

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ
НАН УКРАЇНИ

ТЕПЛОФІЗИКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік
Заснований в 1979 р.

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

Том 46, № 1, 2024

Головний редактор – **Сисєжкін Ю.Ф.**

Редакційна колегія:

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

Редакційна рада:

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

ЗМІСТ

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

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

Особливості теплообміну і аеродинаміки при обтіканні
повітрям пучків прямих кругових циліндрів5

**Авраменко А.О., Ковецька М.М., Кондратьєва О.О.,
Скицько О.І.**

Вплив тепловиділення на детонацію у реальному
газі11

**Турчина Т.Я., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А.,
Козак М.М.**

Дослідження впливу ДІВЕ-обробки і біополімерних
добавок на характеристики плодових гетерогенних
систем як об'єктів розпилювального сушіння18

**Ободович О.М., Хоменко В.О., Сидоренко В.В.,
Степанова О.Є.**

Дискретно-імпульсний ввід енергії (ДІВЕ) та його
реалізація шляхом застосування роторно-пульсаційних
апаратів29

Шморгун В.В., Мартюк О.В.

Енергетична та екологічна ефективність проведення
випаровування та сушіння рідинних продуктів в
єдиному випарувально-сушильному агрегаті39

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

Енергоефективна технологія ректифікованого
етилового спирту44

Трошенькін Б.А. Кравченко О.В., Трошенькін В.Б.

Вдосконалення процесу отримання водню з
використанням борогідриду натрію53

КОМУНАЛЬНА ТА ПРОМИСЛОВА ЕНЕРГЕТИКА, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

**Демченко В.Г., Коник А.В., Погорєлова Н.Д.,
Хоменко М.В.**

Розрахунок об'ємної втрати природного газу через
нещільності з'єднань в трубопроводі58

Желєзна Т.А., Драгнєв С.В.

Аналіз напрямків оптимізації логістики постачання
біопалив на енергетичні об'єкти66

ВИКОРИСТАННЯ ТА СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ, ЕКОЛОГІЯ

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

Підвищення ефективності установок термічного
знешкодження побутових відходів шляхом утилізації
скидної теплоти76

**Шубенко О.Л., Голощанов В.М., Котульська О.В.,
Парамонова Т.М.**

Уточнена фізична модель течії пари в частині
низького тиску турбін великої потужності на
маловитратних режимах84

Петрова Ж.О., Бадеха А.В.

Переробка та утилізація осадів від очищення
промислових та побутових стічних вод93

Кобзар С.Г.

Дослідження термогазодинаміки пальника зі
зменшеною генерацією оксидів азоту для
пилувугільного котла ТПП 312100

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

THERMOPHYSICS AND THERMAL POWER ENGINEERING

UKRAINIAN SCIENTIFIC JOURNAL
Published quarterly

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

Volume 46, № 1, 2024

Editor in Chief – Yu. Snezhkin

Editorial Board Members:

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

Advisory Editorial Board:

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

CONTENTS

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

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

The features of heat exchange and hydrodynamics when air
flows around beams of cylinders5

**Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A.,
Skitsko O.I.**

Influence of heat generation on detonation in real gas11

**Turchina T.Ya., Avdieieva L.Yu., Makarenko A.A.,
Kozak M.M.**

Investigation of the effect of DPEI-treatment and
biopolymer additives on the characteristics of fruit
heterogeneous systems as objects of spray drying18

**Obodovych O.M., Khomenko V.O., Sydorenko V.V.,
Stepanova O.E.**

Discrete-pulse energy input (DPEI) and its implementation
using rotor-pulsation apparatus29

Shmorgun V.V., Martiuk O.V.

Energy and environmental efficiency of evaporation and
drying of liquid products in a single evaporation-drying
unit39

Bulii Y.V., Obodovych O.M., Stepanova O.E.

Energy efficient technology of rectified ethyl alcohol44

Troshen'kin B.A., Kravchenko O.V., Troshen'kin V.B.

Improvement of the process of obtaining the hydrogen by
using sodium borohydride53

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

**Demchenko V.G., Konyk A.V., Pogorelova N.D.,
Khomenko M.V.**

Calculation of volume loss of natural gas due to leakiness of
connections in the pipeline58

Zheliezna T.A., Drahnev S.V.

Analysis of directions to optimize logistics of biomass fuel
supply to energy facilities66

FUEL UTILIZATION AND BURNING, HEAT POWER UNITS, ECOLOGY

Fialko N.M., Navrodska R., Shevchuk S., Gnedash G.

Improving the plants efficiency of thermal incineration
household waste by recovering waste heat76

**Shubenko J.L., Goloschapov V.M., Kotulska O.V.,
Paramonova T.M.**

Refined physical model of steam flow in the low-pressure
part of a high-power turbine in low-flow rate modes84

Petrova Zh.O., Badekha A.V.

Processing and disposal of sediments from the treatment of
industrial and domestic wastewater93

Kobzar S.G.

The investigation of the thermogasdynamics of a burner
with reduced generation of nitrogen oxides for a coal dust
boiler TPP 312100

УДК 536.24:541.11

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛООБМІНУ І АЕРОДИНАМІКИ ПРИ ОБТІКАННІ ПОВІТРЯМ ПУЧКІВ ПРЯМИХ КРУГОВИХ ЦИЛІНДРІВ

Халатов А.А., академік НАН України, Коваленко Г.В., к.т.н. Мулярчук М.А.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.1>

Виконано оцінку зміни інтенсивності тепловіддачі і гідравлічного опору пучка кругових циліндрів після нанесення на їх зовнішню поверхню спіральних канавок різного кроку і поперечного перерізу. Проведено порівняння з результатами комп'ютерного моделювання. Досліджено вплив роздільної пластини (спліттера), закріпленої на кормовій твірній циліндра.

An assessment was made of changes in the intensity of heat transfer and hydraulic resistance of a bunch of circular cylinders after applying spiral grooves of different pitches and different cross section to their outer surface. A comparison has been made with the results of computer modeling. The influence of the separating plate (splitter), fixed on the aft generatrix of the cylinder has been studied.

Бібл. 8, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова: круговий циліндр; однорядний пучок циліндрів; потік повітря; температура; перепад тиску; теплообмін; роздільна пластинка, (спліттер).

 D – діаметр; Eu – Ейлера число; f – частота; h – висота; L_p – довжина роздільної пластини (спліттера); Nu – Нусельта число; Pr – Прандтля число; Re – Рейнольдса число; S – крок; T – температура; t – час; w – швидкість; FAR – фактор аналогії Рейнольдса; α – коефіцієнт тепловіддачі; Δ – різниця; ρ – густина.**Вступ**

Обтікання циліндрів – поширене явище в природі, науці і техніці, особливо в випадках застосування середовищ, що суттєво відрізняються своїми властивостями. Питання міцності циліндрів виникають при будівництві опор мостів, штучних островів, стартових споруджень для ракет, авіації. Спеціальною галуззю є випускні труби джерел надлишкової теплоти і шкідливих речовин, де до задач міцності додаються проблеми теплообміну, вібрацій, конвекції.

