НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАН УКРАЇНИ

ПРОМИСЛОВА ТЕПЛОТЕХНІКА

МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВО-ПРИКЛАДНИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік
Заснований в 1979 р.

Том 40, № 3, 2018

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.
Горобець В.Г.
Клименко В.М.
Круковський П.Г.
Кудря С.О.
Мислович М.В.
Письменний Є.М.
Фіалко Н.М.
Халатов А.А.
Шморгун В.В. – відповідальний секретар

Редакційна рада:

Акулич О.В. (Бєларусь)
Балтренас П.Б. (Литва)
Ліграні П. (США)
Міховскі М. (Болгария)
Пошкас С. (Литва)
Піоро І.Л. (Канада)
Сайред Н. (Великобританія)

ЗМІСТ

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

Халатов А.А., Панченко Н.А., Петляк О.О.
Плівкове охолодження плоскої поверхні в умовах обертання при подачі охолоджувача в трикутні кратери.....5

Фіалко Н.М, Носовський А.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Шараєвський І.Г., Піоро І.Л.
Особливості течії надкритичної води в умовах змішаної конвекції.....12

Ковецкая Ю.Ю., Скицько А.И., Сорокина Т.В.
Неустойчивость проскальзывающего потока в пористом криволинейном микроканале.....20

Булій Ю.В., Ободович О.М.
Підвищення енергоефективності брагоректифікаційних установок і ступеню очистки біоетанолу.....27

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Клименко В.Н.
Перспективы применения когенерационных технологий в коммунальной энергетике.....32

Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Гнєдаш Г.О., Шевчук С.І., Дашковська І.Л.
Підвищення ефективності комплексних теплоутилізаційних систем для підігрівання та зволоження дуттьового повітря газоспоживальних котлоагрегатів.....38

Басок Б.І., Базєєв Є.Т.
Технологічні та соціально-економічні інновації для підвищення енергоефективності будівель (Огляд).....46

Демченко В.Г, Трубачев А.С., Фалько В.Ю., Гронь С.С.
Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 2.....57

Желєзна Т.А., Баштовий А.І.
Аналіз основних тенденцій розвитку біоенергетики в Європейському Союзі.....70

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

Зубенко В.І., Епік О.В., Антоненко В.О., Олійник Є.М.

Енергетичні та економічні показники технології швидкого піролізу в абляційному реакторі шнекового типу.....76

Антоненко В.О., Зубенко В.І., Епік О.В.

Паливні характеристики стебел кукурудзи українського походження.....85

ТЕРМОДИНАМІКА ТА ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ, АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА

Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Разумцева О.В., Проценко Л.Н., Добривечер В.В.

Особенности применения программы IQLab при решении обратной задачи теплопроводности для хромоникелевых цилиндрических термозондов.....91

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING THERMOPHYSICS

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND APPLIED JOURNAL

Published 4 times a year
Founded in 1979

Volume 40, № 3, 2018

Editor in Chief – **Yu. Snezhkin**

Editorial Board Members:

A. Avramenko
V. Babak – Associated Editor
B. Basok
B. Bondarenko
A. Dolinsky – Honorable Editor
S. Vasylenko
V. Gorobec
V. Klimenko
P. Krukovsky
S. Kudrya
M. Myslovych
Ye. Pysmennyy
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 TRANSFER PROCESSES AND EQUIPMENT, THEORY AND PRACTICE OF DRYING PROCESSES

Khalatov A.A., Panchenko N.A., Petliak O.O
Film cooling over a flat plate with coolant supply in to triangular indentation.....5

Fialko N.M., Nosovskyi V.A., Sherenkovskyi Ju.V., Meranova N.O., Sharaevskyi I.G., Pioro I.L.
Specifics of the flow of supercritical water under conditions of mixed convection.....12

Kovetska Y.Y., Skitsko A.I., Sorokina T.V.
The instability of slipping flow in a curvilinear porous microchannel.....20

Bulii Yu.V., Obodovych O.M.
Increasing energy efficiency of contact devices of the distillation and rectification plants and degree of bioethanol purification.....27

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

Klimenko V.N.
Prospects for application of cogeneration technologies in municipal energy.....32

Fialko N.M., Presich G.A., Gnedash G.A., Shevchuk S.I., Dashkovska I.L.
Increase the efficiency of complex heat-recovery systems for heating and humidifying of blown air of gas-fired boilers.....38

Basok B.I., Baseyev E.T.
Technological and socio-economic innovations for improving energy efficiency of buildings (review).....46

Demchenko V.G., Trubachev A.S., Falko V.J., Hron S.S.
Mobile accumulators for discrete systems heat-cold supplies. Part 2.....57

Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.
Analysis of the main trends of bioenergy development in the European Union.....70

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

Zubenko V.I., Epik O.V., Antonenko V.O., Oliynyk E.M.

Energy and economic indicators of fast ablative pyrolysis technology with cone screw reactor.....76

Antonenko V.O., Zubenko V.I., Epik O.V.

Fuel properties of Ukrainian corn stover.....85

THERMODYNAMICS AND TRANSPORT PHENOMENA, NUCLEAR POWER ENGINEERING

Zotov E.N., Moskalenko A.A., Razumtseva O.V., Protsenko L.N., Dobryvechir V.V.

Features of the application of the IQLab program for solving the inverse heat conduction problem for chromiumnickel cylindrical thermosondes.....91

УДК 536.244:621.438

ПЛІВКОВЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ПОВЕРХНІ В УМОВАХ ОБЕРТАННЯ ПРИ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУВАЧА В ТРИКУТНІ КРАТЕРИ

Халатов А.А.[1,2], академік НАН України, **Панченко Н.А.**[1,2], канд. техн. наук, **Петляк О.О.**[2]

[1]*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна*

[2] *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна*

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.01

Наведено результати теоретичного дослідження ефективності плівкового охолодження однорядної схеми з подачею охолоджувача через отвори в поверхневих заглибленнях трикутної форми в умовах обертання.

Представлены результаты теоретического исследования эффективности пленочного охлаждения однорядной схемы с подачей охладителя через отверстия в поверхностных углубления треугольной формы в условиях вращения.

The results are given towards theoretical investigation of the film cooling efficiency over a flat plate with coolant supply into round holes arranged in the triangular dimples and under a surface rotation.

Бібл. 6, рис. 8.

Ключові слова: плівкове охолодження, трикутні поверхневі заглиблення, параметр вдуву, параметр обертання, ефективність плівкового охолодження, комп'ютерне моделювання.

d – діаметр отвору вдуву,
h – висота поверхневого заглиблення,
$m = w_2 \rho_2 / w_1 \rho_1$ – параметр вдуву,
Ro – параметр обдування,
T – температура потоку,
t – поперечний крок розташування отворів,
w – швидкість потоку,
α – кут нахилу отвору до поверхні охолодження,
$\eta = (T_1 - T_{aw})/(T_1 - T_2)$ – ефективність плівкового охолодження,

Нижні індекси:

aw – параметри на адіабатичній стінці,
2 – параметри вторинного потоку,
1 – параметри основного потоку.

Вступ

В сучасних газотурбінних двигунах температура робочого тіла на виході із камери згоряння досягає 1500…1800 ºС, що виходить за межі робочих температур конструкційних матеріалів лопатки. В даний час лопатки турбіни, виконані з кращих жаростійких матеріалів, можуть працювати без охолодження при температурі газу не вище 1100 ºС. Тому при високих значеннях температури газу для забезпечення працездатності лопаток, наряду з теплоізоляційними (жаростійкими) покриттями, використовується також внутрішнє (конвективне) та зовнішнє (плівкове) охолодження [1]. Традиційно охолоджувач подається з внутрішньої порожнини лопатки на охолоджувану поверхню через щілину або систему дискретних отворів діаметром 0,5...0,8 мм. За високих температур газу витрата повітря на охолодження лопаток при конвективно-плівковому охолодженні може становити 15% і більше від витрати повітря через компресор, тому при подальшому підвищенні температури витрата охолоджувача зростає настільки, що втрати від змішування основного потоку з охолоджувачем можуть перевищити позитивний ефект, досягнутий за рахунок охолодження. У зв'язку з цим великий практичний інтерес має пошук альтернативних схем плівкового охолодження, що володіють прийнятною з точки зору термодинамічної ефективності витратою охолоджувача, високою теплофізичною ефективністю і характеризуються відносно нескладною технологією виготовлення.

У роботах [2, 3] було показано, що подача охолоджувача в траншею забезпечує високу ефективність і рівномірність плівкового охолодження. Однак при цьому з'являються високі термічні напруги в лопатці, що сприяють руйнуванню теплозахисного покриття, в якому виконані поверхневі заглиблення. Тому великий практичний інтерес представляють схожі за конфігурацією схеми плівкового охолодження (прямокутні, трикутні). В роботі [4] була наведена порівняльна характеристика плівкового охолодження при використанні двох альтернативних схем: з видувом охолоджувача в траншею і трикутні заглиблення (запатентована в ІТТФ НАНУ [5]) та традиційної схеми, з одним рядом похилих отворів. Ці розрахунки були проведені в стаціонарній постановці задачі. Аналіз результатів роботи [4] показав, що середня адіабатна ефективність плівкового охолодження при використанні трикутних кратерів для параметрів вдуву $m = 1{,}0$ і більше є вищою на 10...60% ніж при використанні традиційної схеми. Але ефективність плівкового охолодження в загальному випадку залежить від дуже великої кількості різних

факторів. З усього різноманіття факторів, в найменшій мірі вивчено вплив обертання лопатки [6].

Метою роботи є дослідження теплофізичних закономірностей і визначення залежностей, які характеризують фізичну структуру та ефективність плівкового охолодження при подачі охолоджувача через один ряд трикутних заглиблень (рис.1) в умовах обертання охолоджуваної поверхні.

Дослідження фізичної моделі системи плівкового охолодження плоскої поверхні з видувом охолоджувача через один ряд похилих отворів в трикутні кратери (рис.2) було виконано в середовищі ANSYS Design Manager. Геометричні параметри були прийняті наступними: діаметр подаючих циліндричних отворів d = 0,8 мм; відносний крок $t = 3d$, відносна глибина кратерів $h = 0{,}5d$, число отворів у ряді $N_{отв} = 4$, кут нахилу $\alpha = 30^{o}$. Відносні довжини основної ділянки та ділянки гідродинамічної стабілізації основного каналу розрахункової моделі складали, відповідно, $40d$ та $10d$. Для забезпечення можливості виконання розрахунків з урахуванням обертання модель після її побудови в базовій системі координат Y0X була переміщена вздовж базової осі OX на відстань, що відповідає радіусу обертання r = 400 мм за допомогою функції Body Operation. Для цього необхідно попередньо створити додаткову площину паралельну базовій площині Z0Y (рис.2). Геометричні розміри розрахункової моделі обрані близькими до розмірів характерним для реальних систем плівкового охолодження лопаток високотемпературних газових турбін.

Для виконання CFD – моделювання була використана неструктурована комбінована розрахункова сітка, побудована за допомогою сіткового генератора ANSYS Mesh. Розрахункова сітка є комбінацією тетраедних елементів в області основного потоку, з призматичними елементами в областях згущування розрахункової сітки біля твердих стінок, що обмежують канали розрахункової моделі. При побудові розрахункової сітки було використані локальні згущування комірок у вузьких проміжках, що дозволило при досить невеликій кількості елементів в області основного осьового потоку отримати детальну сітку в каналах перфорації і в областях поблизу твердих стінок. З метою зменшення кількості комірок розрахункової сітки згущення комірок на верхній поверхні основного каналу не задавалося. При побудові локального згущення розрахункової сітки в пристінній області для забезпечення високої якості комірок при побудові сітки в CFX Mesh рекомендується використовувати функцію Smooth Transition, що дозволяє зменшити спотворення сіткових комірок поблизу гострих кутів розрахункової області.

В розрахунках була використана SST – модель турбулентної в'язкості, яка показала надійні результати в стаціонарних умовах. Кількість вузлів і товщина області пристінного згущення розрахункової сітки обиралися з умови забезпечення значення параметра $y^{+} \le 2$ в усьому дослідженому діапазоні. Тестові розрахунки показали, що в області біля твердої стінки згущення має складати 15...20 комірок, збільшення ж кількості комірок до 30...40 не призводить до суттєвого збільшення точності розв'язків.

Граничні умови на вході і виході розрахункової області відповідають значенням параметра вдуву близьким до m = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. Швидкість основного потоку становить 37 м/с, температура – 20 °С, температура вторинного потоку – 80 °С. У розрахунках був прий-

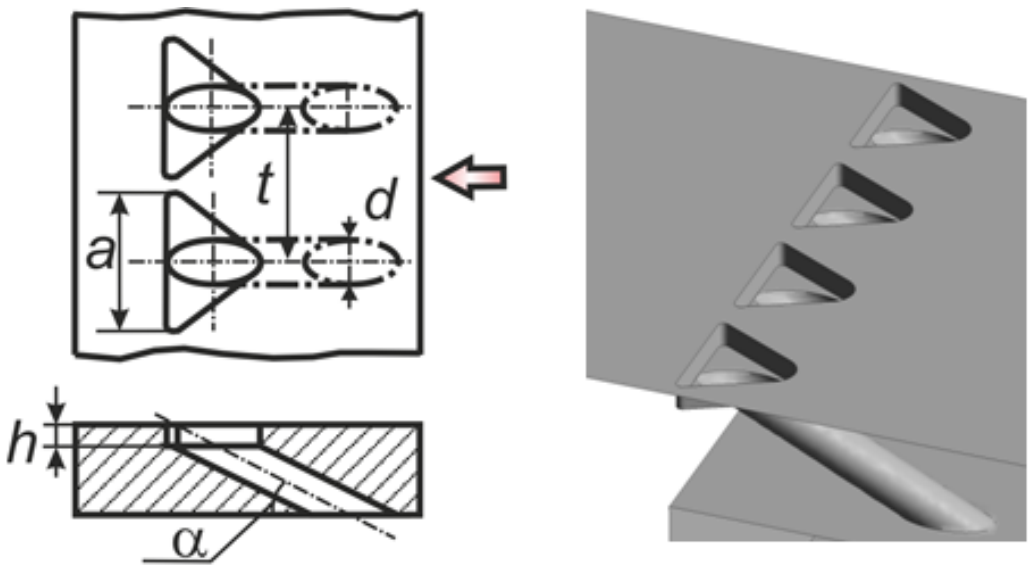


Рис. 1. Досліджений спосіб плівкового охолодження: трикутні кратери.

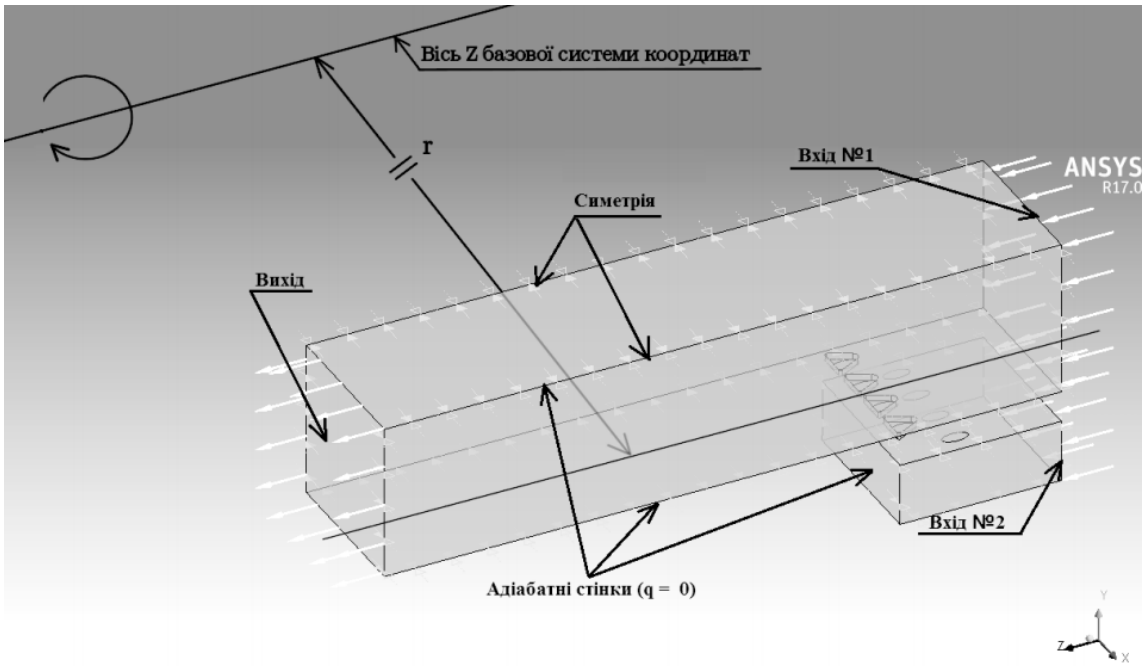


Рис. 2. Геометрична 3D-модель плівкового охолодження.

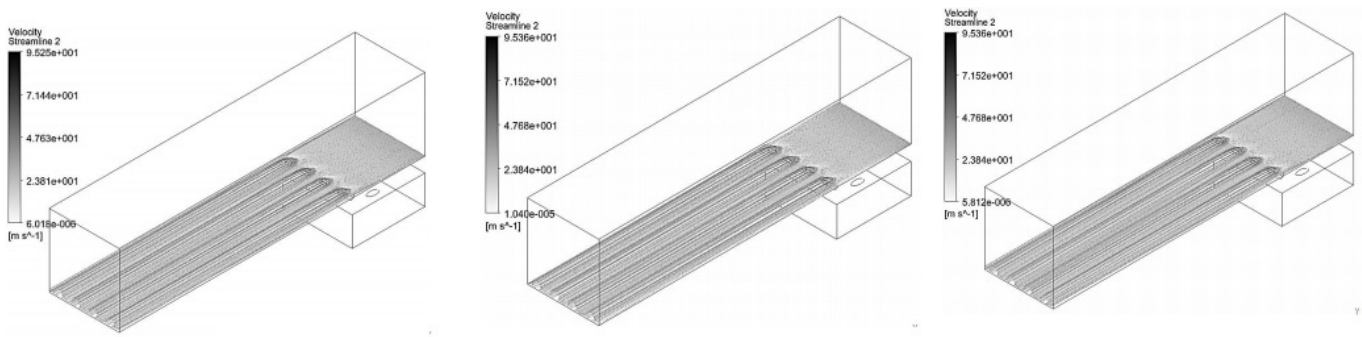
нятий низький рівень інтенсивності турбулентності основного потоку (Tu = 1,0%). Тверді межі розрахункової області задані як адіабатні стінки (q = 0); на бічних поверхнях розрахункової моделі задані умови симетрії.

В якості параметра, що характеризує вплив обертання на ефективність плівкового охолодження використовувалось число Россбі, яке є відношенням між силою інерції і силою Коріоліса Ro = $\pi nr/30w_1$, де n – частота обертання (об/хв). Для визначення меж впливу коріолісових та відцентрових сил визначимо критичне значення параметру Ro, тобто при яких частотах обертання параметр Ro буде рівним 1.0. При Ro < 1.0 переважний вплив матимуть коріолісові сили, при Ro > 1.0 – відцентрові. Критичне значення параметру Ro досягається при частоті обертання рівній 883 об/хв. Тому для дослідження впливу коріолісових сил дослідження проводились при частотах вращения 10 та 100 об/хв, для дослідження відцентрових сил – при частотах 3000, 5000 и 7000 об/хв.

Результати дослідження та їх аналіз

Вплив коріолісових сил. Дослідження впливу сили Коріоліса відбувалось при частотах обертання 10 та 100 об/хв, тобто при параметрах обертання Ro 0.01 та 0.11 відповідно. Далі приведені порівняння при параметрах вдуву m = 1,5.

На рис. 3 показана візуалізація ліній току основного потоку. У стаціонарних умовах при видуві в трикутні заглиблення основний потік майже не змішується з охолоджувачем. З рисунку можна зробити висновок, що дія коріолісових сил не спричиняє викривлення ліній току



а) б) в)

Рис. 3. Лінії току основного потоку: а – n = 0; б – n = 10; в – n = 100 об/хв.

основного потоку по усій довжині пластини, а тому і не викликає змішування потоків.

Важливою особливістю схеми з використанням трикутних кратерів є висока рівномірність плівкового охолодження у поперечному напрямку. При видуві в трикутні кратери плівка охолоджувача майже повністю покриває плоску поверхню. Вплив коріолісової сили на адіабатну ефективність можна оцінити на рис. 4, де зображені локальні значення адіабатної ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень *x/d* і різних значень параметру обертання. На графіках не спостерігається зміщення піків ефективності плівкового охолодження в результаті обертання охолоджувальної поверхні. З чого можна зробити висновок, що сила Коріоліса практично не впливає на локальну адіабатну ефективність.

Розглянемо кількісні значення впливу обертання на адіабатну ефективність. Порівняння осередненої по поверхні (для кожного значення *m*) адіабатної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів обертання представлено на рис. 5. Як видно з рисунку, особливість схеми плівкового охолодження з видувом в трикутні кратери, а саме: зростання осередненої по поверхні адіабатної ефективності плівкового охолодження зі збільшенням параметра вдуву до значення $m = 2{,}0$, має місце при усіх досліджених параметрах обертання. Крім того, при $Ro < 0{,}1$ спостерігається зменшення осередненої по поверхні адіабатної ефективності плівкового охолодження у порівнянні зі стаціонарними умовами лише на 2%.

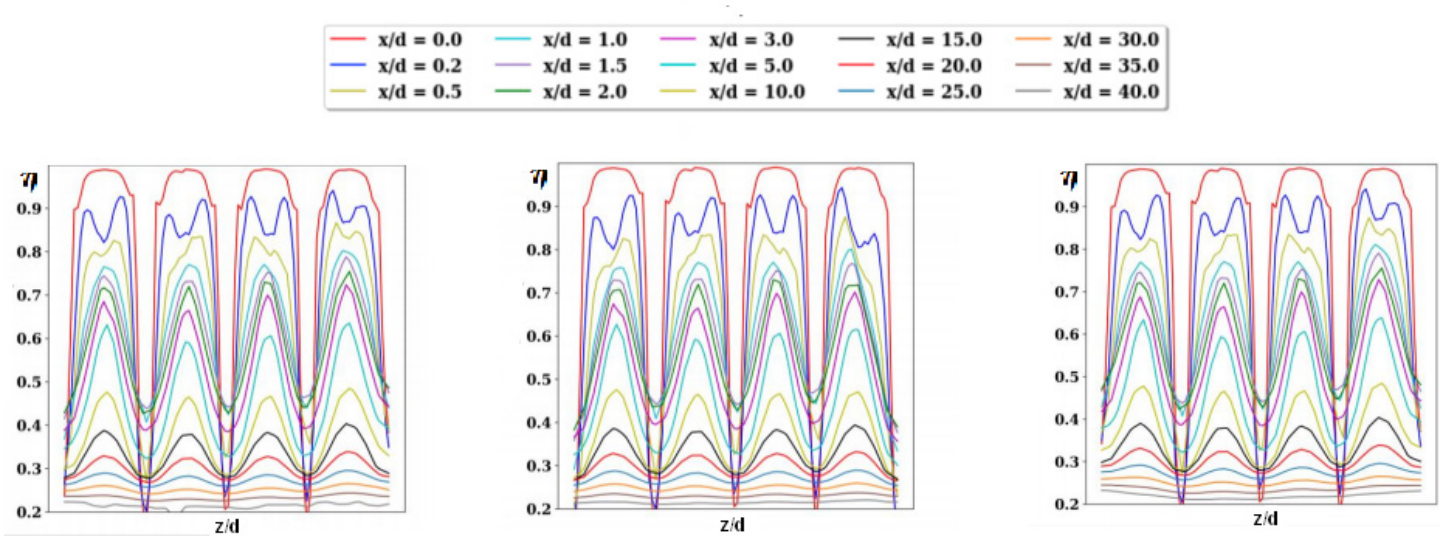
Вплив відцентрових сил. Дослідження впливу відцентрових сил відбувалось при частотах обертання 3000, 5000 та 7000 об/хв, тобто при параметрах обертання Ro = 3,39; 5,65; 7,92 відповідно.

На рис. 6 наведена візуалізація ліній току основного потоку. Дія відцентрових сих спричиняє викривлення ліній току основного потоку. Причому при збільшенні частоти обертання збільшується і викривлення ліній току.

На рис. 7 зображені локальні значення адіабатної ефективності плівкового охолодження в поперечному напрямі для різних значень *x/d* і різних значень параметру обертання. На графіках спостерігається зміщення піків ефективності плівкового охолодження в результаті обертання охолоджувальної поверхні. Для частоти обертання 3000 об/хв помітне зміщення спостерігається лише при $x/d > 15$, для 5000 об/хв – при $x/d > 10$, для 7000 об/хв – при $x/d > 3$.

Перейдемо до кількісних показників значення впливу обертання на адіабатну ефективність. Порівняння осередненої по поверхні (для кожного значення *m*) адіабатної ефективності плівкового охолодження для різних параметрів обертання представлено на рис. 8. Як видно з рисунку, зі збільшенням параметру вдуву до $m = 2.0$, осереднена по поверхні адіабатна ефективність плівкового охолодження збільшується при усіх досліджених параметрах обертання. Дія відцентрової сили викликає зменшення осередненої адіабатної ефективності плівкового охолодження на 2–7%, причому найбільший вплив на ефективність плівкового охолодження спостерігається зі збільшенням параметру обертання до $n = 7000$ об/хв.

Важливим також є те, що при малих значеннях параметру вдуву величина відцентрових сил, діючих як на



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Локальні значення ефективності плівкового охолодження в поперечному перетині: а – n = 0; б – n = 10; в – n = 100 об/хв.

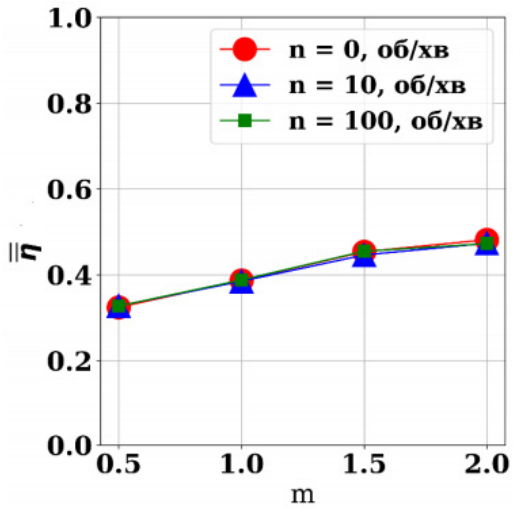


Рис. 5. Осереднена по поверхні ефективність плівкового охолодження.

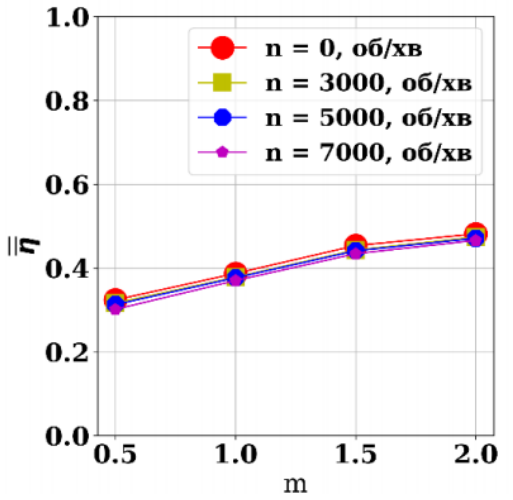
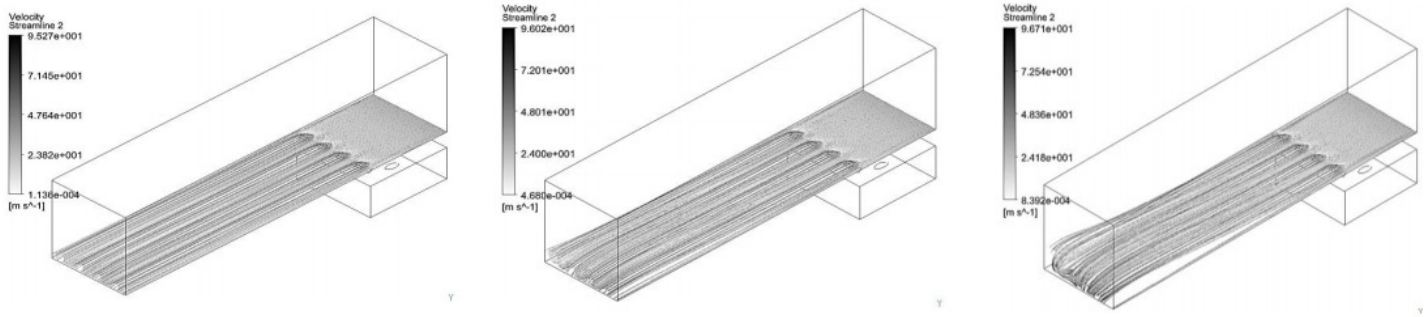
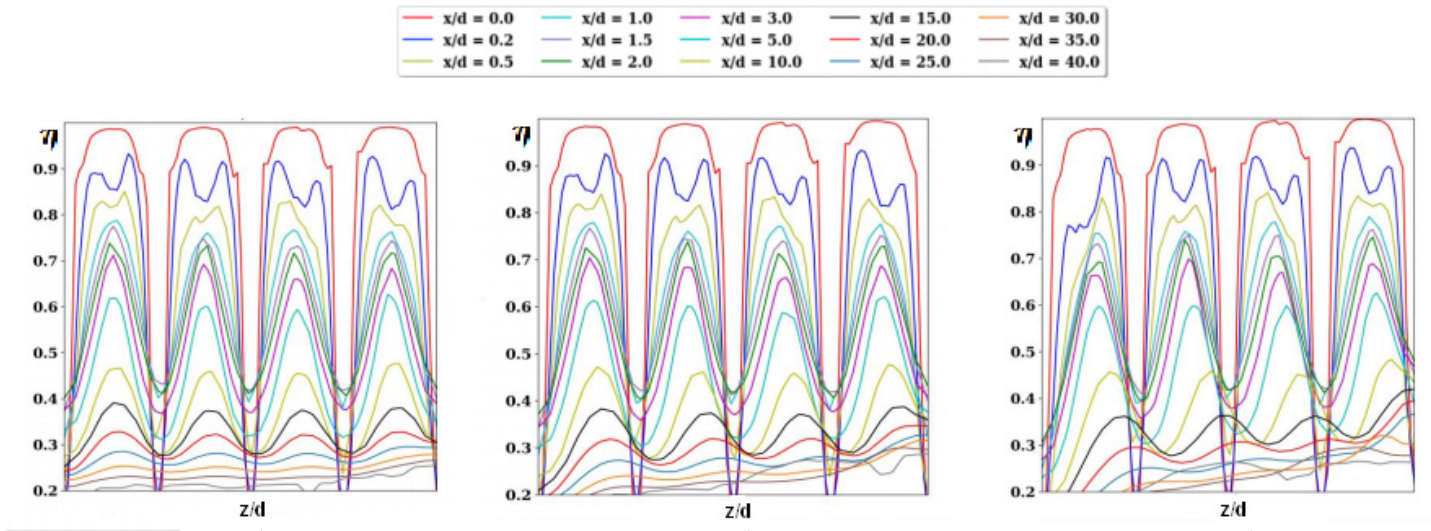


Рис. 8. Осереднена по поверхні ефективність плівкового охолодження.



а) *б)* *в)*

Рис. 6 Лінії току основного потоку: а – n = 3000; б – n = 5000; в – n = 7000 об/хв.



а) *б)* *в)*

Рис. 7. Локальні значення ефективності плівкового охолодження в поперечному перетині: а – n = 3000; б – n = 5000; в – n = 7000 об/хв.

струмені охолоджувача, досить мала, внаслідок малої витрати повітря через отвори плівкового охолодження. З ростом параметру вдуву росте секундна маса охолоджувача, що видувається через отвори плівкового охолодження, отже, збільшується і величина відцентрових сил, діючих на струмені, що призводить до їх більшого відхилення від осьового напряму. При високих значеннях параметру вдуву (m>1.5) збільшується секундна маса охолоджувача на виході з отворів плівкового охолодження, але одночасно істотно зростає величина інерційних сил, діючих на елементарні об'єми охолоджувача в струменях, що, кінець кінцем, призводить до деякого зменшення величини відхилення струменів від осьового напряму.

Висновки

Результати дослідження фізичної структури та ефективності плівкового охолодження при подачі охолоджувача в трикутні заглиблення в умовах обертання поверхні показали, що дії коріолісових та відцентрових сил мають різний характер. Сила Коріоліса практично не впливає на фізичну структуру потоку, осереднені по поверхні та локальні значення адіабатної ефективності охолодження. Відцентрові сили значною мірою впливають на фізичну структуру потоку викликаючи деформації форми вихрових структур та ліній току, спостерігається зміщення піків ефективності охолодження у поперечному напрямку; осереднена по поверхні адіабатна ефективність плівкового охолодження залишилась майже незмінною, хоча і спостерігається суттєве зміщення піків ефективності плівкового охолодження.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Bunker Ronald S.* Evolution of turbine cooling// ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, – 2017. – V. 1 Aircraft Engine; Fans and Blowers; Marine; Honors and Awards. Paper 63205. – 26 p.

2. *Lu Y., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S.* Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // Journal of Turbomachinery. – 2009. – V. 131. Paper 011003. – 13 p.

3. *Khalatov A.A., Panchenko N.A., Severin S.D.* Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 5, – pp. 751-757.

4. *Khalatov A.A., Petliak O.O., Panchenko N.A., Severin S.D.* Comparative analysis of film cooling efficiency at the coolant supply into a single array of triangular dimples// Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012024 - 6 p.

5. *Пат. 113452 Украина*. Способ пленочного охлаждения // Халатов А.А., Северин С.Д., Безлюдная М.В., Новохатская И.В.; заявитель и патентообладатель Институт технической теплофизики НАН Украины. № 201504484; заявл. 07.05.2015; опубл. 04.01.2017, Бюл. № 1. 3 с.: ил.

6. *Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Резник С.Б.* Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: монография. – Киев: НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Изд-во «Политехника», 2016. – Т. 10: Перспективные схемы пленочного охлаждения. – 238 с.

FILM COOLING OVER A FLAT PLATE WITH COOLANT SUPPLY IN TO TRIANGULAR INDENTATION

Khalatov A.A.[1,2], Panchenko N.A.[1,2], Petliak O.O.[2]

1 Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

2 National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute», pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.01

The modern high-performance gas turbine engines operate at the flow temperatures exceeding the melting temperature of materials, which require the blade cooling. However, the traditional scheme of film cooling is characterized by appearance of secondary vortex structures that destroy the coolant film. From the existing alternative schemes of film cooling, which allow protecting the turbine blades from influence of high temperatures, the scheme with triangular dimples has demonstrated good results in the stationary conditions. This cooling scheme was patented and tested in the Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. In order to determine the feasibility of such a scheme, it is necessary to consider the effect of the blade rotation influencing the film cooling efficiency. The results are given towards theoretical investigation of the film cooling efficiency of this scheme under rotation conditions. The study was performed using the ANSYS CFX package using SST-turbulence model. The blowing ratio was varied from 0.5 to 2.0. Numerical simulation performed for rotation parameters corresponding to the dominant influence of the Coriolis force – 10, 100 rpm, and centrifugal forces – 3000, 5000 and 7000 rpm. On the basis of computer simulation, it has been shown that rotation does not affect weakly the average efficiency of film cooling at Coriolis force, but causes a peak displacement of local adiabatic efficiency, at rotation parameter of 7000 rpm, when there is a distortion of the flow lines.

References 6, figures 8.

Key words: film cooling, triangular surface dimples, blowing ratio, rotational parameter, film cooling effectiveness, numerical simulation.

1. *Bunker Ronald S.* Evolution of turbine cooling// ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2017. V. 1 Aircraft Engine; Fans and Blowers; Marine; Honors and Awards. Paper 63205. 26 p.

2. *Lu Y., Dhungel A., Ekkad S.V., Bunker R.S.* Effect of trench width and depth on film cooling from cylindrical holes embedded in trenches // Journal of Turbomachinery. 2009. V.131. Paper 011003. 13 p.

3. *Khalatov A.A., Panchenko N.A., Severin S.D.* Numerical simulation of a flat plate film cooling with a coolant supply into different shape indentations // Thermophysics and Aeromechanics, 2017, Vol. 24, No. 5, pp. 751–757.

4. *Khalatov A.A., Petliak O.O., Panchenko N.A., Severin S.D.* Comparative analysis of film cooling efficiency at the coolant supply into a single array of triangular dimples// Journal of Physics: Conf. Series 980 (2018) 012024. 6 p.

5. *Patent 113452* Ukraine, Film-cooling technique // A.A. Khalatov, S.D. Severin, M.V. Bezlyudnaya, and I.V. Novokhatskaya; Applicant and Patent Holder – Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, No. 201504484; application date 05.07.2015; publication date 01.04.2017, Bulletin No. 1. (in Ukr.)

6. *Khavatov Artem, Borysov Igor, Dashevskyy Yuri, Reznik Sergiy* [Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields] Kyiv: NTUU «KPI», Politechnika, 2016. V. 10: Advanced film cooling schemes. 238 p. (in Rus.)

Отримано 19.07.2018
Received 19.07.2018

УДК 536.242

ОСОБЛИВОСТІ ТЕЧІЇ НАДКРИТИЧНОЇ ВОДИ В УМОВАХ ЗМІШАНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Фіалко Н.М.[1,2], член-кореспондент НАН України, **Носовський А.В.**[2], член-кореспондент НАН України, **Шеренковський Ю.В.** [1], канд. техн. наук, **Меранова Н.О.**[1], канд. техн. наук, **Шараєвський І.Г.**[2], докт. техн. наук, **Піоро І.Л.**[3], докт. техн. наук

[1] *Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03057,Україна*
[2] *Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, вул. Лисогорська, 12, м. Київ, 03028, Україна*
[3] *Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada*

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.02

Наведено дані CFD аналізу закономірностей течії в умовах змішаної конвекції в гладких трубах, охолоджуваних водою при надкритичних тисках. Представлено результати зіставлення CFD передбачень, що відповідають наявності і відсутності врахування сил плавучості. Досліджено ефекти впливу даних сил, пов'язані з затуханням турбулентного переносу, деформацією радіальних профілів осьової швидкості тощо.

Приведены данные CFD анализа закономерностей течения в условиях смешанной конвекции в гладких трубах, охлаждаемых водой при сверхкритических давлениях. Представлены результаты сопоставления CFD предсказаний, соответствующие наличию и отсутствию учета сил плавучести. Исследованы эффекты влияния данных сил, связанные с затуханием турбулентного переноса, деформацией радиальных профилей осевой скорости и т.п.

The data of the CFD analysis of the flow regularities under conditions of mixed convection in bare tubes cooled by water at supercritical pressures are given. The results of comparison of CFD predictions, corresponding to the presence and absence of accounting for the buoyancy forces, are presented. Effects of the influence of these forces on the damping of turbulent transport, deformation of radial profiles of axial velocity, and the other are investigated.

Бібл. 13, рис. 6.

Ключові слова: надкритична вода, CFD моделювання, змішана конвекція.

D – внутрішній діаметр, м;
G – масова швидкість, кг/(м^{2}с);
g – прискорення земного тяжіння, м/с^2;
L – нагрівана довжина труби, м;
P – тиск, МПа;
q – густина теплового потоку на стінці труби, кВт/м^2;
r – радіальна координата, м;
Ri^x – число Річардсона, $Ri^x = \dfrac{\left(1-\dfrac{\rho^x}{\rho_{вх}}\right)gD}{\left(V^x\right)^2}$;
T – температура, °С;
Tu – інтенсивність турбулентності, %;
V_x – осьова швидкість, м/с;
V^x – середнє значення швидкості у перерізі каналу, м/с;
x – осьова координата, м;
Δx – протяжність по довжині каналу зони з М-подібним профілем швидкості, м;
ρ – густина, кг/м^3;
$\rho_{вх}$ – густина, що відповідає вхідній температурі рідини, кг/м^3;
ρ^x – середнє значення густини рідини у перерізі каналу, кг/м^3.

Нижні індекси і скорочення:

вх – вхідний;
рс – псевдокритичний (pseudocritical);
CFD – (Computational Fluid Dynamics) розрахункова гідродинаміка.

Вступ

Незважаючи на наявні досягнення в галузі атомної енергетики, кращі сучасні блоки ВВЕР-1000 забезпечують суттєво нижчі значення ККД нетто у порівнянні з передовими тепловими електростанціями. Це значною мірою зумовлено підвищенням початкових параметрів пари і освоєнням області надкритичних тисків на теплових електростанціях. В атомній енергетиці останнім часом також приділяється певна увага аналізу можливостей переходу на надкритичні параметри.

Науковий супровід такого переходу пов'язаний з вирішенням цілого ряду проблем реакторної теплофізики. Так, значний інтерес становить моделювання течії і теплообміну надкритичної води стосовно ядерних установок. При цьому перспективним є комп'ютерне прогнозування характеристик вказаних процесів на основі CFD досліджень [1 - 12].

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у дослідженні на основі CFD моделювання закономірностей висхідної течії надкритичної води у вертикальних гладких трубах за умов, коли внесок природної конвекції є суттєвим.

Ставилось завдання зіставлення результатів CFD моделювання, одержаних з врахуванням і без врахування архімедових сил. В завдання роботи входило також встановлення ефектів впливу сил плавучості на

закономірності течії надкритичної води при варіюванні величини густини теплового потоку q на стінці труби. При цьому дослідженню, зокрема, підлягали особливості дії даних сил на характеристики турбулентного переносу.

Щодо фізичної постановки задачі, яка розглядається, то розв'язувалась вісесиметрична задача змішаної конвекції, що відповідає наявності вимушеного і вільного руху надкритичної води. Гідродинамічна стабілізація течії на вході в канал забезпечувалася за рахунок встановлення перед ним ненагріваної ділянки довжиною 1,2 м (рис.1). На вході в трубу задавалась постійна величина масової швидкості G, тиску $P_{вх}$, і температури $T_{вх}$. На виході з труби приймались м'які граничні умови. По довжині нагріваної ділянки труби задавалися постійні значення густини теплового потоку, що підводиться до стінки.

Математичне моделювання проводилося при таких неварійованих вихідних даних: внутрішній діаметр труби D = 0,01 м; довжина нагріваної ділянки труби L = 4,0 м; інтенсивність турбулентності на вході в трубу $Tu_{вх}$ = 3 %.

Нижче наводяться результати розрахунків для чотирьох варіантів CFD моделювання. Перший з них відповідає таким вихідним параметрам: q = 239 кВт/м^2; G = 496 кг/(м^2·с); $P_{вх}$ = 24,0 МПа; $T_{вх}$ = 323 ºС; другий – q = 263 кВт/м^2; G = 496 кг/(м^2·с); $P_{вх}$ = 24,0 МПа; $T_{вх}$ = 323 ºС; третій – q = 287 кВт/м^2; G = 494 кг/(м^2·с); $P_{вх}$ = 24,2 МПа; $T_{вх}$ = 325 ºС; четвертий – q = 310 кВт/м^2; G = 496 кг/(м^2·с); $P_{вх}$ = 24,0 МПа; $T_{вх}$ = 323 ºС.

Основні особливості методики моделювання фізичної ситуації, що досліджується, наведено в [13].

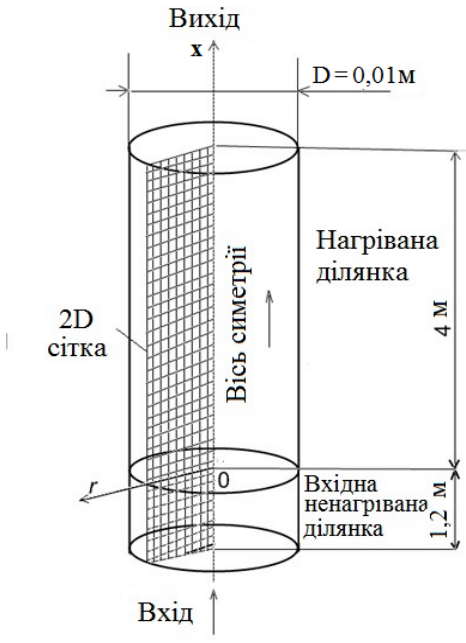


Рис. 1. До постановки задачі.

Результати досліджень та їх аналіз

Нижче наводяться результати CFD моделювання, що стосуються насамперед ефектів прояву природної конвекції, зумовленої дією архімедових сил. На рис. 2 представлено профілі аксіальної швидкості V_x у радіальному напрямку на різній відстані від входу в нагрівану ділянку труби при різних величинах q. Щодо форми цих профілів, яка певною мірою є індикатором наявності вільного руху теплоносія, то вона змінюється вздовж довжини труби таким чином. На початковій і вихідній ділянках труби (різних за протяжністю для різних значень густини теплового потоку q, що підводиться до стінки) дані профілі являють собою усічені параболи, властиві режиму вимушеної течії теплоносія в каналах. З віддаленням від початкової ділянки труби, в її центральній частині профілі швидкості деформуються, на них з'являється м'який локальний максимум поблизу стінки труби, який розмивається в міру наближення до вихідного перерізу каналу. Таким чином, М-подібний профіль швидкості, характерний для режиму змішаної конвекції, що відповідає наявності вимушеного і вільного руху надкритичної води, спостерігається лише на певній центральній по довжині ділянці труби.

Одержані дані свідчать, що локалізація по довжині труби зон з М-подібним профілем швидкості суттєво залежить від величини теплового потоку q. Так, координати поперечних перерізів каналу, що відповідають початку даної зони, для варіантів розрахунку 1 – 4 становлять: 2,24 м; 1,65 м; 1,23 м і 1,01 м. Тобто, чим більше значення q, тим вище за потоком починається зона з М-подібним профілем швидкості. Щодо координат перерізів, в яких ця зона закінчується, то для вказаних варіантів моделювання вони дорівнюють 3,47 м; 3,38 м; 3,26 м; і 3,15 м. Таким чином, із зростанням теплового потоку q зона наявності М-подібного профілю закінчується ближче до вхідного перерізу каналу. Однак, згідно з наведеними даними, величина q більш суттєво впливає на положення початку даної зони, ніж на її закінчення.

Звертає на себе увагу також той факт, що протяжність Δx по довжині каналу зони з М-подібним профілем помітно зростає з підвищенням теплового потоку q. Так для варіантів розрахунку 1 – 4, що відповідають різним значенням q, ця протяжність становить 1,23 м; 1,73 м; 2,03 м і 2,14 м.

Щодо локального максимуму на М-подібному профілі швидкості, то, як свідчать одержані дані, він виражений тим яскравіше, чим більша величина q. При цьому для всіх значень q місце розташування даного максиму змінюється по довжині труби. А саме, цей максимум виникає на деякому віддаленні від стінки труби, далі вниз по потоку зміщується у напрямку до стінки і знову віддаляється від неї, розмиваючись.

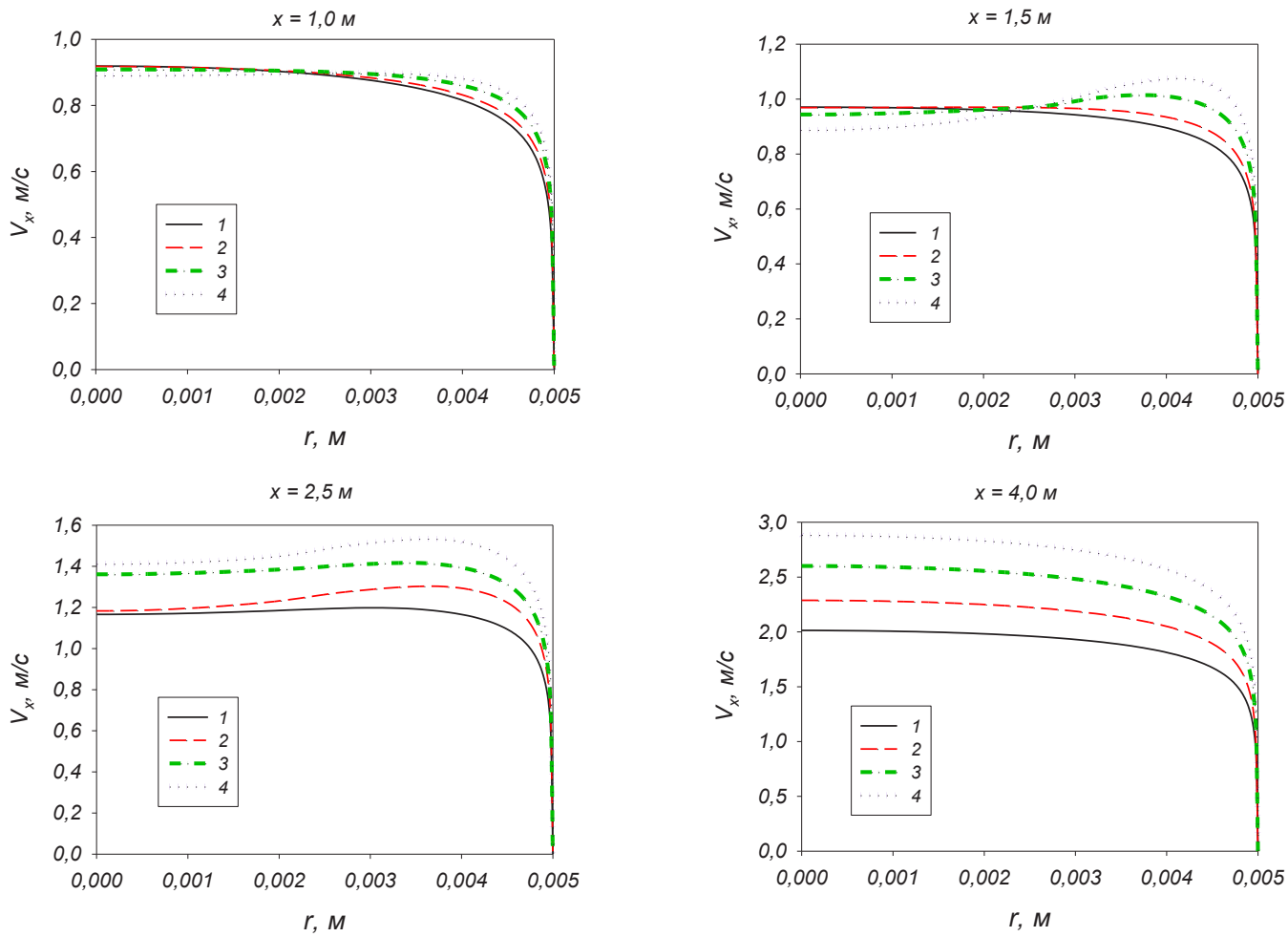


Рис. 2. Профілі осьової швидкості вздовж радіусу труби на різній відстані x від вхідного перерізу для варіантів розрахунків 1 - 4.

