consumption and power mix in charts. *Clean Energy Wire*, 2020. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>
7. *Proposal for establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law)*, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588581905912&uri=CELEX:52020PC0080>
8. *Clean Energy*. The European Green Deal, 2019. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6723
9. *EU Energy System Integration Strategy*, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1295
10. *Communication from the commission on an EU strategy to reduce methane emissions*. COM(2020) 663 final, 2020 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu_methane_strategy.pdf
11. *Communication from the commission on an EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future*. COM(2020) 741 final, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A741%3AFIN&qid=1605792629666>
12. *A Hydrogen Strategy for Climate Neutral Europe*, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296
13. *EU renewable energy financing mechanism*, 2020. https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/eu_renewable_energy_financing_mechanism_en.pdf
14. Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року (проєкт), Мінекоенерго, 2020. <https://bit.ly/2tR0P7n>; <https://bit.ly/2wtr8BM>
15. Гелетуха Г.Г., Желєзна Т.А., Матвєєв Ю.Б. та ін. Дорожня карта розвитку біоенергетики України до 2050 року. Аналітична записка UABIO № 26, 2020. <https://uabio.org/materials/9115/>

EUROPEAN GREEN DEAL AND NEW OPPORTUNITIES FOR THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY

Zheliezna T.A.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.9>

The aim of the work is to develop recommendations for Ukraine on setting long-term integrated climate and energy goals and identifying ways to achieve them. The preconditions, main goals and objectives of the European Green Deal, which was presented by the European Commission in December 2019, are analyzed. The European Green Deal is a comprehensive strategy for the transition to a sustainable economy, clean energy and climate neutrality, i.e., zero greenhouse gas emissions, in Europe by 2050. The adoption of this Deal was preceded by several stages of a coherent EU policy in the relevant sectors. Possibilities for renewable energy development within the framework of the European Green Deal are considered. It is determined that preference is given to the production of green electricity, mobilization of the potential of offshore renewable energy, production of biogas and biofuels from biomass of agricultural origin, sustainable use of low-carbon and renewable fuels, including biomass and hydrogen, in hard-to-electricity sectors. In Ukraine, the document that is closest by its contents to the European Green Deal is the draft Concept of green energy transition until 2050 presented in January 2020. The draft Concept states the goal of achieving 70% of renewable energy sources in electricity generation by 2050 and the climate-neutral economy of Ukraine by 2070. It is recommended that this document should be finalized and adopted formally as soon as possible.

References 15, tables 1, figures 2.

Key words: renewable energy, renewable energy sources, biomass, biogas, decarbonization, greenhouse gases.

1. *Energy for the future: renewable sources of energy*. White paper for a community strategy and action plan, COM(97) 599 final, 1997. http://aei.pitt.edu/1130/1/energy_white_paper_COM_97_599.pdf

2. *Directive 2009/28/EC* on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 2009.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>

3. *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>

4. N. Scarlat, J.-F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario et al. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015, v. 51, p.969-985. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006346>

5. *Energy in Denmark* 2018. Danish Energy Agency, 2020. <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/energyindenmark2018.pdf>

6. K. Appunn, Y. Haas, J. Wettengel. Germany's energy consumption and power mix in charts. *Clean Energy Wire*, 2020. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

7. *Proposal for establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law)*, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588581905912&uri=CELEX:52020PC0080>

8. *Clean Energy*. The European Green Deal, 2019. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6723

9. *EU Energy System Integration Strategy*, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1295

10. *Communication from the commission on an EU strategy to reduce methane emissions*. COM(2020) 663 final, 2020 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/eu_methane_strategy.pdf

11. *Communication from the commission on an EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future*. COM(2020) 741 final, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A741%3AFIN&qid=1605792629666>

12. *A Hydrogen Strategy for Climate Neutral Europe*, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296

13. *EU renewable energy financing mechanism*, 2020. https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/eu_renewable_energy_financing_mechanism_en.pdf

14. *Kontseptsiiia «zelenoho» enerhetychnoho perekhodu Ukrainy do 2050 roku (proiekt)* [The Concept of Green Energy Transition of Ukraine until 2050], Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine 2020 (Ukr.)

<https://bit.ly/2tR0P7n>; <https://bit.ly/2wtr8BM>

15. *Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Matveev Y.B. et al.* Dorozhnia karta rozvytku bioenerhetyky Ukrainy do 2050 roku [Roadmap for bioenergy development in Ukraine until 2050], Position Paper No. 26 by the Bioenergy Association of Ukraine, 2020 (Ukr.) <https://uabio.org/materials/9115/>

Отримано 08.02.2021

Received 08.02.2021

УДК 621.18-5

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ REBURNING З ПРОДУКТАМИ ПІРОЛІЗУ БІОМАСИ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ДОПАЛЕННЯ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ ВІД КОТЛА ТПП 312

Кобзар С.Г., канд. техн. наук, Халатов А.А., академік НАН України

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10>

Проведено дослідження роботи системи тристадійного спалювання вугілля, яка змонтована на блоці №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС, на проектних параметрах роботи для навантаження котла 280 МВт. Встановлено, що подача палива допалення обсязі 12% від загальної теплової потужності котла дає добрий рівень зниження оксидів азоту (до 25%), забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника та не призводить до зростання втрат палива від хімічного та механічного недопалу.

Проведено исследование работы системы трехстадийного сжигания угля, которая смонтирована на блоке №4 ДТЕК Ладизинская ТЭС, на проектных параметрах работы для нагрузки котла в 280 МВт. Установлено, что подача топлива дожигания в объеме 12% от общей тепловой мощности котла дает хороший уровень снижения оксидов азота (до 25%), обеспечивает условие отсутствия шлакования труб ширмового пароперегревателя и не приводит к росту потерь топлива от химического и механического недожога.

The study of the operation of the Reburning coal combustion system, which was mounted on the unit №4 DTEK Ladyzhynska TPP, on the design parameters for the operation for the boiler load of 280 MW, was carried out. It is established that the supply of reburning fuel at 12% of the total heat capacity of the boiler gives a good level of the reduction of nitrogen oxides (up to 25%), provides no slag conditions for superheater pipes and does not lead to increase of the fuel losses with unburnt carbon.

Бібліографія 6, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: біомаса, піролізні гази, спалювання вугілля, оксиди азоту, відновлення оксидів азоту.

T – температура;

$[Y_i]$ – масова концентрація компоненти.

Скорочення:

ШПП – ширмовий пароперегрівач.

Зниження викидів шкідливих речовин від ТЕС є однією з актуальних задач сьогодення. Одним з можливих шляхів зниження викидів оксидів азоту від пилувугільного котла ТПП 312 є використання технології Reburning з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення. Як приклад може бути взято котел ТПП 312 енергоблоку №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС зі змонтованою системою спалювання вугілля за технологією Reburning, яка розрахована на використання природного газу в якості палива допалення та не використовується на теперішній час через ліміти на використання природного газу. В роботі розглянуто перспективи використання продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення для відновлення оксидів азоту за технологією Reburning на прикладі пилувугільного котла ТПП 312.

Система триступеневого спалювання вугілля (Reburning) була змонтована на типовий проект котла ТПП 312, під час його реконструкції. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 блоку №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС після реконструкції наведена на рис.1. Система

розрахована на спалювання вугілля в основних пальниках в обсязі 88% теплової потужності котла з надлишком повітря 1,05. Відновлювальна зона утворюється додатковими пальниками, в які подається природний газ разом з димовими газами. Природний газ подається у кількості 12% теплової потужності котла.