В останній час велику увагу приділяють мінімізації розмірів і маси теплообмінних апаратів дослідники космосу і військові спеціалісти. Тому питання інтенсифікації теплообміну набувають додаткового значення.

Комп'ютерне моделювання показало виняткову перспективність застосування даного підходу для досліджень. Застосування потужних комп'ютерів до-

зволило використати нові моделі турбулентності, в тому числі і для розрахунків конвективного теплообміну при поперечному обтіканні пакетів циліндрів.

З огляду на вищевикладене, вивчення теплообміну і аеродинаміки на основі експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання є актуальним

Мета роботи

Метою роботи є оцінка різних способів інтенсифікації теплообміну при обтіканні повітрям пучків циліндрів при можливій мінімізації втрат тиску [1].

Створення компактних апаратів для космосу і озброєння війська вимагають розв'язання подібних проблем.

Аналіз стану досліджень

Існує велика кількість публікацій, в яких висвітлюється багато питань сформульованої теми. Широко відомі роботи, Жукаускаса А., Мигая В.К.,

Шліхтінга Г., Халатова А. А. [2-7]. Зокрема, розглядалися випадки різних варіантів шерхності поверхні циліндрів. Особливе значення мають розвиток і тестування пакетів прикладних програм, створених на основі великої кількості експериментальних робіт. Розрахунки обмежувались інтегральними напівемпіричними підходами з використанням критеріальних співвідношень. В [8] проаналізовано вплив на теплообмін і аеродинаміку роздільних пластин (спліттерів). Зрозуміло, що в цьому напрямку доцільна ціла серія практичних робіт. Вивчення даної проблеми на основі числового моделювання показало виняткову перспективність даного підходу.

Сам по собі процес обтікання кругового циліндру не простий і складається з декількох стадій: ударного нагінання на лобову частину циліндра, поступового наближення до найширшої його частини (діаметра), де відбувається перехід в зону, яка дозволяє потоку розширятись з відповідною зміною тиску. Тут можливий відрив потоку. Якщо циліндр має фактуру поверхні, однаковою на всьому її протязі, події на правій і лівій половинках циліндра будуть розвиватися однаково, і дві частини потоку зіткнуться біля кормової частини циліндра, чим загальмують одна одну. Відповідно зменшиться і тепловіддача.

Методи досліджень

Досліди виконувались на стенді ІТТФ НАН України, загальний вигляд якого представлено на рис. 1.

Вентилятор створював розрідження і повітря засмоктувалось в робочу ділянку з приміщення, завдяки цьому вдавалось зменшити коливання температури і вологості. На вході розміщувався хонейкомб для вирівнювання профіля швидкостей.

Діаметр досліджуваних циліндрів $D=22$ мм, висота їх активної зони $h=160$ мм. Використовувались як циліндри з гладкою поверхнею, так і циліндри, на зовнішній поверхні яких була нанесена спіральна канавка. Кроки канавок були 10 мм, 20 мм, 40 мм. Канавки мали прямокутний або овальний поперечний переріз. Ширина канавок становила 2,5 мм, глибина – 2 мм. Швидкості повітря в найвужчому місці між циліндрами відповідали діапазону чисел Рейнольдса $3300 < Re < 14500$. Температура повітря на вході в пучок циліндрів була в діапазоні $15^{\circ}\text{C} < T < 22^{\circ}\text{C}$. Для вимірювання температур використовувались ртутні термометри і хромель-копелеві термопари. Тиск на вході в робочу ділянку – атмосферний. Тиск і його перепади вимірювались дифманометром «Tesla». Для визначення коефіцієнту тепловіддачі використовувався метод льоду, що тане [7].

Результати досліджень.

Досліджувалося натікання повітря на циліндр перпендикулярно до його осі. Одночасно присутні кілька явищ: гальмування потоку в лобовій частині циліндру, інтенсивний теплообмін при наближенні до діаметру циліндра. Після проходження діаметра циліндра в потоці виникає розрідження, яке супроводжувалось відривом потоку.

На рис. 2 показано результат комп'ютерного моделювання досліду з такими параметрами: температура на вході $T_i = 19^{\circ}\text{C}$, число Рейнольдса $Re = 3371$, число Нуссельта $Nu = 133$. Відстані між центрами вихорів, що зірвались, приблизно однакові і дорівнюють $l = 28$ мм. Перепад статичного тиску між входом в пучок циліндрів і виходом з нього знаходився в межах $20 \text{ Па} < \Delta p < 228 \text{ Па}$. На поверхнях вихорів помітні дрібні виступи, які відповідають більшим частотам коливання поверхні.



Рис. 1. Аеродинамічна труба для дослідження теплообміну і аеродинаміки при обтіканні повітрям пучків циліндрів

Відмітимо, що вихори, які зриваються з правого і лівого бортів циліндру, обертаються в протилежних напрямках, з чим і пов'язано гальмування потоку в кормовій зоні. Для боротьби з цим явищем використовувався один з методів зменшення опору пучка циліндрів. Він полягав в тому, що на зовнішній поверхні більшості циліндрів були спіральні канавки, які зміщували вздовж осі циліндру точку відриву одного вихору по відношенню до сусіднього з іншої сторони циліндра (рис. 2). Крім того канавка дещо збільшувала площу теплообміну.

На рисунку 2 видно загальмований потік в лобовій і кормовій зонах циліндру, максимальні швидкості обтікання мають місце на бічних ділянках. Поверхні вихорів вкриті дрібними виступами і дифманометр «Tesla» їх фіксував. Відстані між вихорами майже однакові за винятком проміжку між першим вихором і циліндром, який значно більший за інші проміжки (рис. 2).

Залежність зменшення опору від кроку канавки не-монотонна. Найкращі результати показали канавки з кроками спіралей 10мм і 40мм. При цьому значення фак-

тору аналогії Рейнольдса становили $1,859 < FAR < 2,382$. Величину $FAR = 2,382$ при кроку 40мм досягнуто при дещо меншому опорі ($Eu_{40}/Eu_0 = 0,82$), ніж для пучка циліндрів з кроком канавки 10 мм ($Eu_{10}/Eu_0 = 0,95$).

Досліджено вплив спіральної канавки, утвореної на зовнішній поверхні циліндра методом комп'ютерного моделювання. Картина обтікання циліндра зі спіральною канавкою прямокутного поперечного перерізу з кроком 20мм наведено на рис. 3.

Дещо краще співвідношення між збільшенням теплообміну і ростом перепаду тиску показує застосування спіральних канавок не з прямокутним поперечним перерізом, а з овальним [1, 7]. При цьому важливо, щоби бічні стінки овальної канавки при виході на зовнішню поверхню циліндра утворювали з нею гострий кут (рис.4).