Рисунок 3 ілюструє результати розв'язку задачі, що розглядається, з врахуванням і без врахування дії архімедових сил. За відсутності цього врахування профілі швидкості є, як відомо, монотонними. Якщо ж беруться до уваги сили плавучості, то, як вже зазначалося, дані профілі залишаються монотонними на початковій нагріваній ділянці труби. Причому безпосередньо поблизу входу в трубу профілі, що відповідають наявності і відсутності сил плавучості, практично співпадають. Тобто тут вплив сил плавучості на формування профілів швидкості є нехтовно малим. Далі вниз по потоку має місце ділянка труби, на якій профілі швидкості, одержані з врахуванням сил плавучості, залишаючись монотонними, дещо деформуються у порівнянні з профілями, що відповідають відсутності врахування даних сил. А саме у зіставленні з останніми профілі стають більш заповненими, тобто поблизу стінки швидкість дещо підвищується, а в ядрі течії – знижується. При подальшому русі рідини ці профілі набувають М-подібної форми, і кількісні розбіжності значень швидкості для ситуацій з врахуванням і без врахування архімедових сил у цілому зростають. Далі локальні екстремуми швидкості розмиваються, профілі стають монотонними і практично співпадають з профілями швидкості, що відповідають відсутності врахування сил гравітації. Таким чином, згідно з одержаними даними в умовах, які розглядаються, має місце локальний по довжині труби прояв помітного впливу сили тяжіння на картину течії надкритичної води.

Описаний ефект локалізації впливу сил тяжіння корелюється певним чином з характером зміни по довжині труби локального числа Річардсона: $Ri^x = \dfrac{\left(1-\dfrac{\rho^x}{\rho_{вх}}\right)gD}{\left(V^x\right)^2}$.

Як видно з рис. 4, залежність $Ri^x = f(x)$ має екстремальний характер з яскраво вираженим максимумом у центральній по довжині ділянці труби. Збільшення числа Річардсона, як відомо, свідчить про посилення впливу сил плавучості на теплогідравлічні характеристики

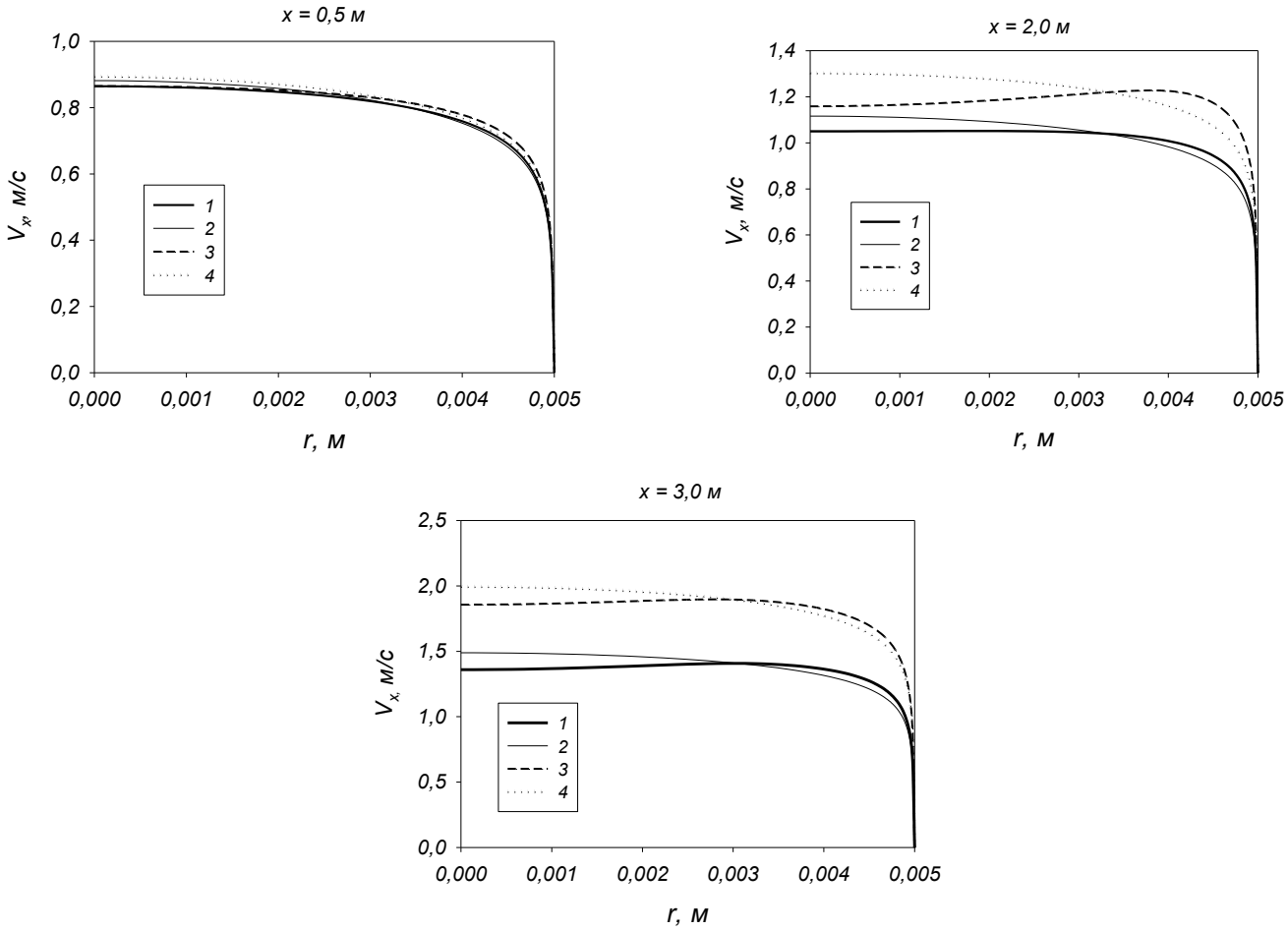


Рис. 3. Профілі осьової швидкості вздовж радіусу труби на різній відстані від вхідного перерізу з урахуванням (лінії 1, 3) і без урахування (лінії 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 (лінії 1, 2) та 4 (лінії 3, 4).

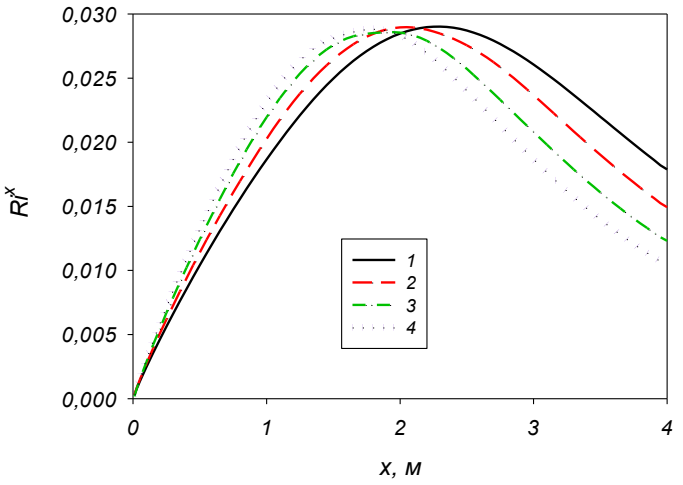


Рис. 4. Розподіл числа Річардсона вздовж нагріваної довжини труби для варіантів розрахунків 1 - 4.

потоку. Тобто наведена картина поведінки числа Ri^x свідчить про те, що вплив даних сил по довжині каналу зростає, досягає максимуму і потім спадає.

Прояв впливу сил плавучості в умовах, що розглядаються, пов'язаний значною мірою з двома такими факторами: по-перше, з величиною різниці густини рідини в різних точках поперечного перерізу потоку і, по-друге, з його термічним прискоренням.

Щодо першого фактору, то саме екстремальна величина вказаної різниці густини, що є характерною для надкритичної води, визначає те, що сили плавучості мають набагато суттєвіший вплив на теплогідравлічні параметри потоку при надкритичних тисках, ніж у докритичній області.

Більшим значенням різниці густини рідини у поперечному перерізі потоку відповідає, як відомо, більш суттєвий прояв архімедових сил. Одержані дані свідчать про те, що для всіх варіантів розрахунків різниця густини $\Delta\rho$ на вісі труби і поблизу її стінки змінюється по

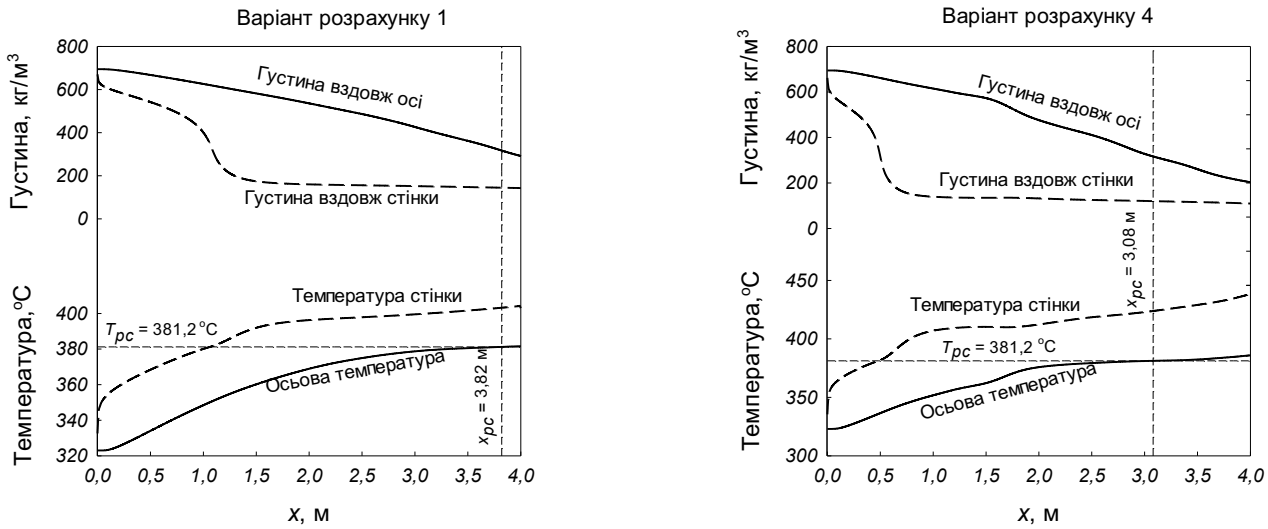


Рис. 5. Розподіл густини води вздовж осі і стінки труби для варіантів розрахунків 1 та 4.

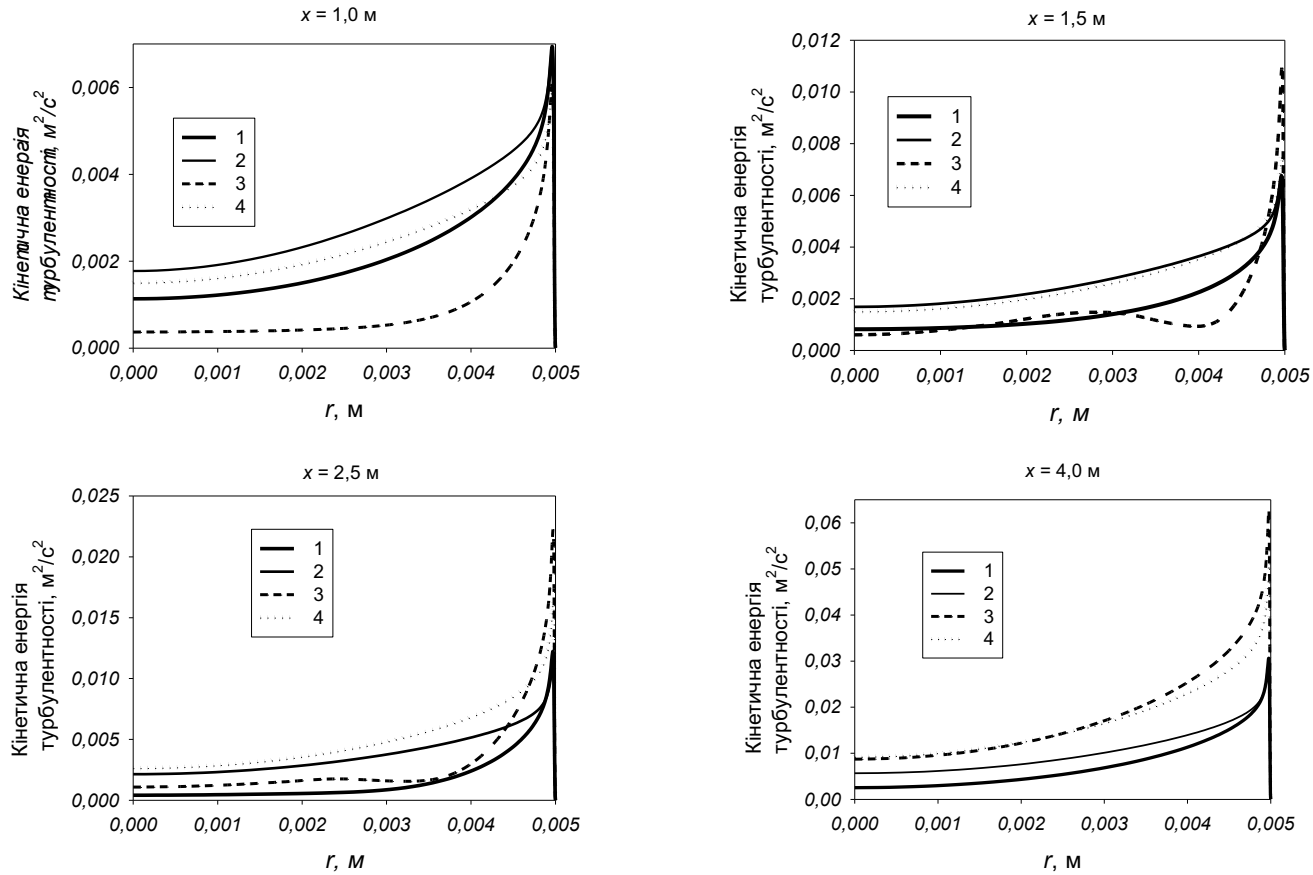


Рис. 6. Розподіл кінетичної енергії турбулентності вздовж радіусу труби на різних відстанях від вхідного перерізу x з урахуванням (лінії 1, 3) і без урахування (лінії 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 (лінії 1, 2) та 4 (лінії 3, 4).

довжині таким чином. На початковій нагріваній ділянці труби вона зростає, досягає максимуму і на вихідній ділянці труби зменшується (рис. 5). Тобто поведінка різниці густини рідини $\Delta\rho$ відповідає описаній вище картині прояву впливу архімедових сил.

Другий з вказаних факторів – термічне прискорен-

ня потоку, навпаки пов'язаний з пригніченням розвитку природної конвекції. Дійсно, згідно з одержаними даними при русі рідини до вихідного перерізу каналу вона помітно прискорюється (тим більше, чим більше значення теплового потоку q), заважаючи дії архімедових сил, так що поблизу даного перерізу їх вплив практично зникає.

Сили плавучості можуть, як відомо, суттєво впливати на інтенсивність турбулентного переносу. А саме, під впливом цих сил відбувається певне затухання турбулентного переносу, що значною мірою визначає різні ефекти, пов'язані з погіршенням тепловіддачі. Зокрема, дія сил плавучості зумовлює зниження рівня кінетичної енергії турбулентності.

Рисунок 6 ілюструє профілі кінетичної енергії турбулентності, одержані з врахуванням і без врахування сил плавучості. Як випливає з наведених даних, значення кінетичної енергії турбулентності у разі врахування сил плавучості виявляється в цілому нижчим, ніж за відсутності даного врахування. Звертає на себе увагу також той факт, що характер профілів кінетичної енергії турбулентності для двох порівнюваних ситуацій може суттєво відрізнятися. А саме, профілі кінетичної енергії є монотонними за відсутності врахування сил плавучості. Щодо ситуації, коли таке врахування має місце, то дані профілі на центральній по довжині ділянці труби стають немонотонними з локальним мінімумом поблизу стінки труби. Розташування вказаних мінімумів кінетичної енергії відповідає розташуванню локальних максимумів на профілях швидкості. При цьому розбіжності в значеннях кінетичної енергії турбулентності, одержаних з врахуванням і без врахування сил плавучості, в області даних мінімумів є найбільшими. Тобто саме поблизу стінки труби, де прояв впливу сил плавучості найбільш яскраво виражений, спостерігається максимальне пригнічення турбулентного переносу.

Висновки

1. На основі CFD моделювання виконано аналіз двовимірної картини течії надкритичної води в вертикальних гладких трубах за умови реалізації режимів змішаної конвекції. Виявлено роль вільного руху теплоносія у формуванні структури потоку шляхом зіставлення числових розв'язків, що відповідають наявності і відсутності врахування сил плавучості.

2. Встановлено ефект локалізації впливу архімедових сил у центральній по довжині ділянці труби. При цьому:

а) виконано аналіз особливостей деформації радіальних профілів осьової швидкості по довжині каналу і показано, зокрема, що зона з М-подібним профілем швидкості, характерним для режиму змішаної конвекції, має місце лише в центральній по довжині зоні;

б) встановлено закономірності впливу густини теплового потоку q на стінці труби на координати початку і кінця зон з М-подібним профілем швидкості. Показано, що чим більше значення q, тим вище за потоком починається і закінчується дана зона і тим більшою є її протяжність;

в) показано наявність певної кореляції поведінки радіальних профілів осьової швидкості зі зміною по довжині каналу локального числа Річардсона.

3. Виконано аналіз впливу сил плавучості на інтенсивність турбулентного переносу. Показано, що під впливом цих сил відбувається його пригнічення.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Фиалко Н.М., Пиоро И.Л., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараевский И.Г.* Влияние теплового потока на стенке канала и давления воды на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника 2016. №5. С. 5-13.

2. *Abdulah R., Malin M., Agranat V., Pioro I.* CFD Prediction of Mixed-Convection Heat Transfer in Supercritical Water in a Bare Tube. Proceeding of the 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). May 17-21. 2015. Chiba. Japan. Paper #1108. 10p.

3. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Власенко Т.С., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Стрижеус С.Н., Хмиль Д.П.* Особенности изменения теплофизических свойств сверхкритической воды при течении в круглых обогреваемых трубах. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т.28. №3. С.117 – 121.

4. *Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Pioro I.* CFD Analysis of Supercritical Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes. Proceeding of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 26) London. England. 2018. Paper #81045. 13p.

5. *Фиалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О.* Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях. Промышленная теплотехника. 2016. №3. С. 10-17.

6. *Farah A., Harvel G., Pioro I.* Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceeding of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermahydraulics (NURETH -15). May 17-21. 2013. Pisa.Italy. Paper #118. 13p.

7. *Фиалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараевский И.Г.* Влияние массовой скорости потока на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника. 2016. №4. С. 5-13.

8. *Yang J., Oka Y., Ishiwatari Y., Liu J., Yoo J.* Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod Bundles. Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. P. 420-430.

9. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Стрижеус С.Н., Войтенко А.Ю., Хмиль Д.П., Брусинская Я.В., Остапчук Т.С*. Характеристики теплообмена в вертикальных трубах при сверхкритических давлениях. Сб. трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Киев: ИПЦ АЛКОН. 2017. С.122-126.

10. *Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskyi Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Pioro I.* CFD Study on Specifics of Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes Cooled with Water at Supercritical pressure. Proceeding of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25). July 2-6. 2017. Shanghai. China. Paper #68528. 11p.

11. *Shang Z*. CFD Investigations of vertical rod bundles of supercritical water-cooled nuclear reactor. Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. P. 2562-2572.

12. *Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maison N., Voitenko A., Pioro I*. Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical parameters. Proceeding of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24). June 26-30. 2016. Charlotte. NC USA. Paper #60390. 12p.

13. *Фиалко Н.М., Пиоро И.Л., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А*. CFD моделювання теплообміну при течії води надкритичних параметрів у вертикальних гладких трубах. Промышленная теплотехника. 2018. №1. С.12-20.

SPECIFICS OF THE FLOW OF SUPERCRITICAL WATER UNDER CONDITIONS OF MIXED CONVECTION

Fialko N.M[1]., Nosovskyi V.A.[2], Sherenkovskyi Ju.V.[1], Meranova N.O.[1], Sharaevskyi I.G.[2], Pioro I.L.[3]

[1]Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

[2] Institute of Nuclear Safety Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Lysogorskaya str., Kyiv, 03028, Ukraine

[2] Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.02

A study of the specifics of supercritical water flow under conditions of mixed convection was made on the basis of CFD modeling. The results of comparison of the numerical solutions obtained in the presence and absence of the buoyancy forces are given. It is shown that the influence of Archimedean forces on the flow structure is localized in the central region of tube length. The data of computer modeling of supercritical water flow pattern with the variation of heat flux q on the tube wall are obtained. The dependence of the localization of mixed convection zone from the value of q is established. The change of the local Richardson number in the context of the effect of the localization of buoyancy forces action is analyzed. For the conditions under consideration, the dependence of turbulent transfer intensity on the effect of Archimedean forces is investigated. It is shown that this action causes oppression of turbulent transport, which is most significantly manifested near the wall of the tube.

Reference 13, figure 6.

Keywords: supercritical water, CFD simulation, mixed convection.

1. *Fialko N.M., Pioro I.L., Sherenkovskyi Yu.V., Maison N.V., Meranova N.O., Sharaevskyi I.G.* Effects of Heat Flux in the Channel Wall and Water Pressure on the Characteristics of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2016. №5. P. 5-13. (in Rus).

2. *Abdulah R., Malin M., Agranat V., Pioro I.* CFD Prediction of Mixed-Convection Heat Transfer in Supercritical Water in a Bare Tube. Proceeding of the 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). May 17-21. 2015. Chiba. Japan. Paper #1108. 10p.

3. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskyi Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A., Vlasenko T.S., Sharaevskyi I.G., Zimin L.B., Stryzheus S.N., Khmil D.P*. Specifics of Changes of the Thermophysical Properties of Supercritical Water at the Flow in Round Heated Tubes. Scientific Bulletin of UNFU. 2018. V.28.№3. P.117 - 121. (in Rus).

4. *Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Pioro I.* CFD Analysis of Supercritical Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes. Proceeding of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 26) London. England. 2018. Paper #81045. 13p.

5. *Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O.* Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Pressures. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2016. №3. P. 10-17. (in Rus).

6. *Farah A., Harvel G., Pioro I.* Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceeding of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermahydraulics (NURETH -15). May 17-21. 2013. Pisa.Italy. Paper #118. 13p.

7. *Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O., Sharaevskyi I.G*. Effect of Mass Flux on Flow Characteristic and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2016. №4. P. 5-13. (in Rus).

8. *Yang J., Oka Y., Ishiwatari Y., Liu J., Yoo J.* Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod Bundles. Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. P. 420-430.

9. *Fialko N.M., Sherenkovskyi Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A., Stryzheus S.N., Voitenko A.Yu., Khmil D.P., Brusinskaya Ya.V., Ostapchuk T.S*. Characteristics of Heat Transfer in Vertical Pipes at Supercritical Pressures. Collection of Works "Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities". Kiev: IPC ALCON. 2017. P.122-126. (in Rus).

10. *Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskyi Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Pioro I.* CFD Study on Specifics of Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes Cooled with Water at Supercritical Pressure. Proceeding of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25). July 2-6. 2017. Shanghai. China. Paper #68528. 11p.

11. *Shang Z.* CFD Investigations of Vertical Rod Bundles of Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactor. Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. P. 2562-2572.

12. *Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maison N., Voitenko A., Pioro I.* Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Proceeding of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24). June 26-30. 2016. Charlotte. NC USA. Paper #60390. 12p.

13. *Fialko N.M., Pioro I.L., Prokopov V.G., Sherenkovskyi Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A*. CFD Modeling of Heat Transfer under Flow of Supercritical Parameters Water in Vertical Bare Tubes. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2018. № 1. P. 12-20. (in Ukr)

Отримано 28.08.2018
Received 28.08.2018

УДК 532.536

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСКАЛЬЗЫВАЮЩЕГО ПОТОКА В ПОРИСТОМ КРИВОЛИНЕЙНОМ МИКРОКАНАЛЕ

Ковецкая Ю.Ю., Скицько А.И., Сорокина Т.В.

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул..Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.03

Досліджено нестійкість течії із проковзуванням у криволінійному мікроканалі, сформованому двома нерухомими концентричними поверхнями. Використано метод колокацій для знаходження критичних значень чисел Діна та хвильових чисел, які визначають критерії нестійкості для потоку. Отримано залежності критичних значень чисел Діна від ширини каналу, коефіцієнта проковзування і проникності.

Исследована неустойчивость течения с проскальзыванием в криволинейном пористом микроканале, сформированном двумя неподвижными концентрическими поверхностями. Использован метод коллокаций для нахождения критических значений чисел Дина и волновых чисел, которые определяют критерии неустойчивости для потока. Получены зависимости критических значений чисел Дина от ширины канала, коэффициента проскальзывания и проницаемости.

The instability of slipping flow in a curvilinear porous microchannel formed by two stationary concentric surfaces is investigated. The collocation method was used for calculation of critical Dean numbers and wave numbers, which define criteria of instability. Dependences for critical values of Dean numbers from the channel width, slipping factor and permeability are obtained.

Библ. 11, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: неустойчивость потока, проницаемость, критическое число Дина.

K – проницаемость;
L – длина свободного пробега молекул;
p – давление;
$\widetilde{p}_A$ – амплитуда давления;
R_1 – радиус выпуклой стенки;
R_2 – радиус вогнутой стенки;
$\widetilde{r}$, φ, $\widetilde{z}$ – цилиндрические координаты;
$\widetilde{t}$ – время;
$\widetilde{u}_m$ – средняя скорость;
$\widetilde{u}_0$, $\widetilde{p}_0$ – скорость и давление основного потока;
$\widetilde{u}_A$, $\widetilde{v}_A$, $\widetilde{w}_A$ – амплитуды возмущений скоростей;
$\widetilde{w}$, $\widetilde{v}$, $\widetilde{u}$ – компоненты скорости;
β – коэффициент нарастания возмущений;
$\widetilde{\gamma}$ – волновое число;
η – ширина зазора между цилиндрическими поверхностями;
ν – кинематическая вязкость;
ρ – плотность.

Введение

В последние годы появился широкий спектр микроустройств с криволинейной геометрией. Криволинейная геометрия каналов часто используется в биотехнологиях и других технических устройствах для грануляции, сепарации и смешивания микрочастиц [1,2]. Большое количество этих устройств основано на концепции образования продольных вихрей под влиянием центробежных сил, что позволяет обеспечить высокую пропускную способность и эффективность процесса. Для прогнозирования протекания этих процессов возникают проблемы, связанные с вопросами исследования гидродинамической неустойчивости течения. При этом необходимо оценивать значения критериев возникновения неустойчивости.

Существует много работ по гидродинамической неустойчивости в микроканалах при течении чистой среды. Вопросы центробежной неустойчивости потока в криволинейных каналах отображены в работах [3, 4], вопросы неустойчивости потоков Дина – в работах [3, 5]. Было показано влияние различных параметров на критическое значение чисел Тейлора и Дина. В работе [6] разработана новая модель термокапиллярной неустойчивости в тонкой плёнке на основе модифицированного уравнения Орра-Зоммерфельда.

Влияние пористости среды на процессы неустойчивости ламинарного течения в пористом плоском канале изучалась в работе [7], в гиперпористой среде – в работе [8]. Была проанализирована зависимость критического числа Рейнольдса от различных параметров среды. Методом ренормгрупповой (RNG) модели исследовано возникновение турбулентности в пористой среде [9]. В работах [10, 11] рассматривается характер течения и неустойчивости в пористых криволинейных каналах. Получено решение для профиля скорости и критического числа Дина в зависимости от геометрии канала и пористости среды.

Цель данной работы – получение критериев неустойчивости для течения Дина в криволинейном пористом микроканале как функции коэффициента проскальзывания, проницаемости и отношения между радиусами вогнутых и выпуклых стенок.

Математическая модель и решение для невозмущённого потока

Исследуется устойчивость ламинарного течения в криволинейном микроканале, образованном двумя неподвижными цилиндрами (течение Дина). Канал заполнен пористой средой с однородной проницаемостью. Движение потока обеспечивается азимутальным градиентом давления.

Гидродинамика потока в таком микроканале описывается следующими уравнениями, которые выражаются в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{t}}+\tilde{v}\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{r}}+\frac{\tilde{u}}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \varphi}+\tilde{w}\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}}+$$
$$\nu\left(\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{r}}-\frac{\tilde{w}}{\tilde{r}}+\frac{1}{\tilde{r}^2}\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \varphi^2}+\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{z}^2}\right)-\frac{\nu}{K}\tilde{w}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{t}}+\tilde{v}\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{r}}+\frac{\tilde{u}}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \varphi}-\frac{\tilde{u}^2}{\tilde{r}}+\tilde{w}\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{z}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}}+$$
$$\nu\left(\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{r}}-\frac{\tilde{v}}{\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}^2}\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \varphi^2}-\frac{2}{\tilde{r}^2}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \varphi}+\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{z}^2}\right)-\frac{\nu}{K}\tilde{v}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{t}}+\tilde{v}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{r}}+\frac{\tilde{u}}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \varphi}-\frac{\tilde{v}\tilde{u}}{\tilde{r}}+\tilde{w}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{z}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \varphi}+$$
$$\nu\left(\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{r}}-\frac{\tilde{u}}{\tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}^2}\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \varphi^2}+\frac{2}{\tilde{r}^2}\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \varphi}+\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^2}\right)-\frac{\nu}{K}\tilde{u}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{r}}+\frac{\tilde{v}}{\tilde{r}}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \varphi}+\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{z}}=0, \quad (4)$$

где "волна" указывает на то, что параметр размерный. Уравнения (1) – (3) содержат член, учитывающий линейное сопротивление Дарси пористой среды. Для исследования неустойчивости необходимо получить профиль скорости основного потока. Для течения Дина эти профили получены из азимутальной проекции уравнения импульса. Поскольку поток не зависит от азимутальной координаты φ, все инерционные члены равны нулю. Профиль скорости также не зависит от продольной координаты $\tilde{z}$, т.к. поток гидродинамически полностью развит.

$$-\frac{1}{\rho\tilde{r}}\left(-\frac{\partial \tilde{p}}{\partial \varphi}\right)=\nu\left(\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{r}^2}+\frac{1}{\tilde{r}}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{r}}-\frac{\tilde{u}}{\tilde{r}^2}-\frac{\tilde{u}}{K}\right). \quad (5)$$

Течение проходит вдоль азимутальной координаты φ. Азимутальный градиент давления не зависит от радиальной координаты и является постоянной величиной. Уравнение в безразмерной форме принимает вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}-\left(\frac{1}{r^2}+\frac{1}{\mathrm{Da}}\right)u=-\frac{1}{r}, \quad (6)$$

где $u=\dfrac{\rho\nu\tilde{u}}{R_2\left(-\dfrac{\partial p}{\partial \varphi}\right)}, r=\dfrac{\tilde{r}}{R_2}$ – безразмерные параметры;

$\mathrm{Da}=\dfrac{K}{R_2^{\,2}}$ – число Дарси.

Уравнение для потока в криволинейном микроканале решается при следующих граничных условиях:

$u=\vartheta L\left(\dfrac{\partial u}{\partial r}-\dfrac{u}{r}\right)\Big|_{wall}$, где ϑ – коэффициент вязкостного проскальзывания.

$$u=\sigma\left(\frac{\partial u}{\partial r}-\frac{u}{\eta}\right) \text{ при } r=\eta, \quad (7)$$

$$u=-\sigma\left(\frac{\partial u}{\partial r}-u\right) \text{ при } r=1, \quad (8)$$

где $\eta=\dfrac{R_1}{R_2}, \sigma=\dfrac{\vartheta L}{R_2}$.

Уравнение (6) с граничными условиями (7), (8) решается методом изменения параметров.

В результате невозмущённый профиль скорости для основного потока имеет вид:

$$u=\frac{Da}{r}+C_1 L_1\left(\frac{r}{\sqrt{Da}}\right)+C_2 K_1\left(\frac{r}{\sqrt{Da}}\right), \quad (9)$$

где – C_1, C_2 – константы интегрирования; I_1, K_1 – модифицированные функции Бесселя.

Анализ линейной неустойчивости

Центробежная неустойчивость исследована на основе метода малых (линейных) возмущений. На основное течение накладываем возмущения так, что суммарные величины выглядят таким образом:

$$\tilde{u}(\tilde{t},\tilde{r},\tilde{z})=\tilde{u}_0(\tilde{r})+\tilde{u}_A(\tilde{r})\cos(\tilde{\gamma}\tilde{z})\exp(\tilde{\beta}\,\tilde{t}), \quad (10)$$

$$\tilde{v}(\tilde{t},\tilde{r},\tilde{z})=\tilde{v}_A(\tilde{r})\cos(\tilde{\gamma}\tilde{z})\exp(\tilde{\beta}\,\tilde{t}), \quad (11)$$

$$\tilde{w}(\tilde{t},\tilde{r},\tilde{z})=\tilde{w}_A(\tilde{r})\sin(\tilde{\gamma}\tilde{z})\exp(\tilde{\beta}\,\tilde{t}), \quad (12)$$

$$\tilde{p}(\tilde{t},\tilde{r},\tilde{z})=\tilde{p}_0(\tilde{r})+\tilde{p}_A(\tilde{r})\cos(\tilde{\gamma}\tilde{z})\exp(\tilde{\beta}\,\tilde{t}), \quad (13)$$

Подставляя уравнения (10) – (13) в уравнения (1) – (4), лианизируя и устраняя амплитуды $\tilde{w}_A$ и $\tilde{p}_A$ при $\tilde{\beta}=0$, получим следующие уравнения для азимутальных и радиальных амплитуд:

$$\left(DD^{*}-\gamma^{2}-\frac{(1-\eta)^{2}}{\mathrm{Da}}\right)u_{A}=D^{*}U\mathrm{v}_{A}, \quad (14)$$

$$\left[\left(DD^{*}-\gamma^{2}\right)^{2}-\frac{(1-\eta)^{2}}{\mathrm{Da}}\left(DD^{*}-\gamma^{2}\right)\right]v_{A}=2\gamma^{2}\frac{\mathrm{De}^{2}}{\xi}Uu_{A}, \quad (15)$$

где $D=\frac{d}{dr}, D^{*}=D+\frac{1-\eta}{\xi}$, (16)

$$\xi=\frac{\tilde{r}}{R_{2}}=\eta+(1-\eta)\left(r+\frac{1}{2}\right), \quad x=\frac{r-(R_{1}+R_{2})/2}{R_{2}-R_{1}}, \quad (17)$$

$$u_{A}=\frac{\tilde{u}_{A}}{\tilde{u}_{m}}, v_{A}=\frac{\tilde{v}_{A}(R_{2}-R_{1})}{\nu}, U=\frac{u_{0}}{u_{m}},$$

$$\tilde{u}_{m}=\frac{u_{m}R_{2}\left(-\frac{\partial p}{\partial\varphi}\right)}{\rho\nu}, \gamma=\tilde{\gamma}(R_{2}-R_{1}), \quad (18)$$

где De – число Дина; u_0, u_m – безразмерные скорость основного потока и средняя скорость; γ – безразмерное волновое число.

Критерий гидродинамической неустойчивости, который приводит к развитию вторичных вихрей, получается путём решения задачи на собственные значения уравнений (14), (15) при следующих граничных условиях:

$u_A = \sigma(Du_A - u_A/\eta)$ при $x = -1/2$; (19)

$u_A = \sigma(Du_A - u_A)$ при $x = 1/2$. (20)

В результате критическое число Дина задаётся следующим уравнением:

$$\mathrm{De}_{cr}=\min_{\gamma}\{\mathrm{De}(\gamma,\eta,\sigma,Da)\}. \quad (21)$$

Численные решения и анализ полученных результатов

Уравнения (14) – (15) с граничными условиями (19) – (20) решались методом коллокаций с пробными функциями:

$$u_{A}=\sum_{j=1}^{n}a_{j}\left(x^{2}-\frac{1}{4}\right)x^{j-1}; \ \mathrm{v}_{A}=\sum_{j=1}^{n}b_{j}\left(x^{2}-\frac{1}{4}\right)^{2}x^{j-1}. \quad (22)$$

$$u_{A}=\sum_{j=1}^{n}a_{j}\left(x^{2}-\frac{1}{4}\right)T_{2j-1}(x); \ \mathrm{v}_{A}=\sum_{j=1}^{n}b_{j}\left(x^{2}-\frac{1}{4}\right)^{2}T_{2j-1}(x). \quad (23)$$

где $T_{j(y)}$ – полиномы Чебышева первого рода. Результаты расчётов критических чисел Дина представлены в табл.1

Табл. 1. Значение критических чисел Дина в зависимости от коэффициента проскальзывания, ширины канала и проницаемости

σ	Da→∞		Da=1			Da=0,1			Da=0,01			Da=0,001		
	η = 0,95	η = 0,5	η = 0,2	η = 0,95	η =0,5	η =0,2	η = 0,95	η =0,5	η =0,2	η = 0,95	η =0,5	η =0,2	η = 0,95	η =0,5	η =0,2
0	36,36	43,71	62,28	36,38	43,93	62,79	36,39	45,71	67,98	36,58	61,91	142,62	38,42	324,59	621,18
0,1	115,70	72,50	86,00	115,75	72,85	86,70	115,80	75,80	93,87	116,40	102,69	196,94	122,26	538,38	857,76
0,2	126,80	79,30	106,20	126,86	79,68	107,07	126,90	82,91	115,92	127,57	112,32	243,20	133,99	588,88	1059,24
0,3	140,40	92,80	123,10	140,46	93,25	124,10	140,52	97,02	134,37	141,25	131,44	281,90	148,36	689,13	1227,80
0,4	165,70	117,00	137,80	165,78	117,56	138,93	165,84	122,33	150,41	166,70	165,72	315,56	175,09	868,84	1374,42
0,5	184,40	119,50	148,10	184,49	120,07	149,31	184,55	124,94	161,65	185,52	169,26	339,15	194,85	887,41	1477,15
0,6	198,70	123,90	156,80	198,79	124,50	158,08	198,86	129,54	171,15	199,90	175,49	359,07	209,96	920,08	1563,92
0,7	207,90	133,60	163,50	207,09	134,24	164,84	208,07	139,68	178,46	209,16	189,23	374,41	219,68	992,11	1630,75
0,8	209,50	143,50	168,40	209,60	144,19	169,78	209,67	150,03	183,81	210,77	203,25	385,63	221,37	1065,63	1679,62
0,9	211,60	159,50	172,7	211,70	160,27	174,11	211,77	166,76	188,51	212,88	225,91	395,48	223,59	11,84,45	1722,51

На рисунке 1 показана зависимость критического числа Дина от ширины канала при различных значениях проницаемости среды.

С ростом σ значение числа De_{cr} увеличивается, что связано с увеличением степени заполненности профиля невозмущённой скорости. Этот эффект аналогичен влиянию профиля скорости основного потока на неустойчивость, описываемую модифицированным уравнением Орра-Зоммерфельда. Это тенденция наблюдается при всех значениях параметра Da. Также из рисунка 1а видно, что при течении чистой жидкости (Da→∞) зависимость критического числа Дина имеет минимум приблизительно при η = 0,5. Для граничных условий без скольжения (σ = 0) этот минимум не наблюдается. Наличие минимумов обусловлено тем, что с уменьшением размера канала при наличии условий проскальзывания развитие гидродинамической неустойчивости становится более сложным. Уменьшение проницаемости приводит к стабилизации потока лишь при малых η. С уменьшением ширины криволинейного канала влияние проскальзывания не наблюдается и минимумов зависимости чисел De_{cr} нет.

На рисунке 2 показана зависимость критического числа Дина от σ и проницаемости среды при различных значениях η. Как обсуждалось выше, увеличение ширины канала (уменьшение η) и уменьшение проницаемости (уменьшение Da) приводит к увеличению критического числа Дина, что указывает на стабилизацию потока при гидродинамической неустойчивости. Влияние проницаемости усиливается с увеличением ширины канала. При η = 0,95 проницаемость практически не влияет на центробежную неустойчивость (рис.2а). Этот результат следует из уравнений (14) – (15), т.к. члены, содержащие параметр Da выпадают из уравнений при η = 1. Критические волновые числа также возрастают с увеличением ширины зазора канала и пористости сре-

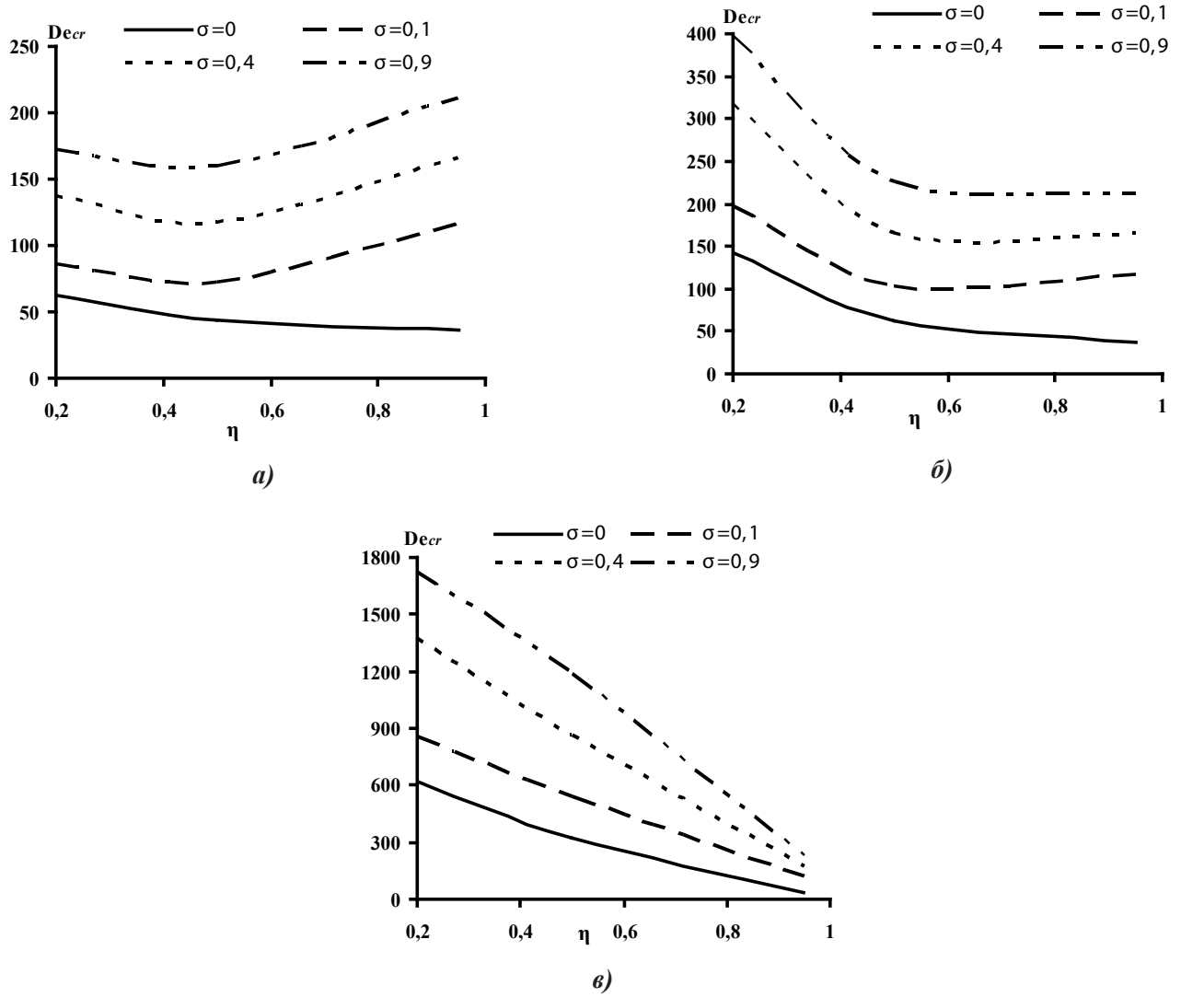


Рис. 1. Зависимость критического числа Дина от параметра η при: а) Da→∞; б) Da = 0,01; в) Da = 0,001.

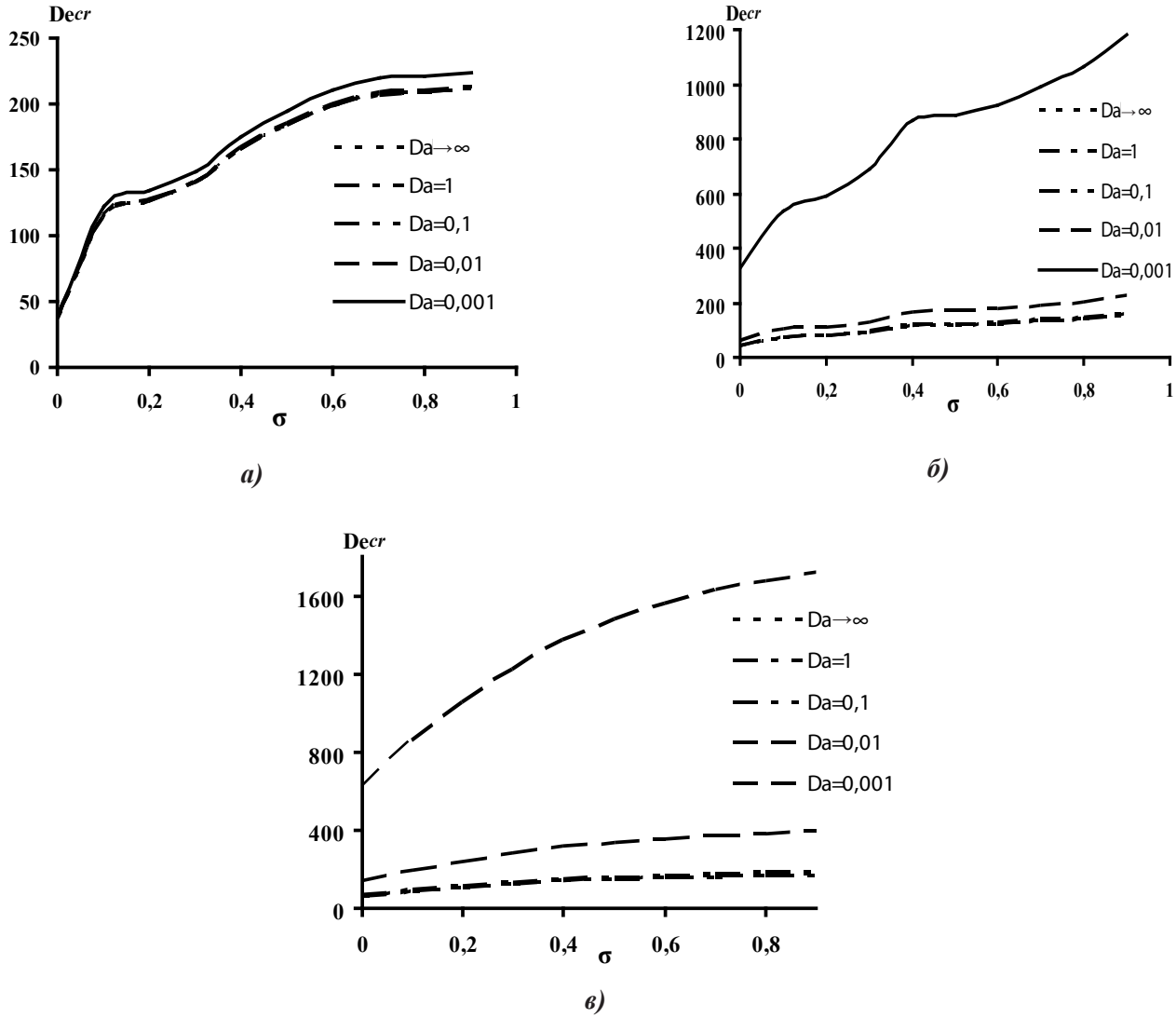


Рис. 2. Зависимость критического числа Дина от параметра σ при: а) η = 0,95; б) η = 0,5; в) η = 0,2.

ды, т. е. с уменьшением значений параметров η и Da трансверсальный масштаб продольных вихрей уменьшается.

Выводы

Исследована гидродинамическая неустойчивость потока с проскальзыванием в криволинейном пористом микроканале между двумя неподвижными концентрическими цилиндрами. Получены невозмущенные профили скорости для потока с проскальзыванием. Проблема линейной неустойчивости решена численно, используя метод коллокаций.