В результаті реконструкції для організації зони відновлення, на відмітці 20,3 м були змонтовані додаткові пальники для подачі палива. Додаткові пальники мають круглий перетин $\varnothing 0,3$ м, які встановлені під горизонтальним кутом 20° . На фронті та тилу котла змонтовано по 10 додаткових пальників. Природний газ подається у додаткові пальники, де змішується з димовими газами рециркуляції. На фронті та на тилу котла, для організації зони допалення, на відмітці 27,6 м встановлено сопла третинного повітря. Кожна сторона має по десять сопел прямокутного перетину $0,3 \times 0,3$ м, які встановлені під горизонтальним кутом 15° . Проектний коефіцієнт надлишку повітря за топкою котла становить 1,2. Загальний об'єм газів рециркуляції прийнято 18%,

з яких 7,5 % подаються у додаткові пальники, 5,5 % у верхні сопла рециркуляції димових газів на тилу котла, а 5% на пилосистему [1]. В процесі реконструкції котла на тилувій стінці був виконаний аеродинамічний виступ, в якому розташовані 5 сопел рециркуляції димових газів.

Котли ТПП 312 на Ладизинській ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Осереднені характеристики вугілля наведені в роботі [2-3]. Для помелу вугілля використовуються кульові барабани млини (КБМ). Результати аналізу вугільного пилу, що йде на спалювання, на ситах з чарункою 90 мкм та 200 мкм, дали наступні результати $R_{90} = 30\%$, $R_{200} = 4\%$. Використовуючи ці результати було отримано розподіл Розіна-Раммлера:

$$R_x = \exp\left(-\left(\frac{d}{7,4}\right)^{1,3}\right).$$

Еквівалентний діаметр часточки, який характеризує дану суміш складає 45,58 мкм.

Дослідження було виконано за допомогою пакета прикладних програм *Ansys CFX*, з адаптованою моделлю горіння вугілля. Модель горіння була розроблена та пройшла верифікацію в попередніх дослідженнях. Детальний опис моделі горіння вугілля та конструкції стандартного котла наведені в роботах [2 – 5].

Для виявлення впливу конструктивних та експлуатаційних параметрів на екологічні та технічні характеристики котла ТПП 312 була реалізована наступна програма розрахунків:

- Варіант №1 – Стандартний котел ТПП 312 ;
- Варіант №2 – Котел ТПП 312 зі змонтованою системою триступеневого спалювання, що працює в режимі пилувугільного котла з відключеною системою Reburning;
- Варіант №3 – Котел ТПП 312 зі змонтованою системою триступеневого спалювання, що працює з системою Reburning з природним газом в якості палива допалення;
- Варіант №4 – Котел ТПП 312 зі змонтованою системою триступеневого спалювання, що працює з системою Reburning з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення;

Всі розрахунки були виконані для навантаження 280 МВт та сумарного надлишку повітря 1,15. Для всіх розрахунків витрата у верхні сопла рециркуляції димових газів на тилу котла була однаковою та складала 5,5 % загальної витрати димових газів. Температура газів рециркуляції приймалася 380 °С. Склад димових газів (масова доля) приймався наступним: $\text{CO}_2 = 0,18804$; $\text{H}_2\text{O} = 0,167$; $\text{O}_2 = 0,06496$; $\text{N}_2 = 0,58$.

При моделюванні стандартного котла (Варіант 1) та котла з відключеною системою триступеневого спалювання (Варіант 2), вся витрата вугілля та повітря подава-

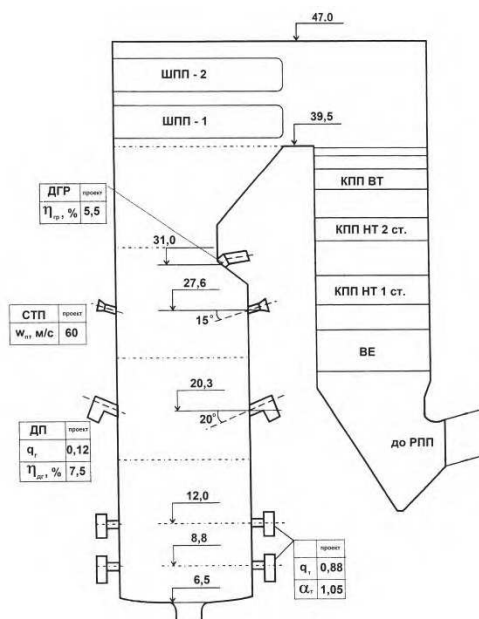


Рис. 1. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 з системою триступеневого спалювання блоку № 4 Ладизинська ТЕС [1]

лися у основні пальники. Робота системи *Reburning* моделювалася шляхом розділення витрати палива на два потоки: в основні пальники подавалася витрата вугілля в еквіваленті теплової потужності 88% при надлишку повітря 1,05, а у додаткові пальники подавалася суміш природного газу з димовими газами (Варіант 3) чи суміш піролізних та димових газів (Варіант 4). Теплова потужність палива, що подавався у додаткові пальники в обох випадках складала 12% від загальної теплової потужності котла. При використанні в якості пали-

ва допалення природного газу було прийнято, що він складається тільки з метану. Склад піролізних газів був взятий з результатів попередніх досліджень [6] з припущенням, що всі вуглеводні представлені еквівалентною кількістю (масова частка) метану. Склад суміші, що подавалася у в додаткові пальники в залежності від виду палива допалення наведений в таблиці 1.

Для Варіанту №3 сумарна витрата крізь додаткові пальники складала 33,4533 кг/с, з них 1,81 кг/с - метан з теплотою згоряння 50,1 МДж/кг. Для Варіанту №4

Таблиця 1. Склад суміші, що подавався у в додаткові пальники в залежності від виду палива допалення

Варіант №	T, K	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	H ₂
3	663	0,17786	0,15796	0,06144	0,54861	0,05413	0,0	0,0
4	663	0,1938	0,144	0,0478	0,5183	0,0211	0,0739	0,0011

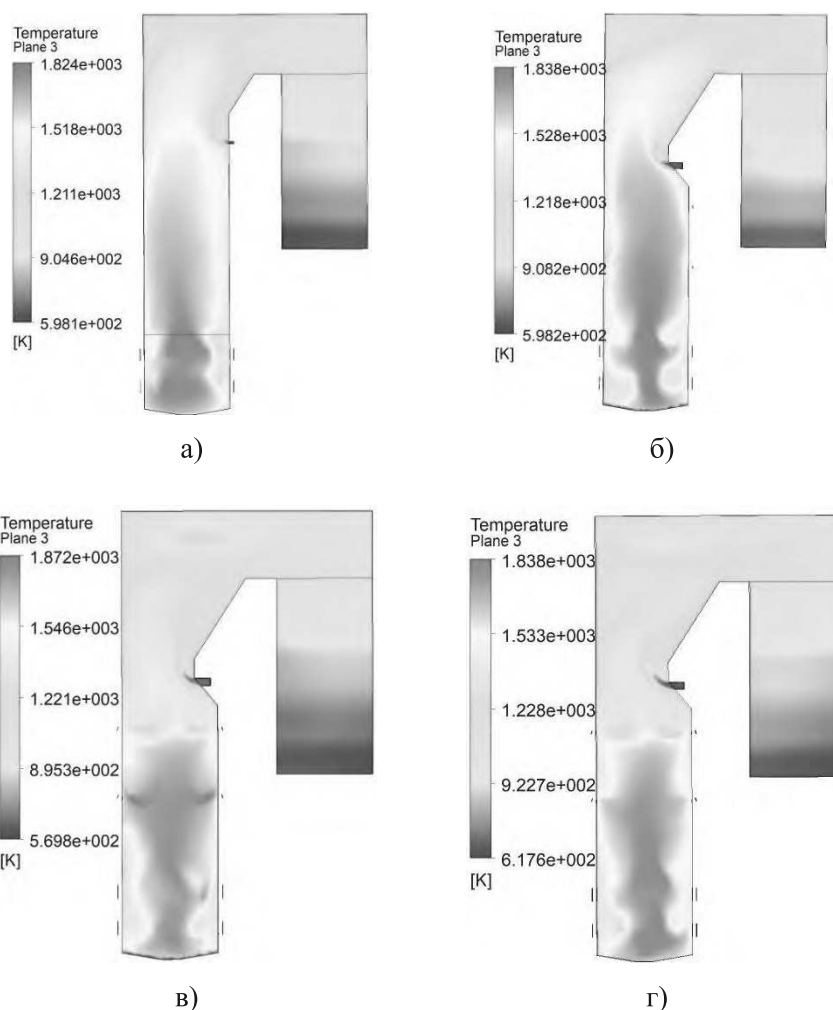


Рис. 2. Температурне поле на осі котла ТПП 312: а) стандартний котел; б) – г) котел з системою триступеневого спалювання: б) – котел з відключеною системою; в) – в якості палива допалення використовується природний газ; г) – в якості палива допалення використовуються продукти піролізу біомаси

сумарна витрата крізь додаткові пальники складала 42,983 кг/с, з них 11,34 кг/с - піролізні гази з теплою згоряння 8 МДж/кг.