Експериментальне дослідження обтікання пучка циліндрів з канавками показує причину виникнення поперечної складової швидкості, яка зменшує розміри застійної зони за циліндром, виникнення додаткових частот коливання потоку і інтенсифікацію

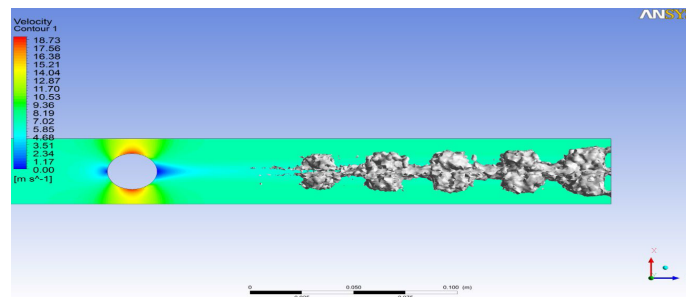


Рис. 2. Обтікання одиночного циліндра поперечним потоком повітря

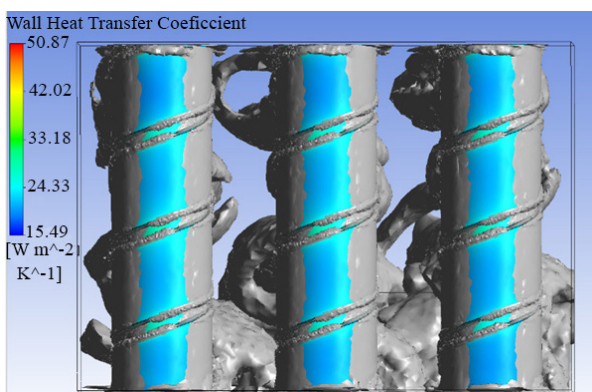


Рис. 3. Результати комп'ютерного моделювання обтікання однорядного пучка циліндрів зі спіральними канавками

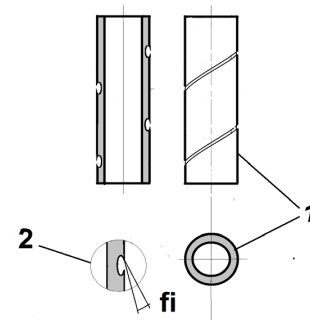


Рис. 4. Трубчата поверхня з канавками овального поперечного перерізу. 1 – вид на циліндр-калориметр збоку і вздовж його осі; 2 – поперечний переріз овальної канавки з гострим виходом (fi) з канавки на зовнішню поверхню циліндра

теплообміну. Комп'ютерне моделювання підтверджує ці положення. Приріст теплообміну перевершує збільшення теплообмінної поверхні при невеликому рості газодинамічного опору пучка. Застосування гострих країв, через які потоки з канавок виходять на зовнішні поверхні циліндрів, дають додатковий фактор впливу не тільки на теплообмін, але й на втрати тиску.

В дослідах використовувались канавки з кутом загострення кромки $\phi=45$ градусів. В результаті фактори аналогії Рейнольдса збільшувалися і при числі Рейнольдса $Re=14500$ становили $FAR_{10}=1.964$, при $(Eu_{10}/Eu_0 = 0.84)$ $FAR_{20} = 1.512$ при $Eu_{20}/Eu_0 = 0.84$, $FAR_{40} = 2.608$ при $Eu_{40}/Eu_0 = 0.51$).

Останній метод інтенсифікації теплообміну, розглянутий в роботі, полягає в тому, що посередині кормової зони циліндру встановлюють тонку роздільчу пластину, тертя вихорів об яку виявляється меншим, ніж їх взаємодія в вільному потоці. Розміри пластин (довжина) в різних дослідах становили $L_{p1}=25$ мм, $L_{p2}=67$ мм, $L_{p3}=84$ мм. На рис. 5 наведено схему розміщення роздільних пластин.

Як показали досліди, ступінь інтенсифікації теплообміну суттєво залежить від довжини роздільної пластини 2. Коли ланцюжок вихорів стає довшим, ніж роздільча пластина, вони одержують можливість змішуватись, і цим збільшувати перепад тиску за циліндром. Якщо напрямок потоку повітря не постійний, необхідно забезпечити можливість зміни положення

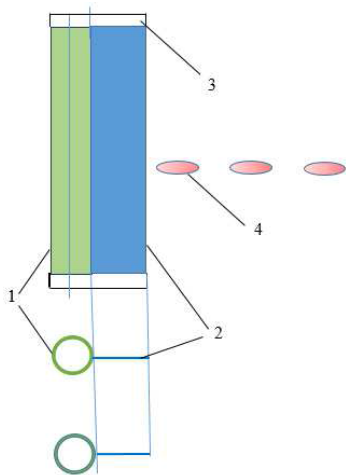


Рис. 5. Схема розміщення роздільних пластин (спліттерів) 2 за циліндрами 1.

3 – обічайка; 4 – вихори, що відірвалися від поверхні циліндра

роздільних пластин у відповідності з напрямом потоку. Для цього служать обічайки 3, які забезпечують легкий поворот роздільної пластини навкруги осі циліндра. Додаткова корисна роль роздільних пластин (спліттерів) полягає в придушенні вібрацій на поверхні вихорів, що відірвалися від циліндру [8].

В дослідах на однорядному пучку циліндрів використовувались 3 розміри роздільних пластин: $L_p=25$ мм, $L_p=67$ мм, $L_p=84$ мм. Роздільчі пластини закріплювались в пучку циліндрів за одним середнім або за трьома середніми циліндрами з п'яти. При цьому вимірювався перепад тиску на пучку.

Результати вимірювань зведені в таблицю 1. Ефект зменшення опору пучка спостерігається у випадку, коли довжина роздільної пластини достатня для того, щоби розділити бодай один вихор в стежці Кармана (таблиця 1). Подібні ефекти описані в роботах Інститута гідромеханіки НАН України [8]. Збільшення кількості роздільних пластин також позитивно впливає на зменшення опору пучка циліндрів.

Як видно з таблиці 1, найбільший опір спостерігається у циліндрів з гладкою поверхнею. Найкращий результат показали найдовші з розглянутих роздільних пластини ($L_p=84$ мм)

Висновки

Комп'ютерне моделювання поперечного обтікання циліндра дало можливість з'ясувати причину виникнення вихорів, які утворюються при обтіканні циліндра і оцінити їх вплив на теплообмін і гідравлічний опір пучка циліндрів.

Для однорядного пучка циліндрів проаналізовано 3 способи впливу на теплообмін і гідродинаміку: 1 – утворення спіральної канавки з прямокутним перерізом на зовнішній поверхні циліндра, 2 – застосування спіральної канавки з овальним перерізом на зовнішній поверхні циліндра, 3 – встановлення роздільної пластини (спліттера) на задній поверхні циліндра.