Расчёты показали, что увеличение коэффициента проскальзывания, пористости среды и ширины канала приводит к увеличению заполненности профиля скорости невозмущенного потока (профиль становится более плоским). Это, в свою очередь, приводит к увеличению критических значений числа Дина и критической длины волны возмущения, которые определяют критерии неустойчивости для потока. Также показано, что для σ > 0 зависимости критического числа Дина от параметра η имеют минимум, наблюдающийся при η = 0,5. С уменьшением ширины канала и проницаемости этот эффект нивелируется.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Nivedita N., Ligrani P., Papautsky I.* Dean Flow Dynamics in Low-Aspect Ratio Spiral Microchannel. Scientific Reports // 2017. – Vol. 7. – pp. 1–10.

2. *Bhagat A.A., Kuntaegowdanahalli S.S., Papautsky I.* Continuous particle separation in spiral microchannels using dean flows and differential migration // Lab Chip. – 2008. – vol.8, pp.1906–1914.

3. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Instability of a slip flow in a curved channel formed by two concentric cylindrical surfaces // European Journal of Mechanics B/

Fluids. – 2009. – 28, N 6. – P. 722–727.

4. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P.* Centrifugal instability of nanofluids with radial temperature and concentration nonuniformity between co-axial rotating cylinders // European Journal of Mechanics B/Fluids. – 2016. – vol. 60. – pp. 90– 98.

5. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P.* Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity // Phys. Fluids. – 2016. – vol. 28. – pp. 034104-1 – 034104-16.

6. *Avramenko A. A., Shevchuk I. V., Harmand S., Tyrinov A. I.* Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – vol. 91. – pp. 77 – 88.

7. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G.* Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium // Phys. Fluids. – 2005. – vol. 17. - pp. 094102-1 - 094102-6.

8. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A*. Instability of slip-flow in a channel occupied by a hyper-porous medium // Journal of Porous Media. – 2007. – vol. 10. – pp. 435 – 442.

9. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Renormalization group model of macroscopic turbulence in porous media // Transport in Porous Media. – 2006. – vol. 63. – pp. 175 – 193.

10. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Flow in a Curved Porous Channel with a Rectangular Cross Section // Journal of Porous Media. – 2008. – vol. 11. – pp. 241 – 246.

11. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Flow instability in a curved porous channel formed by two concentric cylindrical surfaces // Transport in Porous Media. – 2007. – vol. 69. – pp. 373 – 381.

THE INSTABILITY OF SLIPPING FLOW IN A CURVILINEAR POROUS MICROCHANNEL

Kovetska Y.Y., Skitsko A.I., Sorokina T.V.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.03

The hydrodynamic instability of flow with slippage in a curvilinear porous microchannel between two stationary concentric cylinders is investigated. Unperturbed velocity profiles for a flow with slip are obtained. The problem of linear instability is solved numerically, using the collocation method.

Calculations showed that an increase in the coefficient of slippage, the porosity of the medium and the width of the channel leads to an increase in the occupancy of the velocity profile of the undisturbed flow (the profile becomes more flat). This, in turn, leads to an increase in the critical values of Dean number and the critical wave length of the perturbation, which determine the instability criteria for the flow. It is also shown that for $\sigma > 0$ the dependences of the critical Dean number on the parameter η have a minimum observed at $\eta = 0.5$. With decrease in channel width and permeability, this effect is leveled.

References 11, figures 2, tabl. 1.

Key worlds: instability of flow, permeability, critical Dean number.

1. *Nivedita N., Ligrani P., Papautsky I.* Dean Flow Dynamics in Low-Aspect Ratio Spiral Microchannel. Scientific Reports, 2017, Vol. 7, pp. 1–10. (Eng)

2. *Bhagat A.A., Kuntaegowdanahalli S.S., Papautsky I.* Continuous particle separation in spiral microchannels using dean flows and differential migration, Lab Chip, 2008, Vol.8, pp.1906–1914. (Eng)

3. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Instability of a slip flow in a curved channel formed by two concentric cylindrical surfaces, European Journal of Mechanics B/ Fluids, 2009, 28, Vol. 6, pp. 722–727. (Eng)

4. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P.* Centrifugal instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity between co-axial rotating cylinders, European Journal of Mechanics B/ Fluids, 2016, №60, pp. 90– 98. (Eng)

5. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P.* Dean instability of nanofluids with radial temperature and concentration non-uniformity, Phys. Fluids, 2016, №28, pp. 034104-1 - 034104-16. (Eng)

6. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Harmand S., Tyrinov A.I.* Thermocapillary instability in an evaporating two-dimensional thin layer film, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, №91, pp. 77 – 88. (Eng)

7. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Basok B.I., Blinov D.G*. Investigation of stability of a laminar flow in a parallel-plate channel filled with a fluid saturated porous medium, Phys. Fluids, 2005, №17, pp. 094102-1 - 094102-6. (Eng)

8. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V., Nield D.A*. Instability of slip-flow in a channel occupied by a hyper-porous medium, Journal of Porous Media, 2007, vol. 10, pp. 435 – 442. (Eng)

9. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Renormalization group model of macroscopic turbulence in porous media, Transport in Porous Media, 2006, vol. 63, pp. 175 – 193. (Eng)

10. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Flow in a Curved Porous Channel with a Rectangular Cross Section, Journal of Porous Media, 2008, vol. 11, pp. 241 – 246. (Eng)

11. *Avramenko A.A., Kuznetsov A.V.* Flow instability in a curved porous channel formed by two concentric cylindrical surfaces, Transport in Porous Media, 2007, vol. 69, pp. 373 – 381. (Eng)

Отримано 24.05.2018
Received 24.05.2018

УДК 663.551

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНИХ УСТАНОВОК І СТУПЕНЮ ОЧИСТКИ БІОЕТАНОЛУ

Булій Ю.В.[1], канд. техн. наук, **Ободович О.М.**[2], докт. техн. наук

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

[2] *нститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна*

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.04

Запропоновано спосіб керованої ректифікації, що дозволяє підвищити ефективність контактних пристроїв колонного обладнання брагоректифікаційних установок і скоротити питому витрату гріючої пари до 30 %. Подовження часу перебування рідини на тарілках розгінної колони до 20 сек. дозволяє підвищити ступінь розділення спиртовмісних фракцій на 30 %. Затримка бражки на тарілках бражної колони до 12 сек. призводить до підвищення концентрації бражного дистиляту на 28 %.

Предложен способ управляемой ректификации, который позволяет повысить эффективность контактных устройств колонного оборудования брагоректификационных установок и сократить удельный расход греющего пара до 30 % по сравнению с типовыми установками. Увеличение времени пребывания жидкости на тарелках разгонной колонны до 20 сек. позволяет повысить степень разделения спиртосодержащих фракций на 30 %. Задержка бражки на тарелках бражной колонны до 12 сек. приводит к повышению концентрации бражного дистиллята на 28 %.

The method of controlled rectification, which improves the efficiency of contact devices of distillation and rectification column and reduces the specific consumption of the heating steam up to 30 % is proposed. Increasing the residence time of the liquid on the trays of the heads and fusels concentrating column to 20 seconds allows to increase the degree of separation of the alcohol-containing fractions by 30 %. The residence of beer on the trays of distillation columns up to 12 seconds gives the ability to increase the concentration of beer distillate by 28 %.

Бібл. 6, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: контрольовані цикли, гріюча пара, головна фракція, колона, домішки спирту.

Ефективність контактного пристрою або брагоректифікаційної установки (БРУ) в цілому оцінюють за ступенем розділення суміші, що підлягає перегонці, та питомій витраті гріючої пари. Контактні пристрої повинні відповідати наступним вимогам: забезпечувати на поверхні тарілки запас рідини (рідинної затримки), досягнення необхідної роздільної здатності при зміні навантаження по пару або рідині, малий гідравлічний опір паровому потоку, мінімальне винесення рідини з нижніх тарілок на верхні, можливість роботи апарата в різних адіабатичних умовах. Коефіцієнт їх корисної дії (ККД) залежить від конструкції, діаметра та вільного перерізу колони, її навантаження, відстані між тарілками, швидкості пари, фізичних властивостей суміші, що підлягає розділенню тощо. ККД визначають дослідним шляхом. Для більшості тарілок його значення не перевищує 0,4…0,6 [1, 2].

За останні десятиліття запропоновано значну кількість нових контактних пристроїв, особливості яких ще недостатньо досліджені (наприклад, клапанні тарілки EDV, зображені на рис. 1).

В умовах високих цін на енергоносії для підвищення ККД тарілок та скорочення питомих витрат гріючої пари зусилля дослідників направлені на вдосконалення конструкції контактних пристроїв. Технологічні розрахунки ректифікаційних колон припускають миттєве перенесення летких компонентів пари та рідини, не враховуючи термін контакту фаз або час перебування рідини на тарілці. Очевидно, існує межа, нижче якої час контакту рідини та пари недостатній для повного насичен-

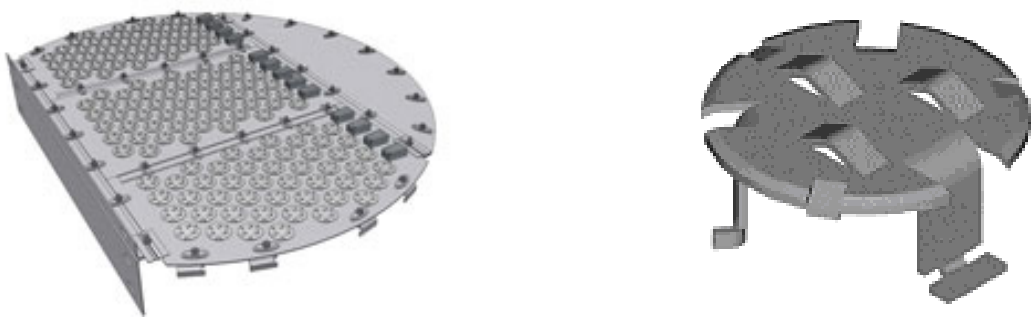


Рис. 1. Клапанні тарілки EDV.

ня пари легколеткими компонентами рідини, а рідини – важколеткими компонентами пари.

Враховуючи вищенаведене, авторами була запропонована технологія ректифікації, що передбачає контрольовані цикли затримки рідини на тарілках колонного обладнання БРУ і синхронного її переливу з парних та непарних за порядком розташування тарілок у два послідовних етапи, що повторюються періодично у часі почергово відповідно до програми контролера [3, 4].

Фрагмент експериментальної колони показаний на рис. 2.

Метою роботи було дослідження енергоефективності розгінної і бражної колон, ступеню очистки етилового спирту в процесі розгонки головної фракції та ефективності процесу брагоперегонки при подовженні часу перебування рідини на тарілках для контакту з парою.

Для вирішення поставленої задачі експериментальна розгінна колона (РК) була оснащена провальними лускоподібними тарілками з коаксіальним розташуванням лусочок, що виключало односпрямованість руху рідини. Переливні отвори кожної тарілки почергово відкривались та закривались рухомими клапанами, зв'язаними з приводними механізмами відповідно до програми контролера [5]. Зміна живого перерізу тарілок на 45-50 % приводила до миттєвого зменшення швидкості пари і забезпечувала пролив рідини через переливні отвори та щілини лусок. Завдяки цьому час переливу скорочувався від 5 до 2 сек. При цьому інтервал рідинної затримки збільшували до 20 сек. Дослідження проводили на Чудновському спиртовому заводі.

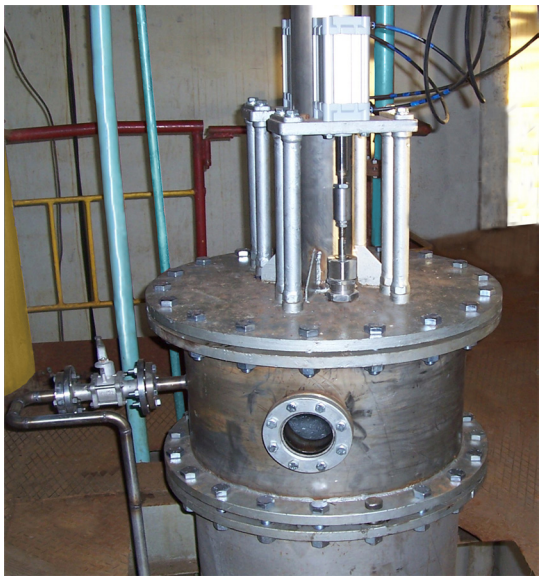


Рис. 2. Експериментальна РК з контрольованими циклами затримки і переливу рідини.

Результати досліджень. На першому етапі досліджень на тарілку живлення РК подавали головну фракцію спирту етилового (ГФ). Її витрати становили 10 % від спирту, що надходив з бражкою. На верхню тарілку колони безперервно надходила гаряча пом'якшена вода для гідроселекції летких органічних домішок із розрахунку, що концентрація етилового спирту в кубовій рідині становила 5…6 % об. Із конденсатора РК відбирали концентрат головної фракції (КГФ) в кількості 0,15 %, контролюючи якість ректифікованого спирту. Для досліджень відбирали проби кубової рідини, флегми, концентрату, а також рідину з 6, 11, 17, 21, 25-тої тарілок через 72 години після зміни режиму роботи колони. Кожну серію дослідів проводили в триразовій повторності з інтервалом між дослідами 24 год. Визначальними обиралися середні величини. Результати хроматографічних досліджень розподілення ключових летких домішок спирту по висоті РК представлені в таблиці 1.

Аналіз отриманих результатів показав, що при подовженні часу перебування рідини на тарілках РК до 20 сек. всі без виключення леткі домішки, починаючи з 25-тої тарілки, приймали характер головних. В процесі розгонки найбільшу ступінь вилучення мали естери та альдегіди. Відомо, що домішки дванадцяти естерів надають спирту неприємного запаху – смолисто-гнилісного, прогірклого, затхлого, прілого, кисло-сирного, паленого тощо. Такі домішки, як пропілацетат, етилпропіонат, етилбутират характерні для спирту, виробленого із неякісної зернової сировини. До складу такого спирту можуть входити етилформіат і пропілформіат. Вони придають спирту відтінки від пліснявілих до кисло-смолисто-затхлих запахів. В процесі ректифікації ці домішки вилучаються складно, оскільки їх леткість близька до леткості етилового спирту. Зазвичай кількість естерів в ректифікованому спирті із крохмалевмісної сировини майже в п'ять разів перевищує суму вищих спиртів та альдегідів.

Як видно із таблиці 1, до складу естерів, що містяться в ГФ, входять етилацетат і в меншій кількості етилбутират. Етилбутират надає товарному спирту різкий запах. Практично доведено, що запропонований спосіб забезпечує його повне видалення. Відсутність етилформіату свідчить про відповідну якість зернової сировини.

Альдегіди характеризуються сильним запахом. При взаємодії альдегідів і спиртів утворюються ацеталі та напівацеталі, які крім ацеталів оцтового, пропіонового та масляного альдегідів погіршують якість спирту. В ректифікованому спирті допускається присутність ацетальдегіду, який в нормативних кількостях не впливає на його органолептичні показники.

Кротоновий альдегід, як і акролеїн, відноситься до насичених альдегідів, має гострий запах та неприємний

Табл. 1. Розподілення ключових летких домішок етилового спирту по висоті РК

Домішки	Концентрація летких домішок по тарілках, мг/дм³							
	кубова рідина	т. 6	т. 11	т. 17	т. 21	т. 25	флегма	КГФ
Альдегіди	0,45	0,21	1,98	3,97	22,31	23,96	1358,53	2046,24
ацетальдегід	0,45	0,21	1,98	3,97	22,31	23,96	1349,72	2032,70
кротоновий	*сліди*	*сліди*	*сліди*	*сліди*	*сліди*	*сліди*	8,81	13,54
Естери	*сліди*	*сліди*	*сліди*	0,97	137,67	83,43	13293,62	16287,51
етилацетат	*сліди*	*сліди*	*сліди*	0,97	128,96	70,97	13247,40	16242,76
етилбутират	*сліди*	*сліди*	*сліди*	*сліди*	8,71	12,46	46,22	44,75
Сивушне масло	103,96	441,90	461,29	529,59	688,77	889,82	6168,71	4151,27
н-пропанол	88,27	347,98	349,42	403,85	521,83	618,48	2062,67	1358,02
ізобутанол	6,67	56,22	64,63	77,88	93,42	130,97	2432,19	1766,78
ізопентанол	8,28	36,95	46,41	46,74	71,95	138,24	1642,61	999,87
ізопропанол	0,74	0,75	0,83	1,12	1,57	2,13	31,24	26,54
Метанол, % об.	0,027	0,054	0,102	0,135	0,173	0,189	4,206	1,013

смак. В умовах глибокої гідроселекції в режимі циклічної ректифікації кротоновий альдегід повністю видаляється із кубової рідини.

Разом з естерами та альдегідами високу ступінь вилучення мали вищі спирти сивушного масла: ізопропанол, н-пропанол, ізобутанол, ізопентанол та н-бутанол. Ці проміжні домішки разом з метиловим спиртом більше концентрувались в дефлегматорі колони. На відміну від головних та проміжних домішок метиловий спирт в процесі бродіння утворюється в незначних кількостях в результаті термічного розпаду пектинових речовин при тепловій обробці сировини. Метанол відноситься до кінцевих домішок і на відміну від головних вилучається із висококонцентрованих розчинів, вміст етилового спирту в яких складає 60 % мас. і більше [1]. Отримані результати свідчать про високу ступінь вилучення та кратність його концентрування при використанні запропонованого способу в умовах глибокої гідроселекції домішок.

Для оцінки енергоефективності експериментальної РК визначали питому витрату гріючої пари в процесі вилучення етилового спирту із ГФ. Витрати гріючої пари ($G_п$) розраховували, виходячи із теплового балансу за витратами води на охолодження та її температурою на вході в конденсатор і на виході із дефлегматора, за формулою:

$$G_п = \frac{G_в \cdot c_в \cdot (t_1 - t_2)}{r} \cdot 1{,}05 = 103 \text{ кг/год}, \quad (1)$$

де $G_в$ – витрати води на охолодження, дм³/год.,
$G_в$ = 1058 дм³/год.;
$C_в$ – теплоємність води, $C_в$ = 4,19 кДж/(кг·град);
t_1 – температура води в колекторі, ºС, t_1 = 15 ºС;
t_2 – температура води після дефлегматора, ºС, t_2 = 65 ºС;
r – прихована теплота пароутворення при тиску 101,3 кПа (для води r = 2256 кДж/кг);
1,05 – коефіцієнт, який враховує втрати тепла гріючої пари по висоті РК с урахуванням ізоляції її обичайок.

Питому витрату гріючої пари ($G_п^{пит}$, кг/дал абсолютного алкоголю (а.а.), введеного на тарілку живлення), розраховували за формулою:

$$G_п^{пит} = \frac{G_п \cdot 100}{V_{ГФ} \cdot C_{ГФ}} = 13 \text{ кг/далл а.а.}, \quad (2)$$

де $V_{ГФ}$ – витрата ГФ спирту етилового, дал/год.,
$V_{ГФ}$ = 8,5 дал/год.;
$C_{ГФ}$ – концентрація етилового спирту в ГФ, % об.,
$C_{ГФ}$ = 93,3 % об.

В процесі розгонки головної фракції при затримці рідини на тарілках до 20 сек. ступінь вилучення альдегідів, вищих спиртів сивушного масла та метилового спирту зростала в середньому на 30 %, кратність концентрування головних та верхніх проміжних домішок підвищувалась на 32 %. При цьому витрати гріючої пари на процес розгонки скорочувались на 30 % в порівнянні з типовими установками – до 13 кг/дал а.а., введеного на тарілку живлення РК.

На другому етапі проводились дослідження ефективності запропонованої авторами технології в процесі перегонки зрілої бражки. Встановлено, що подовження часу перебування бражки на тарілках до 12 сек. дозволяє підвищити концентрацію спирту в бражному дистиляті на 28 % в порівнянні з типовими бражними колонами. Коаксіальне розташування лусочок виключає

можливість утворення застійних зон та пригорання зважених частинок бражки, що подовжує експлуатаційний період роботи бражної колони без зупинки для проведення профілактичних робіт [6].

При цьому витрати гріючої пари на процес брагоперегонки скорочуються на 30 % в порівнянні з типовими бражними колонами і не перевищують 16 кг/дал а.а. бражки.

Висновки. Практично доведено доцільність подовження часу перебування рідини на тарілках колонного обладнання БРУ до моменту, близького до рівноважного стану фаз. Запропонована технологія дозволяє підвищити енергоефективність БРУ на 30 % завдяки зменшенню живого перерізу тарілок в момент масообміну на 45…50 %. При цьому ступінь розділення спиртовмісних фракцій зростає на 30 %, а концентрація бражного дистиляту підвищується на 28 %.

Перспективним напрямком роботи є дослідження ефективності енергозберігаючої технології в процесах епюрації бражного дистиляту і очистки етилового спирту в епюраційній та ректифікаційній колонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Цыганков П.С., Цыганков С.П.* Руководство по ректификации спирта. – М.: ПИЩЕПРОМИЗДАТ, 2001. – 400 с.

2. *Шиян П.Л., Сосницький В.В., Олійнічук С.Т.* Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: Монографія. – К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. – 424 с.

3. *Пат. 60565 А,* Україна, МПК(2006): B01D 3/00. Спосіб перетікання рідини на тарілках колонних масообмінних апаратів / В.М. Малета, І.В. Щуцький, А.П. Дмитрук, Й.Б. Черняхівський.; Заявка № 2002129940; Заяв. 10.12.02; Опубл. 15.10.03, Бюл. № 10. – 2с.

4. *Пат. 89874, Україна*, МПК(2009): B01D 3/00. Спосіб переливу рідини по тарілках колонного апарата у процесі масообміну між парою та рідиною / А.П. Дмитрук, Й.Б. Черняхівський, П.А. Дмитрук,Ю.В. Булій.; Заявка № a200807767; Заявл. 06.06.08; Опубл. 10.03.10, Бюл. № 5. – 4с.

5. *Пат. 116565*, Україна, МПК: B01D 3/30 (2006.01). Ректифікаційна колона з керованими циклами / Ю.В. Булій, П.Л. Шиян, А.П. Дмитрук, П.А. Дмитрук.; Заявка № u201612611; Заявл. 12.12.16; Опубл. 25.05.17, Бюл. № 10. – 5с.

6. *Булий Ю.В., Шиян П. Л., Дмитрук А.П., Куц А.М.* Оптимизация процесса перегонки спиртовой бражки. // Химия и технология пищи.- Каунас: ПИКТУ, 2015. – т. 49, № 1. – с. 20-28.

INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF CONTACT DEVICES OF THE DISTILLATION AND RECTIFICATION PLANTS AND DEGREE OF BIOETHANOL PURIFICATION

Bulii Yu.V.[1], Obodovych O. M.[2]

[1] National Universtiy of Food Technology, 68, Volodymyrska str., Ukraine, Kyiv, 01601, Ukraine
[2] Institute of Engineeri ng Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.04

The aim of the work was a study the energy efficiency of the heads and fusels concentrating column and beer still, the degree of purification of ethanol in the process of the separation of light fraction and the efficiency of the process of a beer distillation by increasing residence time of the liquid on the trays for contact with the vapor.

The technology of rectification with controlled cycles of fluid retention on the stages of the contact and its overflow without mixing to the adjacent trays is proposed. For implementing the method the experimental column was equipped with scaly trays with coaxial arrangement of scales, which excluded the linearity of the fluid motion. The overflow holes of each tray is alternately opened and closed by movable valves associated with the driving mechanism in accordance with the controller program. Change the cross-section of the trays at 45-50 % resulted in an immediate reduction of rate of vapor and provided the spilled liquid through the overflow hole and the gap of scales. Due to this time the overflow was reduced from 5 to 2 seconds.

It was studied that the increasing of the residence time of the beer on the trays to 12 seconds can increase the concentration of alcohol in beer distillate by 28 % in comparison with the standard columns.

The coaxial arrangement of scales eliminates the possibility of formation of stagnant zones and burning of suspended particles of a beer. Specific consumption of heating steam to the process distillation not exceed 16 kg/dl of absolute alcohol of a beer.

In the process of the separation of light fractions with the fluid retention on trays to 20 seconds a degree of extraction of aldehydes, higher alcohols of fusel oils and methyl alcohol grew on average by 30 %, the multiplicity of concentration of light and intermediate impurities increased by 32 %. The consumption of heating steam for the distillation process was reduced to 14 kg/dl of absolute alcohol.

To increase the efficiency of contact devices, it is advisable to prolong the residence time of the liquid on the trays until close to the equilibrium state of phases, and to provide overflow of liquid without mixing to the adjacent trays, to use trays with full compensation of co-current and alternating cross-section.

Ref. 6, fig. 2, table 1.

Key words: controlled cycles, heating steam, light fraction, column, alcohol impurities.

1. *Tsyigankov P.S., Tsyigankov S.P.* [Guide to the rectification of alcohol]. – Moskow: PISCHEPROMIZDAT, 2001. – 400 p. (in Rus.)

2. *Shyian P.L., Sosnytskyi V.V., Oliinichuk S.T.* [Innovative technologies for alcohol industry. Theory and practice: Monograph]. – Kiev: Vydavnychyi dim «Askaniia», 2009. – 424 p. (in Ukr)

3. *Maleta, V., Shchutskyi, I., Dmytruk, A., Cherniakhivskyi, Y.* (2003) [Method for flow-over of liquid on trays of column mass-transfer apparatus], Invention patent № 60565 UA, publ. 15.10.03, Vol. № 10. 2 p. (in Ukr.)

4. *Dmytruk A., Cherniakhovskyi Y., Dmytruk P., Bulii Yu.* (2010) [Method of liquid overflow on trays of column during mass exchange between vapour and liquid], Invention patent № 89874 UA, publ. 10.03.10, Vol. № 5. 4 p. (in Ukr.)

5. *Bulii Yu.V., Shyian P.L., Dmytruk A.P., Dmytruk P.A.* .(2017) [Rectification column with controlled cycles], Invention patent № 116565 UA, publ. 25.05.17, Vol. № 10. 2 p. (in Ukr.)

6. *Bulyi Yu.V., Shyian P. L., Dmytruk A.P., Kuts A.M.* [Optimization of distillation of alcoholic beer // Himiya i tehnologiya pischi [Chemistry and technology of food], 2015. Vol.49.№1.P.20–28. (in Rus.)

Отримано 05.07.2018
Received 05.07.2018

УДК 621.31(03)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В КОММУНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Клименко В.Н., член-корреспондент НАН Украины
Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.05

В статті розглянуті можливості та умови створення когенераційних установок на базі котельних централізованого теплозабезпечення. Показано, що позитивний економічний ефект від втілення таких технологій в системи теплозабезпечення може бути отриманий тільки при умові виконання певних умов при виборі устаткування для КОУ з урахуванням цін на енергоносії, що склалися на момент її проектування.

В статье рассмотрены возможности и условия создания когенерационных установок на базе котельных централизованного теплоснабжения. Показано, что положительный экономический эффект от использования такой технологии генерирования теплоты для целей теплоснабжения может быть получен только при соблюдении определенных требований к выбору оборудования с учетом сложившихся цен на энергоносители.

The article considers conditions and possibilities for installing cogeneration units based on district heating boiler houses. It is shown that a positive economic effect of the use of such technology for heat generation and supply can be obtained only when particular requirements for the selection of equipment taking into account current prices for energy carriers are satisfied.

Библ. 2, рис. 2.
Ключевые слова: когенерация, котел, газотурбинная установка, котел-утилизатор, прибыль, окупаемость.

Введение

Как известно, когенерация, построенная на электрогенерирующих мощностях, является одним из самых эффективных путей экономии топлива при совместном производстве тепловой и электрической энергии по сравнению с их раздельным генерированием в тех же количествах. Это свойство когенерации не зависит от способа или технологии производства тепловой и электрической энергии и определяется тем, что электрическая энергия всегда генерируется со значительно большими потерями энергии, чем тепловая, и эти дополнительные потери в комбинированном цикле можно полезно использовать [1].

Другим важнейшим свойством когенерации является существенное снижение вредных выбросов теплоэнергетической установки в окружающую среду, что является следствием уменьшения расхода топлива. В современных условиях это свойство когенерационных технологий наряду с экономией топлива является важнейшим стимулирующим фактором для их широкого применения в теплоэнергетике.

Сдерживающим фактором для создания когенерационных установок (КОУ) является постоянный рост стоимости топлив и прежде всего природного газа, являющегося для КОУ с тепловыми двигателями (газовыми турбинами или газопоршневыми двигателями) – основным. Для модернизируемых установок, т.е. превращаемых из моноэнергетических в когенерационные, повышение цены природного газа неизбежно приводит к увеличению срока окупаемости проекта.

Областью теплоэнергетики, где, несмотря на постоянный рост тарифов, природный газ остается основным топливом, являются котельные коммунального централизованного теплоснабжения. Это определяется повышенными экологическими требованиями к уровню вредных выбросов теплогенерирующих объектов, а также сложившейся инфраструктурой топливоснабжения и удобствами его использования в котельных большой мощности крупных, прежде всего, городов. Поэтому представляет большой практический интерес рассмотрение экономических и экологических аспектов преобразования крупных (свыше 50-100 Гкал/ч) котельных в мини-ТЕЦ. Предполагается, что эта идея может быть реализована на основе применения простейшей когенерационной схемы, заключающейся в том, что все топливо (природный газ), подаваемое в котельную (котел) используется в тепловом двигателе с электрическим генератором (для указанных тепловых мощностей это должна быть газовая турбина), выхлопные газы которой сбрасываются в модернизируемый котел или специально спроектированный котел-утилизатор соответствующей мощности, генерирующий теплоту для системы теплоснабжения.

Исходной предпосылкой такой модернизации является условие обеспечения тепловой мощности когенерационной установки такой же, как мощность модернизируемой котельни (или котла):

$$Q_{\text{КОУ}} = Q_K . \qquad (1)$$

Тепловая мощность котла при расходе природного газа B_K [нм^3/ч]:

$$Q_K = B_K \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}} \text{ [ккал/ч]},$$

где: $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ [ккал/нм^3] – низшая теплотворная способность природного газа,
$\eta_{\text{к}}$ – КПД котла.

Сбросная теплота теплового двигателя КОУ при расходе природного газа $В_{дв}$ [нм^3/ч]:

$$Q_{дв} = В_{дв} \cdot Q_н^р \cdot (1 - \eta_в) \text{ [ккал/ч]}, \quad (3)$$

где: $\eta_в$ – внутренний КПД газотурбинного двигателя – привода электрогенератора. Для упрощения анализа в первом приближении при расчете он может быть принят равным электрическому КПД $\eta_э$ установки (ГТУ с генератором электроэнергии), обычно указываемому фирмой-изготовителем ГТУ.

Доля сбросной теплоты, полезно используемая в котле-утилизаторе (теплота генерируемая в когенерационной установке):

$$Q_{КУ} = Q_{дв} \cdot \eta_{КУ} = В_{дв} \cdot Q_н^р \cdot (1 - \eta_в) \cdot \eta_{КУ}, \quad (4)$$

где: $\eta_{КУ}$ – КПД котла утилизатора.

Согласно условию (1):

$$В_{дв} \cdot Q_н^р \cdot (1 - \eta_в) \cdot \eta_{КУ} = B_К \cdot Q_н^р \cdot \eta_к . \quad (5)$$

Учитывая то, что расход топлива на когенерационную установку равен его расходу на тепловой двигатель, из (5) следует:

$$В_{КОУ} = В_к \cdot \frac{\eta_к}{(1-\eta_в)\cdot\eta_{КУ}} = К \cdot В_К, \quad (6)$$

т.е. расход природного газа на когенерационную установку пропорционален расходу топлива на базовый котел с коэффициентом пропорциональности:

$$К = \frac{\eta_к}{(1-\eta_в)\cdot\eta_{КУ}}. \quad (7)$$

Как следует из (6) и (7) расход топлива на когенерационную установку полностью определяется расходом топлива на базовый котел и тепловой эффективностью основных элементов КОУ – котла, теплового двигателя и котла-утилизатора, т.е. величиной $\eta_К$, $\eta_В$ и $\eta_{КУ}$. Поскольку коэффициент К всегда больше единицы, то превращение котельной в ТЕЦ потребует увеличения расхода природного газа на величину:

$$\Delta В = В_{КОУ} - В_к = В_к \cdot (К - 1) . \quad (8)$$

Однако, этот отрицательный факт компенсируется тем, что в когенерационной установке кроме базовой тепловой мощности вырабатывается электрическая, которую следует отнести к перерасходованному топливу. Другими словами, в когенерационной установке при соблюдении топливной адекватности теплоснабжения условиям базовой котельной затраты на приобретение дополнительного топлива ΔВ компенсируются доходом от реализации произведенной электрической энергии в количестве (за 1 час):

$$Е = В_{КОУ} \cdot \eta_э \cdot \frac{Q_н^р}{860} \cdot 1[кВт \cdot ч]. \quad (9)$$

Здесь $\eta_э$ – электрический КПД когенерационной установки.

При тарифах $Т_г$ [грн/нм^3] – на газ и $Т_э$ [грн/кВт·ч] – на электроэнергию, прибыль П, полученную от КОУ, можно определить как разность дохода от продажи электрической энергии – $С_э = Т_э \cdot Е$ и затрат на покупку топлива $С_г = Т_г \cdot ΔВ$:

$$П = С_э - С_г = В_к \left[Т_э \cdot \eta_э \cdot \frac{Q_н^р}{860} \cdot К - Т_г(К - 1)\right] =$$

$$= \psi В_к \text{ [грн/час]} . \quad (10)$$

Как видим, преобразование котельной в когенерационную установку той же тепловой мощности несмотря на увеличение расхода топлива (природного газа) в К раз позволяет получить прибыль, пропорциональную мощности модернизируемого котла (котельной) с коэффициентом пропорциональности (коэффициентом прибыльности):

$$\psi = f(Т_э, Т_г, Q_н^р, \eta_э, \eta_{КУ}, \eta_к) . \quad (11)$$

Зависимость (11) представлена на рис.1.

Как следует из графика прибыль (т.е. ψ>0) не всегда может быть получена в когенерационной установке системы коммунального теплоснабжения. Из уравнения (10) следует, что для получения прибыли от когенерационной установки должно выполняться следующее неравенство:

$$Т_э \cdot \eta_э \cdot \frac{Q_н^р}{860} \cdot К > Т_г(К - 1), \quad (12)$$

чему с учетом (7) адекватно условие:

$$\frac{Т_г}{Т_э} < \frac{\eta_э}{1-(1-\eta_э)\cdot\frac{\eta_{КУ}}{\eta_к}} \cdot \frac{Q_н^р}{860}. \quad (13)$$

Неравенство (13) определяет область тарифов на природный газ и электроэнергию при которых когенерационная установка с заданными коэффициентами эффективности ее составляющих – котла $\eta_к$, котла-утилизатора $\eta_{КУ}$ и турбоагрегата $\eta_э$ будет работать с прибылью, т.е. когда стоимость проданной теплоты и электроэнергии будет превышать затраты на использованный природный газ. Напомним, что в (13) тариф на газ указан в грн/нм^3, а на электроэнергию в грн/кВт·час. Неравенство (13) означает, что существует область тарифов и параметров КОУ, при которых созданная на базе котла когенерационная установка будет убыточной. Это свойство КОУ, созданной на базе теплогенерирования, определяется тем, что переход от генерирования теплоты к генерированию теплоты и электроэнергии в соответствии с (8) неизбежно связан с увеличением расхода топлива и поэтому экономическая целесообразность та-

кого перехода становится зависимой от соотношения цен на природный газ и электроэнергию в отличие от КОУ построенной на базе электрогенерирования, в которой переход от электрогенерирования к генерированию теплоты и электроэнергии однозначно не требует по определению увеличения расхода топлива [1], т.е. всегда принесет прибыль за счет «бесплатного» генерирования дополнительного продукта – теплоты. Естественно, это при условии, что базовая электрогенерирующая установка уже работала на природном газе.

Из рис. 1 следует, что для увеличения прибыльности рассматриваемой когенерационной установки следует применять ГТУ и котел-утилизатор с максимально высоким КПД, хотя при этом необходимо иметь ввиду, что увеличение КПД двигателя приводит к увеличению перерасхода топлива, а увеличение КПД котла-утилизатора к его снижению, т.е. всегда желательно максимально возможно увеличение КПД котла-утилизатора, для чего необходимо выбирать ГТУ с высокой температурой выхлопных газов и максимально возможно снижать температуру газов на выходе из КУ.

Как следует из уравнения (10) увеличение тарифов на электроэнергию увеличивает прибыльность когенерационной установки, а увеличение стоимости природного газа – к ее уменьшению. Зависимость прибыльности рассматриваемого типа КОУ от $T_э$ и $T_г$ показана на рис. 2. Как видим, при любом тарифе на продажу электроэнергии, выработанной в КОУ, увеличение цены на газ приводит к снижению прибыли и при определенных значениях $T_г$ когенерационная установка может стать убыточной. Это в соответствии с (13) наступает при условии

$$T_г > T_э \cdot \frac{\eta_э}{1-(1-\eta_э)\cdot\frac{\eta_{КУ}}{\eta_к}} \cdot \frac{Q_н^р}{860}. \qquad (14)$$

Из уравнения (14) следует, что в условиях, когда растут цены на природный газ, рассматриваемая когенерационная установка тем надежнее сохранит прибыльность, чем выше тарифы на электроэнергию и качественнее (выше $Q_н^р$) природный газ.

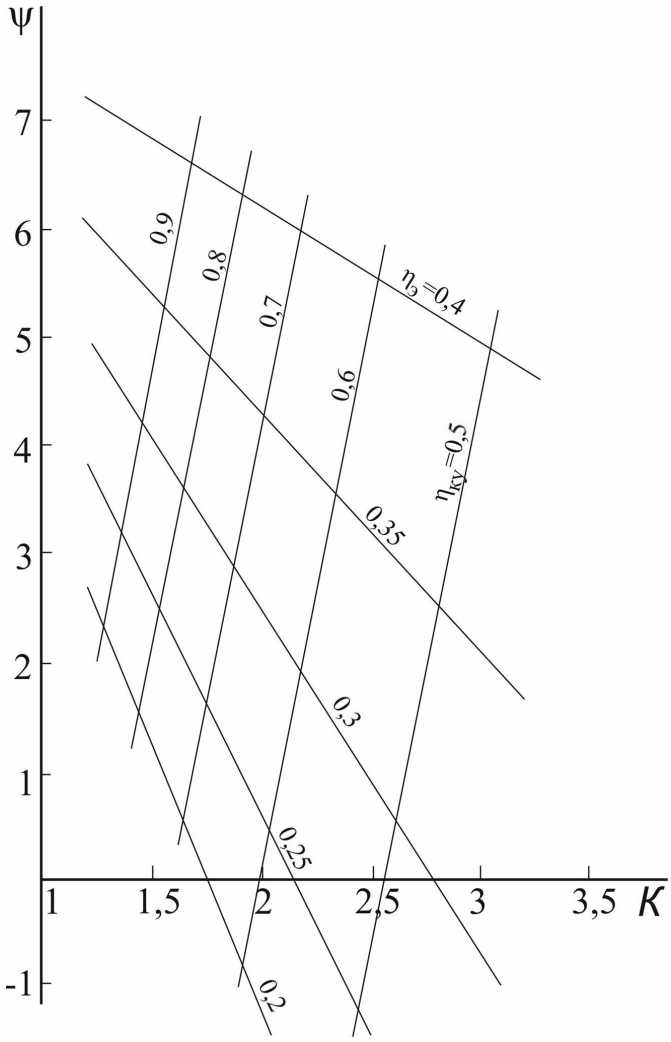


Рис. 1. Зависимость прибыльности КОУ от экономичности ее компонентов.

$Q_н^р = 8200 \frac{ккал}{нм^3}, \eta_к = 0,92, T_э = 1,96 \frac{грн}{кВт \cdot ч}, T_г = 8,74 \frac{грн}{м^3}$

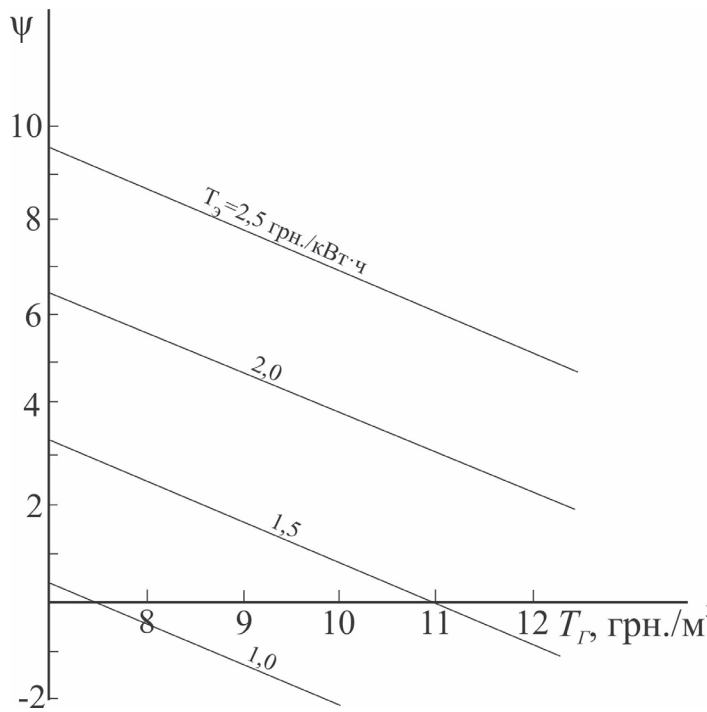


Рис. 2. Зависимость прибыльности КОУ от тарифов на энергоносители.

$Q_н^р = 8200 \frac{ккал}{нм^3}, \eta_к = 0,92, \eta_э = 0,35, \eta_{ку} = 0,78$

Рассмотренные выше соотношения позволяют выбрать оборудование, обеспечивающее прибыльность проекта преобразования отопительной котельной в когенерационную станцию эквивалентной тепловой мощности. Однако, этого недостаточно, чтобы оценить экономическую целесообразность проекта. Для этого необходимо определить срок окупаемости проекта. В современных условиях проект модернизации котельной на базе когенерационных технологий может оказаться привлекательным для инвесторов, если затраты на капитальное строительство и приобретение необходимого оборудования могут быть компенсированы за счет полученной прибыли от продажи электроэнергии или от ее использования для собственных нужд предприятия не более, чем за 2-3 года. В этом отношении наиболее предпочтительным вариантом организации КОУ является использование в качестве котла-утилизатора самого модернизируемого котла и производственных площадей котельной. К сожалению котел не может служить полноценной заменой котла-утилизатора, т.к. расход продуктов сгорания в нем намного меньше, чем расход выхлопных газов ГТУ, выбраной по условию (1). Так, например, для модернизации котла мощностью 100 Гкал/ч согласно условию (1) требуется ГТУ порядка 70 МВт, у которой расход выхлопных газов может составлять около 200 кг/с. Для котла же этот расход не превышает 50 кг/с. Поэтому для КОУ, спроектированной по условию (1) требуется специальный котел-утилизатор, рассчитанный на расход равный расходу продуктов сгорания турбины $G_т$. Только в этом случае мы получим максимально возможную прибыльность когенерационной установки. Использование котла в качестве котла-утилизатора потребует снижения мощности газотурбинной установки и повлечет за собой снижение генерируемой КОУ тепловой мощности, для компенсации которого понадобится применить дополнительный дожиг топлива в котле-утилизаторе. В результате существенно снизится прибыльность когенерационной установки и экономическая целесообразность ее применения.

Реальные показатели когенерационной установки, созданной на базе отопительной котельной, рассмотрим на примере модернизации водогрейного котла типа ПТВМ-50. Этот котел обеспечивает 50 Гкал/ч (58,1 МВт) при расходе природного газа $B_К = 6628$ нм^3/ч с 8200 Ккал/нм^3 и КПД $\eta_К = 0,92$. Расход продуктов сгорания котла составляет около 75000 нм^3/ч . Для генерирования такой тепловой мощности в когенерационном цикле требуется газотурбинная электростанция электрической мощностью 40 МВт. При ее КПД $\eta_э = 0,35$ с выхлопными газами в котел-утилизатор поступит 74,3 МВт теплоты и при $\eta_{ку} = 0,78$ (что возможно осуществить при температуре выхлопных газов турбины 510 °С и на выходе из КУ 110 °С) котел-утилизатор обеспечит требуемую тепловую мощность КОУ (58 МВт). Расход выхлопных газов такой турбины составляет порядка 350000 нм^3/ч, что полностью исключает возможность использования базового котла в качестве котла-утилизатора – КУ необходимо проектировать под выбранную для КОУ турбину. Таким образом, для рассмотренной когенерационной установки коэффициент перерасхода топлива определяется показателями $\eta_К = 0,92$, $\eta_э = 0,35$, $\eta_{КУ} = 0,78$ и составляет К=1,815.

Следовательно, расход топлива в когенерационной установке будет составлять:
$B_{КОУ} = 1,815 \cdot 6628 = 12030$ нм^3/ч, а перерасход топлива
$\Delta B = 12030 - 6628 = 5402$ нм^3/ч.

При тарифе на газ $Т_Г = 8,74$ грн/м^3 и на электроэнергию $Т_э = 1,96$ грн/кВт·ч рассмотренная когенерационная установка будет приносить в соответствии с (10) прибыль П = 31434 грн/ч (1200 $/ч). При затратах на сооружение КОУ 16 млн. $ США (14 – стоимость ГТУ, 500 тыс. $ – стоимость котла- утилизатора, 1,5 млн. $ – строительные работы) и работе установки в течение 4000 часов в год окупаемость проекта составит примерно 3,3 года [2]. При увеличении тепловой мощности базового котла (а следовательно и КОУ) срок окупаемости проекта уменьшится пропорционально увеличению прибыли (согласно ур. 10) и дополнительно за счет снижения удельной стоимости оборудования – турбины и КУ. Более точные оценки можно сделать при выполнении конкретного проекта.

Если рассматривать вариант КОУ с использованием котла ПТВМ-50 в качестве котла-утилизатора, то в соответствии с его пропускной способностью (75000 нм^3/ч) может быть применена газотурбинная установка электрической мощностью не более 5 МВт, которая при $\eta_э = 0,35$ будет генерировать 9,3 МВт тепловой энергии, из которой в теплосети вместо 58 МВт можно будет использовать не более 6,5 МВт. Таким образом, мы получим когенерационную установку эквивалентную по тепловой мощности водогрейному котлу 6,5 МВт и в соответствии с равенством (10) уменьшим прибыльность проекта почти в 9 раз. Несмотря на то, что и затраты на реализацию проекта снизятся, срок его окупаемости возрастет не менее, чем в 2 раза.

Выводы

При современных тарифах на энергоносители и определенных параметрах применяемого оборудования когенерационная установка, созданная на базе отопительного котла эквивалентной тепловой мощности, может быть не только прибыльной, но и убыточной, если соотношение тарифов $Т_Г / Т_э$ возрастает.

Прибыль, которая может быть получена от продажи генерируемой КОУ электроэнергии, прямо пропорциональна базовой мощности котла или котельной и возрастает с увеличением КПД применяемых ГТУ и котла-утилизатора.

Создание на базе отопительного котла когенерационной установки той же тепловой мощности однозначно приводит к перерасходу топлива и тем больше, чем выше КПД базового котла и генерации электроэнергии и ниже КПД котла-утилизатора.

Использование в КОУ базового котла в качестве котла-утилизатора экономически нецелесообразно, т.к. снижает прибыльность проекта и увеличивает срок его окупаемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Клименко В.Н., Мазур А.И., Сабашук П.П.* Когенерационные системы с тепловыми двигателями. Справочное пособие. Ч1. Общие вопросы когенерационных технологий. – К.: ИПЦ Алкон НАН Украины, 2008. – 560 с.

2. *Обосновывающие материалы* к схеме теплоснабжения города Нижнего Новгорода на период с 2012 года до 2027 года. Глава 10. Муниципальный контракт от 19.12.2011 г. No13. – М.: Газпром, 2012. 210 с.

PROSPECTS FOR APPLICATION OF COGENERATION TECHNOLOGIES IN MUNICIPAL ENERGY

Klimenko V.N.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.05

The article considers conditions and possibilities for installing cogeneration units (CUs) in district heating boiler houses. The main requirement to do it is the equality of the CUs' heat capacity and the heat capacity of the boilers that are going to be replaced.

Because the fuel (natural gas) consumption increases due to such replacement, it is necessary to determine the conditions, taking into account the constant growth of energy carriers' prices, under which the transition to cogeneration technologies in the heat supply system will be feasible, i.e. the project will make a profit and ensure the reasonable payback period. For this purpose, the relationships between the profitability of the project, the economic indicators of the equipment included in the cogeneration unit, and the price of energy carriers are suggested. An analysis performed with the help of these relationships showed that the cogeneration unit of the same thermal capacity as the boiler (or boilers), which is going to be replaced, in comparison with CU installed on the basis of a generating unit definitely requires an increase in fuel consumption, and the profit, determined as the difference between income from generated electricity sales and fuel purchase costs, becomes dependent on the prices of natural gas and electricity, as well as the cost-effectiveness of the equipment for cogeneration. With certain combinations of these parameters, the cogeneration unit, installed on the basis of heat generation, may not be profitable, but unprofitable. Moreover, as natural gas price increases and electricity tariff remains fixed, CUs, designed as profitable, may become unprofitable. These conditions are considered in the article. Relationships between the CU's parameters and tariffs for the natural gas and electricity, which determine the area of profitable work of the cogeneration unit, are obtained. Given the current prices for energy carriers, the design of the CU based on the communal heat supply comes to the selection of the equipment that ensures the profitability of the installation that is sufficient for the recoupment of capital investments within 2-3 years. At the same time, the acceptable limits of the possible increase in the gas/electricity tariffs ratio should be determined.

The main conclusion: the cogeneration unit based on district heat supply with a positive economic effect can be installed only if certain economic and technological conditions, which must be taken into account when designing it, are observed.