Для моделювання горіння метану та піролізного газу використовувався триступеневий механізм горіння метану, який показав гарні результати при тестуванні [6].

Результати розрахунків температурного поля для базової конструкції котла ТПП 312 (рис. 2, а) показують, що максимальна температура знаходиться в межах запального поясу, після запального поясу факел займає майже всю ширину топки. В горі топки, внаслідок підмішування димових газів рециркуляції максимум температури зміщується до фронту котла. Максимальне значення температури в перетині перед ШПП I ст. становить 1399 К (див. Табл. 2), що менше температури розм'ягчення попелу, що забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника.

Розподіл концентрації оксиду азоту на осі котла ТПП 312 для всіх варіантів, що розглядалися представлено на рис. 3. Результати розрахунків показують, що максимальна концентрація оксиду азоту однакова для всіх варіантів, що в першу чергу пов'язано з температурними полями в середині топки (рис. 2). Максимальне значення концентрації оксидів азоту знаходиться в центрі топки в зоні де розташовані пальники. Для стандартної конфігурації топки котла (рис.3,а), після максимуму концентрації оксиду азоту в низу топки, спостерігається транспорт утворених та генерація нових оксидів азоту переважно біля фронтальної та тилової поверхонь топки. Генерація нових оксидів азоту в першу чергу пов'язана з паливним механізмом від азоту, що міститься у коксовому залишку часток вугілля.

При спалюванні вугілля в топці з відключеною системою триступеневого спалювання вугілля (рис.3,б),

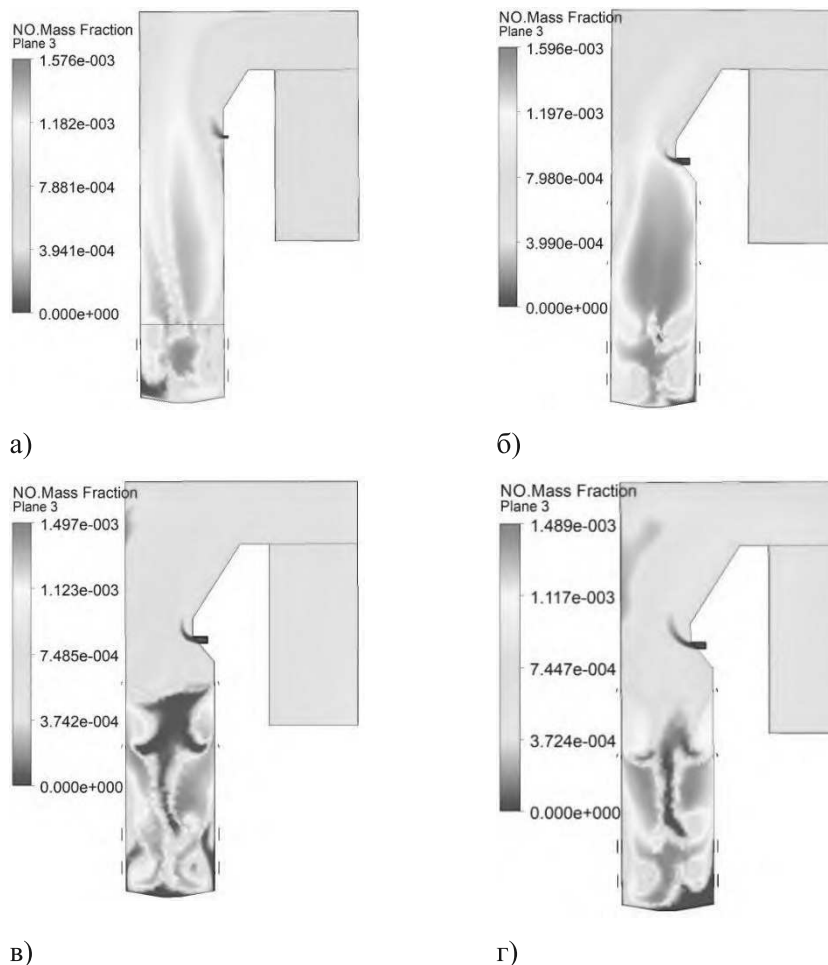


Рис. 3. Концентрація оксиду азоту на осі котла ТПП 312: а) стандартний котел; б) – г) котел з системою триступеневого спалювання: б) – котел з відключеною системою; в) – в якості палива допалення використовується природний газ; г) – в якості палива допалення використовуються продукти піролізу біомаси

внаслідок встановлення аеродинамічного виступу, відбувається піджим потоку димових газів, внаслідок чого, вся генерація оксидів азоту відбувається в об'ємі топки, що розташований нижче аеродинамічного виступу. Внаслідок зміни геометрії топки котла, сумарна генерація оксидів азоту, порівняно зі стандартним котлом, зменшилася на 8,5 % (див. Табл. 2).

У випадку експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з використанням природного газу в якості палива допалення (рис. 3, в) спостерігається утворення зони відновлення оксидів азоту, яка розташована вище додаткових пальників. В цій зоні, при взаємодії оксидів азоту з вуглеводневими радикалами, відбувається відновлення оксидів азоту до молекулярного азоту. Далі за потоком при введенні третинного повітря яке призначено для допалення фрагментів палива, що не згоріло, спостерігається зона генерації оксидів азоту, переважно за термічним механізмом утворення. В наслідок роботи системи триступеневого спалювання вугілля спостерігається зменшення емісії оксидів азоту на 31,6 %. Цей результат коригується з результатами випробування даної системи на 4 блоці ЛаТЕС у 1992 році, коли спостерігалось зменшення емісії оксидів азоту на 28...40 % [1]. Різниця у значенні ефективності в першу чергу пов'язана з відмінностями у складі вугілля, в першу чергу через вміст паливного азоту в вугіллі. Слід відзначити, що зниження емісії оксидів азоту при експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з паливом допалення – природний газ відбувається через два основні фактори:

- Відновлення оксидів азоту внаслідок дії механізму хімічної кінетики Reburning;
- Зменшення генерації оксидів азоту за паливним механізмом утворення, через заміну в паливному балансі котла частини вугілля на природний газ, в складі якого відсутній паливний азот.

При експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з використанням продуктів піролізу біомаси в

якості палива допалення (рис. 3, г) спостерігається утворення зони відновлення оксидів азоту подібної як і для випадку коли використовується природний газ, але вона менша за площею та має меншу інтенсивність. Даний факт пов'язаний з тим, що продукти піролізу біомаси містять незначну кількість вуглеводнів, а основна частка складає оксид вуглецю. Ефективність зниження оксидів азоту системою триступеневого спалювання вугілля з використанням продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення складає 23,1 % в порівнянні зі стандартним проектом котла ТПП 312 (табл. 2). Зниження емісії оксидів азоту при експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з паливом допалення – продукти піролізу біомаси відбувається через чотири основні фактори:

- Відновлення оксидів азоту внаслідок дії механізму Reburning;
- Зменшення генерації оксидів азоту за паливним механізмом утворення, через заміну в паливному балансі котла частини вугілля на піролізний газ, в складі якого відсутній азот;
- Зниження концентрації молекулярного азоту в паливі допалення в наслідок баластування його оксидом вуглецю (табл. 1);
- Пригнічення генерації оксидів азоту за термічним механізмом утворення в зоні допалення, внаслідок зменшення температури, що обумовлено меншою реакційністю піролізних газів порівняно з природним газом.