Показано, що виходячи зі значень фактора аналогії Рейнольдса FAR , канавки з кроком 40 мм забезпечують збільшення тепловіддачі більше ніж в 2,5 рази в той час, коли газодинамічний опір пучка зменшується на 49 %. Трохи гірші показники у циліндрів з канавками з кроком 10 мм – при цьому зростання теплообміну досягало 96%, а зменшення газодинамічного опору – 16%. Порівняння виконувалось при $Re = 14500$. В цілому, циліндри з овальним перерізом канавок мають переваги над циліндрами, на поверхнях яких виконані канавки з прямокутним поперечним перерізом.

Табл. 1. Вплив роздільних пластин (спліттерів) на гідравлічний опір пучка циліндрів

	Розмір роздільної пластини, L_p мм	Кількість роздільних пластин	Перепад тиску, Па	Кількість перекритих вихорів	Тип калориметра
1		0	38		Smooth
2	25	1	26		SPI-20
3	67	1	24		SPI-20
4	84	1		1	SPI-20
5		0	39		Smooth
6	25	2	25		SPI-20
7	67	2	24		SPI-20
8	84	2	22	1	SPI-20
9		0	42		Smooth
10	25	3	23		SPI-20
11	67	3	21		SPI-20
12	84	3	20	1	SPI-20

3 Показано, що встановлення на кормовій твірній циліндра роздільної пластини (спліттера), помітно зменшує опір пучка. Використовувались 3 типи пластин довжиною $L_p = 25$ мм, 67 мм, 84 мм. Навіть одна пластина, яка була встановлена на середній циліндр, дещо зменшувала опір пучка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Коваленко Г.В. Мейрис А.Ж. Сравнение различных способов интенсификации теплообмена на цилиндрических поверхностях. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013.3/12 (63). С.58 – 60.
2. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости.// Вильнюс. «МОК-СЛАС» 1979. - 235 с.
3. Мигай В.К., Фирсова Э.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пучков труб. Ленинград. Издательство «НАУКА» 1986.195 с.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Издательство «Наука», Москва, 1969. 742 с.

5. Халатов А.А., Коваленко Г.В., Мулярчук М.А. Теплоотдача при поперечном обтекании потоком воздуха однорядного пучка цилиндров со спиральными канавками разного поперечного перерізу. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. Том 45. №3. С. 5-9.

6. Манеев А.П., Терехов В.И. Аэродинамика и теплообмен дымовых труб. – АНО Издательский Дом «Научное обозрение», 2017. –226 с.

7. Халатов А.А., Коваленко Г.В. Применение ледяных калориметров для исследования теплоотдачи поверхностей, формированных углублениями. Промышленная теплотехника. 2008. 30.№2. С.5-12.

8. Вовк И.В., Малюга В.С. Генерация автоколебаний при обтекании цилиндра с плоским сплиттером.

Доповіді Національної академії наук України. 2017. № 11. С.30-36.

THE FEATURES OF HEAT EXCHANGE AND HYDRODYNAMICS WHEN AIR FLOWS AROUND BEAMS OF CYLINDERS

A.A.Khalatov¹, G.V.Kovalenko², M.A.Mulyarchuk³

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

¹*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of the Department, Artem.khalatov1942@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>*

²*PhD, Senior Researcher, gkliashkova5@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1789-6918>*

³*Junior researcher, mariyamul997@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1789-3056>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.1>

The purpose of the work is to evaluate various methods for intensifying heat transfer when air flows around bundles of cylinders while possibly minimizing pressure losses.

The results of experimental and theoretical studies of transverse air flow around a homogeneous bundle of cylinders are presented. The patterns of changes in the characteristics of heat transfer and aerodynamic resistance of a given cylinder bank under the conditions under consideration are analyzed. Based on computer modeling, the role of vortex structures in intensifying the heat transfer process is assessed. Data are presented on the effect of spiral grooves on the surface of the cylinders on the heat transfer coefficient and pressure loss. It is shown that the cross-section of spiral grooves also has a significant impact on the analyzed characteristics, while the oval cross-section leads to a greater intensification of heat transfer compared to grooves with a rectangular cross-section. It is noted that the sharpness of the edges plays a significant role when air exits the groove onto the surface of the cylinder. The results of experimental studies on the role of separating plates (splitters) on the aft surface of the cylinders are considered. It is shown that the presence, length and number of plates have a significant impact on the aerodynamic drag of the cylinder bank.

Bibl. 8, Fig. 5, table 1.

1. Khalatov A.A., Kovalenko G.V. Meiris A.Zh. Comparison of different methods for intensifying heat transfer on cylindrical surfaces. Eastern European Journal of Advanced Technologies. 2013.3/12 (63). C.58 – 60. (in Rus).

2. Zhukauskas A., Zhugzhda I. Heat transfer of a cylinder in a transverse fluid flow. Vilnius. "MOKSLAS". 1979.- 235 p. (in Rus).

3. Migay V.K., Firsova E.V. Heat transfer and hydraulic resistance of pipe bundles. Leningrad. Publishing house "SCIENCE". 1986. 195 p. (in Rus).

4. Schlichting G. Boundary Layer Theory. Moscow Publishing house "SCIENCE" 1969.-742 p. (Rus).

5. Khalatov A.A., Kovalenko G.V., Mulyarchuk M.A. Heat transfer during transverse air flow around a single-row bundle of cylinders with spiral grooves of different cross-sections. Thermal physics and thermal energy. 2023. Volume 45. No. 3. P. 5-9. (in Ukr).

6. Maneev A.P. Terekhov V.I. Aerodynamics and heat transfer of chimneys. ASS Publishing House "Scientific Review", 2017. –226 p. (in Rus).

7. Khalatov A.A., Kovalenko G.V. Application of ice calorimeters to study the heat transfer of surfaces formed by depressions. Industrial heating engineering. 2008 30.№2. P.5-12.(in Rus).

8. Vovk I.V., Malyuga V.S. Generation of self-excited oscillations of the flow past a cylinder with a flat splitter plate. Dopovidi. Nacionalnoi Akademii nauk Ukrainy. 2017. № 11. P. 30-36. (in Rus).

Отримано 05.01.2024

Received 05.01.2024

Прийнято до друку 15.02.2024

Accepted for publication 15.02.2024

УДК 532.536

ВПЛИВ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ НА ДЕТОНАЦІЮ У РЕАЛЬНОМУ ГАЗІ

Авраменко А.О., член-кореспондент НАН України, Ковецька М.М., канд. техн. наук,
Кондратьєва О.О., канд. техн. наук, Скицько О.І., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.2>

У роботі представлені результати аналізу динаміки течії реального газу через детонаційну хвилю. Показано вплив тепловиділення та термодинамічних властивостей газу Ван дер Ваальса на параметри процесу детонації.

The paper presents the results of an analysis of the dynamics of real gas flow through a detonation wave. The influence of heat release and thermodynamic properties of van der Waals gas on the parameters of the detonation process is shown.

Бібл. 14, рис. 1.