References 2, figures 2.

Key words: cogeneration, boiler, gas-turbine unit, waste heat recovery boiler, profit, payback period.

1. *V.N. Klimenko, A.I. Mazur, P.P. Sabashuk.* Koheneratsiini systemy z teplovymy dvyhunamy: dovidkovyi posibnyk u 3 chastynakh. Ch. 1: Zahalni pytannia koheneratsiinykh tekhnolohii [Thermal Engines Cogeneration Systems. Handbook in 3 Parts, Part 1 General Aspects of Cogeneration Technologies], Kiev, EPC ALCON NAS of Ukraine, 2008. [in Rus.]

2. *Uzahalniuiuchi materialy* do skhemy teplopostachannia mista Nyzhnoho Novhoroda na period z 2012 do 2027 roku. Rozdil 10. Munitsypalnyi kontrakt vid 19.12.2011 r. No13 [Substantiating materials for the scheme of heat supply of Nizhny Novgorod city for the period from 2012 to 2027. Chapter 10. Municipal contract #13 dated December 19, 2011], Moskow, Gazprom, 2012. 210 p. [in Rus.]

Отримано 18.07.2018
Received 18.07.2018

УДК 621.181.6

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПІДІГРІВАННЯ ТА ЗВОЛОЖЕННЯ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ ГАЗОСПОЖИВАЛЬНИХ КОТЛОАГРЕГАТІВ

Фіалко Н.М., член-кор. НАН України, **Пресіч Г.О.,** канд. техн. наук, **Гнєдаш Г.О.,** канд. техн. наук, **Шевчук С.І.,** канд. техн. наук, **Дашковська І.Л.**

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06

Запропоновано для водогрійних газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики комплексну теплоутилізаційну систему для підігрівання та зволоження дуттьового повітря і нагрівання холодної води на хімводоочищення. Проведено розрахункові дослідження щодо теплової ефективності даної системи.

Предложена для водогрейных газопотребляющих котлов коммунальной теплоэнергетики комплексная теплоутилизационная система для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха и нагрева холодной воды на химводоочистку. Проведены расчетные исследования касательно тепловой эффективности данной системы.

The complex heat-recovery system for humidifying and heating of blown air and preheating of cold water for chemical water-purification system is proposed for water-heating gas-fired boilers of municipal heat-power engineering. Calculated research of the thermal efficiency of this system was carried out.

Бібл. 15, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: відхідні димові гази, теплові втрати, коефіцієнт використання теплоти палива, нагрівання води хімводоочищення.

NO_x – оксиди азота;
t – температура;
X – вологовміст;
Δ – різниця;
с.г., с.п. – сухий газ чи повітря;

Скорочення:

КВТП – коефіцієнт використання теплоти палива;
ХВО – хімводоочищення;

Індекси:
2 – параметр на виході;
г – газ;
п – повітря;
р – роса.

Ситуація, що склалась останнім часом в комунальній теплоенергетиці України через значне зростання вартості природного газу та посилення вимог щодо зменшення забруднення навколишнього середовища при його спалюванні, спонукає до пошуку ефективних енергоощадних технологій для газоспоживальних теплових установок. Першим дієвим етапом у цьому напрямі є підвищення ефективності спалювання палива в котлоагрегатах завдяки модернізації наявних або застосуванню нових сучасних пальникових пристроїв [1-3]. На другому етапі для більш істотного збільшення коефіцієнта використання теплоти палива (КВТП) та значного поліпшення екологічних показників роботи газоспоживальних котлів слід впроваджувати прогресивні теплоутилізаційні технології [4-6], в яких реалізується конденсаційний режим роботи теплоутилізаційного устаткування. Традиційні теплоутилізаційні апарати, що використовуються в комунальній теплоенергетиці і призначені для підігрівання лише одного теплоносія – зворотної тепломережної води або дуттьового повітря, не забезпечують цього режиму продовж усього опалювального періоду. Для постійної реалізації конденсаційного режиму роботи теплоутилізаційного устаткування необхідно використовувати комплексні системи, в яких здійснюється нагрівання теплоносіїв з різними тепловими потенціалами. Застосування таких теплоутилізаційних технологій для котельних установок забезпечує окрім теплового значний екологічний ефект завдяки зниженню шкідливих викидів в атмосферу при зменшенні витрати палива та частковому розчиненні цих викидів у утвореному конденсаті. Для посилення екологічного ефекту в комплексних системах за рахунок утилізованої теплоти може здійснюватись зволоження дуттьового повітря, що сприяє пригніченню утворення оксидів азоту NO_x в топковому просторі котла [7].

Інститут технічної теплофізики НАН України постійно проводить наукові дослідження у цьому напрямі стосовно розробки та вдосконалення відповідних теплоутилізаційних технологій і устаткування. Так у роботі [8-10] запропоновано і досліджено комплексну теплоутилізаційну систему для підігрівання та зволоження дуттьового повітря (рис. 1).

У даній системі за рахунок використання теплоти відхідних димових газів у водопідігрівачах ВД та ПВ нагрівається вода циркуляційного контуру, части-

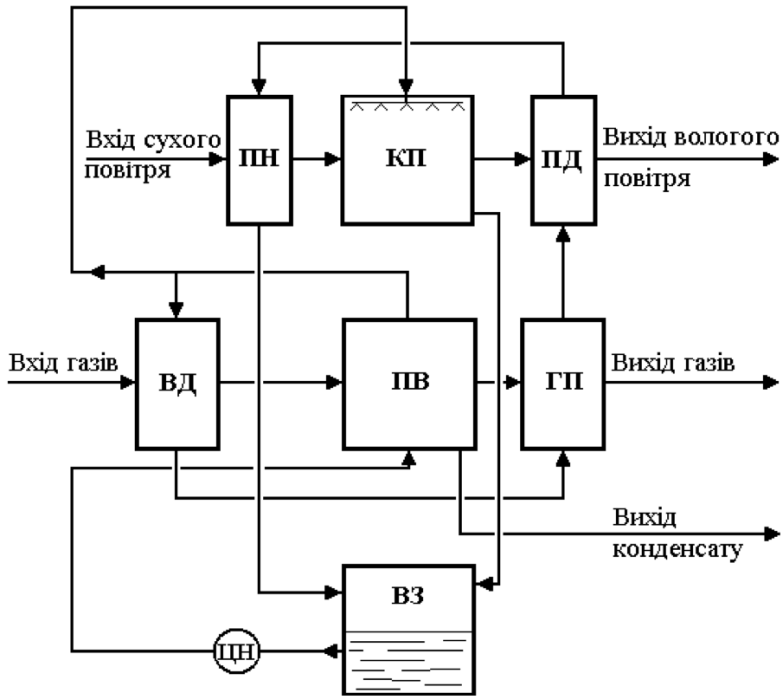


Рис. 1. Структурна схема комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання та зволоження дуттьового повітря:
ПН – повітронагрівач; КП – контактний повітропідігрівач; ПД – повітродогрівач; ВД – вододогрівач; ПВ – поверхневий водопідігрівач; ГП – газопідігрівач; ВЗ – водозбірник; ЦН – циркуляційний насос.

на якої спрямовується в контактний повітропідігрівач КП. У повітропідігрівачі КП шляхом розбризкування нагрітої води на гофрованій насадці і контакту з нею повітря, що надходитиме до газопальникового пристрою котла, відбувається нагрівання і зволоження цього повітря. При охолодженні газів у теплообміннику ПВ здійснюється конденсація частини вологи, що міститься в димових газах, яка разом з охолодженою водою з контактного повітропідігрівача КП спрямовується до водозбірника. Перед надходженням в димову трубу охолоджені димові гази підсушуються у газопідігрівачі ГП до рівня, що забезпечує запобігання конденсатоутворення в цій трубі та підвідних газоходах. Вододогрівач ВД призначений для підвищення теплового потенціалу води, що використовується в газопідігрівачі ГП. Теплообмінники ПН і ПД слугують для попереднього підігрівання повітря перед надходженням його в контактний підігрівач КП і підсушування зволоженого повітря для уникнення конденсатоутворення в підвідних до газопальникового пристрою котла повітроводах. Нагріте і зволожене повітря спрямовується в топку котла. При цьому, підвищення температури повітря забезпечує відповідне зниження витрати палива, а зволоження цього повітря сприяє зменшенню утворення оксидів азоту завдяки зниженню температури горіння шляхом використання частини теплового потенціалу полум'я на нагрівання внесеної вологи.

Дана система характеризується:

1. Високим рівнем температури води у вододогрівачі ВД замкненого контуру перед газопідігрівачем ГП і повітродогрівачем ПД, що забезпечує роботу комплексної системи без споживання теплової енергії від зовнішнього високотемпературного джерела на підсушування охолоджених газів і нагрітого вологого повітря, що дає змогу уникнути випадіння конденсату у повітропроводах та димових каналах котельні. Це є значною перевагою її у порівнянні з традиційними системами з підігрівачами відхідних газів чи повітря, наприклад, прямою водою від котла.

2. Реалізацією процесу зволоження дуттьового повітря в достатньому обсязі для підвищення екологічної ефективності котельної установки за рахунок зменшення утворення NO_x в топковій камері котла завдяки високій температурі повітря на виході з ПН, а відповідно і його значній вологоємності перед контактним повітропідігрівачем КП. Як показали випробування [9], в такій системі досягнуто зменшення оксидів азоту до 4,5 разів.

Основним недоліком даної комплексної системи є підвищений вологовміст димових газів на виході з установки, а відтак і значний рівень її теплових втрат. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є залучен-

ня додаткового споживача теплової енергії. Для водогрійних котлів комунальної теплоенергетики таким споживачем може слугувати холодна вода, що надходить до системи хімводоочищення (ХВО) котельні.

Принципова схема пропонованої удосконаленої комплексної системи наведена на рис. 2. Як видно, у порівнянні з прототипом (рис. 1), новим елементом, який покликаний підвищити теплову ефективність комплексної системи, є додатковий поверхневий теплоутилізатор – водопідігрівач холодної води системи хімводоочищення 7. Завдяки низькому рівню температури води на вході у даний водопідігрівач таке рішення забезпечує більш глибоке охолодження димових газів і реалізацію конденсаційного режиму роботи цього теплообмінника впродовж всього періоду експлуатації. В результаті застосування допоміжного теплообмінника забезпечується суттєве зниження температури та вологовмісту димових газів перед їхнім надходженням до газопідігрівача теплоутилізаційної системи.

Мета роботи полягає у дослідженні режимних параметрів комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання води на хімводоочищення і порівнянні її основних тепловологісних характеристик з відповідною системою без нагрівання води ХВО.

Вихідні дані для проведення розрахункових досліджень теплової ефективності пропонованої системи при застосуванні її для водогрійного котла наведено в табл.1. При виконанні досліджень навантаження котла приймалося відповідно до теплового графіка котельні з перепадом температур теплоносія в тепловій мережі 95-70°С згідно з температурою навколишнього середовища, що змінювалася в діапазоні від мінус 20 до плюс 10°С. Витрата води в системі ХВО приймалася у обсязі 1,5% від загальної витрати води на котел, що відповідає сучасним нормам підживлення теплових мереж.

Визначення тепловологісних характеристик досліджуваної комплексної теплоутилізаційної системи проводилося за відомими методиками з використанням у конденсаційних режимах роботи розрахункових експериментальних залежностей, отриманих в Інституті технічної теплофізики НАН України [11, 12].

Дослідженню підлягали наступні характеристики системи:

- загальна теплопродуктивність комплексної системи Q (рис. 3а);
- приріст КВТП котла $\Delta\eta$ (рис. 3б);
- кінцева температура нагрітого дуттьового повітря $t_2^{\text{п}}$ (рис. 3в) і показник його зволоження $X_2^{\text{п}}$ (рис. 3г);
- температура димових газів на виході з газопідігрівача системи $t_2^{\text{г}}$ з відповідною їм точкою роси $t_{\text{р}}$ (рис. 4а), а також рівень їхнього вологовмісту $X_2^{\text{г}}$ (рис. 4б).

Проведено зіставлення та аналіз досліджуваних параметрів комплексної системи за наявності нагрівання води на ХВО з відповідною системою без такого нагрівання.

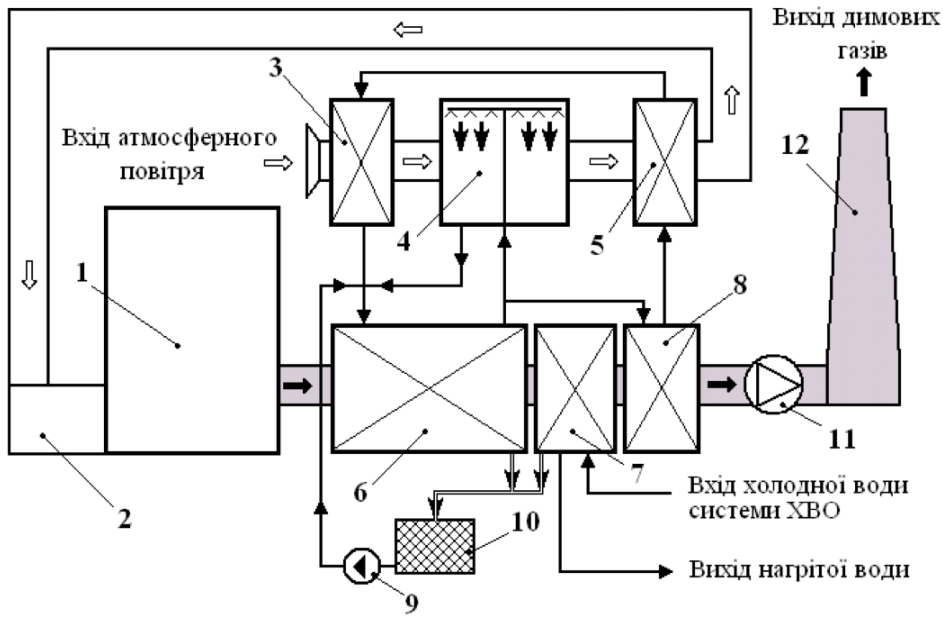


Рис. 2. Принципова схема комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання води системи ХВО: 1 – газоспоживальний котел; 2 – пальниковий пристрій; 3 – повітронагрівач; 4 – контактний повітропідігрівач; 5– повітродогрівач; 6 – водопідігрівач циркуляційної води; 7 –підігрівач води системи ХВО; 8 – газопідігрівач; 9 – циркуляційний водяний насос; 10 – нейтралізатор конденсату; 11 – димосос; 12 – димова труба.

Таблиця 1. Вихідні дані для теплових розрахунків комплексної теплоутилізаційної системи з підігріванням і зволоженням дуттьового повітря та нагріванням води на хімводоочищення

Найменування параметра	Значення						
Температура навколишнього середовища, °С	10	5	0	-5	-10	-15	-20
Навантаження котла відповідно до температурного графіка котельні, %	32	36	49	62	78	87	100
Теплопродуктивність котла, МВт	0,20	0,23	0,31	0,39	0,49	0,55	0,63
Витрата природного газу, м^3/год	21,5	24,3	33,5	42,8	54,4	61,0	70,5
Коефіцієнт надлишку повітря	1,65	1,60	1,55	1,50	1,40	1,30	1,20
Витрата димових газів, кг/с	0,14	0,15	0,20	0,25	0,30	0,31	0,33
Температура газів на виході з котла, °С	80	93	114	132	148	157	170
Витрата повітря, кг/с	0,12	0,13	0,18	0,22	0,26	0,27	0,29
Вологовміст повітря з навколишнього середовища, г/кг с.п.	5,0	4,0	3,0	2,0	1,2	1,0	0,8
Температура води на ХВО, °С	10	8	5	5	4	4	4

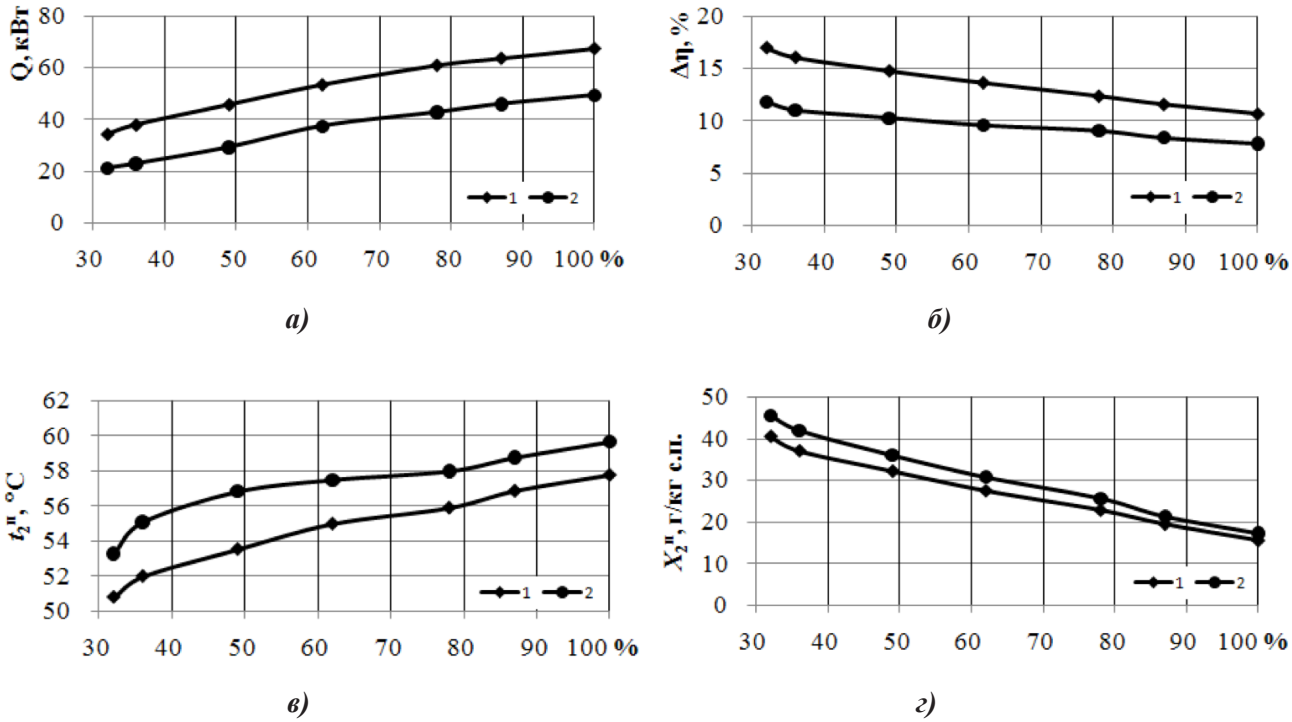


Рис. 3. Залежність від навантаження котлоагрегата загальної теплопродуктивності (а), приросту КВТП Δη (б), температури дуттьового повітря (в) та його вологовмісту (г) на виході з комплексної теплоутилізаційної системи, призначеної для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання (або без нього) води на ХВО: 1 – система з нагріванням води на ХВО; 2 – система без нагрівання води на ХВО.

Очевидним є те, що загальна теплопродуктивність утилізаційної системи Q (рис. 3.а) залежить від навантаження котлоагрегата. Її величина збільшується зі зростанням цього навантаження, оскільки відповідно збільшується температура і витрата відхідних димових газів. Завдяки наявності у складі системи пропонованого додаткового елемента – підігрівача холодної води ХВО, досягається в 1,3...1,6 рази перевищення загальної теплопродуктивності цієї системи у порівнянні з системою без такого теплообмінника.

Як видно з даних рис. 3.б, величина приросту КВТП котла Δη за рахунок застосування досліджуваних

комплексних теплоутилізаційних систем є значною і змінюється в межах від 8,0 до 17,7%. При цьому найбільші значення Δη відповідають системі з нагріванням води на ХВО.

Графіки на рис. 3.в демонструють характер зміни та величини рівня підігрівання дуттьового повітря $t_2^{п}$ на виході з теплоутилізаційної системи. Можна побачити, що є певна залежність у характері зміни рівня підігрівання повітря із залежністю для загальної теплопродуктивності системи (рис. 3.а). А саме, спостерігається поступове збільшення досліджуваної величини $t_2^{п}$ зі зростанням навантаження на котел. За наявності запропонованого нагрівання води для системи ХВО температура $t_2^{п}$ збільшується від 51°С до 58°С. При цьому видно, що рівень $t_2^{п}$ для теплоутилізаційної системи без такого нагрівання дещо вищий. Це пояснюється залученням до складу комплексної системи саме водопідігрівача ВП ХВО (див. рис. 1б), що спричинює зміну потенціалів теплоносіїв та інший характер їхнього перерозподілу між елементами системи.

На рис. 3.г наведено результати розрахункових досліджень рівня вологовмісту дуттьового повітря $X_2^{п}$ на виході з комплексної системи. Відповідно до отриманих даних вологовміст дуттьового повітря $X_2^{п}$ істотно зростає при зменшенні навантаження котельного агрегата, що обумовлено збільшенням температури та вологоємності зовнішнього повітря на вході в систему. Для системи з нагріванням води на хімводоочищення величина $X_2^{п}$ змінюється від 16 г/кг с.п. до 41 г/кг с.п., тобто відбувається зростання вологовмісту у 2,6 рази. При цьому зіставлення величин $X_2^{п}$ для комплексної системи з нагріванням води ХВО та без нього показує, що рівень зволоження дуттьового повітря для обох систем майже однаковий.

Розрахункові дані тепловологісного стану димових газів на виході з комплексної системи наводяться на рис. 4. Для системи з нагріванням води ХВО, як видно, значення температури $t_2^{г}$ (рис. 4.а) та вологовмісту $X_2^{г}$ (рис. 4.б) менші, ніж для відповідної системи без такого нагрівання. Це обумовлено низькою вхідною температурою води у водопідігрівач 7 системи ХВО (див. рис. 2.) та високим рівнем конденсації водяної пари з димових газів на його теплообмінній поверхні. Завдяки зменшенню вологовмісту $X_2^{г}$ досягнуто зниження рівня температури точки роси $t_р$ цих газів. У всіх режимах роботи котлоагрегата дотримується умова $t_2^{г} > t_р$, при цьому їхня різниця Δt знаходиться в межах від 13°С до 16°С, що зазвичай є достатнім для уникнення конденсатоутворення у газовідвідних каналах в напрямку димової труби [13]. З метою контролю стану даних каналів стосовно наявності в них пошкоджень внаслідок конденсатоутворення застосовують сучасні методи моніторингу цих каналів, що дозволяє вчасно виявити дефекти поверхонь та посилити заходи щодо їхнього антикорозійного захисту [14,15].

Таким чином можна констатувати, що пропоноване вдосконалення комплексної системи, істотно знизило теплові втрати котельної установки. Зниження теплових втрат в даній ситуації покращує і умови експлуатації газовідвідного тракту котельні завдяки зниженню абсолютної вологості димових газів на виході із пропонованої системи.

Для теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання води системи ХВО також були проведені розрахункові дослідження її екологічної ефективності [7]. Як показав аналіз отриманих даних, застосування для котельних установок вказаних теплоутилізаційних систем окрім підвищення ефективності використання теплоти палива забезпечує скорочення викидів оксидів азоту на 21...63 % в залежності від навантаження котла.

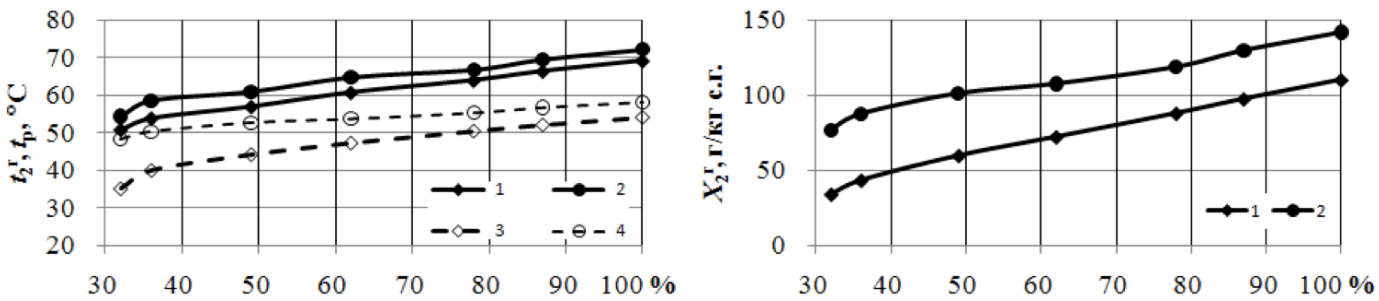


Рис. 4. Залежність від навантаження котлоагрегата температури димових газів (а) та відповідної їм точки роси (3, 4), вологовмісту димових газів (б) на виході з комплексної теплоутилізаційної системи, призначеної для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання (або без нього) води на ХВО:
1, 3 – система з нагріванням води на ХВО; 2, 4 – система без нагрівання води на ХВО.

Висновки

1. Запропоновано для зменшення теплових втрат газоспоживальних котлів застосування комплексної теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря та нагрівання води на хімводоочищення, що забезпечує збільшення коефіцієнта використання теплоти палива у котлах в залежності від їхнього навантаження від 11% до 17%.

2. Показано, що для вказаної теплоутилізаційної системи з нагріванням води на ХВО у порівнянні з системою без такого нагрівання загальна теплопродуктивність збільшується в 1,3...1,6 рази, а приріст КВТП котла зростає на 5,2%.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Бутовский Л.С., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Коханенко П.С., Полозенко Н.П.* (2010). Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени. Промышленная теплотехника. 6, 28–36.

2. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б.* (2014). Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, т.3. 8(69), 40–44.

3. *Фиалко Н.М., Бутовский Л.С., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В, Меранова Н.О., Алёшко С.А., Полозенко Н.П.* (2011). Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха. Промышленная теплотехника, 1, 51–56.

4. *Степанова А.И.* (2016). Анализ эффективности установки с комбинированной теплоутилизационной системой для подогрева воды и дутьевого воздуха котлоагрегата. Промышленная теплотехника, 38(4), 38–45.

5. *Навродська Р. О*. (2015). Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної теплоенергетики. Науковий вісник НЛТУ України, 25(9), 225–229.

6. *Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В.* (2014). Эффективность агрегатированных теплоутилизационных систем для котельных с поверхностными конденсационными теплоутилизаторами. Промышленная теплотехника, 36(3), 63–71.

7. *Fialko N.M., Navrodskaya R.A., Presich G.A., Gnedash G.A., Shevchuk S.I., Martiuk O.V.* (2018). Підвищення екологічної ефективності комплексних теплоутилізаційних систем котельних установок. Промислова теплотехніка, 40(2), 27–32. https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.04.

8. *Фиалко Н.М., Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А.* (2015). Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата. Промышленная теплотехника, 37(4), 71–79.

9. *Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Навродська Р.О., Гнєдаш Г.О.* (2013). Екологічна ефективність комбінованих систем утилізації теплоти викидних газів котельної установки. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва, (755), 429–434.

10. *Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Навродська Р.О., Гнєдаш Г.О*. (2011). Удосконалення комплексної системи утилізації теплоти відхідних газів котлоагрегатів для підігрівання і зволоження дуттьового повітря. Промышленная теплотехника, 33(5), 88–95.

11. *Фиалко Н.М., Гомон В.И., Навродская Р.А., Прокопов В.Г., Пресич Г.А.* (2000). Особенности методики расчета поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа. Промышленная теплотехника. 22 (2), 49–53.

12. *Navrodska R.A., Stepanova A.I., Shevchuk S.I., Gnedash G.A., Presich G.A*. (2018). Експериментальні дослідження теплообміну під час глибокого охолодження продуктів згоряння газоспоживальних котлів. Науковий вісник НЛТУ України, 28(6), 103–108. https://doi.org/10.15421/40280620.

13. *Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А., Глушак, О.Ю*. (2014). Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок с глубоким охлаждением дымовых газов. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2(15), 13-17.

14. *V.P. Babak, S.V. Babak, M.V. Myslovych, A.O. Zaporozhets, V.M.* Zvarych Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities / Edited by Member of the NAS of Ukraine V. Babak. – Kyiv: Akademperiodyka, 2018. – 134 p. DOI: https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.353.134

15. *В.П. Бабак, В.С. Берегун, З.А. Бурова та ін.* Апаратно-програмне забезпечення моніторінгу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії. Монографія /за ред.чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / - К.: ІТТФ НАН України, 2016.-298 с.

INCREASE THE EFFICIENCY OF COMPLEX HEAT-RECOVERY SYSTEMS FOR HEATING AND HUMIDIFYING OF BLOWN AIR OF GAS-FIRED BOILERS

Fialko N.M., Presich G. A., Gnedash G.A., Shevchuk S.I., Dashkovska I.L.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06

The work is devoted to increase of thermal and ecological efficiency of water-heating gas-fired boilers of municipal heat-power engineering. To improve thermal efficiency, heat-recovery technologies are used in which deep cooling of the exhaust-gases from boilers with the realization of the condensation mode of the heat recovery equipment is ensured. To implement this regime throughout the heating period, it is advisable to use complex heat-recovery systems in which several heat transfer agents are heated with sufficiently different thermal potentials. To enhance the environmental effect when using complex systems, it is possible to carry out combustion air humidifying in them, which contributes to the reduction of NO_x emissions to the environment by the boiler plants.

The work suggests improvement of the known complex heat-recovery system for heating and humidifying the blown air by introducing into its comprise an additional element - water heater of chemical water-purification system. Such the technological solution will ensure a reduction in the thermal losses of the boiler plant and improve the operating conditions of the gas ducts of the boiler house by preventing the condensate from falling out of the wet exhaust-gases.

The aim of the work is to investigate the operating parameters of the complex heat-recovery system for heating and humidifying the blown air and preheating the water for chemical water-purification and comparing its basic heatly and humidity characteristics with the corresponding complex system without preheating the water.

The results of the investigations are presented in a wide operating range of the load variation of the water-heating boiler respectively the boiler plant temperature graph and are shown graphically.

The analysis of the obtained data showed that due to the proposed modernization by preheating the water of the chemical water-purification system in the complex heat-recovery system for heating and humidifying the blown air, an increase of coefficient the use heat of fuel of boilers is provided, depending on their load from 11% to 17%. For this improved heat-recovery system with preheating the water of the chemical water-purification system in comparison with the system without such preheating, the total heating capacity of the complex system increases by 1.3÷1.6 times, and the coefficient the use heat of fuel of the boiler increases by 5.2%.

References 15, tables 1, figures 4.

Key words: exhaust-gases, heat losses, coefficient the use heat of fuel of boiler, heating of water for chemical water-purification system.

1. *Fialko N. M., Prokopov V. G., Butovskiy L. S., Sherenkovsky Ju. V., Meranova N. O., Aleshko S. A., Kokhanenko P. S., Polozenko N. P.* (2010). Modelirovaniye struktury techeniya izotermicheskogo potoka v esheloni-rovannoy reshetke ploskikh stabilizatorov plameni [Simulation of the flow structure of an isothermal flow in the echeloned lattice of flat flame stabilizers]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 6, 28–36. (in Rus.)

2. *Fialko N. M., Sherenkovsky Ju. V., Mayson N. V., Meranova N. O., Butovskiy L. S., Abdulin M. Z., Polozenko N. P., Klishch, A. V., Strizheus S. N., Timoshchenko A. B.* (2014). Matematicheskoye modelirovaniye protsessov techeniya i smeseobrazovaniya v tsilindricheskom stabiliza-tornom gorelochnom ustroystve [Mathematical modeling of processes of flow and mixture formation in a cylindrical stabilizer burner device]. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy [Eastern European Journal of Advanced Technologies], V.3, 8 (69), 40–44. (in Rus.)

3. *Fialko N. M., Butovsky L. S., Prokopov V. G., Sherenkovsky Ju. V., Meranova N. O., Alyoshko S. A., Polozenko, N. P.* (2011). Kompyuternoye modelirovaniye protsessa smeseobrazovaniya v gorelochnykh ustroystvakh stabilizatornogo tipa s podachey gaza vnedreniyem v snosyashchiy potok vozdukha [Computer simulation of process of mixture formation in burner devices of the stabilizing type with the introduction of gas into the blowing down airflow]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 33(1), 51–56. (in Rus.)

4. *Stepanova A. I.* (2016). Analiz effektivnosti ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy siste-moy dlya podogreva vody i dut'yevogo vozdukha kotlo-agregata [Analysis of the efficiency of the installation with a combined heat recovery system for heating the water and the blown air of the boiler]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 38(4), 38–45. (in Rus.)

5. *Navrodska R.* (2015). Pidvyshchennya efektyvnosti teploutylizatsiynykh tekhnolohiy dlya kotelnykh ustanovok komunalnoyi teploenerhetyky [Improving the efficiency of heat utilization technologies for municipal heating boilers]. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 25(9), 225–229. (in Ukr.)

6. *Fialko N. M., Stepanova A. I., Navrodskaya R. A., Sherenkovsky Yu. V.,* (2014). Effektivnost agregatirovannykh teploutilizatsionnykh sistem dlya kotelnykh s pover-khnostnymi kondensatsionnymi teploutilizatorami [Effi-ciency of the aggregated heat recovery systems for boilers

with surface condensation heat exchangers]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 36(3), 63–71. (in Rus.)

7. *Fialko N. M., Navrodskaya R. A., Presich G. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I., Martiuk O.V.* (2018). Pidvyshchennya ekolohichnoyi efektyvnosti kompleksnykh teploutylizatsiynykh system kotelnykh ustanovok. [Increase of ecological effectiveness of complex heat-recovery systems for boiler plants] Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 40(2), 27–32. https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.04 (in Ukr.)

8. *Fialko N. M, Stepanova A. I, Presich G. A Gnedash G. A.* (2015). Analiz effektivnosti teploutilizatsionnoy ustanovki dlya nagrevaniya i uvlazhneniya dut'yevogo vozdukha kotloagregata [The efficiency analisis of heat utilization instalasion for heating and humidifying of combustion air of boiler plant]. Promyshlennaya energetika [Industrial Heat engineering], 37(4), 71–79. (in Rus.)

9. *Fialko N. M., Presich G. O., Navrodska R. O., Gnedash G. O.* (2013). Ekolohichna efektyvnist kombinovanykh system utylizatsiyi teploty vykydnykh haziv kotelnoyi ustanovky [Ecological efficiency of combined heat recovery systems waste of exhaust gases for boiler plant]. Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Teoriya i praktyka budivnytstva [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. The theory and practice of construction], (755), 429 – 434. (in Ukr.)

10. *Fialko N. M., Presich G. O., Navrodska R. O., Gnedash G. O.* (2011). Udoskonalennya kompleksnoyi systemy utylizatsiyi teploty vidkhidnykh haziv kotloahrehativ dlya pidihrivannya i zvolozhennya dutt′ovoho povitrya [Improvement of the complex recovery system of heat of the exhaust-gases of boiler plants for heating and humidifying blown air]. Promyshlennaya energetika [Industrial Heat engineering], 33(5), 88–95. (in Ukr.)

11. *Fialko N. M., Gomon V. I., Navrodskaya R. A., Prokopov V. G., Presich G. A*. (2000). Osobennosti metodiki rascheta poverkhnostnykh teploutilizatorov kondensatsionnogo tipa [Specifics of the calculation procedure for surface heat exchangers of condensation type, Industrial heat engineering]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 22(2), 49–53. (in Rus.)

12. *Navrodska R. A., Stepanova A. I., Shevchuk S. I., Gnedash G. A., Presich G. A*. (2018). Eksperymentalni doslidzhennya teploobminu pid chas hlybokoho okholodzhennya produktiv zhoryannya hazospozhyvalnykh kotliv [Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers]. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 28(6), 103–108. https://doi.org/10.15421/40280620 (in Ukr.)

13. *Fialko N. M., Navrodskaya R. A., Shevchuk S. I., Presich G. A., Gnedash G. A. Glushak O. Yu.* (2014). Teplovyye metody zashchity gazootvodyashchikh traktov kotelnykh ustanovok s glubokim okhlazhdeniyem dymovykh gazov [Thermal protection methods of gas exhaust ducts of boiler plants with deep exhaust gases cooling]. Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezultaty, tekhnologii [Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies], 2(15), 13–17. (in Rus.)

14. *Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvarych V.M.* Information Provision of Diagnostic Systems for Energy Facilities; Edited by Member of the NAS of Ukraine V. Babak. – Kyiv: Akademperiodyka, 2018. – 134 p. DOI: https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.353.134

15. *Babak V.P., Berehun V.S., Burova Z.A. et al.* Aparatno-prohramne zabezpechennia monitorinhu obiektiv heneruvannia, transportuvannia ta spozhyvannia teplovoi enerhii [Software and hardware for monitoring of the generation, the transportation and the consumption of heat energy]. - K.: ITTF NAN Ukrainy, za red. chl.-kor. NAN Ukrainy V.P. Babaka[Edited by Member of the NAS of Ukraine V. Babak, K.: ITTF NAN of Ukraine].2016. 298 pp. (in Ukr.)

Отримано 27.08.2018
Received 27.08.2018

УДК 620:621.09.31.311.661.51.313

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНІ ІННОВАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ (ОГЛЯД)

Басок Б.І., докт. техн. наук, чл.-кор. НАН України, **Базєєв Є.Т.,** канд. техн. наук
Інститут технічної теплофізики НАН України,вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна.

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.07

Підкреслено, що підвищення енергоефективності теплозабезпечення будівель – один з головних факторів соціальної стабільності і вимога безпеки життєдіяльності. Наведено огляд пропозицій щодо технологічних, організаційних і соціально-економічних інновацій підвищення енергоефективності будівель, а також запропоновано обладнання інженерних систем їх енергозабезпечення, у т. ч. при спорудженні "пасивних" будівель типу "нуль-енергії".

Подчеркнуто, что повышение энергоэффективности теплообеспечения зданий – один из головных факторов социальной стабильности и требование безопасности жизнеобеспечения. Приведен обзор предложений технологических, организационных и социально-экономических инноваций повышения энергоэффективности зданий, а также оборудования и инженерных систем их энергообеспечения, в т. ч. при сооружении "пассивного" здания типа "ноль-энергии".

It is emphasized that increasing the energy efficiency of heat supply of buildings is one of the main factors of social stability and the requirement of safety of life support. The review of proposals for technological, organizational and socio-economic innovations to improve the energy efficiency of buildings, as well as equipment and engineering systems for their energy supply, including the construction of a "passive" zero-energy building.

Бібл. 14, рис. 2.

Ключові слова: комунальна теплоенергетика, теплозабезпечення, енергоефективність будівель, інноваційні технології, діагностичний центр.

БКБ – багатоквартирні будинки;
ВВП – валовий внутрішній продукт;
ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
ДБН – державні будівельні норми;
ЕСКО – енергосервісна компанія;
ЖЦБ – життя циклу будівель;
ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії;
ІТП – індивідуальний тепловий пункт;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
НЕС – нова енергетична стратегія;
НДДКР – науково-дослідні і дослідно-конструкторські роботи.

У 2017 році Міненерговугілля України прийняло нову Енергетичну стратегію України на період до 2035 року: "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" (НЕС-35) як результат спільних зусиль експертного товариства України, державних інститутів та авторитетних міжнародних установ [1]. НЕС-35 розроблено в контексті Стратегії сталого розвитку "Україна-2020" (Указ Президента України №5 від 12.01.2015) для реалізації програми підвищення енергоефективності і зниження енергоємності економіки.

Ключовою кількісною та якісною характеристикою НЕС-35 є структура загально-первинного постачання енергії – ЗППЕ (рис. 1). До 2035 року в структурі енергобалансу країни істотно знижується частка вугілля (з 27% до 12%) і зростає частка нетрадиційних і поновлюваних енергоресурсів (з 4% до 25%).

Прогнозні показники документу демонструють траєкторію розвитку енергетики і суміжних галузей, першочергові цільові показники з безпеки та енергоефективності. У НЕС-35 позначені досить амбітні цілі – планується досягти зниження енергоємності ВВП більш ніж в два рази до 2035 року: з 0,24 т н. е./тисячу дол. США до 0,13 за ПКС. Серед головних напрямків підвищення енергоефективності економіки України є скорочення енергоспоживання домогосподарств, комерційного та комунального секторів на потреби опалення шляхом підвищення енергоефективності житлових та громадських будівель.

Політика підвищення енергетичної ефективності будівель крім НЕС-35 визначена також і прийнятими в 2017 році двома законами України – "Про енергетичну ефективність будівель" та "Про фонд енергоефективності" [2, 3]. Положення цих документів спрямовані на реалізацію заходів та механізмів, що стимулюють підвищення енергоефективного використання енергоресурсів в теплопостачанні і, особливо, в реалізації потенціалу підвищення показника енергоефективності в будівлях. Таким чином, енергоефективність, нарешті, визначена як головний, визначальний драйвер в енергетичній політиці країни і в комунальній теплоенергетиці зокрема. Якби енергоефективність залишалася такою ж як в 2015 році, то ЗППЕ в країні склало б 177 млн. т н. е., тобто на 70% треба було б збільшити споживання ЗППЕ (рис. 1). Саме підвищення енергоефективності, а не нарощування виробництва енергоресурсів, в останні десятиліття у світовій практиці стало одним з основних джерел енергії. В Україні цей вид енергоресурсів, на жаль, все ще залишається недооціненим. Роль енергоефективності в структурі вітчизняних і зарубіжних балансів енергетичних енергоресурсів, в т. ч. і як основного

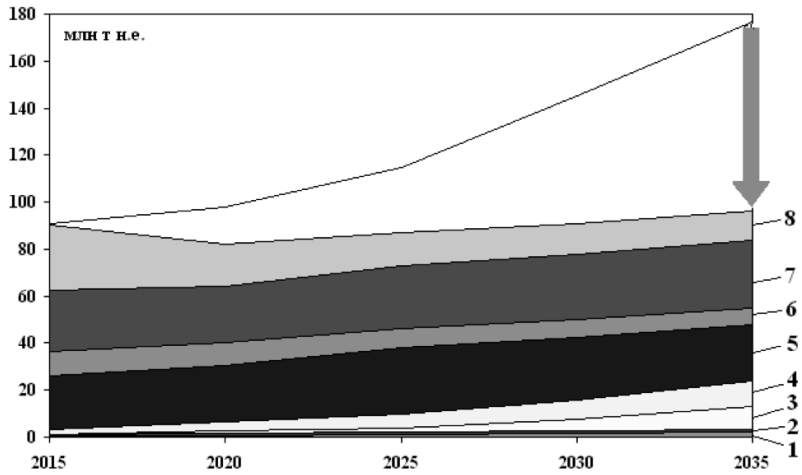


Рис. 1. Енергетичний баланс України за НЕС-35: 1 – термальна енергія (довкілля та техногенного походження); 2 – ГЕС; 3 – сонячна та вітрова енергія; 4 – біомаса, біопаливо та відходи; 5 – атомна енергія; 6 – нафтопродукти; 7 – природний газ; 8 – вугілля; стрілка – ефект енергоефективності.

екологічно чистого енергоресурсу, показана в [4].

Комунальна теплоенергетика України та її головна сфера – теплопостачання населених пунктів України – основний споживач первинних енергоресурсів (понад 60% загального енергобалансу країни, переважно імпортованого природного газу). У той же час саме цей сектор має і найбільший потенціал енергозбереження, якщо задіяти заходи і механізми підвищення ефективності використання енергоресурсів, в першу чергу при енергопостачанні в будівлях (теплові втрати тут доходять до 40%). Однак цей потенціал непросто реалізувати внаслідок специфіки теплопостачання. Теплозабезпечення – це така послуга, без якої неможливо прожити. У той же час тепло – це не ринковий товар, від нього неможливо відмовитися. І не можна відмовитися від традиційного постачальника теплової енергії, так як споживач жорстко пов'язаний з ним стаціонарною трубопровідною системою. Тільки зниження якості і/або вартості послуг змушує споживача переходити до інших, розосереджених, автономних або децентралізованих джерел теплопостачання. При цьому система централізованого теплопостачання втрачає своє монопольне становище. У цій галузі не працюють ринкові механізми, а працюють часто взаємовиключні інтереси держави, місцевої влади, контролюючих органів, особисті інтереси чиновників і працівників служби теплопостачання. В цьому і полягає основна складність функціонування та розвитку сфери теплопостачання.

Сфера теплозабезпечення займає особливе положення як галузь паливно-енергетичного комплексу. Вона органічно пов'язана з іншими галузями промисловості і економіки, прогнозами розвитку або, навпаки, з деградацією міст і населених пунктів, сезонної нерівномірністю надання послуг, високими рівнями ризику інвестиційних проектів в умовах ринкової економіки тощо. Порушення теплозабезпечення викликає соціальну напругу, оскільки специфікою України є те, що ця сфера економіки охоплює все населення країни, зокрема соціально чутливі непрацездатні групи населення (дітей, школярів, пенсіонерів тощо), на відміну від стратегій розвитку інших галузей економіки, орієнтованих на участь активного, соціально затребуваного працездатного населення. Низька енергоефективність теплопостачання є головною причиною високих тарифів для споживача житлово-комунальних послуг та фактором соціальної напруженості. Підвищення енергоефективності – це основна умова національної економічної, екологічної та соціальної стабільності, вимога безпеки життєдіяльності і запорука всієї національної безпеки країни. При цьому необхідно усувати бар'єри на шляху підвищення енергоефективності.

Для реалізації потенціалу підвищення показників енергоефективності в будівлях необхідно задіяти технологічні та організаційно-економічні інновації, розробляти заходи та механізми, що стимулюють підвищення сприйнятливості економіки до інновацій. Технологічні інновації пов'язані як з істотним посиленням теплового опору огороджувальних конструкцій будівель, так і з модернізацією технологій та інженерних систем їх енергопостачання, з використанням нових підходів до розробок таких технологій і систем, з активним залученням відновлюваних джерел енергії та інформаційно-інтелектуальних технологій.

Організаційно-економічні інновації припускають необхідність максимально ефективного управління наявними ресурсами відповідно до нових завдань, а також соціально-економічними, технічними можливостями і механізмами взаємодії комунальної теплоенергетики з економікою в цілому. Такі інновації пов'язані також з удосконаленням механізмів використання ре-

зультатів досліджень, взаємодії державних інститутів, підприємств, управлінців, котрі приймають рішення, експертів, учених.

Функції держави полягають у створенні високоефективної системи управління теплопостачанням населених пунктів України із забезпеченням мінімальних витрат на розвиток і ефективність генерації, транспорту та розподілу теплоти з досягненням якісного, надійного, безпечного теплопостачання, доступного по оплаті для споживача.

Нижче наведено огляд (короткі анотації) пропозицій щодо технологічних, організаційних і соціально-економічних інновацій підвищення енергоефективності будівель, а також обладнання та інженерних систем їх енергозабезпечення, у т. ч. при спорудженні "пасивної" будівлі типу "нуль-енергії" [5-8].

Заходи щодо підвищення енергоефективності в будівлях

1. *Удосконалення нормативно-правової бази щодо нормування енергоефективності в будівлях.*

Існуючі в будівельній сфері "ДБНи" визначають можливість вибору технічних рішень і способів дотримання нормативних параметрів енергоефективності при будівництві будівель. З появою нових енергоефективних технологій необхідно періодично, наприклад, не рідше одного разу на п'ять років переглядати вимоги до енергоефективності будівель.

2. *Розробка збірки правил в сфері енергозбереження та підвищення енергоефективності промислових будівель і споруд та їх гармонізація з європейськими стандартами.*

Промислові будівлі складають значну частину фонду будівель. Однак для них нормативно-методичні документи з нормування рівня енергоефективності відсутні. Необхідно розробити проект нової збірки правил «Енергетична енергоефективність будівель. Розрахунок споживання енергії для опалення та охолодження» (EN ISO 13790:2008).

3. *Удосконалення практики експертизи проектної документації та нагляду за виконанням нормативних вимог з енергоефективності.*

На додаток до державного будівельного нагляду при будівництві та капітальному ремонті об'єктів капітального будівництва необхідно ввести процедури контролю відповідності будівельним нормам і правилам (з подальшим отриманням сертифікату енергетичної відповідності) і для будівель (за типовими проектам) для індивідуальних житлових будинків і малоповерхових багатоквартирних будинків. Сертифікат дає право власнику будівлі на його продаж, оренду чи експлуатацію.

4. *Розвиток системи національних лабораторій, що займаються сертифікацією будівель, будівельних матеріалів і обладнання, а також тестування новозбудованих будівель.*

Мережа національних лабораторій є невід'ємною частиною контролю дотримання "ДБН", в т.ч. стандартів на стадіях проектування і будівництва. Лабораторії повинні мати незалежний статус, що зумовлюватиме більш високу якість послуг, а їх оплату зробити незалежною від результатів проведених сертифікацій і тестів. Головною умовою для лабораторій має стати унеможливлення однієї лабораторії брати участь у всіх стадіях проходження одного проекту (проектування, тестування і сертифікація), що забезпечить більш високий рівень відповідності будівель "ДБН").

5. *Удосконалення правил визначення класу енергетичної ефективності будівель та заходи по реалізації вимог по маркуванню енергоефективності будівель.*

Забудовники повинні розміщувати на фасаді будівлі, яка вводиться в експлуатацію, рівень енергоефективності будівлі (але не рівень енергозбереження). Необхідно заборонити продаж будинків в разі відсутності сертифікату енергетичної відповідності рівню енергетичної ефективності будівлі (A+++ – найвищий; A++ – високий, ..., E – особливо низький). Пропозиції з визначення класів енергетичної ефективності будівель наведено у [9].