Порівнюючи результати по відновленню оксидів азоту в наслідок роботи системи триступеневого спалювання вугілля яка використовує в якості палива допалення природний газ чи продукти піролізу біомаси (табл. 2), можна зробити висновок, що вони мають близьку ефективність при однаковій тепловій потужності палива, що подається у додаткові пальники. При використанні природного газу ефективність відновлення оксидів азоту вище на 8,5 % ніж при використанні продуктів піролізу

Таблиця 2. Експлуатаційні характеристики топки котла ТПП 312 в залежності від режиму роботи системи триступеневого спалювання

Варіант розрахунку	Кількість палива допалення, %	$T_{\max}$ біля ШПП, К	Втрати палива, %	Емісія NO, кг/с	Зниження NO, %
1	0	1399	0,24	0,294	0
2	0	1399	0,26	0,269	8,5
3	12	1283	0,3	0,201	31,6
4	12	1291	0,23	0,226	23,1

біомаси. Слід відзначити, що подача палива допалення у обсязі 12% від загальної теплової потужності котла дає добрий рівень зниження оксидів азоту, забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника та не призводить до зростання втрат палива від хімічного та механічного недопалу.

Висновки

1. Проведено моделювання роботи системи триступеневого спалювання вугілля блоку №4 Ладизинської ТЕС з паливом допалення природний газ та продукти піролізу біомаси.

2. Подача палива допалення у обсязі 12% від загальної теплової потужності котла дає добрий рівень зниження оксидів азоту, забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника та не призводить до зростання втрат палива від хімічного та механічного недопалу.

Робота виконана в межах наукової роботи Н.Е.4.4 «Підвищення екологічності котла ТПП 312 шляхом застосування технології Reburning при використанні традиційних та відновлюваних джерел енергії» цільової програми НАН України «Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії».

ЛІТЕРАТУРА:

1. Моспан Ю.М., Лисовой В.Г. Итоги внедрения схемы трехступенчатого сжигания топлива на котле ТПП 312 Ладизинской ГРЭС// Первая Американско-украинская конференция «Защита атмосферного воздуха от вредных выбросов ТЭС», 9-10 сентября 1996, Киев. – С. 84 – 88.
2. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення зон підвищеної ерозії топкових екранів в залежності від режиму навантаження котлоагрегату ТПП 312 Ладизинської ТЕС// Пром. теплотехніка. — 2011. — 33, № 4. — С. 55-62.

3. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладизинська ТЕС // Вісник НТУУ ХПІ. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №13(1056). – С.85–91.

4. Зменшення ерозії топкових екранів шляхом керування структурою течії в об'ємі топки котла ТПП-312/ Кобзар С.Г., Халатов А.А// в кн.. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010-2012 рр. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2012. – 612 с./ - С. 279 – 288.

5. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з використанням вугілля в якості палива допалення// Промышленная теплотехника. – 2017. – Т.39 – №.5. – С. 91 – 96.

6. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Використання продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення для відновлення оксидів азоту: тестування механізму хімічної кінетики // Теплофізика та теплоенергетика, 2020, т. 42, №2, с.92-98; <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.10>

USE OF THE REBURNING TECHNOLOGY WITH BIOMASS PYROLYSIS PRODUCTS AS A REBURNING FUEL TO REDUCE EMISSIONS OF NITROGEN OXIDES FROM TPP 312 BOILER

Kobzar S.G., Khalatov A.A.

Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine, vul. Marii Kapnist, 2a, Kiev, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10>

In Ukraine, a three-stage coal combustion system fueled by a natural gas as a reburning fuel for nitrogen oxides emission reduction was mounted on Unit № 4 of the Ladyzhyn TPP. This system was developed in cooperation with Combustion Engineering (USA), VTI (Russia) and the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and was assembled by the Ladyzhyn TPP staff in 1992. The test runs of this system had confirmed the effectiveness of this method of reducing emissions of nitrogen oxides into the atmosphere (up to 50%). Unfortunately, due to the high price of natural gas and the introduction of limits on its use, currently the use of natural gas as a fuel for reburning is impossible. One of the possible ways to reduce emissions of nitrogen oxides from the coal-fired boiler TPP 312 is the operation of Reburning technology with the biomass pyrolysis product as reburning fuel.

The aim of the work was to evaluate the possibility of the application the biomass pyrolysis products as a reburning fuel in Reburning technology to reduce nitrogen oxides from the coal-fired boiler TPP 312. For this purpose, a detailed computer model of a standard TPP 312 boiler and a TPP 312 boiler with a coal reburning combustion system was developed and built.

The study of the operation the Reburning coal combustion system, which is mounted on the unit №4 DTEK Ladyzhynska TPP, on the design parameters of the operation for the boiler load of 280 MWe was carried out. It was determinate that the supply of reburning fuel at 12% of the total heat capacity of the boiler gives a good level of the reduction of nitrogen oxides (up to 25%), provides no slag conditions for superheater pipes and does not lead to increase of the fuel losses with unburnt carbon.

Bibliography 6, fig. 3, tab. 2

Key words: biomass, pyrolysis gas, coal combustion, nitrogen oxides, nitrogen oxides reduction.

1. Mospan Yu.M., Lisovoy V.G. Results of the implementation of a three-stage fuel combustion scheme at the TPP 312 boiler at Ladyzhinskaya GRES // First American-Ukrainian Conference "Protection of atmospheric air from hazardous emissions from thermal power plants", September 9-10, 1996, Kiev., P. 84 - 88. (Rus)

2. Kobzar SG, Khalatov A.A. Determination of zones of increased erosion of furnace screens depending on the load mode of the boiler CCI 312 Ladyzhynska TPP// Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2011. 33, № 4. P. 55-62. (Ukr.)

3. Kobzar SG, Khalatov AA. Determination of the efficiency of reducing emissions of nitrogen oxides by a system of step-by-step combustion of a boiler of coal TPP-312 of block # 6 of DTEK Ladyzhinsk TPP // Bulletin of NTUU KhPI. Series: Power and heat engineering processes and equipment. 2014 # 13 (1056). P.85-91 (Ukr.)

4. *Reducing the erosion of furnace screens by controlling the structure of the flow in the volume of the furnace boiler TPP-312 / Kobzar SG, Khalatov AA // in the book. Problems of resource and safety of structures, structures and machines: Collection of scientific articles according to the results obtained in 2010-2012 - Kyiv: Institute of Electric Welding. E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012. - 612 pp. / P. 279 - 288. (Ukr.)*

5. Kobzar, S., & Khalatov, A.. The investigation of the efficiency of the nitrogen oxides reduction by advanced reburning method application with the coal dust as a reburning fuel. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2017, 39(5), 91-96. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.15> (Ukr.)

6. Kobzar, S., & Khalatov, A. Application of the biomass pyrolysis products as a reburning fuel for nitrogen oxides reduction: testing the chemical kinetics mechanism. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2020, 42(2), 92-98. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.10> (Ukr.)

*Отримано 26.01.2021
Received 26.01.2021*

УДК 536.242; 536.4

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ТА ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ З ПРИМУСОВИМ ВИДАЛЕННЯМ РОЗПЛАВУ

Ободович О.М., д.т.н., Іваницький Г.К., д.т.н., Степанова О.Є.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.11>

Для способу плавлення речовини, розміщеної в циліндричній ємності, що ґрунтується на русі дискового нагрівального елемента під дією сили тяжіння в процесі плавлення і перетікання розплавленої речовини через зазори між диском і стінками ємності проведено моделювання. Представлено моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача, та течії розплаву під нагрівачем.