Ключові слова: Теплообмін, газ Ван дер Ваальса, детонація, ударна хвиля.

a – швидкість звуку;
 c_p – теплоємність при постійному тиску;
 c_v – теплоємність при постійному об'ємі;
 h – ентальпія;
 k – показник ізоентропи;
 p – тиск;
 q – тепловий потік;

$\mathcal{R}$ – універсальна газова постійна;
 T – температура;
 V – швидкість;
 ρ – густина.

Індекси:

1 – параметри до ударної хвилі;
2 – параметри після ударної хвилі.

Вивчення процесів детонації в газових середовищах становить інтерес для авіаційної, аерокосмічної та вугледобувної галузей промисловості, водневої енергетики [1]. В умовах високого тиску при проходженні детонаційної хвилі необхідно враховувати рівняння стану реального газу, ефекти ендотермічності та екзотермічності [2]. У роботі [2] проаналізовано стійкість ударних хвиль у газі Ван дер Ваальса, показано вплив тепловиділення на стійкість ударної хвилі. Вплив параметрів реального газу на критичні умови ініціювання детонації в нестационарному потоці розглянуто у роботі [3]. Даний простий метод оцінки впливу властивостей реального газу на ініціювання детонації в умовах високого тиску. В роботі [4] представлені результати дослідження аномальних хвиль у поступовій динаміці детонації неідеального газу. Показано вплив параметрів рівняння стану Ван-дер-Ваальса на швидкість реакції та на швидкість ударної хвилі.

Результати аналізу поширення сильної ударної хвилі в неідеальному газі, що обертається, з азимутальним магнітним полем представлені в роботах [5-7]. Показано вплив зміни параметра неідеальності

газу, показника адіабати, числа Маха та азимутальної швидкості навколишнього середовища на силу ударної хвилі та параметри потоку. У роботі [8] досліджено вплив реального газу на стійку планарну детонацію у суміші водню з повітрям за підвищеного тиску. Показано, що рівняння стану реального газу та відповідні термодинамічні функції збільшують швидкість Чепмена-Жуге, але знижують температуру після удару порівняно з моделлю ідеального газу. Результати дослідження поширення ударних хвиль у не ідеальному газі представлені у роботах [9,10]. Показано вплив параметрів неідеальності газу Ван дер Ваальса на інтенсивність тепломасообмінних процесів під час проходження фронту ударної хвилі. Дослідження динаміки детонаційних хвиль реальних газів сприяють кращому розумінню фізики процесу детонації та розробці засобів управління процесом детонації.

Метою роботи є теоретичне дослідження процесу детонації в газі Ван-дер-Ваальса, визначення впливу рівняння стану газу на параметри детонації та порівняння результатів для реального та ідеального газу.

Розглянемо проходження потоку реального газу через ударну хвилю. Різка зміна параметрів течії під час проходження через ударну хвилю сприймається як розрив цих параметрів (до і після ударної хвилі). Функціональна залежність параметрів течії перед ударною хвилею або хвилею горіння (детонація) та за ударною хвилею в одновимірному потоці рідини називається умовами Ренкіна-Гюгоніо, або умовами стрибка параметрів потоку при проходженні ударної хвилі [11–13]. Динаміка перебігу реального газу через пряму детонаційну хвилю описується системою рівнянь Ренкіна-Гюгоніо [11–13], що включає закон збереження маси

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2, \quad (1)$$

закон збереження імпульсу

$$p_1 + \rho_1 V_1^2 = p_2 + \rho_2 V_2^2, \quad (2)$$

закон збереження повної ентальпії

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} + q = h_2 + \frac{V_2^2}{2}. \quad (3)$$

Тут q визначає енергію, що відводиться ($q < 0$) або що виділяється ($q > 0$) на одиницю маси в результаті відповідного процесу, що відбувається при проходженні ударної хвилі. Система рівнянь (1) – (3) замикається рівнянням стану газу Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - \beta) = \left(p + a\rho^2\right)\left(\frac{1}{\rho} - \beta\right) = \Re T, \quad (4)$$

де a і β – константи Ван-дер-Ваальса, $v = 1/\rho$ – питомий об'єм. Параметр a характеризує додатковий тиск, а параметр β характеризує додатковий об'єм простору, що не заповнений молекулами. Використовуючи рівняння (4), можна отримати співвідношення для ентальпії

$$h = c_v T - a\rho + \frac{p}{\rho} = \frac{c_v}{\Re} \left(p + a\rho^2\right)\left(\frac{1}{\rho} - \beta\right) - a\rho + \frac{p}{\rho}, \quad (5)$$

Тепер закон збереження повної ентальпії (3) з урахуванням рівняння (5) можна подати у вигляді

$$\frac{c_v}{\Re} \left(p_1 + a\rho_1^2\right)\left(\frac{1}{\rho_1} - \beta\right) + \frac{V_1^2}{2} - a\rho_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + q =$$

$$= \frac{c_v}{\Re} \left(p_2 + a\rho_2^2\right)\left(\frac{1}{\rho_2} - \beta\right) + \frac{V_2^2}{2} - a\rho_2 + \frac{p_2}{\rho_2}. \quad (6)$$

Далі перетворимо рівняння (2) з урахуванням рівняння (1), в результаті отримаємо

$$p_1 - p_2 = \rho_1 V_1 (V_2 - V_1). \quad (7)$$

Помножимо це рівняння (7) на співвідношення

$$\frac{V_2 + V_1}{\rho_1 V_1} = \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}. \quad (8)$$

В результаті отримаємо

$$(p_1 - p_2) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right) = V_2^2 - V_1^2. \quad (9)$$

Далі з рівняння (6) випливає що

$$V_2^2 - V_1^2 = \frac{2k}{k-1} \left[\left(p_1 + a\rho_1^2\right)\left(\frac{1}{\rho_1} - \beta\right) - \left(p_2 + a\rho_2^2\right)\left(\frac{1}{\rho_2} - \beta\right) \right] + 2q. \quad (10)$$

Порівнюючи рівняння (9) та (10), можна отримати

$$\left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) \left(1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) = \frac{2k}{k-1} \left[(1+A)(1-B) - \right. \quad (11)$$

$$\left. - \left(\frac{p_2}{p_1} + A \frac{\rho_2^2}{\rho_1^2}\right) \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - B\right) \right] + Q.$$

де

$$A = \frac{a\rho_1^2}{p_1}, \quad B = \rho_1 \beta, \quad (12)$$

$$Q = 2q \frac{\rho_1}{p_1} = 2kq \frac{\rho_1}{kp_1} = 2 \frac{kq}{a_1^2}, \quad (13)$$

$$k = c_p / c_v \quad (14)$$

Тут k – показник ізоентропічного розширення. Рішення рівняння (11) щодо стрибка тиску p_2/p_1 дає