6. *Економічне стимулювання будівництва з низьким споживанням енергії і пасивних будівель.*

На сьогодні відсутні механізми, що стимулюють політику просування пасивних будинків і будинків з майже нульовим споживанням енергії. Необхідно розробити стандарт на будівництво пасивних будинків. Повинні бути розроблені процедура і умова пільгового фінансування і кредитування нового будівництва, капітального ремонту та модернізації житлових будинків з питомою витратою на опалення нижче 60 кВт·годин/м^2·рік. Повинна бути розроблена система заохочення кращих проектів, знижена оплата об'єктів капітального будівництва з найвищим рівнем енергоефективності за підключення до систем теплопостачання.

7. *Держзакупівля будівель і устаткування високих рівнів енергоефективності та будівель з низьким споживанням енергії.*

При будівництві будівель високого рівня енергоефективності за рахунок бюджетних коштів повинні бути визначені терміни введення будинків відповідних рівнів енергоефективності, в т.ч. і будівель, які відповідають стандарту «пасивний будинок». Необхідно побудувати декілька експериментальних будинків, накопичити дані про технології будівництва, параметри експлуатації будівель, можливості зниження вартості життєвого циклу таких будівель. У законодавстві про держзакупівлі енергоспоживаючого обладнання повинні бути розроблені правила закупівлі такого обладнання для потреб бюджетних організацій, використовуючи аналіз цінових пропозицій постачальників з урахуванням вартості експлуатації обладнання і будівель протягом всього

циклу життя. Необхідно створити інформаційний інтернет-ресурс про енергоефективні зразки основних видів побутового та офісного обладнання, наявного на ринку країни.

8. *Підвищення вимог з енергоефективності побутових установок і систем освітлення.*

Стандарти з енергоефективності побутових енергоспоживаючих установок і систем освітлення постійно удосконалюються в міру появи нових технологій. Необхідно забезпечити введення обов'язкових стандартів енергоефективності для розширеного списку обладнання з гармонізацією стандартів і правил маркування з такими, що прийняті в ЄС. Необхідно ввести субсидії і податкові пільги для стимулювання покупки енергоефективних електропобутових і освітлювальних приладів в житловому секторі (або утилізації старих холодильників, морозильників, пральних машин тощо).

9. *Розробка програми доведення щорічної частки комплексних ремонтів багатоквартирних будинків (БКБ) по енергоефективним проектам до 2% від площі всього фонду БКБ і забезпечення держпідтримки комплексних ремонтів.*

Необхідна державна підтримка комплексних капітальних ремонтів за умови зниження за їх підсумками питомого споживання енергії на опалення і вентиляцію на 30% і більше. При частоті вибіркових ремонтів хоча б до одного разу на вісім років потрібна бюджетна підтримка в розмірі не менше 50% від вартості ремонту. Надання такої підтримки можна поставити в залежність від ефекту економії енергії. Є досвід фінансового стимулювання такої діяльності в США, Польщі, Естонії.

10. *Реалізація програми "Теплі кредити" для малозабезпечених домогосподарств.*

Від низької енергоефективності будівель більше інших економічно страждають малозабезпечені домогосподарства. Допомога по програмі "Теплий дім" і "Дешеве світло" дозволить знизити витрати по оплаті комунальних послуг шляхом реалізації порівняно простих заходів щодо вдосконалення теплозахисту елементів будівлі (вікна, двері тощо), інженерних енергопостачальних систем, установок приладів витрати води в системах холодного і гарячого водопостачання

11. *Реалізація пілотних проектів "Білі сертифікати" для заміни джерел світла в житлових будинках і в бюджетній сфері.*

Необхідно використовувати наявний досвід інших країн, набір добре налагоджених механізмів стимулювання енергоресурсів до підвищення енергоефективності шляхом придбання енергоефективного обладнання за рахунок компенсації частини витрат на його закупівлю. Для бюджетної сфери можна розробити і запустити одну-дві пілотних програми в рамках схеми "білі сертифікати", наприклад, схему освітлення в школах чи/та систему опалення з ІТП і за результатами реалізації визначити реальну економію коштів, термін окупності та інші техніко-економічні показники.

12. *Використання підходу аналізу витрат циклу життя.*

При обґрунтуванні доцільності реалізації заходів щодо підвищення енергоефективності використовується характеристика "вартості життя циклу будівель (ЖЦБ)" – сума початкових і майбутніх витрат, пов'язаних з будівництвом і експлуатацією будівель. Оцінка витрат ЖЦБ проводиться при мінімізації витрат для власника при одночасному скороченні шкоди навколишньому середовищу. Вартість ЖЦБ – це повна дисконтована вартість будівництва, експлуатації, ремонту, утилізації будівлі впродовж повного терміну існування будівлі з нормативно допустимими показниками якості. Аналіз вартості ЖЦБ включає оцінку наступних компонентів: витрати, період часу, ставка дисконтування. При розрахунку використовується теперішня і можлива ціна енергоресурсу.

13. *Розвиток систем енергосервісних контрактів в громадських і житлових будівлях.*

Необхідно вирішити питання про об'єднання класичного перформанс-контракту з субсидіями з бюджету на капремонт бюджетних і житлових будівель. Важливо вирішити питання вдосконалення договорів з ЕСКО за рахунок: фінансування проектів з виділенням бюджетних грантів як частки від інвестиційних витрат, надання пільгового кредиту та ін. Зарубіжний досвід використання енергосервісних контрактів в житловому секторі обмежений.

14. *Розвиток системи статичного спостереження за рівнями ефективності використання енергії в житлових будинках і в бюджетних закладах.*

В даний час така система спостереження для оцінки структури використання енергії в житловому і в бюджетному секторі відсутня. Бракує даних про обсяги продажу обладнання на основі нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії та їх децентралізованого використання в будівлях. Повинна бути створена спеціальна форма звітності такого моніторингу, що містить відомості для оцінки цільових індикаторів програми енергозбереження для сфери послуг та для бюджетної сфери. Міністерства-розпорядники коштів повинні мати базу даних по споживанню енергії по площах об'єктів і мати плани зниження питомих показників споживання енергії за періодами, наприклад, в п'ять років.

15. Реалізація систем топології житлових і громадських будівель.

Система дозволяє більш точно визначити масштаби споживання енергії, можливості її економії. Для кожного типу будівель наводяться детальні характеристики будівлі, її енергопаспорт, наявність теплових насосів, тип вікон, питома витрата енергії, рівень енергоефективності, викиди парникових газів та ін.

Формування кривих розподілу будівель за рівнем енергоефективності в рамках кожного типу будівель здатне привести до кращого результату.

16. *Рейтинг житлових будинків за рівнем енергоефективності на основі даних від енергозберігаючих компаній і даних енергетичних обстежень будівель.*

Зазначений рейтинг визначається з використанням даних ресурсопостачальних організацій, енергетичних паспортів, звітів про енергообстеження. Будинки з низьким рівнем енергоефективності підлягають першій черзі проведення заходів з енергозбереження та підвищення енергоефективності в рамках комплексного капремонту та модернізації.

17. *Формування рекомендацій та альбомів технічних рішень по підвищенню енергоефективності.*

Необхідно розробити типові проекти комплексного ремонту і модернізації типових житлових будинків бюджетної сфери зі зниженням питомих витрат енергії на опалення після капремонтів на 20%, 30% і 40% і "глибокого зниження". При цьому важливо використовувати тепловізійні і інші діагностичні засоби використання будівель. Остаточна робота з модернізації будівель може проводитися за результатами тепловізійного обстеження чи/та на основі прямих контактних прецензійних вимірів теплотехнічних характеристик будівельних конструкцій.

18. *Програма підтримки системи "розумного обліку" (smart meters) споживання енергоресурсів в житлових будинках.*

Інтелектуальний "розумний" прилад обліку – електронний пристрій, який записує і запам'ятовує дані про споживання електроенергії, води або інших ресурсів в інтервалах часу година або менше і передає цю інформацію енергопостачальній компанії для цілей управління, моніторингу та білінгу. Виставлення споживачам диференційованих рахунків в залежності від часу доби може мотивувати їх до зміни обсягу і тимчасового профілю споживання енергоресурсів і тим самим "згладити" пік їх споживання. Енергопостачальна організація при цьому може відстрочити будівництво додаткових енергопотужностей або зменшити закупівлю електроенергії. Споживачі за показниками на моніторах можуть отримати інформацію про поточне ретроспективне споживання енергії і оперативно змінити своє споживання ще до отримання рахунку за спожиту енергію.

19. *Створення системи надання банківських гарантій по кредитах на капітальний ремонт житлових будинків.*

Така система може бути створена в т. ч. і на основі формування фондів енергозбереження. Може бути використаний пільговий кредит в разі досягнення цілей підвищення енергоефективності. Така практика є, наприклад, в Німеччині. У Латвії пільговий кредит можна отримати при зниженні споживання енергії на 20%.

20. *Удосконалення системи цільових завдань щодо підвищення енергоефективності та системи моніторингу виконання цільових завдань щодо підвищення енергоефективності в бюджетній сфері.*

В одних будинках можна отримати суттєву економію енергії (до 40…50%), а в нових будівлях, побудованих за останніми вимогами "ДБН", знизити споживання енергії хоча б на 15% не просто або вкрай дорого. Тому цілі енергозбереження потрібно ставити для всієї муніципальної сфери, а не для кожної бюджетної установи. Кошти необхідно направляти в першу чергу на реалізацію заходів, які швидко окупаються, на найменш енергоефективних об'єктах бюджетної сфери з урахуванням рівня енергоефективності будівель.

21. *Формування рейтингу (бенчмаркінг) і сертифікації громадських будівель з енергоефективності "енергетичні зірки".*

Необхідно реалізувати реальну роботу по сертифікації, моніторингу та рейтингу енергоефективності громадських будівель, використовуючи енергетичні паспорти, енергетичні декларації і дані енергозберігаючих компаній (із зазначенням даних для сертифікації питомих викидів парникових газів). Необхідно створити систему зіставлення параметрів енергоефективності ("бенчмаркінгу") для об'єктів бюджетної власності та проводити сертифікацію і щорічний конкурс "енергетичні зірки"

22. *Економічне стимулювання виробництва енергоефективного обладнання, матеріалів і вікон з високими параметрами теплозахисту.*

За кордоном таке стимулювання виробництва енергоефективного обладнання, матеріалів і вікон з високими параметрами теплозахисту проводитися, в основному, у формі надання пільгових кредитів. У законодавстві про закупівлі необхідно ввести положення про необхідність пред'являти вимоги, щоб в тендерах на поставку будматеріалів та енергообладнання для будівництва за участю фінансування з бюджету допускалися лише ті компанії, які виробляють сучасні енергоефективні матеріали і обладнання.

23. *Програма заміни опалювальних котлів.*

Велика частина опалювальних котлів має порівняно низький ККД (72…75%). Необхідно ввести обов'язкові стандарти енергоефективності для нових побутових газових котлів, замінити котли на нові енергоефективні моделі з ККД не менше 95%. Газопостачальні компанії повинні надавати субсидії для заміни старих котлів на нові.

24. *Формування приватно-державного партнерства щодо фінансування пріоритетних НДДКР в сфері підвищення енергоефективності.*

Необхідно визначити пріоритетні НДДКР в сфері підвищення енергоефективності в житловому секторі

та у сфері комунальних послуг. Мінрегіону України спільно з МОН України доцільно організувати розробку наукових основ, технічних рішень стосовно дослідно-конструкторську документацію для будівництва експериментальних енергоефективних житлових та адміністративних будівель, які комфортні та енерго- і ресурсомінімізуючі, та характеризуються зниженим в два і більше разів споживанням первинних енергоресурсів. Будівництво має проводитись з урахуванням взаємодії з навколишнім середовищем та із застосуванням технологій утилізації теплоти при теплопередачі її через огороджувальні конструкції, а також зі створенням системи використання теплоти ґрунту, вод, стічних вод і системи автоматизованого управління мікрокліматом будівлі.

25. *Інформаційна підтримка і пропаганда створення енергоефективного суспільства.*

Необхідно розробити систему збору інформації з формуванням "бібліотеки позитивного досвіду", створити мережу консультативних центрів. Сформувати стереотипи ефективної поведінки управлінців з підвищення енергоефективності, розробити освітні програми, організовувати семінари, конференції, "дні енергоефективності" та ін.

Вищевказані заходи політики підвищення енергоефе ктивності будівель, чинна техніко-технологічна база і нормативні вимоги будівництва дозволяють в цілому проводити енергозбереження в будівлях. Сьогодні найбільш поширена теплоізоляція будівель. Але енергозберігаючий ефект від теплоізоляції може бути зведений до нуля, якщо одночасно не буде удосконалюватися уся система енергопостачання будівлі. При цьому інженерне обладнання системи повинно розглядатися і оцінюватися не окремо, а як частка системи. Тобто повинен бути реалізований т. з. холістичний підхід – оцінка показників системи у цілому. Набір вимог до енергетичних характеристик будівель (EPB – standards) сьогодні розробляється в Європі на рівні CEN і глобально у світі на рівні ISO (ISO TS 163 і 205) [10].

Модернізація систем енергозабезпечення об'єктів ЖКГ пов'язана також з розробкою і впровадженням гібридних систем електротеплозабезпечення багатоповерхових будинків. Такі об'єкти виконують роль споживачів-регуляторів Об'єднаної електричної системи України. Розроблено принципові схеми гібридних систем та проаналізовано особливості функціонування цих систем для різних варіантів реалізації їх базових контурів [11, 12].

Проектування енергоефективних будівель потребує широкого поширення інформації про принципи проектування енергоефективних будівель, вибору будівельних матеріалів та їх монтажу, застосування автоматизації будівель, аналізу фізики та комфорту в приміщенні будівлі [13]. Необхідне комплексне проектування енергоефективних будівель в тренді нових вимог, зокрема використання відновлюваних джерел енергії, які повинні бути виконані архітекторами і інженерами відповідної спеціальності. Вже на етапі концептуального проектування визначаються найекономічні матеріали і системи вентиляції та кондиціонування повітря, системи підтримки визначеного рівня витрати енергії для конкретних потреб споживача.

Отже, перед теплозабезпеченням населених пунктів стоять нові виклики. Формування енергоефективної наукомісткої комунальної теплоенергетики неможливо без використання досягнень науки і техніки та вдосконалення соціально-економічного розвитку. У свою чергу, завдання створення нових технологій і обладнання та підвищення соціально-економічного рівня життя в країні повинні визначати і стимулювати вибір пріоритетних напрямків фундаментальних досліджень. Треба використовувати ефективні механізми виявлення тих фундаментальних досліджень, які мають найбільший потенціал для зниження енергоємності. Потрібне розширення і поглиблювання теорії і практики спорудження енергоефективних, зокрема пасивних, будівель. Необхідно створити організаційно-економічну систему трансформації результатів фундаментальних досліджень для стимулювання розвитку енергоефективних інноваційних технологій.

Удосконалення механізму використаня результатів досліджень для підвищення енергоефективності енергопостачання в комунальній енергетики повинно передбачати:

- стратегію розвитку системи теплопостачання на досить довгий період (до 15 років) з урахуванням інноваційних науково-технічних і технологічних розробок у цій галузі, супроводжуючи її "змінними планами-прогнозами" на більш короткі періоди.

- удосконалення системи соціально-економічних відносин в комунальній енергетиці, які б стимулювали енергогенеруючі підприємства до інноваційного переоснащення енергопостачальних технологій, тобто створення необхідних умов для формування інноваційно-активної політики.

- формування економічно ефективного механізму управління процесами створення і реалізації інтелектуальної діяльності.

- використання вітчизняних ресурсів (виробничих, наукових, інвестиційних, кадрових, інформаційних тощо) для нарощування наукового і виробничо-технологічного потенціалу щодо цільових науково-технічних напрямків і проектів.

Необхідно поєднати фундаментальні, прикладні дослідження та інновації з урахуванням ринкових відносин. При цьому доцільним видається реалізувати замкнутий цикл: фундаментальні дослідження – прикладні дослідження – створення інноваційних техноло-



Рис. 2. Від фундаментальних досліджень до інноваційної економіки.

гій і перехід до інноваційної економіки (рис. 2).

Тісне переплетення природно-технічних і соціальних аспектів енергопостачання сектору будівель житлово-комунального господарства потребує вирішення проблем модернізації та розвитку як науково-виробничої сфери теплопостачання так і поглибленого аналізу соціально-економічних процесів, пов'язаних з теплопостачанням. Головними цілями наукових досліджень установ НАН України при цьому є:

1. Науково-методичне обґрунтування політики модернізації та розвитку комунальної теплоенергетики, в т. ч. розробки і створення наукоємних технологій, що підвищують показники енергетичної ефективності будівель.

2. Активна участь в розробці регуляторних документів (законів, концепцій, стратегій, програм, нормативно-технічної бази тощо), що визначають політику енергоефективності в сфері комунальної теплоенергетики.

Досягнення цих цілей повинно спиратися на результати фундаментальних, прикладних, і пошукових досліджень. Існують різні формулювання характеристик зазначених видів досліджень, можна погодитися з наведеними, наприклад, в [14]:

Фундаментальні дослідження. Експериментальна або теоретична діяльність, спрямована на отримання нових знань про основні закономірності устрою, функціонування і розвитку людини, суспільства, навколишнього середовища.

Прикладні дослідження. Дослідження, що спрямовані переважно на застосування нових знань для досягнення конкретних цілей і вирішення конкретних завдань.

Пошукові дослідження. Дослідження, що спрямовані на отримання нових знань з метою їх подальшого практичного застосування (орієнтовані наукові дослідження) і (або) на застосування нових знань (прикладні наукові дослідження) і проводяться шляхом виконання науково-дослідних робіт.

В ІТТФ НАН України в останній час виконані розробки інноваційного обладнання і технологій для підвищення енергоефективності будівель та інженерних систем їх енергозабезпечення. Заходи реалізовані у «пасивній» будівлі [7]. Розроблена методика визначення індикаторів енергоефективності будівель, огороджувальних конструкцій будівель і практика проведення енергоаудитів з використанням для таких заходів діагностичного центру – у демонстраційної будівлі типу "нуль-енергії", спорудженої на території ІТТФ НАН України, з енергопостачанням від поновлюваних джерел енергії (теплота ґрунту, сонячна інсоляція, вітер). Такий об'єкт виконує роль науково-методичного центру навчання студентів теплоенергетичних спеціальностей, а також підвищення кваліфікації фахівців, що займа-

ються розробкою енергоефективних технологій енергопостачання будівель і їх енергоаудитом.

З урахуванням отриманих результатів досліджень інфраструктури енергопостачання демонстраційного "пасивного" будинку, з метою поглиблення та розширення теорії і практики підвищення енергоефективності будівель, на найближчу перспективу визначено головні цілі наукових досліджень, предмети фундаментальних, прикладних досліджень, тематика, методи і інструментарій таких досліджень.

Фундаментальні дослідження

Предмет досліджень.

Розвиток науково-технічних основ розробки енергоефективних технологій енергопостачання будівель житлово-комунальної сфери.

Тематика досліджень.

1. Поглиблення та розширення теорії теплообміну в конструкціях будівель, в т. ч. з урахуванням в тепловому балансі будівель пасивного вкладу енергії сонячного випромінювання.

2. Поглиблення і розширення теорії теплообміну в ґрунтових масивах при використанні для енергопостачання будівель геотермальної енергії.

3. Системний і безперервний облік протягом представленого року всіх проявів кліматичного чинника (сонячної радіації, швидкості вітру, температури зовнішнього повітря) і аналіз їх впливу на теплопередачу через зовнішні елементи будівель.

Методи та інструментарій досліджень.

1. Аналітичні дослідження з розробкою математичних моделей і методів досліджень складних процесів і систем з використанням великих масивів даних.

2. Експериментальні дослідження при розробці наукових основ створення енергоефективних технологій та обладнання енергопостачання будівель.

Прикладні дослідження

Предмет досліджень.

Розробка технологій енергоефективних систем енергопостачання будівель з урахуванням оптимізації архітектурно-планувальних рішень будівель.

Тематика досліджень.

1. Оцінка потенціалу і ринку паливно-ресурсної бази енергопостачання, в т. ч. з урахуванням нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії.

2. Експериментальні дослідження з розробки науково-конструктивних рішень при створенні енергоефективних технологій та обладнання енергопостачання будівель з визначенням вихідних даних і залежностей для інженерних розрахунків обладнання та конструктивних елементів будівель.

3. Розвиток методів поглибленого техніко-економічного аналізу енергоефективності енергопостачання будівлі.

4. Розробка організаційно-економічних і управлінських заходів та механізмів щодо підвищення енергоефективності енергопостачання будівель.

Методи та інструментарій досліджень.

Аналітичні і експериментальні методи досліджень теплопередачі і моніторинг теплових потоків в огороджувальних конструкціях і елементах будівель з використанням автоматизованих діагностичних систем.

Висновки

1. Підвищення енергоефективності, а не нарощування виробництва енергоресурсів в останні десятиліття стало одним з основних трендів розвитку світової енергетики. В Україні цей вид енергоресурсів, на жаль, все ще залишається недооціненим, хоча потенціал його значний в теплопостачанні, особливо в секторі будівель. Низька енергоефективність – головна причина високих тарифів для споживача житлово-комунальних послуг та потенційна загроза зростання соціальної напруженості. Підвищення енергоефективності, зокрема, енергоефективності теплозабезпечення будівель – це основна умова національної економічної, екологічної та соціальної стабільності, вимога безпеки життєдіяльності і отже, національної безпеки країни.

2. Технологічні організаційні і соціально-економічні інновації в теплопостачанні будівель в даний час підготовлені до широкомасштабної реалізації. Розроблено основні заходи політики підвищення енергоефективності. Закон України "Про енергетичну ефективність будівель", "Про фонд енергоефективності" і Нова енергетична стратегія України до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" дають підстави для реалізації заходів і механізмів, що стимулюють підвищення енергоефективного використання енергоресурсів в теплопостачанні і, зокрема, реалізації потенціалу підвищення показника енергоефективності в будівлях.

3. В ІТТФ НАН України виконані розробки інноваційного обладнання і технологій для підвищення енергоефективності будівель та інноваційних інженерних систем їх енергозабезпечення. Деякі заходи вже реалізовані у діагностичного центру – демонстраційної будівлі типу "нуль-енергії", спорудженої на території ІТТФ НАН України.

4. По проблемам підвищення енергоефективності сектора будівель на найближчу перспективу визначено головні цілі наукових досліджень, предмети фундаментальних, прикладних досліджень, тематика, методи і інструментарій таких досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Нова енергетична стратегії України до 2035 року:* "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", energetychna_strategiya_do_2035_r.zip, http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/

list?currDir=50358.

2. *Закон України «Про енергетичну ефективність будівель»* від 22.06.2017 № 2118-VIII, (Відомості Верховної Ради, 2017, № 33, с.359),

http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2118-19.

3. *Закон України «Про Фонд енергоефективності»* від 08.06.2017 № 2095-VIII. (Відомості Верховної Ради, 2017, № 32, с.344),

http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2095-19/print1453786260848146.

4. *Басок Б. И., Базеев Е. Т.* Повышение энергоёмкости Украины – миссия и основной приоритет развития энергетики // Пром. теплотехника, 2017. – Т. 39, №2. – С. 46-52.

5. *Башмаков И. А.* Тридцать мер политики для ускорения энергоэффективности в российских зданих.

http://www.cenef.ru/art_11212_119_node2.html

6. *Організаційно-економічні механізми модернізації* теплоенергетики України Тематичний збірник матеріалів /за загальною редакцією чл.-кор Б.І. Баска; – К.: ТОВ "Видавничий дім "Каліта". – 2015. – 338 с.

7. *Басок Б. И., Базеев Е. Т.* Инновационные технологии для зданий – приоритет повышения энергоэффективности в Украине // Пром. теплотехника, – 2017. – Т. 39, №4. – С. 61-67.

8. *Карп И. Н., Никитин Е. Е.* Пути решения проблем коммунальной энегетики // ЖКХ Украины, –2011. №6. – С. 16-22.

9. *Личак В.И.* Уточнение таблицы базового и нормируемого по годам строительства показателей энергоэффективности жилых и общественных зданий. // Энергосбережение. – 2014. – №1. – С. 23-31.

10. *Инженерное оборудование:* от отдельных установок к системам и к сертификатам энергопотребления зданий. // Энергосбережение. №4, 2015.– С. 9-10.

11. *Фіалко Н.М., Тимченко М.П., Халатов А.А., Шеренковський Ю.В.* Інтелектуальні енергетичні системи теплозабезпечення будівель. Вісник національного університету "Львівська політехніка". Збірник наукових праць, серія Теорія і практика будівництва, № 844, 2016.– С. 203-209.

12. *Басок Б.І., Веремійчук Ю.А., Рибіна О.Б., Лисенко О.М.* Оцінка потенціалу енергоспоживання кінцевими споживачами (населенням) для регулювання енергосистеми в періоди пікового зростання та нічного провалу споживання електроенергії // Пром. теплотехника. Т. 39. №7. – 2017. – С. 131-132.

13. *Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Kotowiz A*. Aspects and implementation of low-energy buildings design. Вісник національного університету "Львівська політехніка". Збірник наукових праць, серія Теорія і практика будівництва, № 844, 2016.– С. 253-259.

14. *Кулагин А.С.* О терминологической путанице в оценке результатов научной деятельности // Вестник РАН, Т. 96, №8, 2016. – С. 698-705.

TECHNOLOGICAL AND SOCIO-ECONOMIC INNOVATIONS FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS (REVIEW)

Basok B.I., Baseyev E.T.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.07

The communal heat power engineering of Ukraine and its main area – the heat supply of the settlements of Ukraine – is the main consumer of primary energy resources (more than 60% of the total energy balance of the country, mainly imported natural gas). At the same time, this sector has the greatest potential for energy saving if measures and mechanisms are used to increase the efficiency of energy use, first of all with energy supply in buildings (thermal losses here reach up to 40%). Low energy efficiency of heat supply is the main reason for high tariffs for the consumer of housing and communal services and the challenge of social tension. Increasing energy efficiency is a basic condition for national economic, environmental and social stability, a requirement for the safety of life and a guarantee of the entire national security of the country. An overview of technological, organizational and socio-economic innovations for increasing energy efficiency of buildings is presented. Innovative equipment and technologies for increasing the energy efficiency of buildings and innovative engineering systems for their energy supply have been carried out at ITTP NAS of Ukraine. The method of determination of energy efficiency indicators of buildings, enclosing structures of buildings and the practice of conducting energy audits with the use of such diagnostic center measures as demonstration building of the "zero energy" constructed on the territory of ITT of NAS of Ukraine with energy supply from renewable energy sources (heat of soil, insolation, wind). Such a demonstration facility serves as a scientific and methodological center for training students of heat energy specialties, as well as the training of specialists involved in the development of energy efficient energy supply technologies for buildings and their energy audit. On the problems of increasing energy efficiency of the building sector in the near future, the main objectives of scientific research, subjects of fundamental, applied research, subjects, methods and tools of such research were determined.

References 14, figures 2.

1. [*Energy strategy of Ukraine* for the period up to 2035"Security, Energy Efficiency, Competitiveness"]. 2017. 66p. (Ukr.)http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358

2. [*Law of Ukraine* "On the energy efficiency of buildings" dated June 22, 2017, № 2118-VIII], Vidomosti Verkhovnoyi Rady[Data from the VerkhovnaRada], 2017. № 33. P.359. (Ukr.)http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2118-19

3. [*Law of Ukraine* "On the energy efficiency Fund" dated June 8, 2017, № 2095-VIII], Vidomosti Verkhovnoyi Rady [Data from the Verkhovna Rada], 2017. № 32.P.344. (Ukr.) http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2095-19/print1453786260848146

4. *Basok B.I., Bazeev E.T.* [Increasing the energy intensity of Ukraine is the mission and the main priority of the development of energy],Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2017. V. 39. №2. P. 46-52. (Rus.)

5. *Bashmakov I. A.* [Thirty policy measures for accelerating energy efficiency in Russian buildings] http://www.cenef.ru/art_11212_119_node2.html

6. [*Organizational and economic* mechanisms for the modernization of heat power engineering of Ukraine /ed. Basok B.I.], Kyiv, TOV "Vydavnychy dim "Kalita"2015. 338 p. (Ukr.)

7. *Basok B.I., Bazeev E.T.* [Innovative technologies for buildings is the priority of increasing energy efficiency in Ukraine], Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2017. V. 39. №4. P. 61-67. (Rus.)

8. *Karp I. N., Nikitin E.E.* Ways to solve the problems of municipal power engineering // Housing and municipal services in Ukraine 2011. №6. P. – 16-22. (Ukr)

9. *Lychak V.I.* Clarification of the table of basic and standardized for years of construction of energy efficiency indicators for residential and public buildings. // Energy Saving 2014.– №1.– P. 23 – 31.

10. [*Engineering equipment*: from individual installations to systems and to certificates of energy consumption of buildings], Energosberezheniye[Energy saving], 2015. №4. P. 9-10. (Rus.)

11. *Fialko N.M., Timchenko M.P., Khalatov A.A., Sherenkovskiy Yu. V.* [Intelligent energy systems of heat supply of buildings], Visnyk Natsionalnoho Universytetu "Lvivskapolitekhnika". Zbirnyknaukovykhprats, Seriya: Teoriya I praktyka budivnytstva [Bulletinof the National University "Lviv Polytechnic". Collection of scientific works, Series: Theory and Practice of Construction], 2016. № 844. P. 203-209. (Ukr.)

12. *Basok B.I., Lysenko O.M., Denisyuk S.P., Veremijchuk Ju.A., Rybina O.B., Lazurenko O.P.* Otsinka potentsialu enerhospozhyvannya kintsevymy spozhyvachamy (naselennyam) dlya rehulyuvannya enerhosystemy v periody pikovoho zrostannya ta nichnoho provalu spozhyvannya elektroenerhiyi [Estimation of the potential of energy consumption by end users (population) for regulating the power system during periods of peak growth and night failure of electricity consumption], Promyslova teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2017, V. 39, №7, P. 131-132. (Ukr.)

13. *Fedorczak-Cisak M., Furtak M., Kotowiz A.* [Aspects and implementation of low-energy buildings

design], Visnyk Natsionalnoho Universytetu “Lvivska politekhnika”. Zbirnyk naukovykh prats, Seriya: Teoriya i praktyka budivnytstva [Bulletin of the National University "LvivPolytechnic". Collection of scientific works, Series: Theory and Practice of Construction], 2016. № 844. P. 253-259.

14. *Kulagin A.S*. [On the terminological confusion in the evaluation of the results of scientific activity], VestnikRossiyskoyakademiinauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2016.V. 96. № 8. P. 698-705.(Rus.)

Отримано 25.06.2018
Received 25.06.2018

УДК: 62-684, УДК 536.24

МОБІЛЬНІ АКУМУЛЯТОРИ ДЛЯ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОХОЛОДОПОСТАЧАННЯ. ЧАСТИНА 2

Демченко В.Г., канд. техн. наук, **Трубачев А.С.**, канд. техн. наук, **Фалько В.Ю., Гронь С.С.**
Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.08

У цій статті зроблені висновки про вплив корозії на конструкцію бака-акумулятора, приведені розрахунки на міцність, розроблена номограма для визначення теплової потужності, що акумулюється, в залежності від об'єму і температури, проведено економічний аналіз проекту, виконана оцінка енергетичних, екологічних і економічних параметрів системи і запропонований експрес-метод аналізу ефективності проекту.

В данной статье сделаны выводы о влиянии коррозии на конструкцию бака-аккумулятора, приведены расчёты на прочность, разработана номограмма для определения тепловой аккумулируемой мощности в зависимости от объёма и температуры, проведен экономический анализ проекта, выполнена оценка энергетических, экологических и экономических параметров системы и предложен экспресс-метод анализа эффективности проекта.

In this article drawn conclusion about influence of corrosion on the construction of tank energy storage, calculations over are brought on durability, a nomogram is worked out for determination of the accumulated heat power depending on a volume and temperature. Provided economic analysis of the project, the estimation of power, ecological and economic parameters of the system is executed and the express-method of analysis of efficiency of project offers.

Бібл. 14, рис. 8, табл. 3

Ключові слова: акумулятор, теплота, холод, система, ефективність.

$c_{тв}$ – питома теплоємність твердої фази (кДж/кг °С);
$c_{р}$ – питома теплоємність рідкої фази (кДж/кг °С);
$\Delta h_{фп}$ – питома теплота плавлення (кДж/кг);
m – маса речовини (кг);
$T_{фп}$ – температура фазового переходу (°С);
t_1 – початкова температура нагріву (°С);
t_2 – кінцева температура нагріву (°С);
Δq – прихована теплота плавлення, в Джоуль/кг;
t_a – температура довкілля, К;
t_m – температура плавлення, в °С;
τ – час;
C_{PS} – середня теплоємність твердої фази між t_1 і t_m, кДж/кг-К;
C_{PL}– середня теплоємність рідкої фази між t_m і t_f, в J/(kg-K);
Q_u і Q_l – теплота трансформації енергії від джерела теплоти до ТАМ;
G – масова витрата рідини (кг/год);
ϱ – густина рідини (кг/м^3);
γ – питома вага рідини;
ρ – щільність рідини;
V – об'єм;
σ_m – меридіальні напруження в пласконапруженому стані;
σ_t – окружні напруження в плосконапруженому стані;
ρ_m – окружний радіус кривизни;
ρ_t – меридіальний радіус кривизни;
δ – товщина стінки бака-акумулятора,
P – внутрішній тиск;
$[\sigma]$ – допустиме напруження;
τ – дотичне напруження при зрізі;
а – прискорення;
v_0 – початкова швидкість;
S – загальна площа поперечних перерізів болтових з'єднань;
$КЕ_1$, $КЕ_2$, $КЕ_3$ – ваговий енергетичний, екологічний, економічний коефіцієнти;
ΔB – економія палива шляхом використання МТА, т у.п.;
B – витрати палива за попередній рік, т у.п.;
G – річний викиди шкідливих речовин, т/год;
ΔG – зменшення викиду шкідливих речовин шляхом використання МТА, т/год;
T – регіонально затверджений тариф, грн./Гкалл;
Св – собівартість отримання акумульованої енергії, грн./Гкалл;
ДСО – дискретна система опалення/охолодження;
МТА – мобільний акумулятор теплової енергії;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ТАМ – теплоакумулюючий матеріал;
РСМ – матеріал з фазовим перетворенням;
I^p_Σ – Індекс привабливості;
I^a_Σ – Індекс пропорціональності.

1. Вступ.

Метою другої частини статті [1] є вибір та обґрунтування конструктивних матеріалів для МТА, оцінка впливу хімічної корозії ТАМ на конструктивні елементи, проведення розрахунку на міцність бака-акумулятора при транспортуванні, визначення теплової

здатності ТАМ та визначення доцільності впровадження та ефективності інвестицій у природоохоронні заходи на прикладі реалізації проекту ДСО. Для досягнення поставленої мети були проведені експериментальні досліди корозійної дії водного розчину бішофіту й триацетату натрію на метали, проведені розрахунки напружено-деформованого стану бака-акумулятора та його кріплення при транспортуванні, розроблена номограма для визначення кількості отримання корисної теплоти та холоду в залежності від різниці температур теплоносія та запропоновано експрес-метод визначення енерго-еколого-економічної ефективності проекту. Для визначення економічної привабливості впровадження ДСО було використано довгострокову статистично-нормативну та балансову методику.

2. Вибір тепло-холодоакумулюючих матеріалів.

Безліч методів і способів акумуляції призводить до різних технічних і конструктивних рішень. Головне, що суттєво відрізняє проектування систем з акумуляторами – це знання не тільки їх конструкції, ємності акумуляторів (кількості накопиченого холоду/теплоти), але й продуктивності акумуляторів, тобто їх здатності віддавати конкретну кількість холоду (теплоти) в одиницю часу на конкретному температурному рівні, з аргументацією можливих значень похибок відповідних характеристик. Найбільш ефективна акумуляція досягається при використанні теплоти фазових перетворень чи теплоти хімічних реакцій (утворення та розпаду кристалогідратів солей). Найменш ефективною є акумуляція при використанні тільки теплоємності речовини, зміни її ентальпії (тепловмісту) зі зміною температури без фазових перетворень.

Маса і об'єм теплоакумулюючого матеріалу (ТАМ) залежить від відповідної щільності енергії, що запасається, й ККД процесу акумуляції. У реальному процесі акумуляції щільність енергії, що запасається, на порядок нижча теоретичного значення внаслідок теплових втрат, вирівнювання поля температур, втрат при заряді й розряді акумулятора тощо. Акумуляції теплоти та холоду присвячена велика кількість досліджень, аналіз яких показує, що найбільші перспективи ТАМ мають водно-сольові системи.

Нами проведено порівняння технічних характеристик, вибраних для наших досліджень ТАМ – бішофіту й тригідрату ацетату натрію, яке показало, що обидві речовини мають певні переваги та обмеження по їх застосуванню.

Бішофіт є водним хлоридом магнію $MgCl_2*6H_2O$, він не має запаху, не горючий, не вибухонебезпечний, гігроскопічний та не токсичний. Розчин природного бішофіту застосовується для захисту від замерзання та корозії в автономних системах опалювання й охолодження та відповідає вимогам ГОСТ 28084-89 "Рідини охолоджувальні низькозамерзаючі". Він характеризується низькою корозійною активністю. Його можна транспортувати та зберігати в звичайних металевих ємностях. Забезпечує роботу устаткування в діапазоні робочих температур від -30 ºС до +110 ºС і захищає систему від повного замерзання при температурах зовнішнього середовища до -35 ºС. Термін зберігання в герметично закритій тарі не обмежений.

При нагріванні водного розчину бішофіту відзначається випадання осаду, який засмічує фільтри та збільшує гідравлічний опір системи опалювання. Крім того, в літературних джерелах є суперечливі відомості про корозійну активність та вплив розчину бішофіту на металеві труби і гумові ущільнення, що вимагає подальшого вивчення.

Трьохводний ацетат натрію $NaCH_3COO\text{-}3H_2O$ є об'єктом підвищеної уваги в силу унікальності його теплофізичних властивостей, сприятливих для використання в якості ТАМ на основі фазових перетворень.

У літературі є велика кількість інформації про цю речовину: структуру, властивості, плавлення, кристалізацію, дегідратацію та ін. [2]. Проте, при вивченні фазових перетворень, що відбуваються в цій речовині, відсутній системний підхід. Даються суперечливі відомості по ентальпіях плавлення та переохолодження, до яких пред'являють вимоги щодо їх стійкості при багаторазовому термоциклуванні, а також передкристалізаційному переохолодженні [3, 4].

Тригідрат ацетату натрію плавиться ізотермічно при температурі +58 °С і допускає переохолодження на 30–40 °С без кристалізації. Кристалізація відбувається при механічному перемішуванні або при введенні додаткових центрів кристалізації в розплав, що обмежує можливості його застосування. Крім того, при нагріванні до температури +95 °С відбувається випар кристалізаційної води, і змінюються температури плавлення і кристалізації. Збереження стабільності при багаторазових циклах плавлення та кристалізації можливо при введенні в тригідрат ацетату натрію ініціаторів кристалізації й спеціальних загусників. [5]

Кількість акумульованої теплоти безпосередньо залежить від теплофізичних властивостей теплоакумулюючого матеріалу. Так, для нагріву матеріалу з двофазним переходом кількість теплоти може бути описана формулою:

$$Q = c_{тв} \cdot m \cdot (T_{фп} - t_1) + \Delta h_{фп} \cdot m + c_p \cdot m \cdot (t_2 - T_{фп}). \quad (1)$$

Для визначення кількості теплоти матеріалу без фазового переходу використовувалась наступна формула:

$$Q = c_p \cdot m \cdot (t_2 - t_1). \quad (2)$$

Кількість акумульованої енергії холоду визначалась за формулою:

$$Q = G \cdot \varrho \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1). \quad (3)$$

Проведені нами дослідження дали змогу побудувати розрахункові діаграми для визначення продуктивності акумулятора по теплоті і холоду залежно від місткості ТАМ для водного розчину бішофіту (Рис. 1) і тригідрату ацетату натрію (Рис. 2) з розрахунку на 5-20 кубічних метрів відповідно. Як можна бачити, об'єм акумульованої теплоти/холоду прямо пропорційний об'єму ТАМ, при цьому кількість отриманого холоду вище.

3. Експериментальне дослідження впливу ТАМ на процес корозії металів.

На сьогоднішній день основним матеріалом для виготовлення теплоакумулюючих апаратів є конструкційна вуглецева сталь (Ст 3, Ст 10, Ст 20). Більш приваблива нержавіюча сталь не знаходить широкого вжитку через високу собівартість виробів з неї. Хоча останнім часом набуває сили тенденція до виготовлення основних вузлів з полімерних матеріалів, вони застосовуються не настільки широко, як низьколеговані сталі.

Враховуючи, що теплоакумулюючі речовини досить часто являють ознаки кислот чи лугів і використовуються при підвищеній температурі, процеси хімічної і електрохімічної корозії є одними з основних чинників руйнування елементів конструкції теплоакумулюючих пристроїв. Нанесення захисних хімічних чи гальванічних покриттів дещо уповільнює цей процес, але повністю припинити його не може. Більш доцільним бачиться підключення металевих елементів конструкції до захисного аноду (анодний захист) з періодичною заміною аноду в процесі роботи.

При аналізі корозійної дії теплоакумулюючих речовин нами проводились досліди з технічним розчином бішофіту і триацетатом натрію. Технічний розчин бішофіту являє собою рідину жовто-коричневого кольору з показником РН = 6.8. Після нагрівання до +90…95 °С випадає бурий. нерозчинний в воді осад, сам розчин стає прозорим. Показник РН рідини при цьому змінюється незначно (до РН 6.6…6.7). Триацетат натрію в стані розплаву мав показник РН 5.6. Після кількох фазових переходів речовина втрачала чи набирала (в залежності від зовнішніх умов) воду, що призводило до зміни числа РН на 06…0.9 в той чи інший бік. З літературних джерел нам відомо, що швидкість корозії металів в розплаві триацетат натрію складає близько 0,02 мм/рік.

Для дослідів нами використовувалися металеві деталі як з низьколегованих сталей (08кп, Ст3 з покриттям Н3, чи хімічною пасивацією), так і з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Зразки занурювались в теплоакумулюючу речовину, після чого проводилось 10 циклів нагрівання на водяній бані до +95 °С з наступним охолодженням до кімнатної температури. Після 10 циклів нагрівання-охолодження металеві деталі, що заходились

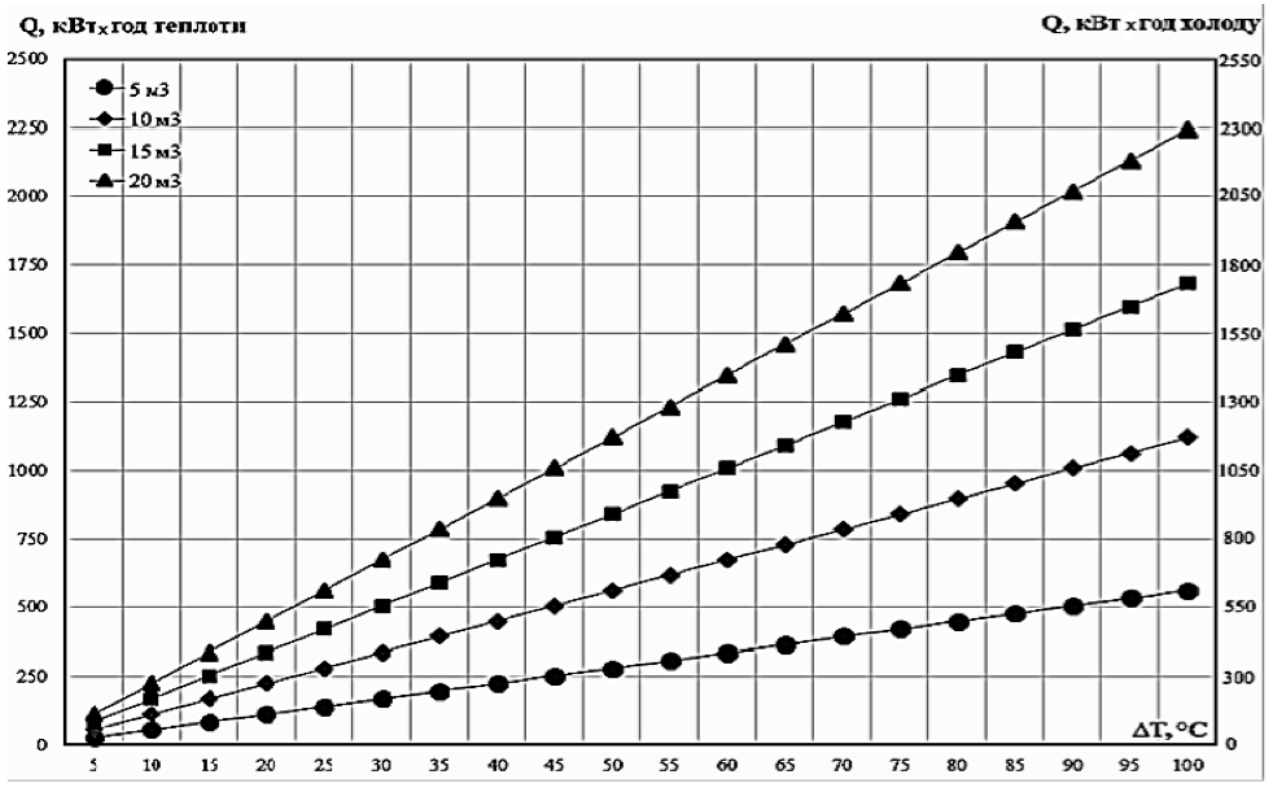


Рис. 1. Діаграма тепло-холодопродуктивності об'єму ТАМ на основі бішофіту.

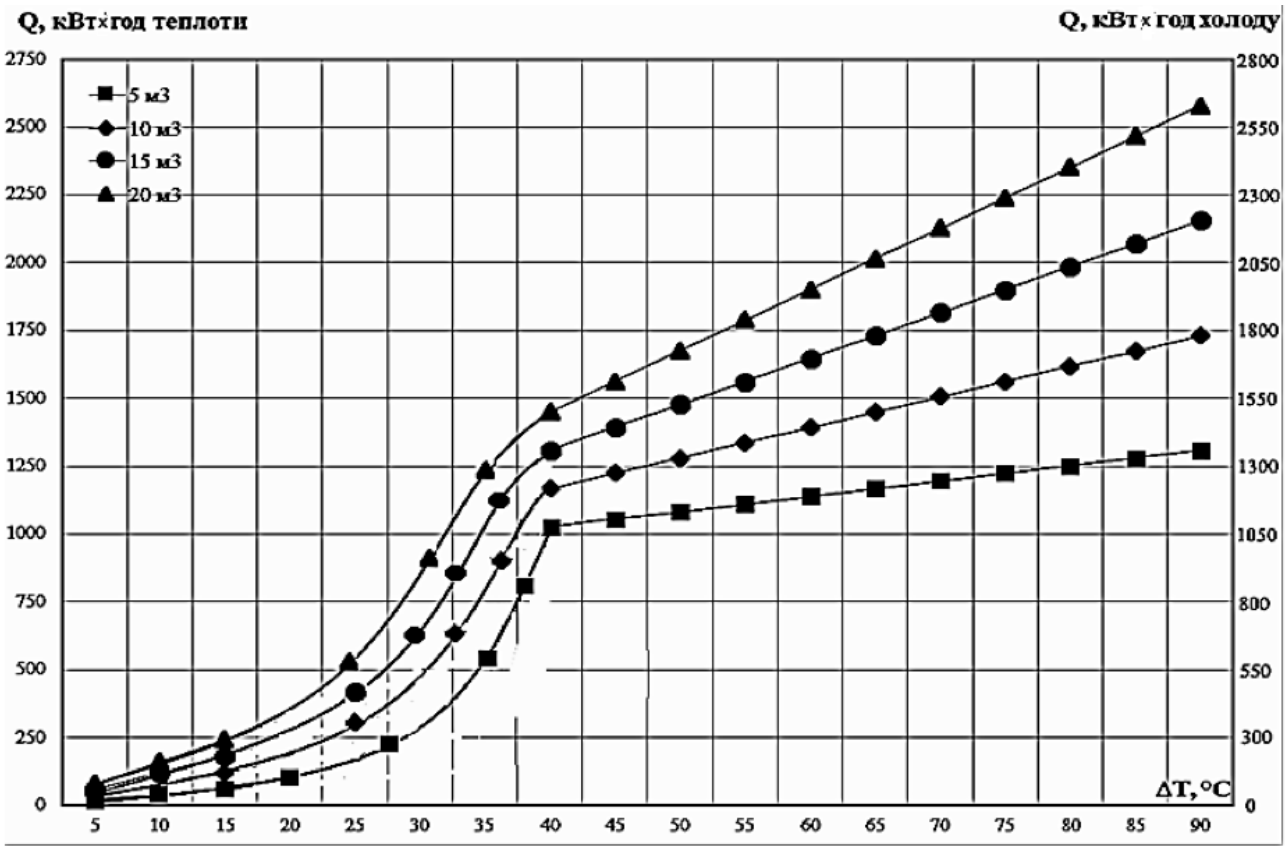


Рис. 2. Діаграма тепло-холодопродуктивності об'єму ТАМ на основі тригідрату ацетату натрію.

в розчині бішофіту, залишились практично незмінними, слідів корозії не помічено. В той час як зразки, що знаходились в розплаві триацетату натрію, мають явні сліди корозії (крім зразка з нержавіючої сталі). Особливо помітна корозія зразків, що знаходились на межі повітря і триацетату натрію. Таким чином підтверджено, що використання розплавів солі гідратів потребують додаткових заходів по захисту від корозії металів, а використання полімерних матеріалів обмежено температурою їх застосування.

4. Розрахунок напружено-деформованого стану бака-акумулятора та кріплення при транспортуванні тягачем.