Для способа плавления вещества, размещенного в цилиндрической емкости, основанного на движении дискового нагревательного элемента под действием силы тяжести в процессе плавления и перетекания расплавленного вещества через зазоры между диском и стенками емкости проведено моделирование. Представлено моделирование течения расплава в кольцевом зазоре, описывающее ламинарное течение под действием перепада давления и скорости движения стенки емкости относительно нагревателя, и течения расплава под нагревателем.

For the method of melting a substance placed in a cylindrical tank, based on the movement of a disc heating element under the action of gravity during melting and overflow of molten substance through the gaps between the disc and the walls of the tank, simulation has been carried out. Simulation of the melt flow in the annular gap is presented, which describes the laminar flow under the influence of the pressure drop and the velocity of the vessel wall relative to the heater, and the melt flow under the heater.

Бібліографія 12, рис. 4.

Ключові слова: нагрівання, плавлення, вуглеводневі суміші, кільцевий зазор, дисковий зазор, математичне моделювання.

C_p – теплоємність;

G_m – масова витрата;

L_{melt} – тепловий потік;

Q – тепловий потік;

p – тиск;

R – радіус;

S – площа поперечного перерізу;

T – температура;

W_{fr} – витрата енергії на в'язке тертя;

δ – ширина зазору;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

μ – в'язкість;

v_z – швидкість;

ρ – густина;

τ – час;

τ_{rz} – напруження зсуву;

w_0 – швидкість руху стінки;

Нижні індекси:

δ – розплав;

cl – переріз зазору;

h – нагрівач;

m – масова;

vs – вазелін;

z – зазор.

Вступ. Процеси нагрівання і плавлення органічних речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, насамперед, вуглеводнів (вазелін, парафін, церезин, віск, нафтопродукти, тверді жири тощо), а також різного типу полімерних матеріалів та окремих видів харчових продуктів широко розповсюджені в хімічній, нафтопереробній, фармацевтичній, харчовій та інших галузях промисловості [1-4]. Кожен з таких продуктів

є складною сумішшю твердих, рідких та напіврідких вуглеводнів із різною молекулярною масою і тому не має визначеної температури переходу з одного агрегатного стану в інший. Усі ці речовини є неньютонівськими рідинами і характеризуються сильною залежністю в'язкості від температури [5,6]. Вплив температури на реологічні показники та на агрегатний стан таких продуктів відіграє важливу роль при їх транспортуванні

та експлуатації, що робить промислові процеси нагрівання та плавлення занадто трудомісткими та енерговитратними.

Продукти перегонки нафти, що складаються в основному із суміші граничних вуглеводнів, широко застосовуються в якості вуглеводневих основ у виробництві м'яких лікарських форм зовнішньої дії – кремів, мазей тощо. На підприємствах фармацевтичної промисловості для нагрівання та плавлення основ для виготовлення косметичних і лікарських препаратів застосовують теплообмінні апарати періодичної дії з мішалками. Передача тепла в цих апаратах здійснюється в нестационарному режимі з великим перепадом температур, що призводить до небажаних змін властивостей кінцевого продукту, безпосередньо, і самих речовин. При роботі на такому обладнанні неможливо домогтися рівномірного прогріву всієї маси речовини, а отже і якісної теплової обробки.

Аналіз публікацій, присвячених нагріванню та плавленню речовин з низьким коефіцієнтом теплопровідності, засвідчує потребу в розробці сучасних методів та новітнього обладнання для більш ефективної реалізації цих технологічних процесів із зменшенням енергетичних витрат. З цієї точки зору перспективним вважається метод термоконтактного плавлення з примусовим видаленням розплаву із зони контакту. Такий принцип застосовується при обробці полімерних матеріалів та композитів із застосуванням черв'ячних та дискових екструдерів [7, 8]. Видалення розплаву відбувається за рахунок двох фізичних механізмів: течії, що виникає внаслідок тертя стінок та течії під дією

нормального тиску металевого нагрівача на поверхню твердого полімеру. Комплексному дослідженню цих процесів присвячена велика кількість зарубіжних та вітчизняних публікацій [8-10].

Схожа задача примусового виведення розплаву із зони вирішувалася також при розробці методу термоконтактного проникнення джерела тепла в глибинні надра за допомогою автономного пристрою – термозонду, що містить потужний малогабаритний автономний теплогенератор з метою визначення швидкості руху термозонду, товщини шару розплаву на лобовій поверхні термозонду та інших параметрів перебігу процесу термопроникнення [11]. Враховувалася сукупність двох аспектів задачі: поширення тепла від термозонду через розплави до породи для її прогрівання з подальшим плавленням та перетікання розплаву від лобової частини термозонду в напрямку протилежному руху.

До останнього часу метод термоконтактного плавлення вуглеводнів у виробництві косметичних і фармацевтичних препаратів не застосовувався. При використанні традиційних методів нагрівання та плавлення матеріалу за рахунок теплопровідності тривалість процесу плавлення вазеліну або парафіну складала від 12 до 24 годин, а питомі витрати теплової енергії становлять 0,25...0,37 кВт•год/кг.

В ІТТФ НАНУ було розроблено спосіб плавлення вуглеводнів за рахунок контактного та конвективного переносу тепла із примусовим видаленням розплаву [12, 13] і створено експериментальний стенд для визначення раціональної конструкції апарату та оптимальних режимів його роботи (рис. 1).

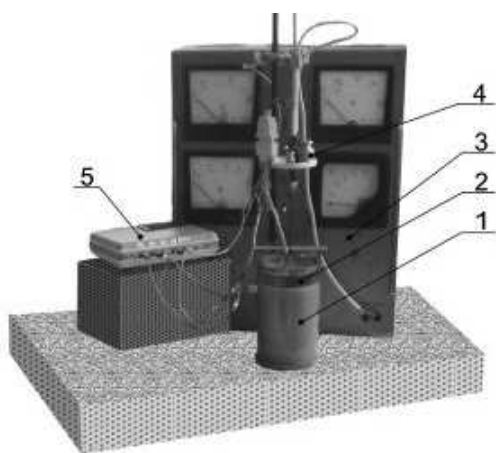


Рис. 1. Загальний вигляд стенда для експериментального дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей:

**1 – ємність з речовиною; 2 – електричний нагрівач; 3 – регулятор напруги;
4 – тягар; 5 – аналогово-цифровий перетворювач**

Спосіб плавлення твердої вуглеводневої основи, полягає у підведенні теплоти безпосередньо до фронту фазового перетворення за допомогою дискового нагрівача, який контактує із зовнішньою границею нерозплавленої речовини і поступово переміщується в ній під дією сили тяжіння. При цьому температура дискового нагрівача в зоні контакту з основою підтримується нижчою температури її деструкції.

Підтримання постійного контакту нагрівача з поверхнею твердої речовини відбувається завдяки перетіканню шару розплаву під дією нормального тиску з боку нагрівача через зазори між диском і стінками ємності. В товщі розплаву, який поступає через зазори на зовнішню поверхню диску верхню поверхню нагрівача, підтримання температури плавлення відбувається за рахунок конвективної теплопередачі від верхньої поверхні нагрівача. Саме такі процеси моделюються при дослідженні процесів плавлення та гомогенізації полімерних матеріалів [8].

З математичної точки зору задача плавлення шляхом теплопровідності з примусовим видаленням розплаву є більш складною ніж звичайна задача плавлення, оскільки необхідно шукати спільне вирішення рівняння кількості руху та рівняння енергій. Задача ще більш ускладнюється неозначеністю агрегатного та реологічного стану речовини в процесі плавлення в залежності від температур та необхідністю врахування її неньютонівських властивостей.

Цим, зокрема, пояснюється та обставина, що на теперішній час відсутні публікації, пов'язані з моде-

люванням процесів нагрівання та плавлення саме вуглеводневих сумішей, таких як вазелін, парафін, жири, ланолін тощо.

Метою даного дослідження є розвиток теорії та методів моделювання процесів нагрівання та плавлення цих речовин на основі результатів експериментальних досліджень на лабораторному стенді як першого етапу розробки математичної моделі перебігу цих процесів.