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{((1 + 2A(1 - B) - 2B)k + 1)\frac{\rho_2}{\rho_1} - (k - 1) + 2Ak\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2\left(B\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1\right) + Q\frac{\rho_2}{\rho_1}(k - 1)}{(k + 1) - (k(2B + 1) - 1)\frac{\rho_2}{\rho_1}}. \quad (15)$$

У безрозмірній формі це рівняння запишеться у вигляді

$$P = \frac{\sigma(A(1 - B) - B) + \gamma - R^{-1} + \sigma AR(BR - 1) + Q}{\gamma R^{-1} - 1 - \sigma B}, \quad (16)$$

де

$$P = \frac{p_2}{p_1}, \quad R = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad \gamma = \frac{k + 1}{k - 1}, \quad \sigma = \frac{2k}{k - 1}. \quad (17)$$

Рівняння (15) та (16) описують модифіковане рівняння Гюгоніо для детонації з урахуванням теплофізичних властивостей газу Ван дер Ваальса та тепловиділення. Для ідеального газу ($A=B=0$) та потоку без підведення енергії рівняння (16) зводиться до

$$P = \frac{\gamma - R^{-1}}{\gamma R^{-1} - 1} = \frac{\gamma - S}{\gamma S - 1}, \quad (18)$$

що є добре відомою адіабатою Гюгоніо для звичайних газів [14].

Рівняння (16) має асимптоту для граничного збільшення густини ρ_2/ρ_1 при проходженні ударної хвилі, виражену як

$$R = \frac{\gamma}{1 + \frac{2k}{k-1}B} = \frac{\gamma}{1 + \sigma B}. \quad (19)$$

Для умови, що визначається формулою (19) стрибок тиску (16) стає нескінченним. Для ідеального газу ($A=B=0$) рівняння (19) для стрибка густини зводиться до залежності

$$R = \gamma. \quad (20)$$

Отже повітря в умовах, коли його можна розглядати як ідеальний газ ($k = 1,4$), при проходженні через ударну хвилю не може збільшити свою густину більш ніж у шість разів. Рівняння (19) показує, що асимптота граничного збільшення густини зміщується в область менших значень ρ_2/ρ_1 зі збільшенням значення параметра $\rho_1\beta$. Як відомо, параметр β описує додатковий обсяг простору, що не заповнений молекулами. Отже збільшення цього обсягу призводить до того, що відстань між молекулами збільшується, а концентрація молекул зменшується. Тому зі зростанням тиску зростання густини сповільнюється.

З рівняння (19) видно, що параметр A ніяк не впливає на положення асимптоти граничного збільшення густини. Цей параметр характеризує додатковий тиск, що виникає у пристінному шарі. У розглянутій задачі взаємодія з твердою поверхнею відсутня. Тому очевидно, що цей фактор не впливає на положення асимптоти граничного збільшення густини.

У роботі [9] рівняння для граничного стиснення було отримано у наближенні

$$p \gg \frac{\alpha}{v^2}, \quad v \gg \beta. \quad (21)$$

Це рівняння має вигляд

$$R = \frac{\gamma}{1 + \frac{2}{k-1} B}. \quad (22)$$

Як видно використання наближення (21) дещо послаблює вплив параметра B на межу стиснення. Для одноатомних газів це ослаблення становить $k = 5/3$, а двоатомних газів $k = 7/5$.

Результати розрахунків за рівнянням (16) подано на рис. 1. Також на цьому рисунку нанесено класичну ізоентропу Пуассона $P = R^k = S^{-k}$ (крива 4).

З малюнка випливає, що стрибок тиску при проходженні детонаційної хвилі в газі Ван дер Ваальса більше, ніж в ідеальному газі для великих значень R ($S < 0.5$, криві 1 і 4). Збільшення тепловиділення (Q) призводить до еквідистантного підняття кривої Гюгоніо порівняно з випадком $Q=0$.

Висновки

Розглянуто течію реального газу через плоску детонаційну хвилю. Отримано модифіковане рівняння Ренкіна-Гюгоніо для визначення динаміки

зміни параметрів потоку газу Ван-дер-Ваальса під час проходження ним детонаційної хвилі.

Отримано рівняння граничного збільшення густини газу при проходженні детонаційної хвилі. Показано вплив параметрів A та B у рівнянні стану газу Ван дер Ваальса на асимптоту граничного збільшення густини. З рівняння випливає, що асимптота граничного збільшення густини зміщується в область менших значень ρ_2/ρ_1 зі збільшенням значення параметра B , а параметр A не впливає на положення асимптоти граничного збільшення густини.

Показано вплив тепловиділення та термодинамічних властивостей газу на стрибок тиску в детонаційній хвилі. Стрибок тиску в газі Ван дер Ваальса більше, ніж у випадку ідеального газу. Розрахунки показали, що збільшення параметра A уповільнює зростання тиску в хвилі детонації, а збільшення параметра B його посилює. Збільшення тепловиділення призводить до збільшення стрибка тиску, еквідистантного підняття кривої Гюгоніо в порівнянні з випадком без тепловиділення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Urzay J. Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. Annual Review of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 50:593-627. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>

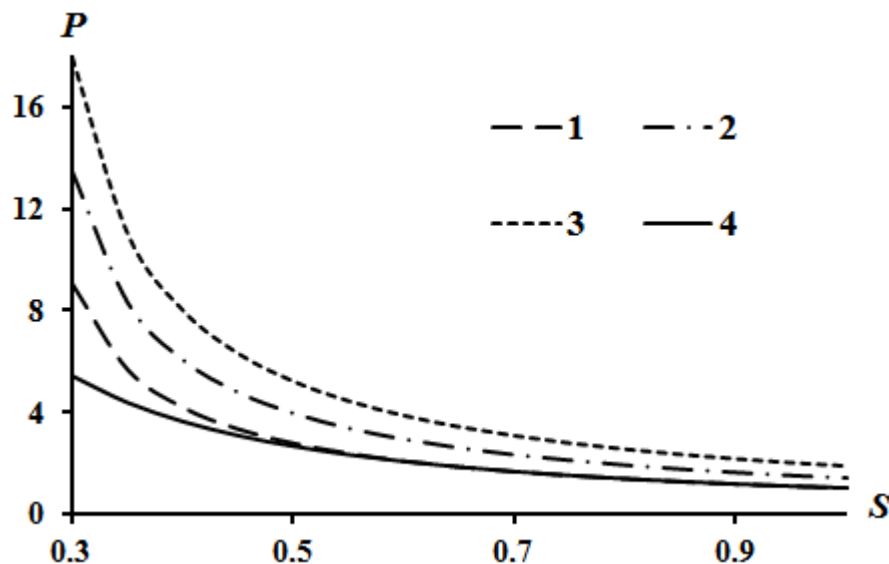


Рис. 1. Вплив тепловиділення Q на криву Гюгоніо при $A=0.1$; $B=0.05$; 1- $Q=0$; 2- $Q=3$; 3- $Q=6$; 4-ізоентропа Пуассона