Розрахунки проведені для бака-акумулятра циліндричної форми, виготовленого зі сталі та полімерного матеріалу ємкістю 10 м^3. Ємкість заповнена рідиною γ. Таким чином:

$$m_p = \rho V = \frac{\gamma}{g} V. \qquad (4)$$

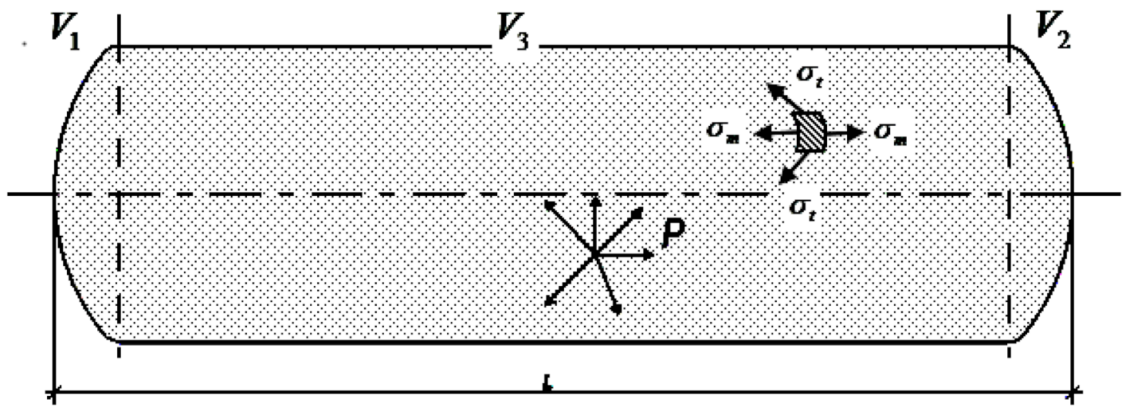


Рис. 3 Схематичне зображення конструкції, що розраховується, та напружень в елементах ємності.

При цьому $V_1 = V_2$, а $V_1 + V_2 + V_3 = 10$ м^2. Так як задача вісесиметрична, розрахуємо σ_t та σ_m, де σ_t – окружні напруження в пласконапруженому стані, σ_m – меридіальні напруження в пласконапруженому стані.
Використовуємо формулу Лапласа:

$$\frac{\sigma_t}{\rho_t} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{P}{\delta}, \quad (5)$$

де ρ_t – окружний радіус кривизни; ρ_m – меридіальний радіус кривизни.

Так як бак-акумулятор має циліндричну форму, отримуємо $\rho_t = R$, $\rho_m = \infty$.
Таким чином:

$$\frac{\sigma_t}{R} + \frac{\sigma_m}{\infty} = \frac{P}{\delta} \Rightarrow \sigma_t = \frac{RP}{\delta}. \quad (6)$$

В конструкції бака-акумулятора вварені два днища, тому необхідно визначити σ_m

$$\sigma_m 2\pi R\delta = P\pi R^2. \quad (7)$$

$$\sigma_m = \frac{P\pi R^2}{2\pi R\delta} = \frac{PR}{2\delta}. \quad (8)$$

В даному випадку $\sigma_t > \sigma_m$.

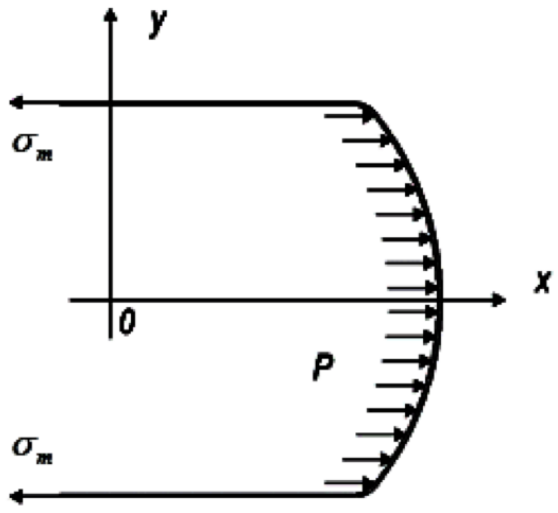


Рис. 4 Схема дії меридіальних напружень.

де $[\sigma]_{Cm}$ – допустиме напруження для матеріалу корпусу бака-акумулятора, а саме Ст.20, дорівнює 160 МПа; $[\sigma]_{ПЛАСТ}$ – допустиме напруження корпусу бака-акумулятора для полімерного композитного матеріалу на основі поліпропілену, дорівнює 17 МПа.
Таким чином умови міцності зберігаються:

$$\sigma_t = \frac{RP}{\delta} \le [\sigma]_{Cm},\ \sigma_m = \frac{PR}{2\delta} \le [\sigma]_{Cm},\ \sigma_t = \frac{RP}{\delta} \le [\sigma]_{ПЛАСТ},$$

$$\sigma_m = \frac{PR}{2\delta} \le [\sigma]_{ПЛАСТ},\ \sigma^{IV}_{екв(Cm)} = 0,87\frac{PR}{\delta} \le [\sigma],\ \sigma^{IV}_{екв(ПЛАСТ)} = 0,87\frac{PR}{\delta} \le [\sigma].$$

За умов урахування, що напружений стан плаский, то знаходимо еквівалентне напруження за IV енергетичною теорією міцності (по Мізесу):

$$\sigma^{IV}_{екв} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2 - \sigma_t\sigma_m} \le [\sigma] \Rightarrow \sqrt{\frac{R^2P^2}{\delta^2} + \frac{R^2P^2}{4\delta^2} - \frac{R^2P^2}{2\delta^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{3P^2R^2}{4\delta^2}} = \frac{\sqrt{3}}{2}\frac{PR}{\delta} = 0,87\frac{PR}{\delta} \le [\sigma]. \quad (9)$$

В процесі транспортування бака-акумулятора за допомогою тягача асфальтованою дорогою необхідною умовою є збереження цілісності конструкції при екстреному гальмуванні. Розрахуємо болтові з'єднання конструкції.

В умовах екстреного гальмування болтове з'єднання працює на зріз.

Необхідно визначити дотичне напруження при зрізі:

$$\tau = \frac{F}{S} \le [\tau], \quad (10)$$

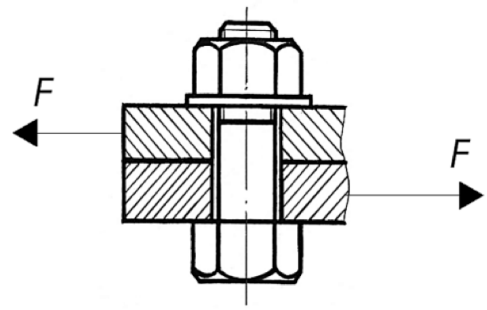


Рис. 5. Направлення сил, що діють на болтове з'єднання при екстреному гальмуванні.

Табл. 1. Результати розрахунку окружних, меридіальних напружень в пласконапруженому стані та напружень по Мізесу

Матеріал бака-акумулятора	σ_t, МПа	σ_m, МПа	$\sigma^{IV}_{екв}$, МПа
Сталь 20	8	4	6,96
Полімерний композитний матеріал	3,2	1,6	2,78

де τ – дотичне напруження при зрізі, [τ] – допустиме дотичне напруження при зрізі.

$$F = m_{заг}a, \quad (11)$$

де: $m_{заг(Ст)} = m_{1(Ст)} + m_2$; $m_1 = \varrho_1 V_1$, де $\varrho_1 = 7859$ кг/м^3, V_1 – об'єм бака, як оболонки.

$$m_{заг\ (ПЛАСТ)} = m_{1\ (ПЛАСТ)} + m_2, \quad (12)$$

$m_2 = \varrho_2 V_2$, m_2 – маса рідини, де ϱ_2 – густина теплоносія, V_2 – об'єм теплоносія у ємності.

$V_2 = \pi R^2 h + 2V_{дн}$, приймаємо значення $m_{заг(Ст)} \approx 20$т, а для $m_{заг\ (ПЛАСТ)} \approx 17$т, $a = (\nu_0 - \nu)/t$, a – прискорення, що є від'ємним при гальмуванні, де ν_0 – початкова швидкість, яка приймається у розмірі 60 км на годину, у випадку рівноприскореної зупинки $\nu = 0$, таким чином $a = \nu_0/t = 16{,}67$ м/с^2.

$S = 24\pi d^2/4 = 6\pi d^2 = 10851{,}9$ мм^2 $[\tau]_{Ст} \approx 1/2\ [\sigma]_{Ст} \approx 80$МПа.

При транспортуванні бака-акумулятора ґрунтовою дорогою може виникнути ефект розкачування конструкції, тому необхідним розрахунком є розрахунок болтового з'єднання на розрив. Таким чином

$\sigma = F/12S \le [\sigma]$

$$F = F_{Ст} \cdot K_{дин}, \quad (13)$$

$$F_{Ст} = m_{заг} g, \quad (14)$$

$$K_{дин} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{стат}}}, \quad (15)$$

$\delta_{стат} = FL/ES$ – виникає при наявності люфту у болтовому з'єднанні. Тоді $K_{дин} = 2$

$$F = F_{Ст} \cdot K_{дин}. \quad (16)$$

Таким чином, було розраховано напружено-деформований стан конструкції зі сталі та композитного полімерного матеріалу при сталих розмірах бака-акумулятора та умовах експлуатації. Результат розрахунку:
- еквівалентне напруження за IV енергетичною теорією міцності

$\sigma^{IV}_{екв(Ст)} = 6{,}96$ МПа $\le [\sigma]$ $\sigma^{IV}_{екв(ПЛАСТ)} = 2{,}78$ МПа $\le [\sigma]$,

- дотичне напруження при зрізі для сталі $\tau_{Ст} = 30{,}7$ МПа та полімерного композиту $\tau_{ПЛАСТ} = 26{,}11$ МПа,

- розрахунок болтового з'єднання на розрив

$\sigma_{СТАЛЬ} = 18$ МПа $\le [\sigma]$ та $\sigma_{ПЛАСТ} = 15{,}7$ МПа $\le [\sigma]$.

Отже умови міцності конструкції при використанні матеріалу Ст.20 та полімерного композиту зберігаються. Та враховуючи отримані результати напруження по Мізесу, дотичне напруження при зрізі та напруження болтового з'єднання при розкачуванні під час транспортування за умов використання конструкції зі сталі вище. Таким чином, доцільно використовувати полімерний композит.

5. Експрес-метод оцінки ефективності різноманітних проектів впровадження енергозберігаючих технологій.

Система ухвалення стратегічного рішення по доцільності інвестування проектів енергоефективності таких, як заміна і модернізація устаткування, залучення до процесу генерації альтернативних палив і джерел енергії, утилізації вторинних енергоресурсів, твердих побутових відходів і відходів сільськогосподарської діяльності потребує розробки нових експрес-методів оцінки ефективності. Існує багато методик розрахунку доцільності інвестування та впровадження енергозберігаючих заходів, які, однак, не завжди враховують умови роботи енергетичної системи та окремого обладнання.

В ході визначення доцільності впровадження ДСО нами було апробовано та пропонується доповнити методи розрахунку інвестування енергозберігаючих заходів та проектів принципово новим методом стратегічного експрес-аналізу «3Е». [6]

Даний метод дозволяє отримати графічне зображення результату аналізу та з великою долею вірогідності визначити стратегію фінансування проектів впровадження. Аналіз базується на трьох основних критеріях, а саме: енергетичному, екологічному та економічному. Дані вагові критерії, в свою чергу, складаються з низки значень, що є необхідними для отримання вірогідного результату окупності проекту впровадження.

Результати експрес-аналізу наочно представляються у вигляді площі допустимих значень на трикутній діаграмі, яку нами пропонується назвати надалі «3Е трикутник» від початкових літер слів: Енергетика, Екологія та Економіка.

За допомогою «3Е» експрес-аналізу нами було визначено ефект впровадження ДСО при використанні віддалених від споживача джерел енергії, а також залеж-

Табл. 2. Результати розрахунку напружено-деформованого стану болтових з'єднань з урахуванням зрізу та відриву.

Матеріал бака-акумулятора	$F_{Ст}$, кН	τ, МПа	$F_{Ст}$, кН	F, кН	σ, МПа
Сталь 20	333,4	30,7	200	400	18
Полімерний композитний матеріал	283,4	26,11	170	340	15,7

ність між вище наведеними критеріями для визначення впливу кожного з них на загальний результат. Розроблена методика дозволяє у короткий термін, без зайвих фінансових витрат, прийняти стратегічне рішення щодо фінансування проекту впровадження. Також розроблений «3Е» експрес-аналіз дозволяє порівнювати варіанти та визначати ефективність впровадження новітніх енергозберігаючих технологій і надалі виконати статистичній та кореляційний аналіз традиційними методами математичної статистики.

Важливим чинником проведення розрахунків за новим методом «3Е» експрес-аналізу є виявлення довірчого інтервалу, що покриває невідомий параметр. Важливим розділом економетрики є теорія і практика експертних оцінок – на них базується вибір оптимального напрямку інвестицій або виробництва певного виду продукції та навіть прогнозування розвитку економічної ситуації. На основі проведення експертної оцінки нами пропонується призначити межі довірчих інтервалів, із заданою надійністю, для кожного критерійного вагового коефіцієнта КЕ, що являють собою безрозмірні величини, що виражені у відсотках. Формули для розрахунку вагових коефіцієнтів наведені в табл 3.

Енергетичний коефіцієнт $КЕ_1$ показує мінімально привабливу кількість акумульованої енергії з урахуванням теплових втрат та пропонується обчислювати як пропорцію різниці витрат натурального палива, тон/год., й електроенергії на виробництво 1,0 Гкал, або сумарний виробіток теплової енергії за період часу, кВт·год., до сумарної витрати енергії в перерахунку на тони умовного палива мінус одиниця. [7,8] Як було відзначено в першій частини даної роботи, теплові втрати в процесі акумуляції теплоти сягають 25%, тому довірчий інтервал за економічними показниками прийнятий в межах від 25 до 100%.

Аналогічно обчислюється екологічний коефіцієнт $КЕ_2$, який на пряму залежіть від об'єму привнесеної шляхом акумуляції енергії в систему теплопостачання або холодопостачання та об'єму скорочення шкідливих викидів в атмосферу з димовими газами від базового теплогенеруючого устаткування. [9]

Наші розрахунки показали, що об'єм димових газів

Табл. 3. Розрахунок значення вагових коефіцієнтів для побудови «3Е трикутника»

Найменування	Формула для розрахунку	Довірчий інтервал	Призначення
Ваговий енергетичний коефіцієнт $КЕ_1$	$KE_1 = (1 - \frac{B - \Delta B}{B})$ x 100%	25…100%	Мінімальна та максимальна кількість акумульованої енергії
Ваговий екологічний коефіцієнт $КЕ_2$	$KE_2 = \frac{G - \Delta G}{G}$ x 100%	35…100%	Об'єм привнесеної шляхом акумуляції енергії в систему тепло-холодопостачання
Ваговий економічний коефіцієнт $КЕ_3$	$KE_3 = \frac{T - Cв}{T}$ x 100%	40…100%	Економічна привабливість проекту
Індекс привабливості	$I_{\Sigma}^{p} = КЕ_1 + КЕ_2 + КЕ_3$	Інтегрований показник кількісної якості виконання програми проекту в часі. Визначені у відсотках; вагові коефіцієнти повинні задовольняти таку вимогу: $\sum_t KE_n = 1$	Для вибору оптимального варіанта фінансування проекту
Індекс пропорційності	$I_{\Sigma}^{a} = КЕ_1 \cdot КЕ_2 \cdot КЕ_3$	Інтегрований показник виконання проекту - пропорційне темпу зміни відхилення від програми	Для порівняння та визначення відхилень від цільового значення, які прогнозуються в майбутньому

при скороченні генерації теплоти на 25% зменшується приблизно на 35%. Довірчий інтервал за екологічними показниками приймається в межах від 35 до 100%.

Відомо, що головним принципом формування тарифу є співвідношення суми витрат до обсягу теплопостачання. При цьому витрати на паливо складають близько 85%. Економічний коефіцієнт $КЕ_3$ пропонується обчислювати як співвідношення законодавчо прийнятого місцевого тарифу [10] до продажної вартості теплової енергії, отриманої від системи ДСО. Таким чином, коефіцієнт $КЕ_3$ відповідає на питання економічної привабливості проекту енергозбереження. При визначенні вартості отриманої теплової енергії нами враховувалося, що енергія, яка отримана від ДСО, має коштувати мінімум на 10% дешевше, ніж від стаціонарного джерела теплопостачання. Приваблива для отримання інвестицій рентабельність проекту складає мінімум 20% та непередбачені витрати – 10%. У нашому випадку довірчий інтервал економічних показників знаходиться в межах від 40 до 100%.

Отриманні межі довірчого інтервалу дали змогу побудувати діаграму, яку пропонується надалі називати «3Е трикутником». (Рис. 6).

Трикритеріальна діаграма графічно показує у вигляді багатокутника площину задовільних умов за трьома основними параметрами: енергетика, екологія, економіка.

«3Е трикутник» дозволяє зображати у вигляді однієї точки зміст трьох вагових коефіцієнтів. Запропонований метод експрес-аналізу «3Е» ґрунтується на тому, що в рівносторонньому трикутнику сума трьох перпендикулярів, опущених з будь-якої точки усередині трикутника на його сторони, дорівнює висоті. Довжина висоти береться за 100%, а довжини перпендикулярів відповідають відсотковому вмісту вагових коефіцієнтів. Точка перетину перпендикулярів є інтегральною характеристикою даного проекту енергозбереження. Для визначення точки перетину кожну зі сторін трикутни-

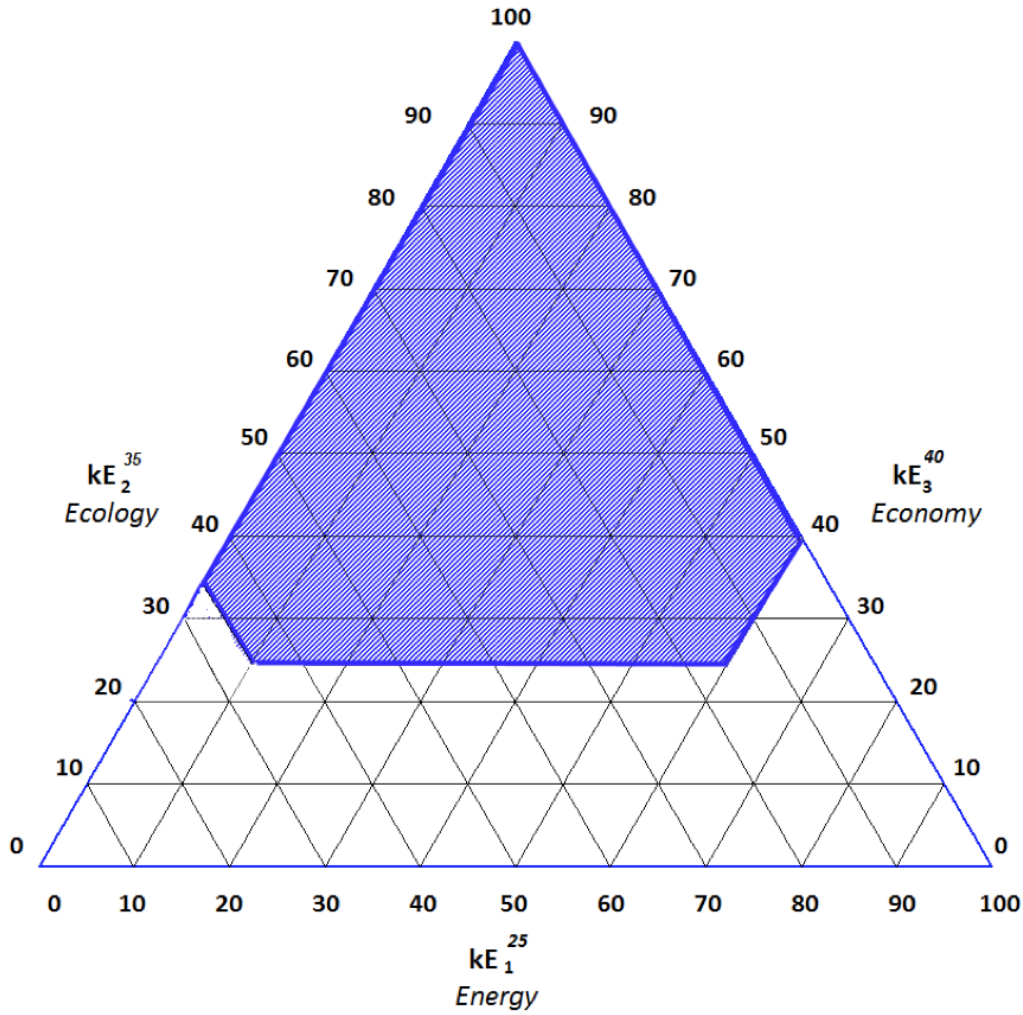


Рис. 6. Трикритеріальна діаграма «3Е трикутник».

ка ділять на 100 частин і від кожної з вершин по тій стороні, якій відповідає кожна з трьох характеристик, відкладають довірчий інтервал вагових коефіцієнтів у відсотках.

Як можна бачити, за вищеозначеними межами побудовано довірче (заштриховане) поле, в якому значення вагових коефіцієнтів привабливе для фінансування проекту.

У випадку, якщо один або декілька коефіцієнтів не потрапляють в заштриховану ділянку трикутника, рішення про доцільність інвестування проекту потребує додаткових досліджень і має негативний характер. Знаючи значення економічних, енергетичних і екологічних даних конкретного проекту, в короткий час можна оцінити його привабливість, після чого можна застосувати загальноприйняті методи математичної статистики та теорії вірогідності для проведення подальших розрахунків. [11, 12]

Вказаний підхід може бути застосований не лише для проектів енергозбереження, але і в інших галузях науки і техніки.

Для визначення економічної привабливості запропонованого проекту було проаналізовано основні показники довгострокового планування з врахуванням тенденцій та закономірностей розвитку об'єкта планування та середовища його діяльності в цілому. Було враховано об'єктивні тенденції макроекономічного та мікроекономічного стану умов галузі в цілому.

Основні економічні показники за якими проведено розрахунки, що є актуальними на даний час:

– ціна устаткування (мається на увазі основні засоби виробництва теплової енергії та холоду, що не враховує автотягач);

– ціна технічного бішофіту (із розрахунку необхідних 18 т);

– транспортні витрати на перевезення МТА (з врахуванням амортизаційних витрат на автотягач та пального);

– фонд заробітної плати (при плануванні бюджету враховано показник нормальної інфляції та індексації, податкові зобов'язання наймодавця);

– плановий дохід від реалізації теплової енергії та холоду;

– плановий дохід від рекультивації території та дохід від реалізації вторсировини;

На основі наведених вище методик було розраховано прогнозний баланс типового підприємства, діяльністю якого є впровадження, управління, контроль та повне супроводження роботи ДСО. Так як на підприємстві даного типу є чітка структура управління, усі механізми взаємодії підрозділів будуються таким чином, щоб забезпечити виконання довгострокових цілей та стратегій шляхом реалізації поточних планів. [14]

Враховуючи економічні показники, що наведені вище було проаналізовано та розраховано основні планові балансові показники на період 10 років. Усі розрахунки проводились з врахуванням одного бака-акумулятора, який має корисний об'єм 10м^3 (рис. 7, 8).

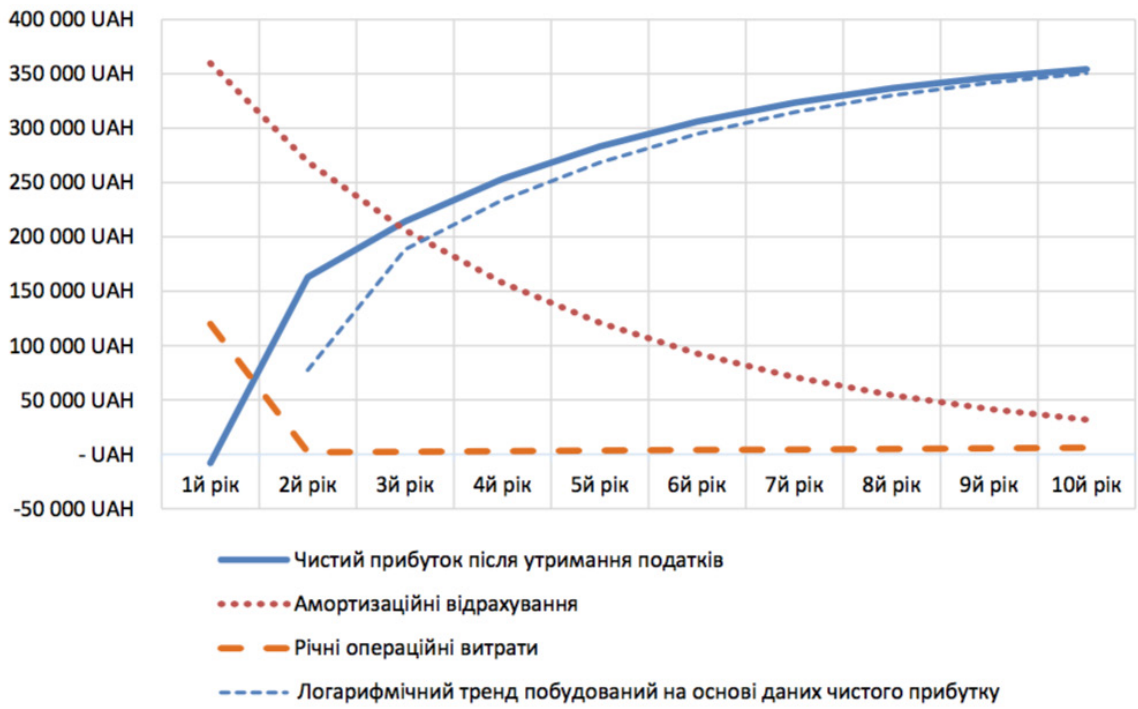


Рис. 7. Діаграма залежності амортизаційних відрахувань, річних операційних витрат та чистого прибутку.



Рис. 8. Чистий прибуток після утримання податків.

Інвестиційний капітал складає 1 510 000 грн. Розрахунковий об'єм річного доходу від реалізації теплової енергії та холоду становить 1470000 грн., чистий річний операційний прибуток за перший рік складає 350000 грн., а за п'ятий рік – 466500 грн., норма амортизаційних відрахувань за перший рік діяльності підприємства складає 23,83%, що становить 359759 грн. Коефіцієнт чистого прибутку після утримання податків складає у перший рік складає – 0,54%, у другий рік складає +11,09%, а вже в п'ятий 19,27%. Плановий термін окупності проекту менше п'яти років.

Висновки

1. Попит на дешеву енергію значно перевищує пропозицію в Україні.

2. Наслідками впровадження проекту ДСО є збільшення загальної ефективності і підвищення надійності, економія енергії та екологічна безпека, створення конкуренції в енергетичному секторі економіки, повернення порушених земель у господарське користування, поліпшення умов навколишнього середовища, підвищення рівня життя населення тощо.

3. Перевагами ДСО є відсутність на ринку вітчизняних та закордонних аналогів, уніфікована конструкція МТА, широке використання для генерації енергії наявних котлів, чіллерів та іншого обладнання.

4. Інтеграція МТА в систему центрального та автономного теплопостачання значно зменшує собівартість теплоти й холодоагенту та має високу економічну привабливість.

5. Проведені дослідження показали, що об'єм з акумульованої теплоти/холоду прямо пропорційний об'єму ТАМ. При цьому кількість отриманого холоду вище.

6. Дослідженнями підтверджено, що використання розплавів солегідратів потребують додаткових заходів щодо захисту від корозії металів, а використання полімерних матеріалів обмежене температурою їх застосування. Розрахунки на міцність МТА показали, що для його будівництва доцільніше використання полімерних композитів.

7. Запропонований експрес-метод оцінки ефективності різноманітних проектів впровадження енергозберігаючих технологій дозволяє в короткий час оцінити їх привабливість.

8. Основні економічні показники були визначені за допомогою планової балансової методики. Розрахунковий термін окупності проекту складає менше п'яти років, а об'єм річного доходу від реалізації теплової енергії та холоду становить 1470000 грн. Таким чином проект є привабливим для інвестування.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Демченко В.Г, Фалько В.Ю., Гронь С.С.* Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 1. // Промислова теплотехніка. – 2018. – Т.40. № 2. – С. 20 – 25.
https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.03

2. *Naumann R.* Кристаллогидраты солей как тепловые аккумуляторы / R Naumann, H.Emons // Sitzungsber. Acad. Wiss. DDR. Math-Natur-Wiss.-Techn. 1986. № 3. P. 31−44.

3. *Cabeza L.F.* Thermal Performance of Sodium Acetate Trihydrate Thichened with Different Materials as

Phase Change Energy Storage Material / L. Cabeza, G. Svensson, S.Hieler // Appied Thermal Engineering. 2003. № 23. P. 1697−1704.

4. *Levitsky E. A.* Chemica lHeat accumulators – a new approach to accumulating low potential heat / E. A. Levitsky and others // SolarEnergyMaterials. SolarCells. 1996. V. 44, №. 3. P. 219−235.

5. *Долесов А.Г., Хрисониди В.А*. Теплоаккумулирующий материал на основе ацетата натрия // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 4. – С. 99-100

6. *Demchenko V., Trubachev A.,* Express analysis of inspection of efficiency projects, The scientific method, Warszawa, Poland, ISSN 2708-5341, № 20/2018, v.2, p. 74-77

7. *Норми та вказівки* по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні, КТМ 204 Україна 244-94, Київ, 2001 р.

8. *Методика нормування* витрат палива та теплової енергії на виробництво і транспортування теплової енергії для споживання системами опалення, вентиляції і гарячого водопостачання та господарсько-побутових потреб житлових будинків та громадських споруд в Україні. 2012 р.

9. *Методика оцінки* ефективності реалізації регіональних природоохоронних та державних (загальнодержавних) цільових екологічних програм, Міністерство екології та природних ресурсів України, наказ 15.10.2012 № 491

10. *Постанова* Кабінету міністрів України від 4 жовтня 2017 р. N 758

11. *Гмурман С.Е.* Теорія ймовірностей та математична статистика: Навчальний посібник для ВНЗ., 9-е изд., М: Вища школа, 2003. — 479 с.

12. *Демченко В.Г.* Корреляционный анализ системы центрального теплоснабжения населеного пункта, Промышленная теплотехника.– 2009.-Т.31, №7.- С.32-34

13. *Опір матеріалів:* Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Є.С. Уманський- К.: Вища шк., 2004.-655 с.

14. *Коваленко О.В.* Підприємництво та його організаційно-правові засади: Навчальний посібник. – Видво ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2013. – 400 с.

MOBILE ACCUMULATORS FOR DISCRETE SYSTEMS HEAT-COLD SUPPLIES. Part 2, (Part 1, №2, v.40, 2018, ISSN 0204-3602)

Demchenko V.G., Trubachev A.S., Falko V.J., Hron S.S.

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kiev, 03057, Ukraine

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.08

The purposes of this article are selection and substantiate the construct materials for a mobile battery of thermal energy. To evaluate the impact of chemical corrosion on the structural materials of the tank-battery, and researching the strength of the tank-battery during transportation and determination the feasibility of introducing and effectiveness of investments in environmental measures on the example of the implementation of the discrete heating / cooling systems. A comparison has been made of the technical characteristics chosen for our studies of heat storage material – Bischofite (Magnesium chloride hexahidrate) and sodium acetate trihydrate, which showed that both substances have certain advantages and limitations in their application. An experiment was carried out to determine the stability of the material for corrosion, after the 10 cycles of heating-cooling, the metal parts that were deposited in the bischofite solution remained virtually unchanged, no corrosion marks were observed. While specimens that were in the melt of sodium triacetate have obvious corrosion marks (except for a stainless steel sample). Particularly noticeable corrosion of samples that were on the verge of air and sodium triacetate. Thus, it has been confirmed that the use of hydrated salt melts requires additional measures to protect against corrosion of metals, and the use of polymer materials is limited by the temperature of their application. Calculations of the strength of the tank-accumulator at static and dynamic loads with the account of transportation are carried out. Taking into account the obtained results of Mises stress, the tensile stresses in the cut and stresses of bolted joints during rolling during transport under conditions of use of steel constructions are higher. In the course of determining the feasibility of implementing the project, it was tested and proposed to supplement the methods of calculating the investment of energy saving measures and projects by a fundamentally new method of strategic rapid analysis "3E". This method allows you to get a graphical representation of the result of the analysis and with a high degree of probability to determine the strategy of financing the implementation projects. The analysis is based on three main criteria, namely: energy, environmental and economic. These weighting criteria consist of a number of values that are necessary to obtain a likely return on the payback of the implementation project. The results of express analysis are clearly represented in the form of the area of permissible values on the triangular diagram, which we are invited to call the "3E triangle" in the initial words of words: Energy, Ecology and Economics. An economic analysis has also been conducted, which showed that the estimated payback period of the project is less than five years, and the volume of annual revenue from the sale of thermal energy and cold is 1470000 UAH. Thus, the project is attractive for investment.

Keywords: energy storage, heat, cold, system, efficiency

References 14, fig. 8, table 3.

1. *Demchenko V.G., Falco V.Yu., Hron S.S.* (2018) Mobilni akumulyatory dlya dyskretnykh system teplokholodopostochannya. Chastyna 1 [Mobile batteries for discrete systems of heat-supply. Part 1]. Promyslova teplotekhnika [Industrial heat engineering] 40(2), 20 – 25 (Ukr.) https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.03

2. *Naumann R.* (1986) Krystallohydraty soley kak teplove akkumulyatory [Salt crystalline hydrates as thermal accumulators]. Sitzungsber. Acad. Wiss. DDR. Math-Natur-Wiss.-Techn. 3, 31−44. (De)

3. *Cabeza L.F.* (2003) Thermal Performance of Sodium Acetate Trihydrate Thichened with Different Materials as Phase Change Energy Storage Material. Appied Thermal Engineering. 23, 1697−1704. (Eng.)

4. *Levitsky E. A*. (1996) Chemical Heat accumulators – a new approach to accumulating low potential heat. SolarEnergyMaterials. SolarCells. 44(3), 219−235. (Eng.)

5. *Dolesov A.H., Khrysonydy V.A*. (2010) Teploakkumulyruyushchyy materyal na osnove atsetata natryya [Heat accumulation material based on sodium acetate]. Sovremennye naukoemkye tekhnolohyy [Modern science-intensive technologies] 4. 99-100. (Rus)

6. *Demchenko V., Trubachev A*. (2018), Express analysis of inspection of efficiency projects. The scientific method, Warszawa, Poland 20(2). 74-77. (Ukr.)

7. *Normy ta vkazivky* po normuvannyu vytrat palyva ta teplovoyi enerhiyi na opalennya zhytlovykh sporud, a takozh na hospodars′ko-pobutovi potreby v Ukrayini (2001) [Norms and guidelines for the standardization of fuel and heat energy consumption for the heating of residential buildings, as well as for household needs in Ukraine], KTM 204 1. (Ukr.)

8. *Metodyka normuvannya* vytrat palyva ta teplovoyi enerhiyi na vyrobnytstvo i transportuvannya teplovoyi enerhiyi dlya spozhyvannya systemamy opalennya, ventylyatsiyi i haryachoho vodopostachannya ta hospodarsko-pobutovykh potreb zhytlovykh budynkiv ta hromads′kykh sporud v Ukrayini. (2012) [Method of valuation of fuel and heat energy costs for the production and transportation of heat energy for consumption by heating, ventilation and hot water supply systems and household and household needs in residential buildings and public buildings in Ukraine. 2012] (Ukr.)

9. *Metodyka otsinky* efektyvnosti realizatsiyi rehionalnykh pryrodookhoronnykh ta derzhavnykh (zahalnoderzhavnykh) tsilovykh ekolohichnykh prohram, Ministerstvo ekolohiyi ta pryrodnykh resursiv Ukrayiny (2012) [Methodology for assessing the effectiveness of the implementation of regional environmental and state (national) targeted environmental programs, Ministry of Environment and Natural Resources of Ukraine]. nakaz 491 [Order 491] (Ukr)

10. *Postanova* Kabinetu ministriv Ukrayiny (2017) [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine] 758 (Ukr)

11. *Hmurman S.E.* (2003) Teoriya ymovirnostey ta matematychna statystyka [Probability Theory and Mathematical Statistics] Navchal′nyy posibnyk dlya VNZ. Vyshcha shkola [A Manual for Higher Educational Establishments High School] 9, 479 (Rus.)

12. *Demchenko V.H.* (2009) Korrelyatsyonnyy analyz systemy tsentralnoho teplosnabzhenyya naselenoho punkta [Correlation analysis of the district heating system of the settlement], Promyshlennaya teplotekhnyka [Industrial heat engineering]. 31(7), 32-34. (Ukr.)

13. *Opir materialiv*: Pidruchnyk (2004) [Resistance of materials: Textbook] / H.S. Pysarenko, O.L. Kvitka, YE.S. Umanskyy- K.: Vyshcha shk.[High School], 655 (Ukr.)

14. *Kovalenko O.V.* (2013) Pidpryyemnytstvo ta yoho orhanizatsiyno-pravovi zasady: Navchalnyy posibnyk. [Entrepreneurship and its organizational and legal bases: A manual.]– Vyd-vo DZ «LNU imeni Tarasa Shevchenka» [View of the DZ "LNU named Taras Shevchenko"] 400 (Ukr.)

Отримано 22.08.2018
Received 22.08.2018

УДК 620.92

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СОЮЗІ

Желєзна Т.А., канд. техн. наук, **Баштовий А.І.,** канд. техн. наук
Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна
https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.09

Представлено поточний стан та перспективи розвитку сектору біоенергетики ЄС-28 до 2030 року. Проаналізовано особливості ролі біоенергетики по окремих секторах виробництва та споживання енергії в ЄС. Запропоновано рекомендації по розвитку біоенергетичного сектору України, що ґрунтуються на основних тенденціях, існуючих в ЄС.

Представлены текущее состояние и перспективы развития сектора биоэнергетики ЕС-28 до 2030 года. Проанализированы особенности роли биоэнергетики по отдельным секторам производства и потребления энергии в ЕС. Предложены рекомендации по развитию биоэнергетического сектора Украины, основанные на главных тенденциях, существующих в ЕС.

State of the art and prospects for the development of bioenergy in the EU-28 until 2030 are presented. Features of bioenergy contribution to different EU's energy production and consumption sectors are analyzed. Based on the main trends existing in the EU, some recommendations for Ukraine's bioenergy sector development are suggested.

Бібл. 8, табл. 2, рис. 2.
Ключові слова: відновлювані джерела енергії, біоенергетика, біомаса, біопаливо, тверде біопаливо, біогаз.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії;
ВЕС – вітрова електростанція;
ВКЕ – валове кінцеве енергоспоживання;
ГЕС – гідроелектростанція;
ЗВПЕ – загальне виробництво первинної енергії;
ПГ – парникові гази;
СЕС – сонячна електростанція;
ТЕЦ – теплоелектроцентраль;
ТЕС – теплова електростанція;
н.е. – нафтовий еквівалент.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю виконання умов Паризької Угоди 2015 року щодо зменшення викидів парникових газів у світі, одним з механізмів чого є перехід на низьковуглецеві палива. Використання відновлюваних джерел енергії, у тому числі біомаси, сприяє скороченню емісії парникових газів, зменшує залежність країн від імпортованих палив, підвищує їх енергетичну незалежність.

Метою роботи є аналіз основних тенденцій розвитку біоенергетики в країнах ЄС, визначення успішних прикладів і існуючих проблем, а також розробка рекомендацій для впровадження кращих практик ЄС у біоенергетичному секторі України.

Цілі та перспективи ЄС по розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року

Сьогодні Європейський Союз вважається світовим флагманом енергетичної трансформації – переходу на відновлювані джерела енергії та впровадження високоефективних технологій ВДЕ. Завдяки послідовному застосуванню політики підтримки, внесок відновлюваних джерел енергії у валове кінцеве енергоспоживання ЄС збільшився з 9% у 2005 р. до близько 17% у 2015 р. Згідно оцінок Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), до 2030 р. цей внесок може подвоїтися за умови подальшого існування сприятливої енергетичної політики. Така динаміка розвитку дасть можливість ЄС не тільки досягти цілей 2020 р. (20% відновлюваної енергії у кінцевому енергоспоживанні, 10% ВДЕ у секторі транспорту згідно Директиви з відновлюваної енергетики 2009/28/ЕС 2009 року [1]), але й сприятиме виконанню зобов'язань по Паризькій Угоді щодо декарбонізації енергетичного сектору. При цьому очікується, що біомаса залишиться основним джерелом «зеленої» енергії в ЄС (головним чином, за рахунок виробництва теплової енергії) на період до і після 2030 року (табл. 1, рис. 1) [2].

Для стимулювання інвестицій у відновлювану енергетику у період 2020-2030 рр. Європейська Комісія у 2016 р. розробила і представила на розгляд Європейського Парламенту і Ради пакет з восьми законодавчих заходів під назвою «Чиста енергія для всіх європейців» [3]. Ці заходи мають три основні пріоритети: підвищення енергоефективності (запропонована мета – ріст енергоефективності на 30% до 2030 р.), досягнення ЄС світового лідерства у розвитку ВДЕ (мінімум 27% ВДЕ у кінцевому енергоспоживанні у 2030 р.) і забезпечення справедливих відносин зі споживачами енергії (доступ до інформації, можливість зміни постачальника енергії, захист прав споживачів та ін.). За оцінками Єврокомісії, починаючи з 2021 р. інвестиції у відновлювану енергетику в ЄС мають становити близько 177 млрд. євро/рік, що призведе до створення 900 тис. робочих місць до 2030 р. та зменшення рівня емісії парникових газів на 40% у порівнянні з базовим 1990 р. На сьогодні із запропонованих Європейською Комісією законодавчих ініціатив Європейський Парламент вже ухвалив зміни до Директиви 2010/31/ЄС «Енергоефективність будівель» 2010 року. Ці зміни спрямовані на досягнення дуже низьких або нульових викидів парникових газів, пов'язаних з енергоспоживанням будівель до 2050 р. [4-5].

Табл. 1. Прогноз Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики щодо виробництва та споживання енергії з ВДЕ в ЄС-28 у 2030 році [2].

Показник	**2010 р. (факт)**	**2030 р. (прогноз)**	
		Базовий сценарій	**Оптимістичний сценарій**
Виробництво електроенергії:			
- частка ВДЕ в загальному обсязі виробництва	20%	41%	50%
- частка окремих ВДЕ в загальному обсязі виробництва «зеленої» електроенергії:			
ГЕС	55%	27%	22%
ВЕС	22%	38%	42%
Біомаса	19%	20%	17%
СЕС	3%	14%	16%
Інші ВДЕ	1%	1%	3%
Виробництво теплової енергії: - частка ВДЕ в загальному обсязі виробництва, - у тому числі біомаса	 16% 15,9%	 29% 27%	 38% 32%
Сектор транспорту: - частка ВДЕ в загальному обсязі споживання палив/електроенергії на транспорті, - у тому числі біопалива	 4% 4%	 9% 8%	 17% 15%
Частка ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії	13%	24%	33%

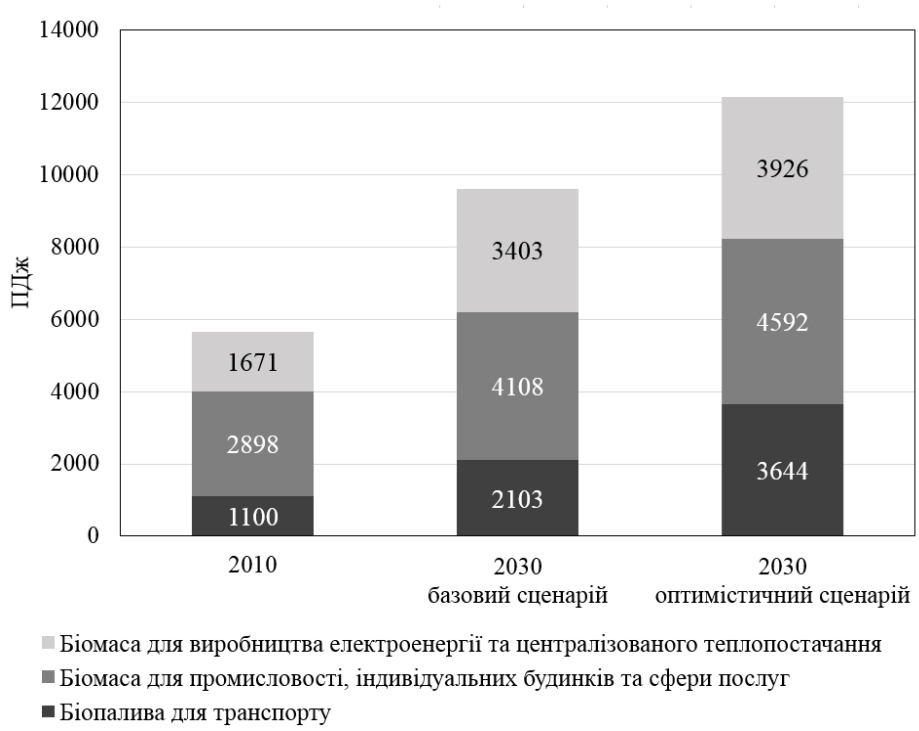


Рис. 1. Прогноз постачання первинної енергії з біомаси в ЄС-28 [2].

Важливою складовою ініційованих Єврокомісією законодавчих ініціатив є підготовка нової редакції Директиви з відновлюваної енергетики 2009/28/ЕС. Серед іншого, планується суттєве підсилення критеріїв сталості для біопалив. Для рідких біопалив другого покоління вимога по зменшенню викидів CO_2 у порівнянні з викопними паливами становитиме 70%. Крім того, буде уведено низку критеріїв сталості для твердих біопалив, що використовуються на енергетичних установках потужністю більше 20 МВт (по вхідному паливу). Прийняття нової версії Директиви очікується вже в поточному або наступному році.

Структура виробництва і споживання енергії в ЄС-28

У структурі виробництва первинної енергії в ЄС-28 відновлювані джерела енергії займають друге місце після атомної енергії з показником близько 27% загального обсягу виробництва (рис. 2). З усіх ВДЕ найбільший внесок (63,5%) робить біомаса – 17% загального виробництва первинної енергії, що еквівалентно більше 130 млн. т н.е./рік. У окремих країн цей показник значно вище, наприклад, у Швеції частка біомаси у ЗВПЕ складає 31%, в Австрії – 45%, у Фінляндії – 50%, у Литві – 86%, у Латвії – 92% [6].

У структурі біопалив, що виробляються в ЄС, найбільша частка традиційно припадає на тверді біопалива – більше 70% (91,4 млн. т н.е./рік). На другій позиції знаходиться біогаз – 12% (15,6 млн. т н.е./рік).

Для повного задоволення своїх потреб в енергії Євросоюз імпортує енергоносіїв практично у два рази більше, ніж виробляє – 1478 млн. т н.е./рік за даними 2015 р. (при цьому експорт – 576 млн. т н.е./рік, з яких 69% – нафтопродукти). Основними складовими імпорту енергоносіїв є нафтопродукти (63%), природний газ (23%) і вугілля (10%). Найкрупнішими імпортерами газу є Німеччина, Італія, Великобританія, Франція. Більш за всіх твердих і рідких біопалив імпортують Великобританія, Італія, Данія, а крупними експортерами є Нідерланди, Німеччина, Іспанія, Латвія.

У зв'язку з наявністю великого імпорту викопних палив, внесок ВДЕ у валове кінцеве енергоспоживання ЄС є значно меншим, ніж у виробництво первинної енергії – 17%, у тому числі внесок біомаси у ВКЕ – 10% (табл. 2). У ряді країн показники розвитку біоенергетики суттєво перевищують середньоєвропейські. Так, в Фінляндії частка біомаси у валовому кінцевому енергоспоживанні становить 34%, в Швеції – 33%, в Латвії – 32%, в Естонії – 26,5%, в Данії і Литві – 23%.

За даними 2015 року, десять країн ЄС (у тому числі Швеція, Фінляндія, Естонія, Хорватія, Болгарія) вже виконали і перевиконали свої цілі 2020 року по частці відновлюваних джерел енергії у ВКЕ.

Внесок біоенергетики в окремі сектора виробництва і споживання енергії

Із загального обсягу біомаси/біопалив, що споживаються в ЄС (136,2 млн. т н.е./рік), найбільша частка (82,9 млн. т н.е./рік або 61%) використовується для виробництва теплової енергії. Решта ділиться приблизно порівно між виробництвом електроенергії і біопалив для транспорту. Найкрупнішими споживачами теплової



Рис. 2. Структура виробництва первинної енергії в ЄС-28, 2015 р. (загалом 766,6 млн. т н.е.) [6].

Табл. 2. Структура валового кінцевого споживання енергії в ЄС-28 (2015 р.) [6].

Вид палива/енергоносія	млн. т н.е.	частка ВКЕ
Нафтопродукти	429,6	39,6%
Природний газ	236,2	21,8%
Вугілля	46,3	4,3%
Електроенергія, у т.ч. з ВДЕ	235,7 85,6	21,7% 7,9%
Теплова енергія, у т.ч. з ВДЕ	45,9 13,5	4,2% 1,2%
ВДЕ	86,8	8,0%
Відходи (невідновлювана частина)	3,5	0,3%
Всього	1083,9	100%

енергії є населення (42,3 млн. т н.е./рік) і промисловість (21,4 млн. т н.е./рік). За даними 2015 р., цілі ЄС-28 на 2020 рік по частці біомаси у виробництві теплової енергії виконані вже на 92%, по електроенергії – на 77%, по моторним біопаливам – лише на 49%.