Моделювання процесів нагрівання та плавлення. Експериментальні дослідження процесів нагрівання та плавлення вуглеводів проводилися на лабораторному стенді, схематично представленому на рисунку 2. Для теоретичного аналізу результатів експерименту створено математичну модель, яка описує особливості гідродинаміки, тепло- та масообміну в процесі нагрівання та плавлення.

Математична модель базується на таких припущеннях:

1. Стаціонарність процесу нагрівання та плавлення.
2. Розплав – в'язка нестислива ньютонівська або неньютонівська рідина.
3. Теплофізичні властивості розплаву постійні.
4. Рух розплаву в зазорах – ламінарний ($Re < 1$).
5. На стінках відсутнє прослизання.

Моделними об'єктами дослідження обрані вазелін та парафін, які є складними вуглеводневими сумішами, склад та властивості яких можуть варіюватися в залежності від ступеня очищення, від галузі їх застосування та від багатьох інших параметрів.

Модель представлена базовими рівняннями: рівняння теплопровідності, нерозривності та збереження кількості руху (1)-(5).

Рівняння теплопровідності в осьовому (1) та в радіальному напрямі (2)

$$\frac{\lambda}{\rho \tilde{N}_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w_0 \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Рівняння нерозривності

$$G_m = \rho S v = \text{const}.$$

Рівняння збереження кількості руху

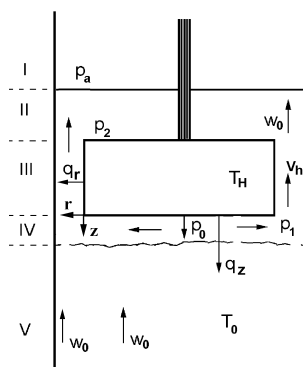


Рис. 2. Схема до моделі процесів нагрівання та плавлення з примусовим видаленням розплаву: I – повітря; II – розплав над нагрівачем; III – нагрівання та доплавлення у кільцевому зазорі; IV – нагрівання і плавлення в дисковому зазорі; V – тверда речовина

$$\rho v_z \frac{dv_z}{dz} = -\frac{dp}{dz} + \mu(T) \frac{d^2 v_z}{dr^2} + \rho g. \quad (4)$$

Рівняння нагрівання та плавлення речовини

$$Q = \frac{d(mC_p T)}{d\tau} + \frac{dm}{d\tau} \cdot L_{melt}. \quad (5)$$

Із застосуванням цих базових рівнянь далі розглядається течія розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки та в дисковому зазорі під нагрівачем.

Течія розплаву в кільцевому зазорі під дією перепаду тиску і руху стінки. В'язка рідина тече у вузькому кільцевому каналі між двома співвісними циліндрами під дією перепаду тиску на кінцях каналу з урахуванням сили тяжіння. Стінка зовнішнього циліндра рухається зі швидкістю нерухомої стінки внутрішнього циліндра із швидкістю в напрямку протилежному градієнту тиску (рис. 3а). Потрібно знайти розподіл напруження зсуву і швидкості потоку по ширині зазору.

Задачу течії рідини в кільцевому зазорі доцільно вирішувати в циліндричній системі координат. Але для неньютонівської рідини в циліндричній системі координат задача не має аналітичного рішення і для її вирішення слід застосовувати чисельні методи. Враховуючи, що зазор між ємністю і нагрівачем дуже вузький ($\delta/R_1 = 0,05$), задачу можна вирішувати не в циліндричних, а в декартових координатах шляхом переходу до плоско-паралельної моделі. В цьому ви-

падку задача вирішується в аналітичному вигляді і для неньютонівської і для неньютонівської рідини.

Як і в циліндричній системі координат, напрямок руху рідини в зазорі позначається z , а напрямок вздовж ширини зазору позначимо y . Перехід від циліндричної до декартової системи координат схематично представлено на рис. 2. Як видно з рисунку, напрямок координати r в декартовій системі співпадає з напрямком координати в циліндричній системі. Початок координат $(0, z)$ вибираємо в довільній точці на периметрі кола нижньої поверхні нагрівача, так що точка $y = 0$ відповідає точці $r = R_1$ в циліндричній системі. Координата внутрішньої поверхні стінки ємності $r = R_2$ очевидно відповідає координаті $y = \delta$ в декартовій системі. Відстані по координаті z в обох системах координат мають однакові значення. Швидкість течії розплаву через зазор, яка в циліндричній системі позначається $v_z(r)$, а в декартовій системі – $v_z(0)$, в обох системах мають ті ж самі значення.

В плоско-паралельній моделі швидкість $v_z(0)$ розглядається як швидкість переміщення розплавленого вазеліну в зазорі відносно нагрівача. Так само, в обох системах однакове значення має також швидкість опускання нагрівача v_h , яка в моделі визначає швидкість переміщення стінки ємності і твердого і розплавленого вазеліну в об'ємі ємності поза зазором відносно нагрівача.

В плоско-паралельній моделі швидкість руху стінки ємності відносно нагрівача будемо позначати w_0 . Тобто, за величиною $w_0 \equiv v_h$.

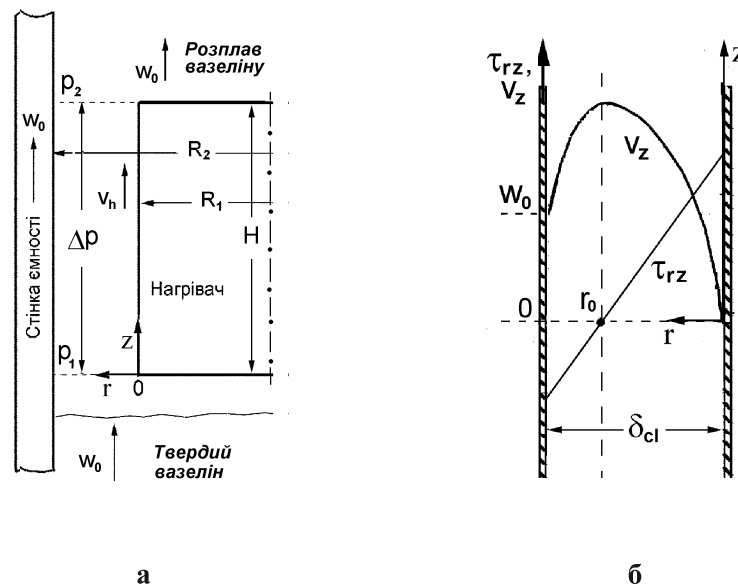


Рис. 3. Схема течії розплаву в кільцевому зазорі (а) та розподіл швидкості $v_z(\delta)$ і зсувних напружень $\tau_{rz}(\delta)$ по ширині зазору (б)

В плоско-паралельній моделі права поверхня зазору $y = 0$, яка відповідає боковій поверхні нагрівача, є нерухомою, а ліва поверхня зазору, яка відповідає внутрішній поверхні стінки ємності, рухається відносно поверхні нагрівача із швидкістю w_0 в додатному напрямі z .

Рішення для ламінарної течії в циліндричних координатах. Модель описує ламінарну течію в зазорі під дією перепаду тиску $p_1 - p_2$, а також під дією руху стінки ємності відносно нагрівача із швидкістю w_0 . І перепад тиску $p_1 - p_2$, і швидкість руху стінки w_0 (швидкість опускання нагрівача), поки що, залишаються не визначеними.

Для того щоб вирішити цю задачу, треба визначити розподіл напруження тиску по ширині зазору $d\tau_{rz}/dr$. Для всіх задач течії в циліндричних трубах і кільцевих зазорах воно описується стандартним рівнянням руху:

$$\frac{d(r\tau_{rz})}{dr} = -\frac{dp}{dz} = \frac{p_1 - p_2}{H}. \quad (7)$$

Залежність напруження тиску від радіусу завжди пряма лінія (рис. 3б), а тому похідна $d\tau_{rz}/dr$ завжди постійна, але невідома величина. У всіх цих задачах записується рівняння в'язкості для ньютонівської або неньютонівської рідини (8), яке при заданій в'язкості μ пов'язує напруження зсуву τ_{rz} на будь-якій відстані r із швидкістю потоку $v_z(r)$ в цій точці (рис. 3б).