2. Calvo-Rivera A., Huete C., Velikovich A.L. The stability of expanding reactive shocks in a van der Waals fluid. *Physics of Fluids*. 2022. 34, 046106. doi: 10.1063/5.0087073
3. Weng Z., Mével R., Law C.K. On the critical initiation of planar detonation in Noble-Abel and van der Waals gas Author links open overlay panel. *Combustion and Flame*. 2023. Vol. 255, 112890 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112890>
4. Pielemeier K.R., Powers J.M. Anomalous Waves in Non-Ideal Detonation Dynamics. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA 2022-0396. Session: Ignition, Detonation, and Supersonic Combustion. <https://doi.org/10.2514/6.2022-0396>
5. Chauhan S., Singh D., Arora R. Similarity solution for isothermal flow behind the magnetogasdynamic cylindrical shock wave in a rotating non-ideal gas with the effect of gravitational field. *Physics of Fluids*. 2022. 34(11). DOI: 10.1063/5.0123031
6. Nath G., Devi A.A. self-similar solution for unsteady adiabatic and isothermal flows behind the shock wave in a non-ideal gas using Lie group analysis method with azimuthal or axial magnetic field in rotating medium. *European Physical Journal Plus*. 2021. 136(5):477 DOI:10.1140/epjp/s13360-021-01476-y
7. Yadav S., Singh D., Arora R. Lie group of invariance technique for analyzing propagation of strong shock wave in a rotating non-ideal gas with azimuthal magnetic field. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2022. 45(1) DOI:10.1002/mma.8486
8. Weng Z., Méve R. Real gas effect on steady planar detonation and uncertainty quantification. *Combustion and Flame*. 2022. Vol. 245, 112318 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112318>
9. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P. Shock Wave in van der Waals Gas. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*. 2022. 47(3). P. 255 – 267. doi: <https://doi.org/10.1515/jnet-2021-0099>
10. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Y. Y. Self-similar analysis of gas dynamics for van der Waals gas in slipping flow after normal shock wave. *Physics of Fluids*. 2023. 35, 026110 <https://doi.org/10.1063/5.0138331>
11. Rankine W.J.M.. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1870. 160. 277–288.
12. Hugoniot H. Mémoire sur la propagation des mouvement dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (première partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part)], J. l'École Polytechnique (in French) 1887. 57. 3–97. See also:
13. Hugoniot H. Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (deuxième partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (second part)], J. l'École Polytechnique, 1889. 58. 1–125.
14. Loitsyanskii L.G. *Mechanics of Liquids and Gases* (International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics), 2nd ed., Elsevier Ltd, 1966.

INFLUENCE OF HEAT GENERATION ON
DETONATION IN REAL GAS

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

¹Corresponding Member of the NAS of Ukraine, ID
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2416-3512>

²Dr Sci, (Engin.) <https://orcid.org/0000-0003-2454-9113>

³PhD (Engin.)

⁴PhD (Engin.)

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.2>

The study of detonation processes in gaseous media is of interest for the coal mining, aviation, aerospace industries, and hydrogen energy. Under high pressure conditions during the passage of a detonation wave, it is necessary to take into account the equation of state of a real gas, the effects of endothermicity and exothermicity.

The paper considers the flow of real gas through a plane detonation wave. A modified Rankine-Hugoniot equation has been obtained to describe the dynamics of changes in the parameters of a van der Waals gas flow when it passes through a detonation wave.

An equation for the maximum increase in gas density during the passage of a detonation wave is obtained. The influence of parameters A and B in the van der Waals gas equation of state on the asymptote of the maximum increase in density is shown. It follows from the equation that the asymptote of the maximum increase in density shifts to the region of lower values of p_2/p_1 with an increase in the value of parameter B, and parameter A does not affect the position of the asymptote of the maximum increase in density.

The influence of heat release and thermodynamic properties of gas on the pressure jump in the detonation wave is shown. Pressure jumps in a van der Waals gas are greater than in the case of an ideal gas. Calculations have shown that an increase in parameter A slows down the increase in pressure in the detonation wave, and an increase in parameter B enhances it. An increase in heat release leads to an increase in the pressure jump, to an equidistant increase in the Hugoniot curve compared to the case without heat release.

References 14, figures 1.

Key words: Heat transfer, van der Waals gas, detonation, shock wave.

1. *Urzay J.* Supersonic combustion in air-breathing propulsion systems for hypersonic flight. Annual Review of Fluid Mechanics. 2018. Vol. 50:593-627. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122316-045217>

2. *Calvo-Rivera A., Huete C., Velikovich A.L.* The stability of expanding reactive shocks in a van der Waals fluid. Physics of Fluids. 2022. 34, 046106. doi: 10.1063/5.0087073

3. *Weng Z., Mével R., Law C.K.* On the critical initiation of planar detonation in Noble-Abel and van der Waals gas Author links open overlay panel. Combustion and Flame. 2023. Vol. 255, 112890 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2023.112890>

4. *Pielemeier K.R., Powers J.M.* Anomalous Waves in Non-Ideal Detonation Dynamics. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA 2022-0396. Session: Ignition, Detonation, and Supersonic Combustion. <https://doi.org/10.2514/6.2022-0396>

5. *Chauhan S., Singh D., Arora R.* Similarity solution for isothermal flow behind the magnetogasdynamic cylindrical shock wave in a rotating non-ideal gas with the effect of gravitational field. Physics of Fluids. 2022. 34(11). DOI: 10.1063/5.0123031

6. *Nath G., Devi A.* A self-similar solution for unsteady adiabatic and isothermal flows behind the shock wave in a non-ideal gas using Lie group analysis method with azimuthal or axial magnetic field in rotating medium. European Physical Journal Plus. 2021. 136(5):477 DOI:10.1140/epjp/s13360-021-01476-y

7. *Yadav S., Singh D., Arora R.* Lie group of invariance technique for analyzing propagation of strong shock wave in a rotating non-ideal gas with azimuthal magnetic field. Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2022. 45(1) DOI:10.1002/mma.8486

8. *Weng Z., Méve R.* Real gas effect on steady planar detonation and uncertainty quantification. Combustion and Flame. 2022. Vol. 245, 112318 <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112318>

9. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Dmitrenko N.P.* Shock Wave in van der Waals Gas. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics. 2022. 47(3). P. 255 – 267. doi: <https://doi.org/10.1515/jnet-2021-0099>

10. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Y.Y.* Self-similar analysis of gas dynamics for van der Waals gas in slipping flow after normal shock wave. Physics of Fluids. 2023. 35, 026110 <https://doi.org/10.1063/5.0138331>

11. *Rankine W.J.M.* On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1870. 160. 277–288.

12. *Hugoniot H.* Mémoire sur la propagation des mouvement dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (première partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (first part)], J. l'École Polytechnique (in French) 1887. 57. 3–97. See also:

13. *Hugoniot H.* Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (deuxième partie) [Memoir on the propagation of movements in bodies, especially perfect gases (second part)], J. l'École Polytechnique, 1889. 58. 1–125.