Більша частина теплової енергії в ЄС виробляється в режимі ТЕЦ. Так, із загального обсягу біомаси, що споживається для виробництва теплової енергії, 72% припадає на ТЕЦ. З іншого боку, 58% загального обсягу виробництва електроенергії з біомаси в ЄС також отримується на ТЕЦ, а в деяких країнах (Данія, Литва, Латвія, Швеція) цей показник сягає 100%. Ці дані є явним підтвердженням пріоритетного розвитку комбінованого виробництва теплової і електричної енергії над роздільним виробництвом.

Представляє інтерес вид і структура біопалив, що споживаються у Євросоюзі. Основним видом твердої біомаси є деревна біомаса, що використовується у вигляді пелет, брикетів, тріски і дров. Так, наприклад, близько третини загального споживання твердої біомаси припадає на деревну тріску у промисловості.

Лісове господарство є основним джерелом деревної біомаси в ЄС. Із загальної площі лісів (161 млн. га) близько 83% (134 млн. га) використовуються для заготівлі деревного палива. У деяких країнах (Німеччина, Великобританія, Словенія, Латвія) цей показник складає більше 90%. Середній по Євросоюзу рівень використання (рубки) щорічного приросту деревини становить 63%, по окремих країнах: Австрія – 94%, Швеція, Литва – 80%, Словаччина – 79%, Чехія – 78%. Для порівняння: в Україні щорічний приріст деревини використовується лише на 50,5% (2016 р.).

Євросоюз виробляє майже половину світового обсягу деревних пелет (14 млн. т/рік за даними 2016 р.) і ще близько 8 млн. т імпортує з Північної Америки та країн Європи поза ЄС. Із загального обсягу споживання пелет в ЄС (більше 24 млн. т/рік), 90% – це пелети з деревини, 10% – пелети з біомаси аграрного походження (соломи, лушпиння соняшника та ін.). Найбільша частина пелет з деревини (13,4 млн. т/рік) використовується для виробництва теплової енергії, у тому числі 9,2 млн. т/рік – у побутовому секторі.

Основними видами сировини для отримання біогазу є побічні продукти і відходи сільського господарства і харчової промисловості. Тенденцією останніх років є помітний ріст кількості біогазових установок і, особливо, установок з виробництва біометану – біогазу, очищеного до якості природного газу. Так, наприклад, тільки у 2015 році було побудовано 456 установок з виробництва біометану. За оцінкою європейських експертів, використання біогазу і біометану може зробити суттєвий внесок до декарбонізації таких важливих секторів як виробництво електроенергії (27% загального обсягу викидів парникових газів в ЄС) і транспорт (20% загальної емісії ПГ). Крім того, біогазові та біометанові установки з генерацією електроенергії можуть використовуватися як маневрові потужності для регулювання загальної енергосистеми, оскільки генерація електроенергії СЕС і ВЕС залежить від погодних умов.

Біодизель в ЄС виробляється, головним чином, з ріпаку, а біоетанол – з зерна кукурудзи, пшениці і з цукрового буряку. Біодизель складає 75% загального обсягу споживання рідких біопалив в ЄС, біоетанол – 18%. На частку біоетанолу другого покоління (тобто виробленого з лігноцелюлозної сировини) припадає поки лише 2%, але розвитку цього напрямку приділяється велика увага.

Біоенергетика відіграє також важливу роль у створенні робочих місць. На сьогодні в цьому секторі в Євросоюзі працюють більше 490 тис. чоловік, діяльність більше половини з яких пов'язана з твердими біопаливами і біогазом.

Висновки та рекомендації для України

Біоенергетика є важливою частиною енергетичного сектору Європейського Союзу і найбільш вагомою складовою сегменту відновлюваної енергетики. ЄС достатньо успішно наближається до досягнення цілей з ВДЕ 2020 року, поставлених Директивою 2009/28/ЕС,

при цьому принаймні десять країн вже перевиконали своє зобов'язання по частці ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії.

Традиційно, біомаса робить найбільший внесок до виробництва теплової енергії, її провідна роль серед інших ВДЕ в цьому секторі зберігатиметься і в майбутньому. Ситуація в Україні співпадає з цією тенденцією. Відмінність полягає в тому, що в ЄС більша частина теплоти отримується в режимі комбінованого виробництва з електроенергією, а в Україні приклади ТЕЦ на біомасі залишаються поки поодинокими. Також Україна суттєво відстає у виробництві електроенергії з біомаси у порівнянні з іншими ВДЕ. Так, в ЄС-28 біомаса займає третє місце по виробництву «зеленої» електроенергії (близько 18% загального обсягу електроенергії з ВДЕ) після ГЕС (40%) і ВЕС (30%) (дані 2015 р.). В Україні ж біопалива знаходяться на останньому місці серед усіх ВДЕ в цьому секторі – 1,7% загального обсягу виробництва «зеленої» електроенергії у 2015 р. і 1,2% у 2016 р. (за даними Енергетичного балансу України [7]). Таким чином, для України можна рекомендувати пріоритетний розвиток комбінованого виробництва теплової і електричної енергії з біомаси і підвищення ролі біомаси у виробництві електроенергії у порівнянні з іншими ВДЕ (у першу чергу, з сонцем і вітром).

Стійкою тенденцією розвитку сектору біоенергетики ЄС є серйозне відношення до проблем сталості і поступове розширення та посилення критеріїв сталості, обов'язкових для виконання. Україна також має враховувати ці питання, в зв'язку з чим рекомендується прийняти проект Закону «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку сфери виробництва рідкого палива з біомаси та впровадження критеріїв сталості рідкого палива з біомаси та біогазу, призначеного для використання в галузі транспорту» (№ 7348 від 29.11.2017) [8], а також розпочати підготовчу роботу до уведення критеріїв сталості для біоенергетичних установок, що працюють на твердій біомасі. Крім того, за прикладом Євросоюзу, рекомендується приділяти більшу увагу розвитку виробництва та споживання рідких біопалив другого покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Directive 2009/28/EC* on the promotion of the use of energy from renewable sources http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0028-20151005&from=EN

2. *Renewable Energy Prospects* for the European Union. IRENA, 2018 https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA_REmap_EU_2018.pdf

3. *Clean Energy for all Europeans*. Communication from the Commission COM(2016) 860 final https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fa6ea15b-b7b0-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

4. *Directive 2010/31/EU* on energy performance of buildings https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN

5. *Commission welcomes final* vote on energy performance of buildings. European Commission – Press release, 17.04.2018 http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3374_en.htm

6. *European Bioenergy Outlook*, AEBIOM Statistical Report, 2017 http://www.aebiom.org/statistical-report-2017/statistical-report-2017-17-10-17/

7. *Енергетичний баланс України за 2016 рік.* Експрес-випуск Державної служби статистики України № 506/0/08.4вн-17 від 20.12.2017.

8. *Проект Закону* «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку сфери виробництва рідкого палива з біомаси та впровадження критеріїв сталості рідкого палива з біомаси та біогазу, призначеного для використання в галузі транспорту» (№ 7348 від 29.11.2017) http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=62987

ANALYSIS OF THE MAIN TRENDS OF BIOENERGY DEVELOPMENT IN THE EUROPEAN UNION

Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.09

Purpose of the paper is to analyze main trends of bioenergy development in the EU, identify successful examples and existing problems and also to suggest some recommendations on implementing the best European practices in Ukraine's bioenergy sector. State of the art and prospects for the development of bioenergy in the EU-28 until 2030 are presented. It is shown that bioenergy is an important part of European Union's energy sector and the biggest contributor to renewable energy production. The EU is getting on quite well with achieving its RES 2020 targets set by the Directive 2009/28/EC. By now at least ten counties have already attained their obligatory share of renewable energy in the gross final energy consumption. According to expert estimation, under further pursuing of the favourable policy, the present share of RES in EU's energy consumption may double and reach about 34% in 2030. Main features of bioenergy part in different EU's energy production and consumption sectors are analyzed. Traditionally, in the EU, biomass contributes mostly to heat production and its leading part among other RES in the sector is expected to remain beyond 2020. The situation in Ukraine is in line with this trend. The difference is that in the EU most part of heat is produced combined with power, and in Ukraine there are few biomass CHP plants. Besides, power production from biomass is behind other RES in Ukraine in contrast with the EU. Based on the main trends existing in the EU, one can recommend the priority development of biomass CHP to Ukraine and also some higher contribution of biomass to power production compared with other RES. In addition it is suggested that Ukraine should pay more attention to the production and consumption of second generation biofuels and implementation of sustainability criteria in the bioenergy sector.

References 8, tables 2, figures 2.

Key words: renewable energy sources, bioenergy, biomass, biofuel, solid biofuel, biogas.

1. *Directive 2009/28/EC* on the promotion of the use of energy from renewable sources http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009L0028-20151005&from=EN

2. *Renewable Energy Prospects* for the European Union. IRENA, 2018 https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA_REmap_EU_2018.pdf

3. *Clean Energy for all Europeans.* Communication from the Commission COM(2016) 860 final https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fa6ea15b-b7b0-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

4. *Directive 2010/31/EU on energy performance* of buildings https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN

5. *Commission welcomes final vote* on energy performance of buildings. European Commission – Press release, 17.04.2018 http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3374_en.htm

6. *European Bioenergy Outlook*, AEBIOM Statistical Report, 2017 http://www.aebiom.org/statistical-report-2017/statistical-report-2017-17-10-17/

7. *Enerhetychnyi balans Ukrainy za 2016 rik.* Ekspres-vypusk Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy № 506/0/08.4vn-17 vid 20.12.2017 [Energy balance of Ukraine for 2016. Express-issue by State Statistics Service of Ukraine № 506/0/08.4vn-17 of 20.12.2017] (Ukr.)

8. *Proekt Zakonu* «Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo rozvytku sfery vyrobnytstva ridkoho palyva z biomasy ta vprovadzhennia kryteriiv stalosti ridkoho palyva z biomasy ta biohazu, pryznachenoho dlia vykorystannia v haluzi transportu» (№ 7348 vid 29.11.2017) *[Draft Law «On Amendments to certain legislative acts of Ukraine on the development of the liquid fuels from biomass production and the implementation of sustainability criteria for liquid fuels from biomass and biogas intended for use in the transport sector»]* (Ukr.) http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=62987

Отримано 23.05.2018
Received 23.05.2018

УДК 620.92

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТЕХНОЛОГІЇ ШВИДКОГО ПІРОЛІЗУ В АБЛЯЦІЙНОМУ РЕАКТОРІ ШНЕКОВОГО ТИПУ

Зубенко В.І., Епік О.В., Антоненко В.О., Олійник Є.М.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10

Стаття містить консолідовані результати розробки та оптимізації лабораторної піролізної установки з абляційним реактором шнекового типу продуктивністю 5 кг/год по сировині. Наведено дані серії експериментів (>60) з аналізом впливу низки вхідних параметрів на вихід пірорідини та якісні характеристики продуктів піролізу.

Статья содержит консолидированные результаты разработки и оптимизации лабораторной пиролизной установки с абляционным реактором шнекового типа производительностью 5 кг/ч по сырью. Приведены данные серии экспериментов (>60) с анализом влияния ряда входных параметров на выход пирожидкости и качественные характеристики продуктовпиролиза.

The article contains the aggregated results of the development and optimization of laboratory installation for ablative fast pyrolysis performance with productivity 5 kg/hour on input products. The experimental data on the series of experiments (>60) with analysis of the influence of certain range of input parameters on the bio-oil yield and qualitative parameters of output products is presented.

Бібл. 8, табл. 4, рис. 6.

Ключові слова: швидкий піроліз, абляція, реактор шнекового типу, пірорідина, вуглиста речовина, піролізний газ, енергетична ефективність.

BTG – (biomass technology group) група технологій по біомасі;
BTL – (biomass to liquid) біомаса в рідину;
RCR – (rotating cone reactor) обертовий конічний реактор;
CAPEX – (capital expenditure) капітальні витрати;
IRR – (internal rate of return) внутрішня норма прибутку;
NPV – (net present value) чиста приведена вартість;
PBP – (payback period) простий строк окупності;
PI – (profitability index) індекс прибутковості;
ЄС – європейський союз;
ОЕСР – організація економічного співробітництва та розвитку;
ПДВ – податок на додану вартість;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
ТКЕ – теплокомуненерго;
ЦКШ – циркулюючий киплячий шар;
ЦТ – централізоване теплопостачання.

Стійка тенденція зростання цін на основні енергоносіїв та необхідність пошуку шляхів скорочення споживання імпортованих палив є актуальними проблемами в Україні та вимагають невідкладного вирішення шляхом диверсифікації джерел енергії з врахуванням принципів сталого розвитку, що є загальносвітовим трендом. При цьому біоенергетика, як один із видів відновлюваних джерел енергії, наразі займає провідне місце серед інших типів ВДЕ як в Україні, так і у світі. Енергетичне використання біопалив не обмежується спалюванням первинної твердої біомаси, все більшу роль починають відігравати технології її вторинного використання до яких, в тому числі, відносяться виробництво та утилізація рідкого піропаливата побічних продуктів піролізу біомаси – піролізного газу та вуглистої речовини.

Порівняння деяких технологій енергетичного використання біомаси

Остання енергетична політика країн ЄС-28 та країн ОЕСР спрямована на встановлення амбітних цілей щодо розвитку відновлюваної енергетики та біоенергетики. Що стосується України, ключовою особливістю енергозабезпечення є імпорт до половини енергоресурсів (головним чином природного газу, що використовується для індивідуального опалення населення, виробництва тепла ТКЕ та в промисловості). Ціна на природний газ значно зросла за останні 5 років і, як очікується, зростатиме і в подальшому. Реальною та практичною альтернативою природному газу є використання місцевих відновлюваних джерел енергії, включаючи біомасу.

Існують різні технології утилізації необробленої біомаси, з яких найпоширенішою і наразі найбільш комерціалізованою та економічно доцільною є пряме спалювання первинної біомаси в котлах для виробництва теплової та електричної енергії. Незважаючи на порівняну простоту такого способу утилізації, в багатьох випадках пряме спалювання біомаси не може бути застосоване, наприклад, якщо технічно неможливо встановити новий котел на біомасі, у разі територіального рознесення об'єктів виробництва та споживання енергії, у секторі транспорту, тощо. У таких випадках технології газифікації та піролізу біомаси можуть мати сенс, оскільки основним вихідним продуктом є рідке біопаливо, що забезпечує більш високу щільність вихідної енергії на одиницю маси палива у порівнянні з твердою біомасою.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, «піропаливо – це найдешевша рідина, яку сьогодні можна виготовити з біомаси» [1]. Незважаючи на деякі

переваги, хороші перспективи розвитку та існування пілотних установок, технологія швидкого піролізу ще не досягла статусу комерційної, існують певні невирішені наукові проблеми, пов'язані з технічною та технологічною організацією власне процесу піролізу [1, 2, 3], і ця робота спрямована на вирішення деяких з них.

Переваги технології швидкого абляційного піролізу з реактором шнекового типу

Піролізні технології представлені різними підходами до технічної реалізації, а саме: абляційним піролізом, піролізом в киплячому шарі, піролізом в циркулюючому киплячому шарі, піролізом у потоці, піролізом в конусному реакторі, що обертається, тощо. Кожен з них має свої переваги та недоліки і характерні показники енергетичного ККД. У таблиці 1 наведено порівняння різних технологій піролізу для лабораторних, експериментальних, демонстраційних та комерційних установок швидкого піролізу біомаси, які в даний час існують у світі.

Одним з найбільш помітних прикладів успішної реалізації великомасштабної піролізної установки є установка BTG-BTL з модифікованим реактором RCR, яка працює на принципі швидкого піролізу з комбінацією абляційного та обертового конусних реакторів. Власником даної установки є Biomass Technology Group BV (Нідерланди) [4]. Основними перевагами технології BTG-BTL у порівнянні з іншими технологіями піролізу є високий вихід піропалива, висока теплотворна здатність піролізного газу, принципова можливість виробництва електроенергії, а також низька концентрація твердих часток у піропаливі (до 0,01% мас.).

Конструкція та первинний дизайн абляційної лабораторної установки швидкого піролізу були представлені у [8]. Експерименти показали, що лабораторна установка стабільно працювала протягом 180 хвилин. Завдяки визначенню на підставі попередніх запусків та випробувань та підтримці певних заздалегідь заданих умов експлуатації лабораторної установки, середній показник щодо виходу пірорідини склав 50% за вагою.

Результати експериментів та визначення ефективність роботи установки

Умови проведених експериментів наведені на рисунку 1. Серія експериментів проводилася з такими діапазонами параметрів [5, 8]:
- споживання біомаси: 0,5-4,5 кг/год;
- температура зовнішньої поверхні реактора: 525-650 °С;
- швидкість частки біомаси в реакторі: 0,8-1,2 м/с;
- час перебування частки біомаси в реакторі: 0,6-0,75 с.

Вплив температури реактора

Для першої серії експериментів, які мали на меті «прощупування» можливостей установки, проведених при температурі зовнішньої поверхні реактора до 550 °С в продуктах піролізу містилося понад 60% вуглецевої речовини, 30% піролізного газу та 10% рідкого піропалива. Ці показники свідчать про те, що процес більше схожий на торефікацію, а не на піроліз біомаси, що неприйнятно для цілей роботи. При підвищенні температури реактора понад 650 °С спостерігалось різке збільшення виходу піролізного газу (до 60%) – процес зміщується в бік газифікації. Отже, пошук оптимальної температури корпусу реактора був проведений в серії

Табл. 1. Порівняння різних технологій піролізу.

Тип/ технологія швидкого піролізу	Статус технології	Макс. вихід пірорідини	Складність конструкції	Фракція сировини	Витрата інертного газу	Масштаб	Можливість масштабування
В потоці	Демонстраційний		Велика	Малий	Велика	Великий	Складна
В реакторі з киплячим шаром	Комерційний, Демонстраційний	75%	Середня	Малий	Велика	Середній	Легко
В реакторі з ЦКШ	Комерційний	75%	Велика	Середній	Велика	Великий	Легко
В реакторі з конусом, що обертається	Комерційний, Демонстраційний	65%	Велика	Малий	Мала	Малий	Складна
Вакуумний	Демонстраційний	60%	Велика	Великий	Мала	Малий	Складна
Вихровий	Лабораторний	60%	Велика	Середній	Велика	Великий	Середня
Абляційний	Лабораторний, дослідно-промисловий	75%	Велика	Великий	Мала	Малий	Легко



Рис. 1. Сукупні дані для 60 експериментів – показані витрата сировини, температура реактора та відповідний вихід пірорідини.

експериментів в діапазоні температур 550-650 °С та визначено, що при температурі 600 °С, вихід рідкого піропалива був найвищим серед інших продуктів піролізу.

Вплив швидкості руху частки біомаси

При швидкості руху частки менше 0,8 м/с та відповідно часу перебування частки в реакторі понад 0,75 с спостерігалося різке збільшення частки вуглистої речовини в продуктах піролізу. При швидкості руху частки більше 1,2 м/с не спостерігалось будь-яких змін в розподілі між продуктами піролізу. Відповідно пошук оптимальної швидкості частки біомаси в АРШТ був проведений в діапазоні 0,8…1,2 м/с. Визначено, що швидкість частки біомаси у 1,2 м/с відповідає максимальному виходу пірорідини за умов стабільного підтримання інших параметрів.

Максимальний вихід піропалива за всі серії експериментів склав 51% та був досягнутий при температурі зовнішнього корпусу реактора 600 °С, витраті сировини 1,2 кг/год, швидкості руху частки в реакторі – 1,2 м/с. При цьому, середній вихід пірорідини у вибраних експериментах, за винятком відбракованих, становить 44% (рис. 2).

Енергетичний та масовий баланс установки

Для оцінки ефективності роботи лабораторної установки було складено енергетичний та масовий баланс.

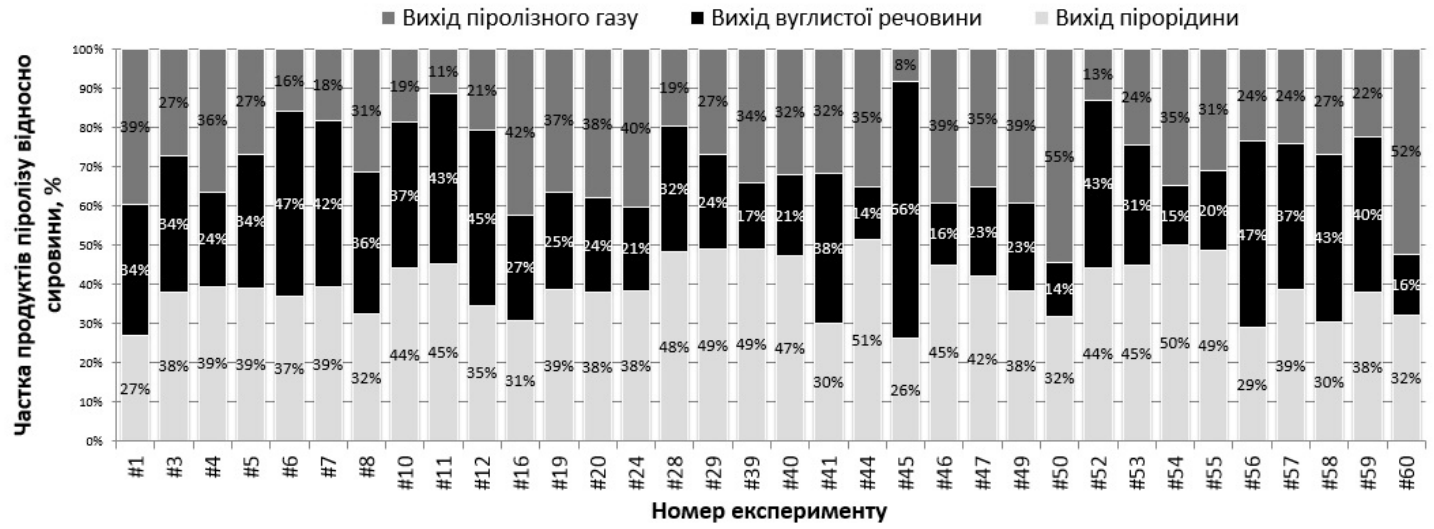


Рис. 2. Баланс вихідних продуктів піролізу для вибраної серії експериментів.

Вхідна енергія представлена енергією в сировині на основі нижчої теплотворної здатності (Q_1) та додаткової енергії, що надходить від системи нагріву реактора (Q_2) (рис. 3 (а)). Вихідна енергія складається з енергії у продуктах піролізу на основі нижчої теплотворної здатності кожного продукту (Q_3) та втрат тепла (Q_4).Теплові втрати виникають в різних зонах установки через систему конденсації, ізоляцію реактора, вертикальний патрубок від зони системи подачі сировини до зони реактора.

Рисунок 3 (б) демонструє масовий баланс для реального експерименту з максимальним виходом піропалива. Зі схеми видно, що з 0,9 кг вхідної сировини виходить 0,46 кг рідкого піропалива, 0,316 кг піролізного газу та 0,122 кг вуглистої речовини. Масовий баланс підтверджує, що кількість вхідних і вихідних продуктів рівні. Інертний газ N_2, який використовується для запобігання потрапляння кисню в тракт установки, постійно циркулює в системі без впливу на масовий баланс.

На рисунку 4 показані значення енергетичної ефективності (енергетичного ККД) установки для вибраної серії експериментів, розрахованого за методом енергетичного балансу $Q_3/(Q_1 + Q_2)$. Можна побачити, що максимальний енергетичний ККД установки становить 94% (для експериментів № 6-8). Така висока ефективність спостерігається при роботіустановки на номінальній проектній потужності з відповідним високим споживанням вхідної сировини – більше 4 кг/год. Найменша енергетична ефективність установки становить 50% (експеримент № 1-4), оскільки перші експеримен-

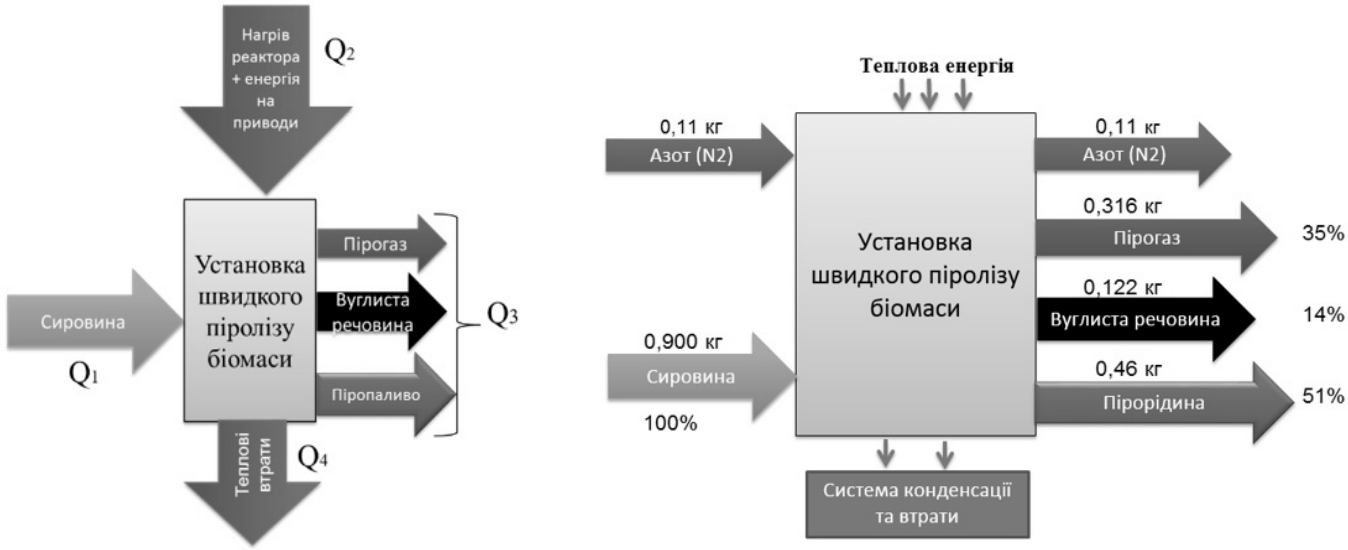


Рис. 3. Енергетичний та масовий баланс лабораторної установки.

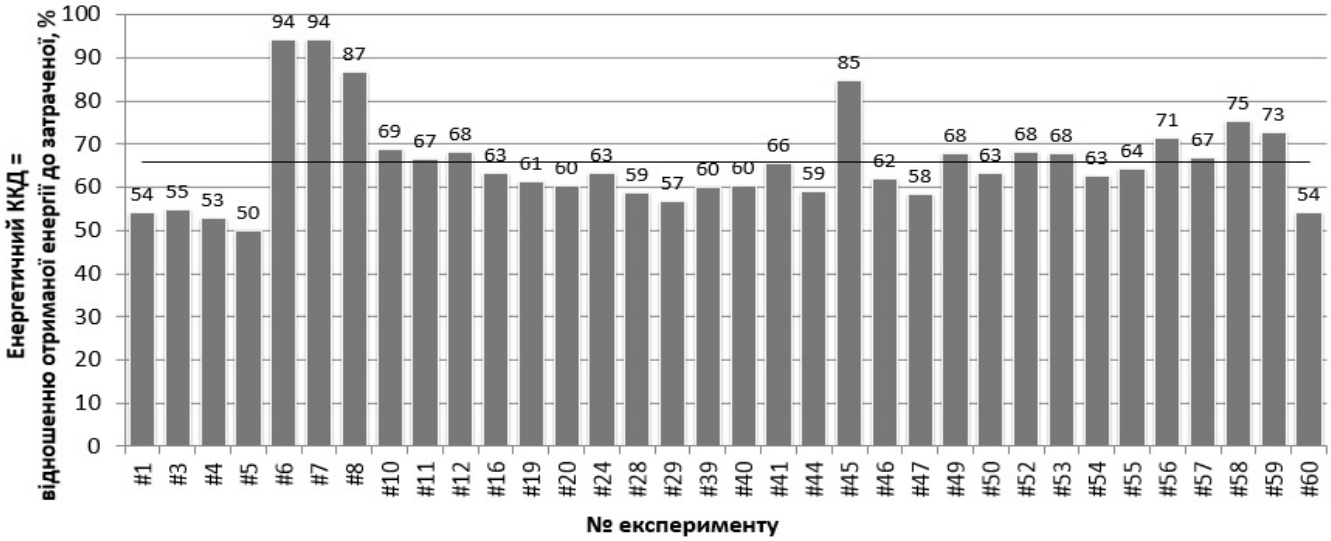


Рис. 4. Енергетичний ККД установки.

ти проводилися для налаштування режимів експлуатації і не можуть повністю відображати реальний показник енергетичного ККД.

Середній енергетичний ККД установки для вибраної серії експериментів становить 65%. Він може бути підвищений шляхом повернення частини втрат тепла від вертикального патрубка між зоною подачі сировини та зоною реактора до осаджувальної камери між зоною реактора та зоною конденсації. Згідно з розрахунками, така модифікація може забезпечити підвищення середнього енергетичного ККД на 10% (рис. 5).

Іншим способом підвищення енергетичного ККД є використання піролізного газу для зменшення споживання електроенергії на власні енергетичні потреби установки. Це може бути досягнуто завдяки його утилізації в окремому пальнику із подальшим нагріванням реактора продуктами згорання (що мають температуру 800…1000 °С). Відповідно до попередніх розрахунків енергетичного балансу утилізації піролізного газу, кількість тепла від його спалювання достатня для забезпечення 40…100% (в середньому 60%) власних потреб установки на нагрів реактора (рис. 6).

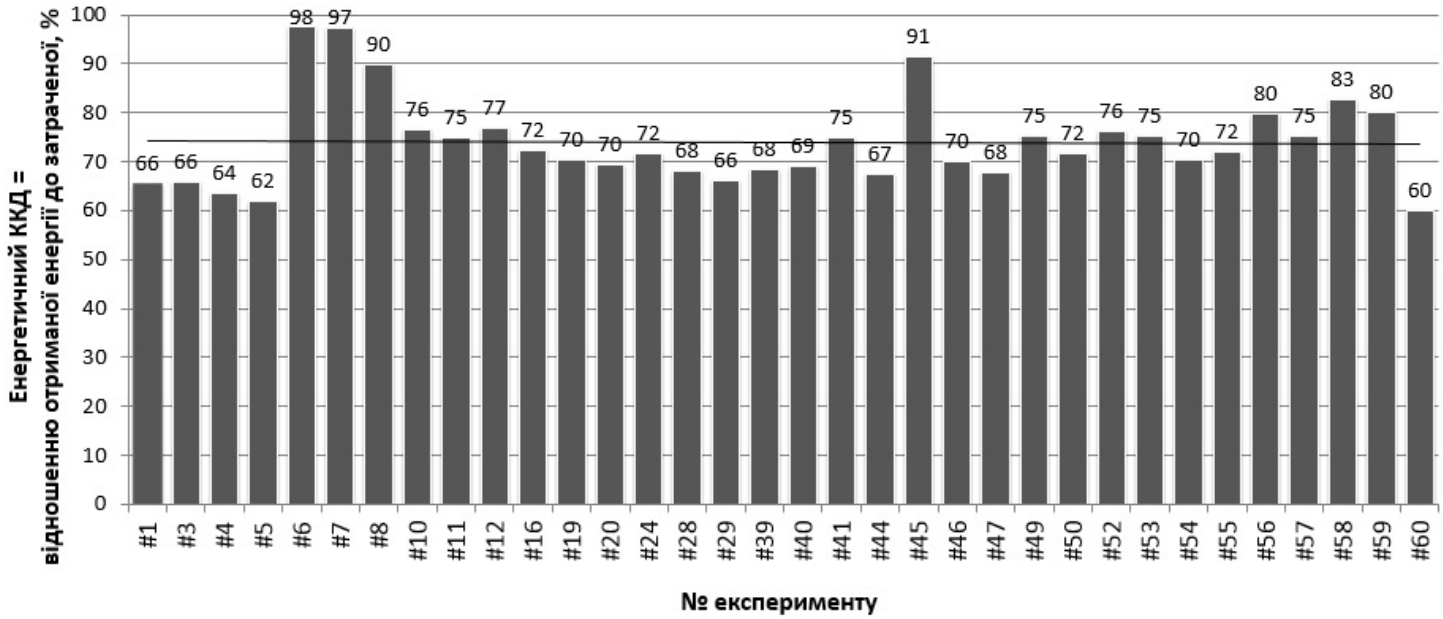


Рис. 5. Енергетичний ККД установки з утилізацією частини втрат тепла.

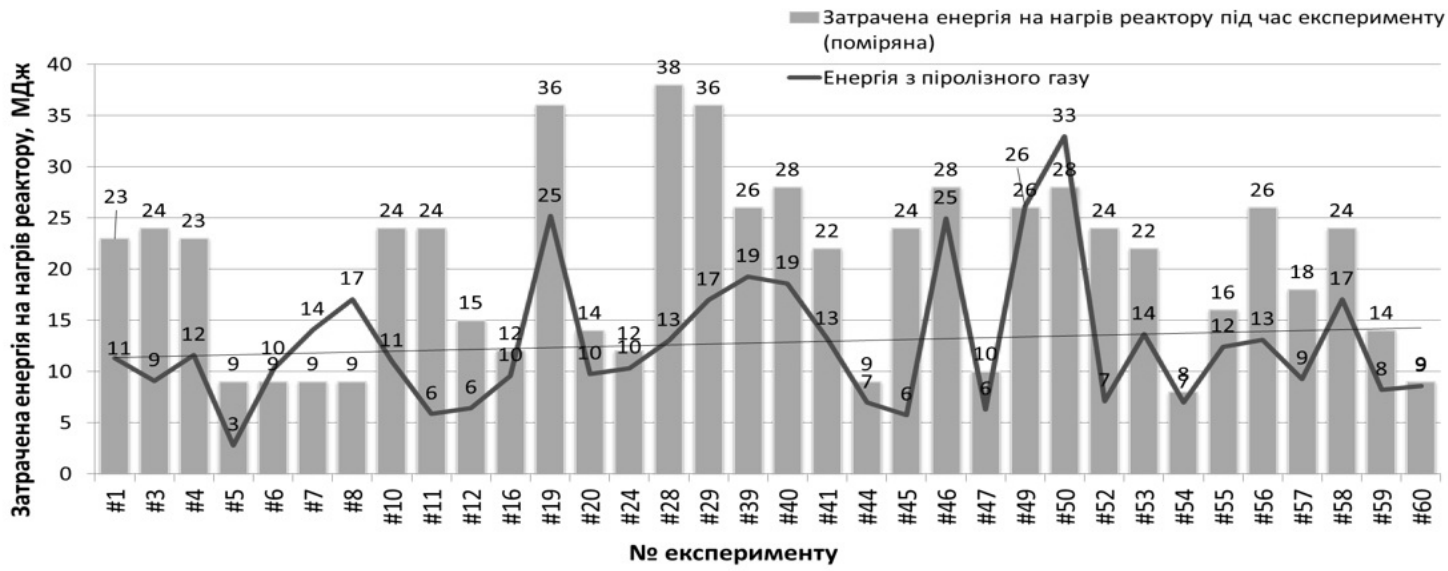


Рис. 6. Можливість покриття потреб енергії на нагрів реактора за рахунок утилізації піролізного газу.

Оцінка економічних показників роботи комерційної установки з виробництва рідкого піропалива та вуглистої речовини

В рамках техніко-економічного обґрунтування розглядається комерційна мобільна піролізна установка потужністю 500 кг/год по вхідній сировині. Оскільки в якості основної переваги технології швидкого піролізу в реакторі шнекового типу є простота масштабування, така велика установка може бути масштабована з розглянутої лабораторної установки без суттєвих технічних модифікацій, що доведено для реально існуючої конструкції комерційної установки швидкого піролізу потужністю до 50 кг/год по сировині. Ключовими особливостями комерційної установки, потужністю 500 кг/год, що розглядається, є:

- Енергетична ефективність, масовий та енергетичний баланс, вихід та якісні показники продуктів піролізу, режимні параметри є такими самими, щой для представленої лабораторної установки;
- Піролізний газ використовується як первинне джерело енергії для нагріву реактору, що складає 60% теплової енергії, необхідної для нагрівання реактора, відповідно до даних енергетичного балансу лабораторної установки;
- Експлуатація установки відбувається поруч із джерелом вхідної сировини, а отримані рідке піропаливо та вуглиста речовина реалізуються на місці як паливо для використання в котельнях, когенераційних установках або для подальшої переробки та очистки.

Загальні капітальні витрати (CAPEX), необхідні для виготовлення піролізної установки з урахуванням всього необхідного основного та допоміжного обладнання, складають 1,25 млн. Євро відповідно до комерційних пропозицій місцевих виробників на компоненти установки та власної оцінки авторів на базі комплектації існуючої лабораторної установки (5 кг/год) і демонстраційної мобільної установки (50 кг/год). Зведені дані щодо основних технічних характеристик та експлуатаційні витрати установки показані нижче в Таблиці 3.

Загальна собівартість рідкого піропалива з біомаси оцінюється на рівні 38,9 Євро/т без ПДВ із відповідною вартістю вхідної продукції 13 Євро/т. Загальна собівартість виробництва вуглистої речовини складе 46,3 €/т без ПДВ. Структура загальної собівартості виробництва рідкого піропалива з біомаси протягом всього строку життя проекту (20 років) включає, серед іншого, оподаткування та фінансові витрати. Основними складовими операційних витрат є придбання вхідної сировини (28%) та оплата праці (24%).

Для порівняння вартості отриманих продуктів із наявними на ринку енергетичними ресурсами, прораховано вартість 1 МДж енергії, яка міститься в продуктах піролізу (табл. 3). Розрахунок виконується відповідно до заздалегідь визначеної «ціни продажу» рідкого піропалива та вуглистої речовини (табл. 2). Ця «ціна продажу» дещо вище собівартості, оскільки мета роботи

Табл. 2. Технічніхарактеристики та операційні витрати установки потужністю 500 кг/год (у Євро).

Параметр	Значення	Розмірність
Кількість переробленої сировини	4200	т/рік
Вартість сировини	13	€/т
Паливна сировина	51	тис. €/рік
Вартість електроенергії з мережі	0,055	€/кВт×год
Вартість спожитої електроенергії за рік	16,2	тис. €/рік
Технічне обслуговування, ремонт за рік	3,6	тис. €/рік
Річна заробітна плата	43,5	тис. €/рік
Амортизація за рік	11,5	тис. €/рік
Загальні витрати	**33,5**	тис. €/рік
Кількість виробленого рідкого піропалива	2100	т/рік
Ціна для продажу рідкого піропалива	45.5	€/т
Повна вартість рідкого піропалива	**26,5**	€/т
Кількість виробленої вуглистої речовини	1470	т/рік
Ціна для продажу вуглистої речовини	75,8	€/т
Повна вартість вуглистої речовини	**46,3**	€/т

[1]Відходи біомаси від лісових рубок догляду, відходів рубок та деревообробки.

Табл. 3. Порівняння вартості продуктів піролізу з іншими паливами.

Параметр	Калорійність		Вартість без ПДВ		Вартість одиниці енергії
	МДж/кг	МДж/м³	€/т	€/тис. м³	€/МДж
Природний газ (для промисловості)	-	34,1	-	239	7
Мазут	38,3	-	272	-	7,1
Вугілля	21,8	-	76	-	3,5
Тріска (W = 40%)	10,2	-	30	-	3
Піропаливо (W = 40%)	14,7	-	45	-	3,1
Вуглиста речовина	25,1	-	76	-	3

комерційної установки – отримання певного прибутку від продажу продуктів піролізу і забезпечення окупності установки.

Як видно з таблиці 3 рідке піропаливо і вуглиста речовина є конкурентними на ринку України у порівнянні з викопними паливами. Вартість 1 МДж енергії, що міститься в продуктах піролізу вдвічі менша у порівнянні з аналогічним показником для мазуту та природного газу для промисловості, на 15% нижче за ціну енергії з вугілля, та майже ідентична для тріски з вологістю 40%. При цьому піропаливо має суттєву перевагу у порівнянні з тріскою – його щільність втричі вища, тому транспортувальне плече для піропалива може бути майже втричі довшим.

Слід також відмітити, що у випадку продажу лише одного продукту піролізу вартість енергії буде відповідно зростати, оскільки всі витрати будуть відноситися лише до одного корисного продукту. Наприклад, для режиму "лише рідке піропаливо" вартість енергії в ньому збільшиться до 6,1 Євро/МДж, що все ще є конкурентним у порівнянні з природним газом, але не з іншими видами палива. Тому надзвичайно важливо виробляти та мати збут як рідкого піропалива, так і вуглистої речовини.

У режимі виробництва двох продуктів проект може бути економічно здійсненним за умов, визначених у Таблиці 3. За допомогою методу аналізу грошового потоку було визначено основні економічні показники, характерні для заданих вхідних умов: простий стрококупності (без дисконтування) – 3,5 роки; дисконтований строк окупності – 3,9 року; внутрішня норма прибутку (IRR) – 39%; чиста приведена вартість (NPV) – 0,25 млн. євро; індекс рентабельності становить 2,8 (табл. 4).

Отримані економічні показники характерні для біоенергетичних проектів в Україні. Для їх поліпшення рекомендується збільшити розмір установки та використовувати більш дешеву вхідну сировину. Проте, існує верхня межа до збільшення потужності установки через особливості застосування технології швидкого піролізу з реактором шнекового типу, після якої інші технології піролізу можуть бути більш конкурентоспроможними.

Висновки

Розглянута модифікована лабораторна установка швидкого абляційного піролізу з реактором шнекового типу демонструє високий вихід рідкого піропалива з максимумом 51% та забезпечує додаткові енергомісткі побічні продукти (піролізний газ та вуглиста речовина, кожен з яких може досягати 60% для деяких експериментів) і має ряд переваг серед інших піролізних технологій, таких як відносна простота конструкції, легкість масштабування, низькі капітальні витрати на одиницю встановленою потужності та високий енергетичний ККД.

Максимальний енергетичний ККД розглянутої технології досягає 94%, а в середньому складає 65% (для

Табл. 4. Основні економічні показники, характерні для піролізної установки з виробництвом двох продуктів – пірорідини та вуглистої речовини.

Показник	Значення	Розмірність
Простий строк окупності PBP	3,5	роки
Дисконтований строк окупності DPBP	3,9	роки
Внутрішня норма рентабельності IRR	39	%
Чиста приведена вартість NPV	0,25	млн. €
Індекс прибутковості PI	2,8	-

60 експериментів), основними параметрами, що впливають на його рівень є споживання вхідної сировини (продуктивність установки) та коефіцієнт використання встановленої потужності установки (чим він вище, тим вищий ККД); використання виробленого піролізного газу для нагріву реактора може забезпечити в середньому 60% споживання теплової енергії реактором, що також дає змогу підвищити середній енергетичний ККД до 75%.

Оцінка економічних показників для промислової мобільної установки швидкого піролізу потужністю 500 кг/год показує, що це комерційно здійсненний проект у випадку продажу двох продуктів – рідкого піропалива і вуглистої речовини, а також використання піролізного газу для нагріву реактора; крім того, утилізація піролізного газу на власні потреби установки дає можливість автономної роботи установки без додаткового потужного джерела електроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th Europ. Bioenergy Conference, Wurzburg, Germany, 8-11 June, 1998, CARMEN, – 1998. – P. 268-271.

2. *Lédé J.* Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of recommended research topics // Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov. 68 (5). – 2013, P. 801-814.

3. *Lédé J., Diebold J.P., Peacocke G.V.C., Piskorz J.* The nature and properties of intermediate and unvaporized biomass pyrolysis materials, in: A.V. Bridgwater, et al. (Eds.) // Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook, CPL Press, Newburry (UK) 1999.

4. *BTG-BTL technology*: https://www.btg-btl.com/en/technology.

5. *Клименко В.М., Зубенко В.І., Баштовий А.І. Антощук Т.О.* Дослідження швидкого піролізу біомаси в абляційному шнековому реакторі // Промислова теплотехніка. – 2016, т. 38, № 2. – С. 20-27.

6. *Lede J., Panagopoulos J., Li H.Z. and Villermaux J.* Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate // Fuel, – 1985. – Vol. 64, Issue 11. – P. 1514-1520.

7. *Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y.* "Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass" // Renewable and Sustainable Energy Reviews (http://www.sciencedirect.com) 2005.

8. *Zubenko V.I., Bashtovyi A.I., Antoshchuk T.O.,* Investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor // Proceedings of the 5th International conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, June 2-4, Golden Sands, Bulgaria (ISSN 2457-3302, ISSN-L 2457-3302). P. 21-26.

ENERGY AND ECONOMIC INDICATORS OF FAST ABLATIVE PYROLYSIS TECHNOLOGY WITH CONE SCREW REACTOR

Zubenko V.I., Epik O.V., Antonenko V.O., Oliynyk E.M.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.10

The article contains the aggregated results of the development and optimization of laboratory installation for ablative fast pyrolysis performance with productivity 1-4 kg/hour on final products. The experimental data on the series of experiments (>60) with analysis of the influence of certain range of input parameters on the bio-oil yield and qualitative parameters of output products is presented. The optimization of installation regimes and input parameters for bio-oil yield maximization for different biomass types is performed. It was found that the ratio of three output products is not always optimal maximizing bio-oil yield with respect to energy yield in the products. The maximum achieved bio-oil yield is 51% by mass rated to the input products. It is revealed, that the essential parameters which influence on the final bio-oil yield are temperature in the reactor, time of biomass particles existence in the reactor, fraction of biomass particles. The mass distribution for pyrolysis by-products (pyrogas and biochar) is dependent on the initial moisture content of biomass and organization of condensation process of bio-oil. The energy balance of installation demonstrates the average efficiency of the pyrolysis process on the level of 65% (with maximum 98%) and could be increased to 75% average with simple reconstruction of installation. On the basis of obtained laboratory data the scaling of the installation was performed with development of commercial prototype with productivity of 50 kg/hour. On the basis of obtained technical data, the assessment of economic indicators of bio-oil and biochar production with large sized mobile installation has been performed demonstrating the good commercial feasibility of the installation performance.

References 8, tables 4, figures 6.

Key words: fast ablative pyrolysis, screw reactor, bio-oil, biochar, pyrogas, pyrolysis energy efficiency.

1. *Bridgwater A.V.* The Status of Fast Pyrolysis of Biomass in Europe // Proc. of the 10th Europ. Bioenergy Conference, Wurzburg, Germany, 8-11 June, 1998, CARMEN, 1998. P. 268–271.

2. *Lédé J.* Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of recommended research topics // Oil Gas Sci. Technol.–Rev. IFP Energies Nov. 68 (5). 2013, P. 801–814.

3. *Lédé J., Diebold J.P., Peacocke G.V.C., Piskorz J.* The nature and properties of intermediate and unvaporized biomass pyrolysis materials, in: A.V. Bridgwater, et al. (Eds.) // Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook, CPL Press, Newburry (UK) 1999.

4. *BTG-BTL technology:* https://www.btg-btl.com/en/technology.

5. *Klimenko V.M., Bashtovyi A.I., Zubenko V.I., Antoshchuk T.O.*, Doslidzhennia shvydkoho pirolizu biomasy v abliatsiinomu shnekovomu reaktori. [Investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor], Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering],. 2016, v.37, N 2, P. 20–27.

6. *Lede J., Panagopoulos J., Li H.Z. and Villermaux J.* Fast pyrolysis of wood: direct measurement and study of ablation rate // Fuel, – 1985. – Vol. 64, Issue 11. P. 1514–1520.

7. *Chiaramonti D., Oasmaa A., Solantausta Y.* "Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass" // Renewable and Sustainable Energy Reviews (http://www.sciencedirect.com) 2005.

8. *Zubenko V.I., Bashtovyi A.I., Antoshchuk T.O.,* Investigation of biomass fast pyrolysis in the ablative screw reactor // Proceedings of the 5th International conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, June 2-4, Golden Sands, Bulgaria (ISSN 2457-3302, ISSN-L 2457-3302). P. 21–26.

Отримано 24.05.2018
Received 24.05.2018

УДК: 62-684, УДК 536.24

ПАЛИВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕБЕЛ КУКУРУДЗИ УКРАЇНСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ

Антоненко В.О., Зубенко В.І., Епік О.В.

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.11

Представлено результати досліджень якісних показників стебел та стрижнів кукурудзи як палива з полів в Київській області. Досліджувались елементний склад (W, A, C, H, S, N, O, Cl), теплотворна здатність, температура плавлення золи та хімічний склад золи. Проведено порівняльний аналіз зразків із зарубіжними аналогами.

Представлены результаты исследования качественных показателей стебел и стержней кукурузы как топлива с полей в Киевской области. Исследовались элементный состав (W, A, C, H, S, N, O, Cl), теплотворная способность, температура плавления золы и химический состав золы. Проведен сравнительный анализ образцов с зарубежными аналогами.

The results of qualitative analysis of fuel properties of corn stover and cobs from a fields in the Kiev region are presented. Elemental composition (W, A, C, H, S, N, O, Cl), calorific value, ash melting temperature and chemical composition of ash were investigated. A comparative analysis of samples with foreign analogues was carried out.

Бібл. 7, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: біоенергетика, біомаса, стебла кукурудзи, елементний склад, хімічний склад, плавлення золи.

Україна – п'ята за величиною зернозбиральна країна в світі. Однією із основних зернових культур, що вирощуються на території України є кукурудза на зерно. Площа під цю культуру, відповідно до статистичних даних [1], оцінюється на рівні 25% від загальної площі сільськогосподарських земель і має тенденцію постійного щорічного збільшення в 1,2-1,3 рази. Під час вирощування кукурудзи на зерно утворюється значна кількість побічної продукції, що може бути використана для виробництва енергії. Енергетичний потенціал стебел кукурудзи становить 3,08 млн. т н.е. [1] і напряму залежить від кількості кукурудзи, що вирощується. В той же час, кукурудза є своєрідним паливом, і її паливні властивості, що включають елементарний склад, теплотворну здатність, температуру плавлення золи та хімічний склад золи, дещо відрізняються як від властивостей інших агрокультур, так і від властивостей дров та відходів деревини. Ці властивості напряму впливають на процес спалювання та продуктивність обладнання, що вимагає їх ретельного визначення для різних умов та способів вирощування кукурудзи.