Для ньютонівської рідини рівняння в'язкості має вигляд:

$$\tau_{rz}(r) = -\mu \frac{dv_z}{dr}. \quad (8)$$

Рівняння напруження зсуву

$$\tau_{rz}(r) = \frac{\Delta p}{H_h} (r - r_0). \quad (9)$$

В нашій задачі в рівнянні (9) для $\tau_{rz} = f(r)$ міститься невідомий параметр r_0 (рис. 3б), який необхідно визначити для вирішення цієї задачі.

З рівняння в'язкості швидкість потоку в будь-якій точці r визначається швидкістю потоку, яка містить невідомий параметр r_0 .

$$v_z(r) = \frac{\Delta p}{\mu H_h} \left(r_0 r - \frac{r^2}{2} \right) \text{ при } r \leq r_0; \quad (10a)$$

$$v_z(r) = w_0 - \frac{\Delta p}{\mu H_h} \cdot \left(r_0(\delta - r) - \frac{\delta^2 - r^2}{2} \right) \text{ при } r_0 \leq r \leq \delta. \quad (10b)$$

Рівняння (10a) описує ліву гілку параболи (зліва від r_0), а рівняння (10b) – праву гілку (рис. 3). Обидва ці рівняння містять невідомий параметр r_0 . Але, як видно з рисунку в точці $r = r_0$ значення швидкості по рівнянню (10a) і (10b) будуть однаковими. Тому прирівнюючи швидкості ми знаходимо r_0 і далі вирішуємо задачу.

$$r_0 = \frac{\delta_{cl}}{2} + \frac{\mu H}{\Delta p \cdot \delta_{cl}} w_0. \quad (11)$$

Розраховуємо середню швидкість розплаву в зазорі:

$$\bar{v}_z = v_{cl} = w_0 \frac{(\delta - r_0)}{\delta} + \frac{(p_1 - p_2)}{\mu H_h} \left[\frac{\delta^2}{3} - (\delta - r_0) \cdot r_0 \right]. \quad (12)$$

В рівняннях цієї моделі невизначеним залишаються тиск p_1 на вході в зазор, відносна швидкість руху стінки w_0 і в'язкість розплаву μ .

Для знаходження цих величин модель кільцевого зазору треба зв'язати з моделлю течії під нагрівачем і з моделлю плавлення, які і складають загальну модель апарата.

Течія розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем.

Моделювання течії розплаву в дисковому зазорі (рис. 4a) прямо пов'язано із моделюванням течії розплаву для кільцевого зазору, бо розплав безпосередньо переходить із дискового в кільцевий зазор як одна нерозривна течія. Це необхідно для визначення невідомого тиску p_1 , без якого не можливо було розглядати ці течії. А загальне переміщення розплаву в апараті відбувається внаслідок дії відомого тиску нагрівача на вході і атмосферного тиску на виході.

Записується стаціонарне рівняння руху розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем у вигляді рівняння Бернуллі для стаціонарних потоків. Ширина зазору δ_m приймається постійною. Це відстань між нижньою поверхнею нагрівача і поверхнею твердого вазеліну. Тому вважається, що розплав витікає із-під зазору в напрямі r між двома твердими поверхнями. При витіканні розплаву із зазору δ_m на його місце з поверхні твердого вазеліну надходить нова порція розплавлено вазеліну із швидкістю w_0 , тобто з постійною швидкістю опускання нагрівача. Отже, скільки в зазор поступає роз-

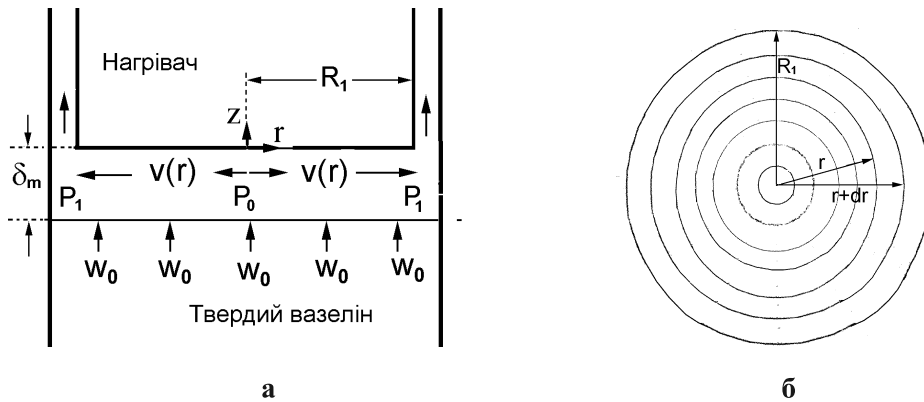


Рис. 4. Схема течії розплаву в дисковому зазорі під нагрівачем (а) та схема розбиття дискового зазору на елементарні зони (б)

плавленого вазеліну, стільки і витікає із зазору. Це впливає з рівняння нерозривності або з балансу маси. Враховується також втрата напору в течії у зазорі внаслідок тертя на верхній та нижній поверхні зазору.

Рівняння руху течії на ділянці між r та $r + dr$ (рис. 4б):

$$\rho \frac{v^2(r)}{2} + p(r) = \rho \frac{v^2(r+dr)}{2} + p(r+dr) + dW_{fr}. \quad (13)$$

Витрата енергії на в'язке тертя на цій ділянці:

$$dW_{fr} = \mu \frac{v(r)}{\delta_m} \cdot \frac{dS_z}{dS_r} = \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (14)$$

Швидкість течії в зазорі:

$$v(r) = \frac{w_0 r}{2\delta_m}. \quad (15)$$

З урахуванням (14) та (15) рівняння руху має вигляд:

$$-\frac{dp}{dr} dr = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r \cdot dr}{4\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r}{2\delta_m^3} dr. \quad (16)$$

Після інтегрування в межах від 0 до r одержимо:

$$p_0 - p(r) = \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi r^2}{8\delta_m^2} + \mu \frac{w_0 r^2}{4\delta_m^3} = \frac{w_0 r^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (17)$$

Підставляючи в (17) $r = R_1$, знаходимо тиск p_1 на виході із-під нагрівача:

$$p_1 = p_0 - \rho \cdot \frac{w_0^2 \cdot \pi R_1^2}{8\delta_m^2} - \mu \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^3} = p_0 - \frac{w_0 R_1^2}{4\delta_m^2} \left(\frac{\pi \rho w_0}{2} + \frac{\mu}{4\delta_m} \right). \quad (18)$$

Приймається що в центрі при $r = 0$ на розплав діє тиск p_0 (вага нагрівача), а на виході – невідомий тиск $p_1 < p_0$. Течія може відбуватися лише при перепаді тиску $\Delta p = p_0 - p_1$. Але, тиск p_1 – це тиск на вході в кільцевий зазор між стінкою ємності і нагрівачем, який присутній в рівняннях моделі для кільцевого зазору. В результаті вирішення рівнянь для течії в дисковому зазорі (13)-(17) в останньому рівнянні (18) визначено тиск p_1 , який можливо далі застосовувати.

Висновки

1. Для оптимізації та розрахунків параметрів процесів нагрівання та плавлення розроблена математична модель процесів нагрівання та плавлення з примусовим видаленням розплаву, що дає можливість провести розрахунки для різноманітних вуглеводневих сумішей.

2. Розроблене моделювання течії розплаву в кільцевому зазорі, що описує ламінарну течію під дією перепаду тиску і швидкістю руху стінки ємності відносно нагрівача дало можливість розрахувати середню швидкість розплаву через зазор.

3. В результаті моделювання течії розплаву під нагрівачем, що безпосередньо пов'язане з моделюванням течії розплаву через кільцевий зазор, бо розплав переходить із дискового в кільцевий зазор як одна нерозривна течія, було визначено тиск на вході в кільцевий зазор між стінкою і нагрівачем.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бойченко Н.Б., Колесников В.А. Мягкие лекарственные формы. Технология приготовления и особенности прописи рецептов: метод. указания [Электронный ресурс]. Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016 – 30 с.
2. Луць В.В., Гладышев В.В., Лисянская А.П., Бирюк И.А. Изучение влияния основ-носителей на высвобождение активных фармацевтических ингредиентов из комбинированных мазей антимикотического действия // Актуальні питання фармацевтичної і медичної науки та практики. – 2018. – Т. 11, №1(26) – С. 57-63.
3. Толепбергенов Е.К. Новые подходы к переработке амбарной нефти на месторождениях “Узень” и “Карамандыбас” // НИПИ «Нефтегаз». – Баку, 2012. – № 4. – С. 43-52.
4. Пат. 48964 (RU), МПК7 В 67 D 5/04, В 65 G 69/20. Установка для выгрузки из железнодорожной цистерны высоковязкого мазута с твердым остатком / заявитель и патентообладатель: Колыхалин В.М. – № 2005116214/22; заявл. 20.05.05; опубл. 10.11.05.
5. Лузгин Н.Е., Утолин В.В., Коченов В.В., Чекайкин С.В. Исследование динамической вязкости расплавленного пчелиного воска. Инновационная техника и технология. – 2018. – № 2. – С.33-37.
6. Грабов Л.М., Грабова Т.Л., Мусаелян Л.Ю. Теплофизические свойства жидких энергетических топлив // Энергетика та електрифікація – №2 (318). – 2010. – С. 16-20.
7. Кузьяев И.М., Свидерский В.А., Петухов А.Д. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров: монография. Ч.2. – Киев: НТУУ «КПИ» Изд-во «Политехника», 2016. – 276 с.
8. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
9. Shapiro J., Halmos A.L., Pearson J.R.A. Melting in single screw extruders. Part 1: The mathematical model // Polymer. – 1976. – Vol. 17, № 10 – P. 905-918.
10. Геллер Б.Э., Геллер А.А., Чиртузов В.Г. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров. Уч. пособие для вузов. – М.: Химия, 1996. – 432 с.
11. Писаренко Т.В. Разработка метода контактной термопроникновения в глубинные недра с помощью технических автономных средств: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / Писаренко Татьяна Васильевна; Институт технической теплофизики. – К., 2000. – 20 с.
12. Долінський А.А., Грабов Л.М., Степанова О.Є. Теплообмін при нагріванні і плавленні основ для виготовлення косметичних та фармацевтичних препаратів // Промышленная теплотехника – 2011. – Т. 33, № 3. – С. 12–19.
13. Грабов Л.М., Посулько Д.В., Степанова О.Є. Використання методів термоконтактного нагрівання та дискретно-імпульсного введення енергії в технології одержання супозиторіїв // Промышленная теплотехника. – 2016. – Т. 38, № 1. – С. 31-40.

**MODELING OF HEATING AND MELTING
PROCESSES OF HYDROCARBON MIXTURES
WITH FORCED REMOVAL OF THE MELT**

Obodovych O.M., Ivanitsky, G.K., Stepanova O.E.

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.11>

Analysis of the work, which considered the mathematical modeling of the melting process in various industries, currently does not pay attention to modeling the processes of heating and melting of hydrocarbon mixtures, such as vaseline, paraffin, fats, lanolin and others. The issue of optimization of heating and melting processes, calculations of necessary process parameters (speed and depth of thermal front penetration, etc.) and equipment, avoidance of repetition for each hydrocarbon mixture of experimental studies shows the need to develop a mathematical model of these processes. For the method of melting a substance placed in a cylindrical tank, based on the movement of a disc heating element under the action of gravity during melting and overflow of molten substance through the gaps between the disc and the walls of the tank, simulation has been carried out. Simulation of the melt flow in the annular gap is presented, which describes the laminar flow under the influence of the pressure drop and the velocity of the vessel wall relative to the heater, and the melt flow under the heater.

Bibliography 12, fig. 4

Key words: heating, melting, hydrocarbon mixtures, annular gap, disk gap, mathematical modeling.

1. *Bojchenko N.B., Kolesnikov V.A.* [Soft dosage forms. Cooking technology and recipe features]: metod. ukazaniya [Elektronnyj resurs]. Krasnoyar. gos. agrar. un-t. – Krasnoyarsk [Krasnoyarsk], 2016. 30 c. (Rus.)

2. *Luc V.V., Gladyshev V.V., Lisyanskaya A.P., Biryuk I.A.* [Study of the effect of carrier bases on the release of active pharmaceutical ingredients from combined antimycotic ointments]. Aktualni pitannya farmaceutichnoï i medichnoï nauki ta praktiki [Actual nutrition of pharmaceutical and medical science and practice]. 2018. V. 11, № 1(26). C. 57-63. (Rus.)

3. *Tolebergenov E.K.* [New approaches to the processing of granular oil at the Uzen and Karamandybas fields]. NIPI “Neftegaz” [NIPI “Neftegaz”]. Baku, 2012. № 4. C. 43-52. (Rus.)

4. *Patent 48964 (RU)*, MPK7 B 67 D 5/04, B 65 G 69/20. [Installation for unloading of high-viscosity fuel oil with solid residue from a railway tank car]. zayavitel i patentoobladatel: Kolykhalin V.M. – № 2005116214/22; zayavl. 20.05.05; opubl. 10.11.05. (Rus.)

5. *Luzgin N.E., Utolin V.V., Kochenov V.V., Chekajkin S.V.* [Investigation of the dynamic viscosity of molten beeswax]. Innovacionnaya tekhnika i tekhnologiya [Innovative technology and technology]. 2018. № 2. C.33-37. (Rus.)

6. *Grabov L.M., Grabova T.L., Musaelyan L.YU.* [Thermophysical properties of liquid energy fuels]. Energetika ta elektrifikaciya [Energy and electrification]. №2 (318). 2010. C. 16-20. (Rus.)

7. *Kuzyaev I.M., Sviderskij V.A., Petuhov A.D.* [Modeling extrusion and extruders in polymer processing]: monografiya. Chast 2. Kyiv: NTUU “KPI” Izd-vo “Politehnika” [NTUU “KPI” Publishing house “Polytechnic”]. 2016. 276 p. (Rus.)

8. *Tadmor Z., Gogos K.* [Theoretical foundations of polymer processing]. Per. s angl. Moscow: Himiya [Chemistry]. 1984. 632 p. (Rus.)

9. *Shapiro J., Halmos A.L., Pearson J.R.A.* Melting in single screw extruders. Part 1: The mathematical model. Polymer. 1976. Vol. 17. № 10. P. 905-918.

10. *Geller B.E., Geller A.A., Chirtuzov V.G.* [A practical guide to the physical chemistry of fiber-forming polymers]. Uch. posobie dlya vuzov. – Moscow: Himiya [Chemistry]. 1996. 432 p. (Rus.)

11. *Pisarenko T.V.* [Development of method of contact thermal penetration in deep bowels of the Earth by autonomous technical means]: avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.14.06 / Pisarenko Tetyana Vasilivna; Institute of Technical Thermophysics [Institut tehničnoyi teplofiziki]. Kyiv. 2000. 20 p. (Ukr.)

12. *Dolinskij A.A., Grabov L.M., Stepanova O.E.* [Heat transfer during heating and melting of bases for the manufacture of cosmetics and pharmaceuticals]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heating technology]. 2011. T. 33, № 3. C. 12–19. (Ukr.)

13. *Grabov L.M., Posunko D.V., Stepanova O.E.* [Application methods of thermocontact heating and discrete pulse input energy in technologies of obtaining suppositories]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heating technology]. 2016. T. 38, № 1. C. 31-40.

Отримано 04.02.2021

Received 04.02.2021