Властивості стебел кукурудзи зазвичай залежать від різних факторів: наприклад, клімат, погода, властивості ґрунту, внесення добрив тощо. В Україні 44% площі покрито чорноземом. Більша частина сільськогосподарської діяльності зосереджена в чорноземних районах. Більш того, фермери використовують практику заорювання стебел кукурудзи в ґрунт, щоб мінімізувати внесення добрив. Тому, існує необхідність порівняльного аналізу властивостей палива з різних локацій. Метою дослідження є порівняння паливних властивостей стебел кукурудзи українського походження з аналогами та іншими видами біомаси.

Наприклад, вплив хлору (його висока концентрація в паливі на рівні 0,5-1% – типове явище для більшості агрокультур) на процес спалювання, полягає в тому, що під час горіння хлор повністю випаровується і утворює HCl, Cl_2 та багато лужних сполук. По мірі того, як температура газу зменшується, хлоридні луги конденсуються на поверхнях металів, що викликає корозію. Дослідження [2], [3] показують, що утворення NO_x відбувається при температурах в межах 800-1100 °C і в основному залежить від вмісту азоту в паливі, конструкції камери згоряння та способу впуску повітря. Висока зольність агробіомаси (типово 3-6%, іноді до 10%) може викликати ускладнення при спалюванні в топці котлів та висуває додаткові вимоги до системи її видалення, що безпосередньо впливає на вибір обладнання та рівень викидів твердих частинок. Налипання (спікання) золи на поверхнях нагріву зменшує інтенсивність теплопередачі та може викликати корозію [4]. Це вимагає підтримання рівня температури продуктів згоряння вздовж поверхонь теплообміну нижче температури початкової деформації золи (t_a). Таким чином, чим вища температура початкової деформації золи, тим менша вірогідність її спікання в топці, і тим простіша конструкція топкової системи котла. На температуру плавлення золи впливає її хімічний склад. Вважається, що взаємодія різних елементів має вирішальне значення. Дуже ймовірно, що вміст Ca, K та Si є вирішальним для характеристик плавлення золи [5].

Мінеральний та хімічний склад золи біомаси залежить від складу рослини. Проте, в реальних умовах кількість неорганічних елементів може бути доповнена додатковими компонентами з ґрунту та атмосферного пилу при зборі, транспортуванні та зберіганні палива [6]. Зольність біомаси в основному складається з оксидів неорганічних елементів: SO_3, P_2O_5, SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, Mn_3O_5, TiO_2.

Оксиди калію K_2O та фосфору P_2O_5 є макроелементами і відіграють важливу роль у використанні золи як добрива. При збиранні соломи або стебел з поля відбувається відчуження певної кількості поживних речовин з ґрунту. Для того, щоб визначити реальну ціну цих продуктів, фермери повинні розглянути вартість добрив, що використовується для подальшого відшкодування поживних речовин, що були видалені [7].

Методологія

Зразки побічної продукції кукурудзи на зерно були взяті безпосередньо після збору врожаю. Місцезнаходження: Київська обл., Северинівка. Дата: 16 листопада 2015 року, 12-00. Сорт рослин: КВС-380.

Зразки:

- стрижні (1);
- стебла (2).

Якісні показники палива та методи їх визначення представлені у табл. 1. Всі випробування, крім хімічного складу золи, проводились згідно з ISO (Міжнародна організація з стандартизації). Методика визначення хімічного складу золи базується на ГОСТ 10538-87. Стандарти, що представлені в табл. 1, призначені для аналізу твердого мінерального палива (вугілля, лігніну тощо). Однак, авторами застосовано ці методи для аналізу побічної продукції кукурудзи, що може призвести до деякої неточності.

Табл. 1. Перелік показників та стандартів на методи їх контролювання

Ч/ч	Назва показника	Позначення та назва стандарту
1	Волога аналітична	ГОСТ 11014-81 Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренный метод определения влаги. ГОСТ 27314-91 (ИСО 589-81) Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги
2	Загальна волога на робочий стан палива	ГОСТ 11014-81 Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренный метод определения влаги. ГОСТ 27314-91 (ИСО 589-81) Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги
3	Зольність на сухий стан палива	ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности
4	Загальна сірка на сухий стан палива	ДСТУ 3528-97 (ГОСТ 8606-93) (ИСО 334-92) Паливо тверде мінеральне. Визначення загальної сірки. Метод Ешка
5	Хлор на сухий стан палива	ДСТУ ГОСТ 9326:2003 (ИСО 587-97) Паливо тверде мінеральне. Методи визначання хлору
6	Вихід летких речовин на сухий беззольний стан палива	ГОСТ 6382-91 (ИСО 562-81) Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ
7	Температури плавкості золи (температура деформації t_A, температура півсфери t_B, температура розтікання t_C)	ГОСТ 2057-94 (ИСО 540-81) Топливо твердое минеральное. Методы определения плавкости золы
8	Вища теплота згорання на сухий беззольний стан палива	ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT) Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння
9	Нижча теплота згорання на робочий стан палива	ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT) Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згоряння методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згоряння
10	Елементний склад на сухий беззольний стан палива:	
	- органічний вуглець	ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625-96) Топливо твердое. Методы определения углерода и водорода
	- органічний водень	ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625-96) Топливо твердое. Методы определения углерода и водорода
	- азот	ГОСТ 28743-93 (ИСО 333-96) Топливо твердое минеральное. Методы определения азота

	- кисень	ГОСТ 2408.3-95 (ИСО 1994-76) Топливо твердое. Методы определения кислорода
	- органічна сірка	ГОСТ 30404-2000 (ИСО 157-96) Топливо твердое минеральное. Определение форм серы
11	Хімічний склад золи (двоокис кремнію, оксид алюмінію, оксид заліза, оксид магнію, оксид кальцію, оксид марганцю, оксид титану, триоксид сірки, оксид фосфору, оксид калію, оксид натрію)	ГОСТ 10538-87 Топливо твердое. Методы определения химического состава золы

Результати та обговорення

Елементний склад, теплотворна здатність, температура плавлення та хімічний склад золи для зразків побічної продукції кукурудзи українського походження сорту КВС-380: стрижень (1) та стебла (2); а також середні значення тих самих показників для трьох різних видів біомаси: стебла кукурудзи (3), солома пшениці (4), тріска сосни (5), згідно з базою даних ECN Phyllis, представлені в табл. 2.

Табл. 2. Характеристики зразків побічної продукції кукурудзи українського походження в порівнянні із середніми значеннями для стебел кукурудзи, соломи пшениці та соснової тріски

	Побічна продукція кукурудзи українського походження сорту КВС-380		Середні значення згідно бази даних		
	Стрижень	Стебла	Стебла кукурудзи	Солома пшениці	Тріска сосни
Номер проби/ усередненого палива	1	2	3	4	5
Вологість, W_r, %	7,7	10,5	6,25	9,71	8,83
Зольність, A_d, %	2,1	5,6	6,37	6,08	0,7
Летючі, V_{daf}, %	85,3	81,9	81,31	81,37	84,26
Вуглець, C_{daf}, %	49,08	50,04	42,76	48,72	52,01
Водень, H_{daf},%	6	6,07	5,36	5,97	6,25
Азот, N_{daf},%	1,0	1,0	1,17	0,72	0,14
Кисень, O_{daf},%	43,69	42,78	39,83	44,39	41,43
Сірка, S_{daf},%	0,23	0,11	0,23	0,14	0,1
Хлор, C_{ld}, мг / кг	100	1500	2098	4479	603
Теплота згоряння					
Вища, Q^s_{daf}, МДж / кг	18,963	19,377	18,4	19,2	20,68
Нижча, Q_{ir}, МДж / кг	15,767	15,016	17,11	17,99	19,36
Температури плавкості золи					
Початок деформації , t_a, °C	1200	1160	989	924	1200
Напівсфера, t_b, °C	1250	1180	1 203	1161	1252
Розтікання, t_c, °C	1330	1260	1 243	1224	1259

Хімічний склад золи, %					
SO_3	3,65	4,36	5,99	3,7	1,62
P_2O_5	1,66	3,37	4,88	3,55	3,39
SiO_2	67,36	55,9	59,01	53,47	36,2
Fe_2O_3	4,99	3,99	4,34	1,01	2,74
Al_2O_3	5,08	4,46	1,99	0,88	6,86
CaO	2,8	9,45	2,93	7,02	27,56
MgO	3,53	4,28	4	2,28	3,26
Na_2O	0,85	1,3	0,44	1,11	0,67
K_2O	5,75	7	11,84	18,01	7,57
Mn_3O_5	0,09	0,12	NA	0,1	NA
TiO_2	0,45	0,24	NA	0,06	0,12

Елементний склад

За елементним складом всі представлені види біомаси суттєво не відрізняються за вмістом летких V_{daf}, вуглецю C_{daf}, водню H_{daf} та кисню O_{daf}. Вміст сірки S_{daf} в дослідних зразках стрижня (1) і стебел (2) складає 0,23% та 0,11% відповідно. Дані показники є характерними для інших видів твердої біомаси аграрного (3, 4) і, що особливо важливо, деревного походження (5). Вміст сірки впливає на формування оксидів сірки SO_x та лужних сульфатів які можуть конденсуватися на поверхнях нагріву та частках летючої золи. Вища теплота згоряння Q^s_{daf} зразків (1) та (2) складає близько 19 МДж/кг. Вміст азоту N_{daf} в дослідних зразках (1) та (2) складає 1,0%, що є характерним для біомаси аграрного походження. Натомість у деревині вміст азоту є дещо нижчим і складає в середньому 0,14% для сосни (5).

Суттєві відмінності від інших видів біомаси спостерігаємо за вмістом золи та хлору, що проілюстровано на рис. 1.

Вміст золи A_d в дослідних зразках (1) та (2) становить 2,1 та 5,6% відповідно, що характерно для біомаси аграрного походження. Концентрація хлору Cl_d в дослідному зразку кукурудзяного стебла (2) становить 1500 мг/кг, що вище, ніж середнє значення для сосни (5), проте нижче ніж середнє значення для стебла кукурудзи (3) та соломи пшениці (4). Проте вміст хлору у дослідному зразку стрижня кукурудзи (1) становить 100 мг/кг, що навіть нижче середнього значення для тріски сосни (5). Порівняно низький вміст хлору в зразках українського походження призводить до зниження ризику утворення HCl, Cl_2 та лужних сполук при горінні, що є перевагою у порівнянні із іншими видами біопалива.

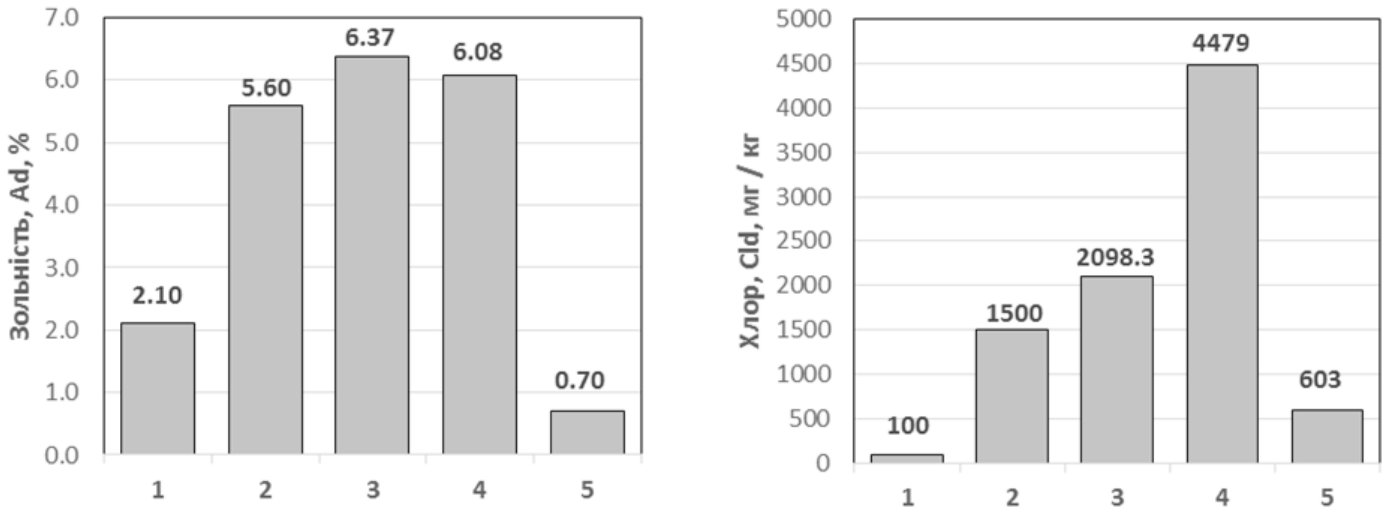


Рис. 1. Відмінності у вмісті золи та хлору: 1 – стрижень кукурудзи (Київська обл.); 2 – стебла кукурудзи (Київська обл.); 3 – усереднені стебла кукурудзи (база даних ECN Phyllis); 4 – усереднена солома кукурудзи (база даних ECN Phyllis); 5 – усереднена тріска сосни (база даних ECN Phyllis)

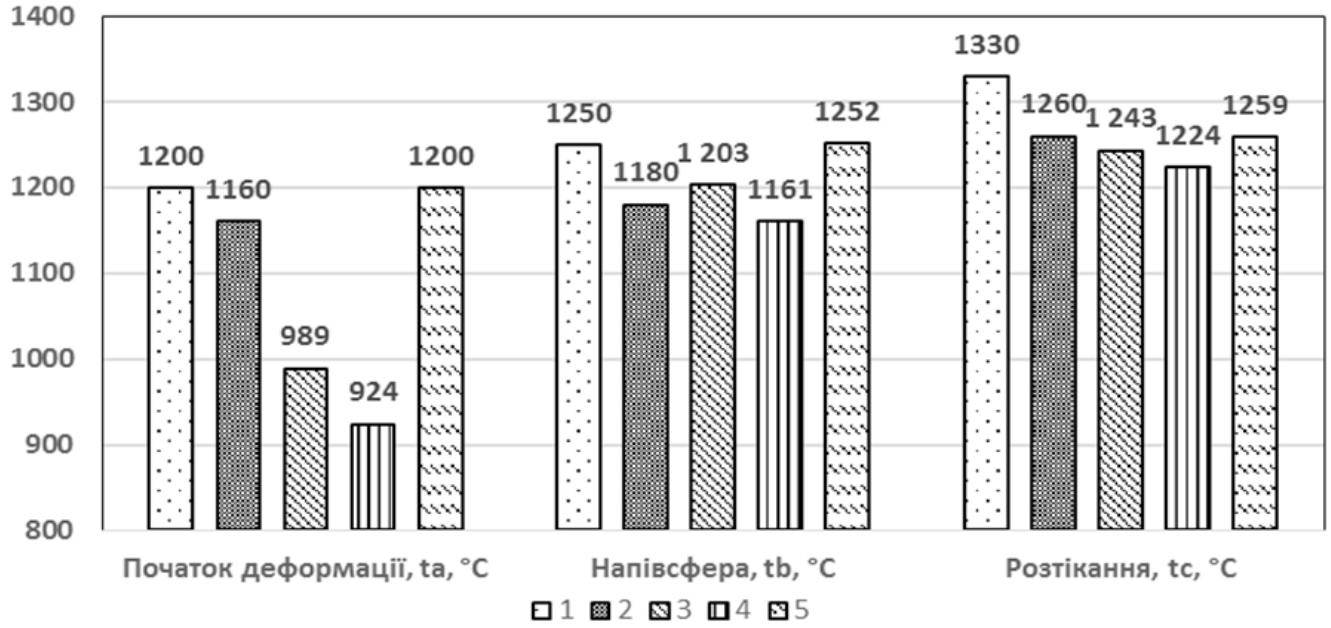


Рис. 2. Температури плавлення золи: 1 – стрижень кукурудзи (Київська обл.); 2 – стебла кукурудзи (Київська обл.); 3 – усереднені стебла кукурудзи (база даних ECN Phyllis); 4 – усереднена солома кукурудзи (база даних ECN Phyllis); 5 – усереднена тріска сосни (база даних ECN Phyllis)

Плавкість золи

На рис. 2 показано температури плавлення золи у дослідних зразках побічної продукції кукурудзи українського походження в порівнянні з усередненими показниками для декількох видів біомаси. Дослідні зразки стрижня (1) та стебел (2) кукурудзи характеризуються високою температурою початкової деформації золи, на відміну від усереднених значень для стебел (3) та соломи пшениці (4), і близькі до деревної тріски (5).

Порівняно висока температура плавлення золи для зразків побічної продукції кукурудзи українського походження може бути пов'язана з особливостями ґрунту, кліматичними умовами та методами ведення сільського господарства (внесення добрив, сівозміна, тощо). Висока температура плавлення золи знижує вимоги до додаткових систем котла та до якості сталі. Отже, побічна продукція кукурудзи українського походження може бути використана як паливо у відносно дешевих та простих за конструкцією котлах для спалювання деревини.

Хімічний склад золи

Виявлено, що вміст K_2O у досліджуваних зразках (1) та (2) дещо нижчий за середні значення для сільськогосподарської біомаси (3) та (4). Проте, вплив хімічного складу золи на температуру плавлення золи в даній роботі не досліджувався.

Висновки

Побічна продукція кукурудзи є більш складним паливом у порівнянні з деревиною завдяки високому вмісту золи та, у деяких випадках, хлору. Проведені в роботі дослідження показують, що зразки побічної продукції кукурудзи українського походження сорту КВС-380 мають елементний склад аналогічний іншій сільськогосподарській біомасі. Проте концентрація хлору значно нижча, ніж середнє значення для агробіомаси і близька до величин характерних для деревної тріски (сосна). Порівняно низький вміст хлору відіграє важливу роль у запобіганні корозії сталевих елементів.

Температура плавлення золи зразків побічної продукції кукурудзи українського походження сорту КВС-380 на 170-270 °С вище, ніж усереднені значення для сільськогосподарської біомаси і близька до значень, характерних для деревини. Висока температура плавлення золи дає можливість використовувати традиційні дров'яні котли для спалювання побічної продукції кукурудзи.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Т. Желєзна, Г. Гелетуха,* Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні // Аналітична записка БАУ №7

2. *Leckner, B. and Karlsson, M.,* Gaseous emissions from circulating fluidised bed combustion of wood // Biomass and Bioenergy, 1993, vol 4, no 5, pp 379–389.

3. *Kilpinen, P.* Kinetic modelling of gas-phase nitrogen reactions in advanced combustion processes // 1992, Report 92–7, PhD thesis, Abo Akademy University, Abo, Finland.

4. *Michal Holubcik, Jozef Jandacka, Milan Malcho* Ash Melting Temperature Prediction From Chemical Composition Of Biomass Ash // ISSN 1848-0071, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia.

5. *J. van Soest, J. Renirie, S. Moelchand, A. van der Meijden and J. Plijter* New Insights in the Ash Melting Behavior and Improvement of Biomass Energy Pellets Using Flour Bond, 2011 // Journal of Energy and Power Engineering, № 5, pp. 685-691.

6. *Wanda Wilczyēska-Michalik, Renata Gasek, Marek Michalik* // Mineral and chemical composition of the biomass ash. Goldschmidt 2012 Conference Abstracts.

7. *David D. Tarkalson, Brad Brown, Hans Kok, and Dave L. Bjorneberg,* Impact of Removing Straw from Wheat and Barley Fields // A Literature Review <http://eeca-ru.ipni.net/article/EECARU-2184>.

FUEL PROPERTIES OF UKRAINIAN CORN STOVER

V.O. Antonenko, V.I. Zubenko, O.V. Epik

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

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.11

In order to provide reliable and efficient thermal conversion, it is necessary to understand the physical and chemical properties of corn stover. The properties of corn stover depend on species, climatic and weather conditions, soil type, fertilizer input etc. Thus, it is necessary to study the fuel from various locations.

The present paper describes analysis results of corn stover from a single location in Kyiv region, Ukraine. The soil was fertilized with anhydrous ammonia 80 kg/ha. Elemental composition (W, A, C, H, S, N, O, Cl), calorific values, ash melting temperatures and ash chemical composition of the samples have been tested.

The comparative analysis of the samples with foreign analogues has been carried out. It is shown that the test samples of corn stover from Kyiv region are characterized by ash initial deformation temperatures of 1160 - 1200 °C. These temperatures are higher than the average agricultural biomass values and typical for woody biomass. The relatively high ash melting temperature reduces risks of sintering and deposit formation on the furnace inner surface.

References 7, tables 2, figures 2.

Key words: bioenergy, biomass, corn stover, calorific value, elemental composition, ash melting, ash chemical composition.

1. *T. Zheliezna, G. Geletukha*, Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv silskoho hospodarstva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini // UABio Position Paper N7, February 2014.

2. *Leckner, B. and Karlsson, M.,* Gaseous emissions from circulating fluidised bed combustion of wood // Biomass and Bioenergy, 1993, vol. 4, no 5, pp. 379–389.

3. *Kilpinen, P.* Kinetic modelling of gas-phase nitrogen reactions in advanced combustion processes// 1992, Report 92–7, PhD thesis, Abo Akademy University, Abo, Finland.

4. *Michal Holubcik, Jozef Jandacka, Milan Malcho* Ash Melting Temperature Prediction From Chemical Composition Of Biomass Ash // ISSN 1848-0071, Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina, Žilina, Slovakia.

5. *J. van Soest, J. Renirie, S. Moelchand, A. van der Meijden and J. Plijter* New Insights in the Ash Melting Behavior and Improvement of Biomass Energy Pellets Using Flour Bond, 2011 // Journal of Energy and Power Engineering, no 5, pp. 685–691.

6. *Wanda Wilczyēska-Michalik, Renata Gasek,* Marek Michalik // Mineral and chemical composition of the biomass ash. Goldschmidt 2012 Conference Abstracts

7. *David D. Tarkalson, Brad Brown, Hans Kok, and Dave L. Bjorneberg,* Impact of Removing Straw from Wheat and Barley Fields // A Literature Review <http://eeca-ru.ipni.net/article/EECARU-2184>.

Отримано 07.06.2018
Received 07.06.2018

УДК 621.577

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ IQLAB ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕРМОЗОНДОВ

Зотов Е.Н.[1], канд.техн.наук, **Москаленко А.А.[1],** канд.техн.наук, **Разумцева О.В.[1], Проценко Л.Н.[1], Добривечер В.В.[2]**

[1] Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

[2] ООО «Интенсивные технологии ЛТД», пр-т Победы,68/1, Киев, 03113, Украина

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.12

Представлені експериментально-розрахункові дослідження результатів використання програми IQLab для розв'язання зворотньої задачі теплопровідності і відновлення температури поверхні циліндричних хромо-нікелевих зразків (термозондів) при їх охолодженні в рідких середовищах. Експерименти проведені на зразках D = 10…50 мм в рідинах з різною охолоджуючої здатністю. Для розрахунку використовувалися показання термопар, встановлених у внутрішніх точках циліндричних термозондів.

Представлено экспериментально-расчетное исследование результатов использования программы IQLab для решения обратной задачи теплопроводности и восстановления температуры поверхности цилиндрических хромоникелевых образцов (термозондов) при их охлаждении в жидких средах. Эксперименты проведены на образцах D = 10…50 мм в жидкостях с различной охлаждающей способностью. Для расчета использовались показания термопар, установленных во внутренних точках цилиндрических термозондов.

An experimental and computational study of the results of using the IQLab program to solve inverse heat conduction problem and restore the temperature of the surface of cylindrical chromium-nickel samples (thermal probes) during their cooling in liquid media is presented. The experiments were performed on samples D = 10…50 mm in liquids with different cooling capacities. For the calculation we used the readings of thermocouples installed at internal points of cylindrical thermosondes.

Библ. 8, рис. 4, табл.1.

Ключевые слова: определение охлаждающей способности жидкости, термозонд, прямая и обратная задачи теплопроводности, программа IQLab.

Условные обозначения:
D – диаметр, мм;
H – высота, мм;
T – температура, °С;
Δ – разность;
τ – время, сек;

Нижние индексы:
ОЗТ – обратная задача теплопроводности;
ПЗТ – прямая задача теплопроводности;
ПО – программное обеспечение;
ТЗ – термозонд;
ТП – термопара;
э – экспериментальная;
ж – жидкость;
р – расчетная;
п.в. – восстановленная температура поверхности;
ц.э. – экспериментальная температура центра;
ц.р. – расчетная температура центра.

Введение

Эффективность технологических процессов термообработки стальных деталей зависит от охлаждающей способности закалочной среды. Для унификации исследований этой характеристики были разработаны международные (ISO 9950) [1, 2] и национальные (США, Японии, Франции, Китая) [3] методические стандарты. В стандартах в качестве измерительных образцов используются серебряные и хромоникелевые термозонды (ТЗ) цилиндрической формы. Процесс охлаждения ТЗ в закалочной среде контролируется установленной в геометрическом центре образца хромель-алюмелевой термопарой (ТП).

Для многоразового лабораторного тестирования закалочных сред, а также для использования результатов этих тестов в промышленных условиях, более практичными являются термозонды из хромоникелевых сплавов. Стандартные ТЗ изготавливаются из хромо-никелевого сплава Inkonel 600 (Ni – 72,0%; Cr – 14…17%, близкие аналоги – сплавы ХН78Т, ХН60ВТ). Хромоникелевые сплавы сочетают высокую жаростойкость, коррозионную устойчивость и технологичность при механической обработке. Теплофизические свойства таких сплавов близки к свойствам марок сталей, распространенных в технологиях термообработки.

Применение таких компактных термозондов с диаметром от 10 до 16 мм с одной центральной термопарой вызывает у некоторых исследователей возражения по обоснованности их использования для расчетов температурных режимов охлаждения более габаритных образцов и реальных деталей. Такие ТЗ предлагается использовать лишь для тестирования при сравнении

охлаждающих способностей различных жидкостей по графикам температуры и скорости охлаждения.

В работе [4], с целью повышения точности и прикладного значения результатов расчетов характеристик теплообмена на поверхности ТЗ, предложено использовать цилиндрические термозонды с увеличенным диаметром (25 мм; 50 мм; 80 мм) и установкой 2-3 термопар в контрольных точках.

При сравнении процессов охлаждения компактных термозондов и ТЗ с большими размерами (D = 25…80 мм) и массой, авторами [6] установлено следующие различия:

- по продолжительности охлаждения: стандартный термозонд диаметром 12 мм охлаждается от 850°С до 200°С от 20 до 25 секунд, а цилиндрический термозонд с диаметром 50мм – в 25…30 раз медленнее, от 500 до 600 секунд;

- продолжительность охлаждения стандартных компактных термозондов недостаточна для точной регистрации и детального анализа перемещения границы зон пузырькового и пленочного кипения по высоте ТЗ. Для этого лучше использовать цилиндры, имеющие большие диаметры и высоту;

- интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении тем выше, чем меньше диаметр ТЗ, особенно существенно это различие проявляется для термозондов от 10 до 25 мм;

- стандартные компактные ТЗ имеют небольшой объем и относительно большую площадь поверхности. Вследствие этого, на начальном этапе они охлаждаются так быстро, что начальный тепловой поток, как правило, больше, чем первая критическая плотность теплового потока (q_{cr1}). Это объясняет возникновение режима пленочного кипения на начальном этапе в большинстве экспериментов, что значительно реже происходит в случае с габаритными ТЗ и реальными деталями;

В предыдущей статье авторов [4] рассматривались различные методы определения плотности тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи на поверхности серебряных термозондов сферической и цилиндрической формы, охлаждаемых в различных жидкостях.

Постановка задачи

Целью данной работы является проверка корректности работы программы IQLab [5, 6, 7] при восстановлении температуры на поверхности цилиндрических термозондов из жаропрочных хромоникелевых сплавов различных геометрических размеров с 1 - 3 термопарами.

Входными данными при решении обратной задачи теплопроводности по восстановлению температуры поверхности ТЗ являются экспериментальные значения температуры в точках внутри образца. Эксперименты по диагностике процесса охлаждения проводились на термозондах с геометрией D/H: 10/50 мм, 12/60 мм, 25/100 мм, с одной центральной термопарой, 50/200 мм с тремя термопарами (центральной, поверхностной и на глубине 5 мм от поверхности). Установка трех ТП на термозонде D/H = 50/200мм диктовалась необходимостью установки термопары на поверхности и ТП, установленной на глубине 5 мм от поверхности, для подтверждения точности восстановления температуры поверхности по $T_ц$ при решении ОЗТ. Температура ТЗ в экспериментах измерялась с помощью контрольных хромель-алюмелевых термопар с диаметром электродов 0,3 мм. Класс термопары обеспечивал паспортную точность измерения в диапазоне рабочих температур 810…100°С не хуже, чем +/- (0,3 + 0,005$T_{тз}$) °С. Установка ТП внутри ТЗ производилась в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 9950. Для обеспечения надежного теплового контакта, зазор между спаем ТП и металлом отверстия в термозонде заполнялся медно-никелевым припоем с температурой плавления от 850 до 910 °С.

Были исследованы жидкости, обладающие различными охлаждающими способностями: водные растворы NaCl и полимера Юкон-Е, растительное рапсовое масло и минеральное масло И-20А. Эксперименты проведены в лаборатории ИТТФ НАНУ на установке для тестирования охлаждающих свойств закалочных сред. Установка представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из нагревательной печи, блока управления нагревом ТЗ, позволяющего нагреть ТЗ до установленной температуры, блока 8-канального аналого-цифрового преобразования сигнала термопар со скоростью до 10 измерений в секунду и компьютера со специальным программным обеспечением (ПО). ПО содержит программу регистрации температуры термозонда при его охлаждении в исследуемой жидкости и программу IQLab для обработки массива температурных данных и представления результатов в графической и табличной форме.

Программа IQLab предназначена также для решения одномерных нелинейных прямых (ПЗТ) и обратных задач теплопроводности (ОЗТ) при постоянных начальных и граничных условиях, задаваемых как функция времени в табличном виде с постоянным и переменным шагом по времени. Для решения уравнения теплопроводности используется конечно-разностный метод.

Для решения ОЗТ задаются форма образца, свойства материала (в IQLab имеется библиотека теплофизических свойств различных марок сталей и сплавов – Х18Н9Т, Inconel 600 и др.), координата точки сбора экспериментальных данных. Программа автоматически выбирает оптимальные (по точности и экономии машинного времени) шаг по времени и число разбиений на отрезке пространственной координаты, число узлов на отрезке времени охлаждения образца и значение параметра регуляризации, обеспечивающих решение ОЗТ.

Описание решения ОЗТ

Процесс решения ОЗТ является итерационным. После выполнения итерации, решение ОЗТ представляется в виде восстановленной температуры поверхности и расчетной температуры в любой точке внутри образца в интервале времени его охлаждения. Результаты представлены в графическом и в табличном виде.

В процессе решения ОЗТ точность оценивается средне-интегральной ошибкой [8]:

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \frac{\left[T_{pi}(\tau) - T_{эi}(\tau)\right]^2}{m}}, \text{ °C} \qquad (1)$$

Данная ошибка используется для нахождения оптимального решения при решении обратной задачи для конкретного эксперимента.

Для визуальной оценки также рассчитывается и выводится в соответствующем окне еще одна ошибка, которая рассчитывается, как максимальная разность между экспериментальной ($T_э$) и расчетной ($T_р$) температурой в точке сбора опытных данных:

$$\Delta T = \max|T_{р.}(\tau) - T_{э.}(\tau)|. \qquad (2)$$

Поскольку при исследовании процессов охлаждения наибольшие расхождения происходят в основном в начальный промежуток времени, а в остальной, как правило, намного большей части расхождения пренебрежимо малы, то именно последняя формула ошибки дает хорошую сравнительную оценку качества решения обратных задач для различных экспериментов. Первая же формула ошибки дает характеристику, которая оценивает качество приближения в рамках одной и той же задачи для одного эксперимента.

В процессе решения ОЗТ после очередной итерации возможно изменение числа узлов и значения параметра регуляризации. Увеличение числа узлов повышает точность решения ОЗТ, т.е. уменьшает ΔT, а увеличение значения параметра регуляризации улучшает монотонность, повышает устойчивость решения ОЗТ, но увеличивает ΔT. Процесс решения можно остановить, когда ΔT становится достаточно малым (например, сравнимым с экспериментальной погрешностью) или когда ΔT не уменьшается с увеличением числа итераций.

Ниже представлены результаты решения ОЗТ по восстановлению температуры поверхности для исследуемых термозондов.

Результаты восстановления температуры поверхности Tп.в. для различных размеров хромоникелевых ТЗ, охлаждаемых в жидкостях, представлены в таблице 1.

Обсуждение

В результате проведенного экспериментального исследования охлаждения ТЗ D = 10…50 мм в различных жидких средах и применения программы IQLab для восстановления температуры поверхности по результатам измерения температуры во внутренних точках цилиндрических хромоникелевых зондов (в результате расчета температурного поля и граничных условий теплообмена), установлено следующее:

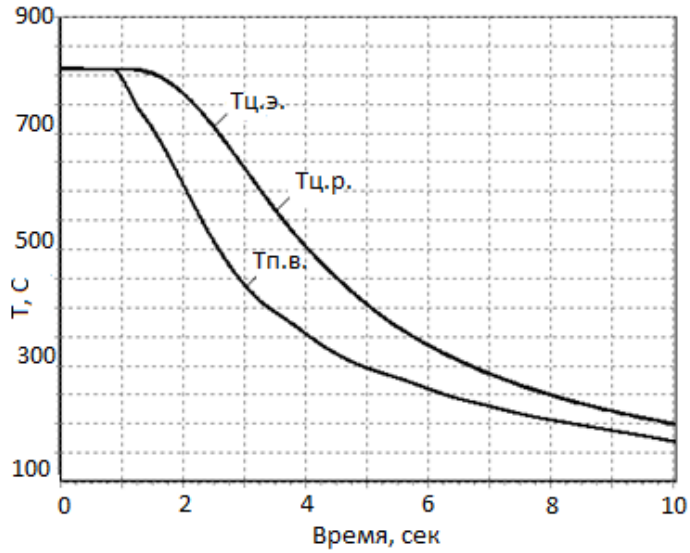


Рис 1. График температур зонда 10х50 мм, охлаждаемого в 1% водном растворе полимера Юкон-Е при Тж = 20°С, где: Тп.в., Тц.э, Тц.р. – соответственно, восстановленная температура поверхности, экспериментальная и расчетная температура центра зонда.

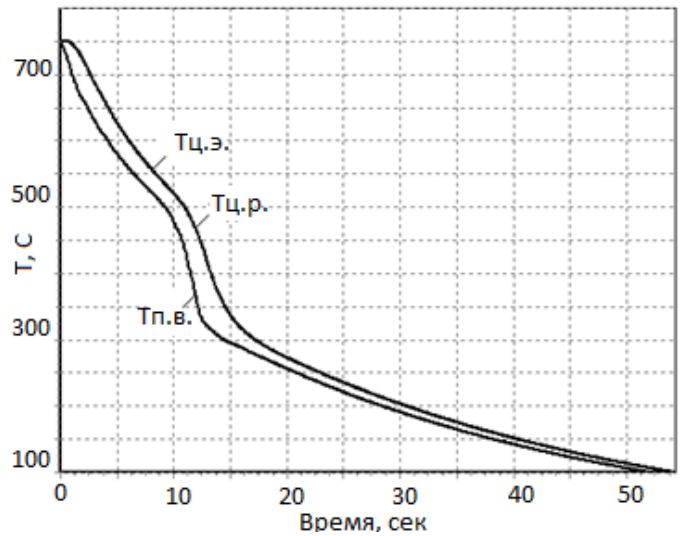


Рис. 2. График температур зонда 12х60 мм, охлаждаемого в масле И-20А при Тж = 50°С, где: Тп.в., Тц.э., Тц.р. – соответственно, восстановленная температура поверхности, экспериментальная и расчетная температура центра зонда.

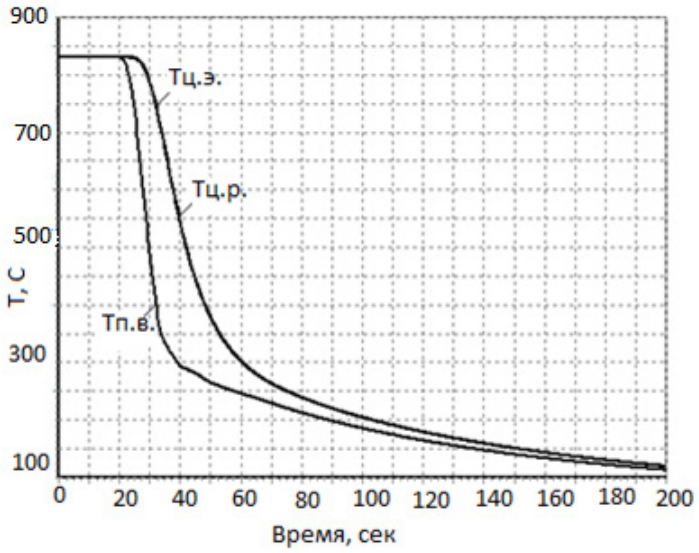
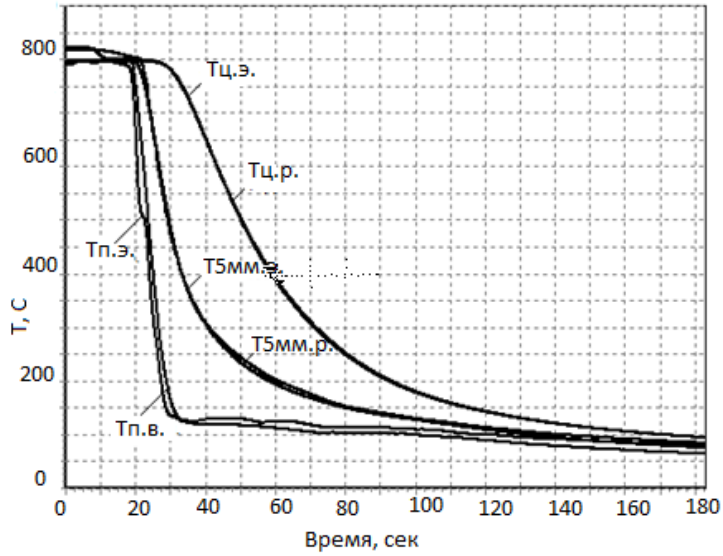


Рис. 3. График температур зонда 25х100 мм, охлаждаемого в рапсовом масле при Тж = 50°С, где: Тп.в , Тц.э., Тц.р – соответственно, восстановленная температура поверхности, экспериментальная и расчетная температура центра зонда.

- методическая погрешность восстановления температуры поверхности возрастает с увеличением расстояния от поверхности до точки сбора данных, т.е. методическая погрешность максимальна при решении ОЗТ по температуре центра зонда;

- при высоких скоростях изменения температуры поверхности зонда (компактные ТЗ D = 10…12 мм, жидкости с высокой охлаждающей способностью) для обеспечения точности решения уравнения теплопроводности значения температуры необходимо интерполировать или дискретные значения аппроксимировать. Использование в процессе расчетов методов сглаживания дискретных значений опытных данных по температуре, например, с помощью метода наименьших квадратов, при шаге измерения АЦП 0,15сек, повышает точность решения ОЗТ;

- для зондов диаметром 10 мм, 12 мм и 25 мм восстановление температуры поверхности характеризуется погрешностью $\Delta T = \max \left| Тц.р.(\tau) - Тц.э.(\tau) \right|$ в пределах 0,3…0,73°С, а для ТЗ диаметром 50 мм – 3,9…4,1°С, что не превышает погрешности измерения температуры термозонда в экспериментах хромель-алюмелевыми ТП.



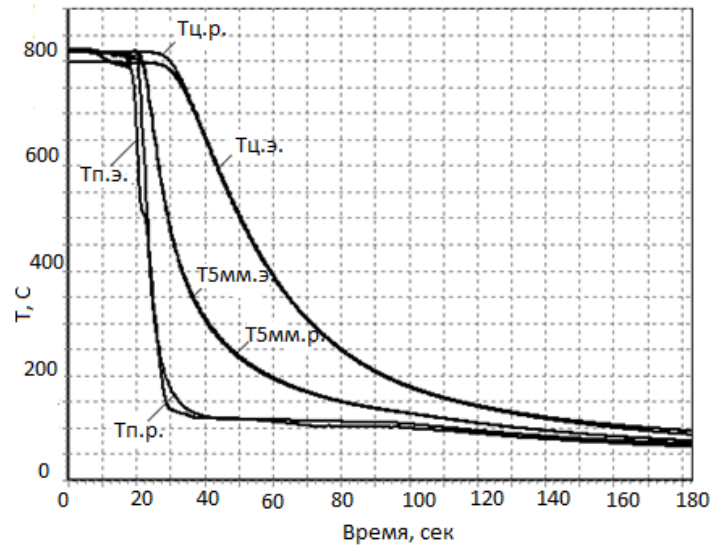


Рис. 4. Графики температур зонда 50х200 мм, охлаждаемого в 14% водном растворе NaCl при Тж = 20°С, где:

а) Тц.э., Тп.э., Т5мм.э. – соответственно, экспериментальные значения температуры центра, поверхности и на расстоянии 5 мм от поверхности;

Тц.р., Т5мм.р., Тп.в. – соответственно, температура расчетная в центре и на расстоянии 5мм от поверхности, температура поверхности, восстановленная (в результате расчета ОЗТ по Т5мм).

б). Тц.э., Тп.э., Т5мм.э. – соответственно, экспериментальные значения температуры центра, поверхности и на расстоянии 5 мм от поверхности;

Тц.р., Т5мм.р., Тп.в. – соответственно, температура расчетная в центре и на расстоянии 5мм от поверхности, температура поверхности восстановленная (в результате расчета ОЗТ по Тц.э.).

Табл. 1. Результаты решения ОЗТ с помощью программы IQLab для хромоникелевых цилиндрических термозондов (сталь Х18Н9Т).

№ рисунка	Размеры термозонда *D/H*, мм	Охлаждающая жидкость	Температура охлаждающей жидкости, $T_ж$, °С	Ошибка при решении ОЗТ, °С
1.	10/50	1% водный раствор полимера Юкон-Е	20	0,73
2.	12/60	минеральное масло И-20А	50	0,3
3.	25/100	рапсовое масло	50	0,46
4а.	50/200	14% водный раствор NaCl	20	4,1
4б.				3,9

Выводы

К достоинствам решения ОЗТ с помощью программы IQLab для термозондов из хромоникелевых сплавов цилиндрической формы, охлаждаемых в жидкостях с различными охлаждающими свойствами, следует отнести:

- для ТЗ размером *D/H* = 10/50 мм, 12/60 мм и 25/100 мм, восстановление температуры поверхности возможно с приемлемой точностью по показаниям одной термопары, расположенной в геометрическом центре ТЗ, что существенно упрощает изготовление термозонда, подготовку и проведение экспериментов;

- для ТЗ размером *D/H* = 50/200 мм с тремя термопарами, расположенными в центре образца, непосредственно на поверхности и на расстоянии 5,0 мм от поверхности, программа дает возможность восстанавливать температуру поверхности по Тц.э. и по Т5ммэ. с близкими и приемлемыми для практического применения значениями ΔТ;

- обнаруженная тенденция увеличения ошибки при восстановлении температуры поверхности при удалении точки сбора данных от поверхности подтверждает целесообразность возможно близкого размещения контрольной термопары к поверхности, прежде всего для габаритных термозондов и сред с высокой скоростью охлаждения;

- решение ОЗТ и восстановление температуры поверхности позволяет рассчитать другие важные характеристики процесса охлаждения образца: плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи;

- программа может быть использована для инженерных, лабораторных расчетов по определению температуры поверхности для цилиндрических образцов диаметром 10…50 мм с одной термопарой, а для более габаритных образцов $D \geq 50$ мм необходимо устанавливать контрольные промежуточные термопары и проводить опытно-промышленные испытания в производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ISO 9950:1995:* Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics–Nickel-Alloy Probe Test Method, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. – 1995.

2. *ISO 9950,* “Industrial Quenching Oils – Determination of Cooling Characteristics- Nickel-Alloy Probe Test Method, 1995(E),” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.

3. *ASTM D6200-01,* Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

4. *Kobasko, N., and Liscic, B., LISCIC/PETROFER* probe to investigate real industrial hardening processes and some fundamentals during quenching of steel parts in liquid media. «EUREKA: Physics and Engineering», 2017, № 6.

5. *Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Разумцева О.В., Проценко Л.Н.* Определение коэффициента теплоотдачи при охлаждении серебряных термозондов с учетом эффектов температурно-временной задержки. Журнал «Промышленная теплотехника», 2017, том 39, №5, с. 34–40.

6. *Добривечер В.В., Зотов Е.Н., Кобаско Н.И., Моргунюк В.С., Сергеев Ю.В*. Программный комплекс «IQLab», коммерчески распространяемый ТОВ «Интенсивные технологии ЛТД» (iqlab@itl/kiev.ua).

7. *Зотов Е.Н., Москаленко А.А., Добривечер В.В., Кобаско Н.И., Дейнеко Л.Н*. Использование программы IQLab для выбора оптимальних режимов процесса термообработки стальных изделий. Сборник докладов 6-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», ОТТОМ-6, ч.II,Харьков, ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2005. –с.106–115.

8. *Круковский П.Г*. Обратные задачи тепломассопереноса (Общий инженерный подход). Киев: Ин-т технической теплофизики, 1998, 224с.

FEATURES OF THE APPLICATION OF THE IQLAB PROGRAM FOR SOLVING THE INVERSE HEAT CONDUCTION PROBLEM FOR CHROMIUM-NICKEL CYLINDRICAL THERMOSONDES

Zotov E.N.[1], Moskalenko A.A.[1], Razumtseva O.V.[1], Protsenko L.N.[1], Dobryvechir V.V.[2]

[1] Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, ul. Zhelyabova, 2a, Kiev, 03680, Ukraine
[2] LTD "Intensive technologies", 68/1, Pobeda ave., Kiev, 03113, Ukreine

https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.12

The paper presents an experimental-computational study of the results of using the IQLab program to solve inverse heat conduction problem and restore the surface temperature of cylindrical thermosondes from heat-resistant chromium-nickel alloys while cooling them in liquid media.

The purpose of this paper is to verify the correct operation of the IQLab program when restoring the surface temperature of thermosondes with 1-3 thermocouples. The IQLab program is also designed to solve one-dimensional nonlinear direct lines and inverse heat conduction problems with constant initial and boundary conditions specified as a function of time in a tabular form with a constant and variable time step. A finite-difference method is used to solve the heat equation.

Experiments were carried out on samples D = 10-50 mm in liquids with different cooling capacities such as aqueous solutions of NaCl and Yukon-E polymer, rapeseed oil and I-20A mineral oil. For the calculation we used the readings of thermocouples installed at internal points of cylindrical thermosondes.

The advantages of solving inverse heat conduction problems with the IQLab program include the possibility of restoring the surface temperature for cylindrical samples with a diameter of 10 mm to 50 mm with practical accuracy according to the indications of a single thermocouple located in the geometrical center of the thermosonde, which simplifies the manufacture of the probe. For larger dimensions with a diameter $D \geq 50$ mm, it is necessary to install control intermediate thermocouples and perform additional tests.

The solution of inverse heat conduction problems and restoration of the surface temperature of the sample makes it possible to calculate other important characteristics of the cooling process: the heat flux density and the heat transfer coefficient.

References 8, tables 1, figures 4.

Key word: determination of the cooling capacity of a liquid, a thermal probe, direct and inverse heat conduction problems, the IQLab program.

1. *ISO 9950:* 1995: Industrial Quenching Oils Determination of Cooling Characteristics-Nickel-Alloy Probe Test Method, International Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, – 1995.

2. *ISO 9950,* "Industrial Quenching Oils-Determination of Cooling Characteristics-Nickel-Alloy Probe Test Method, 1995 (E)," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995.

3. *ASTM D6200-01,* Standard Test Method for Determination of Cooling Characteristics of Quench Oils by Cooling Curve Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org.

4. *Kobasko, N., and Liscic, B., LISCIC / PETROFER* probe to investigate real industrial hardening processes and some fundamentals during quenching of steel parts in liquid media., EUREKA: Physics and Engineering , 2017, No. 6.

5. *Zotov E.N., Moskalenko A.A., Razumtseva O.V., Protsenko L.N.* Determination of the coefficient of heat transfer during cooling of silver thermosondes taking into account the effects of temperature-time delay. Journal of Industrial Heat Engineering (Promyshlennaya Teplotekhnika), 2017, Vol. 39, No. 5, p. 34–40, (Rus).

6. *Dobrivecher V.V., Zotov E.N., Kobasko N.I., Morgunyuk V.S., Sergeev Yu.V*. The software complex "IQLab", commercially distributed by "Intensive technologies LTD" (iqlab@itl/kiev.ua), (Rus).

7. *Zotov E.N., Moskalenko A.A., Dobrivecher V.V., Kobasko N.I., Deineko L.N*. Using the IQLab program to select the optimal modes for the heat treatment of steel products. Collection of reports of the 6th International Conference "Equipment and Technologies for Heat Treatment of Metals and Alloys", (OTTOM-6), Part II, Kharkov, NSC KIPT, CPC "Contrast", 2005, p.106–115, (Rus).

8. *Krukovsky P.G.* Inverse problems of heat and mass transfer (General engineering approach). Kiev: Institute of Engineering Thermophysics, 1998, 224 p, (Rus).

Отримано 26.06.2018
Received 26.06.2018