14. *Loitsyanskii L.G.* Mechanics of Liquids and Gases (International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics), 2nd ed., Elsevier Ltd, 1966.

Отримано 18.01.2024

Received 18.01.2024

Прийнято до друку 15.02.2024

Accepted for publication 15.02.2024

УДК: 66.08 : 532.5: 664.1 : 664.8 : 66.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДІВЕ-ОБРОБКИ І БІОПОЛІМЕРНИХ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОДОВИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ ЯК ОБ'ЄКТІВ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ

Турчина Т.Я.¹, канд. техн. наук, Авдєєва Л.Ю.², докт. техн. наук, Макаренко А.А.³, канд. техн. наук, Козак М.М.⁴

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

¹старший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²провідний науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

³старший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

⁴молодший науковий співробітник, tbds_itf@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2589-4998>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.3>

В статті представлено результати досліджень впливу роторно-пульсаційних апаратів двох типів та фізико-хімічних і морфологічних особливостей плодово-овочевої сировини на процес диспергування для отримання водних суспензій із заданою дисперсністю і структурно-механічними властивостями. Наведені характеристики отриманих в результаті диспергування суспензій одержаних в результаті гідромеханічної обробки. За результатами експериментальних і аналітичних досліджень визначено тип роторно-пульсаційного апарату для проведення гідромеханічної обробки плодових мас та визначено раціональні умови введення структуруючих біополімерних добавок.

The article presents the results of research on the impact of two types of rotor-pulsation apparatus and the physicochemical and morphological characteristics of fruit and vegetable raw materials on the dispersion process for obtaining aqueous suspensions with a specified particle size distribution and structural-mechanical properties. The characteristics of the obtained suspensions resulting from hydro-mechanical processing are provided. Based on the results of experimental and analytical studies, the type of rotor-pulsation apparatus for conducting hydro-mechanical processing of fruit masses is determined, and the rational conditions for introducing structuring biopolymeric additives are identified.

Бібл. 13, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: плодова сировина, гідромеханічна обробка, біополімерна добавка, патока, гетерогенна система, дисперсність.

Постановка проблеми. У технологіях розпилювального сушіння підготовка плодової сировини до сушіння має визначальне значення, оскільки саме на цій стадії закладаються потенційні властивості рідинної гетерогенної системи і характеристики висушеного в подальшому порошку. Тому при виборі обладнання для одержання плодової гетерогенної системи із заданими характеристиками, зокрема, дисперсними, і достатньою для подачі в сушарку текучістю важливо враховувати особливості фізико-хімічного складу і будови плодів, що підлягають переробці [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ключовими факторами, що визначають ефективність розпилювального сушіння, є характеристики висушених порошоків. А вони цілком залежать від фізико-хімічних

характеристик сировинного матеріалу, у т.ч. його структуроутворюючого потенціалу, ступеня дисперсності частинок нерозчинних фракцій та реологічних властивостей. Реологія плодової гетерогенної системи має забезпечити формування сферичної форми крапель в момент відриву їх від кромки дискового розпилювача, а скорегований на стадії підготовки до сушіння структуроутворюючий потенціал висушеного матеріалу – міцну термостійку структуру її поверхневої кірочки з паропровідними властивостями, достатніми для миттєвого їх висушування [1, 3, 4].

Проблеми формо-, структуроутворення та зміцнення поверхневого шару часток при розпилювальному сушінні плодових гетерогенних систем, що містять біополімери із властивостями, характерними

для колоїдних розчинів, доцільніше корегувати саме на стадії їх підготовки до сушіння. При цьому слід враховувати відмінності будови різних видів плодів за формою клітин та щільністю їх пакування, міцність їх клітинних оболонок і здатність до руйнування, вміст клітинної води, білків, полісахаридів та ін. розчинних та нерозчинних речовин. Крім того, від умов гідромеханічної обробки плодів фізико-хімічний склад, стан рідкої фази щойно одержаної гетерогенної системи та її реологічні властивості можуть змінюватись в залежності від кількості вилученого соку та речовин, що перейшли у розчинний стан в результаті деструкції їх фізичних структур [2, 5-7] Зокрема:

- вуглеводи, що звільняються з клітинних та міжклітинних об'ємів в результаті деструкції структурних систем, переходять у розчинний стан на 3-34%;

- вітамін С може бути втрачений на 20-70%, однак, це значно менше за втрати при бланшуванні, протиранні та стерилізації;

- білки, інулін та ін. речовини частково переходять у розчинний стан;

- протопектин, що входить до складу клітин, розщеплюється і переходить у розчинний стан на 50-100%

Більш того, ступінь вилучення усіх цих речовин з плодів структур під час гідромеханічної обробки (деструкції) і переходу у розчинний стан обумовлюється певною природною кислотністю середовища [8]. З іншого боку підвищений вміст органічних кислот у плодів середовищах є основним з чинників адгезійних явищ в розпилювальних сушарках, що вимагає застосування біополімерних добавок для корегування показників рН.

Відомо, що в робочих органах сучасних роторно-пульсацийних апаратів реалізується метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) - ефективний інструмент інтенсифікації процесів змішування, диспергування, екстракції і гомогенізації дисперсних середовищ з плодової сировини, який використовується у різних технологіях, у т.ч. розпилювального сушіння [9]. Тому вибір такого апарату для підготовки плодової сировини до сушіння вимагає розуміння впливу методу ДІВЕ на її структурні системи.

Механізми ДІВЕ умовно поділяють на жорсткі і м'які без визначення чіткої межі між ними, зокрема перші ефективні при руйнуванні і подрібненні плодів структур до утворення частинок мікро- та нанорозмірів. Вважається, що на подрібнення дуже малих дисперсних часток витрачається незрівнянно більше енергії, ніж на руйнування великих часток [9, 10].

В залежності від складу гетерогенної системи той чи інший механізм ДІВЕ, що діє в роторно-пульсацийному апараті, є домінуючим. Так, при обробці нев'язких мас переважають кавітаційний, пульсацийний, вихровий механізми, а високов'язких гетерогенних систем - зсувних напружень. Виходячи з фізико-хімічних особливостей плодової сировини, обирають один роторно-пульсацийний апарат певної конструкції або комплект з 2-х таких апаратів різних конструкцій [10].

Як показує досвід [6, 7, 11], деякі проблеми плодів гетерогенних систем лише ДІВЕ-обробкою без застосування біополімерних структуруючих добавок вирішити неможливо:

- низька текучість при вмісті сухих речовин 5-14%, характерна для неньютонівських рідких мас

- висока в'язкість, яка під час гідромеханічної обробки може різко зростати за рахунок переходу гелеутворюючих речовин зі структур плодів у розчинний стан, наприклад, пектинів;

- здатність дисперсних частинок до агломерації або їх груп до самоорганізації в асоціати розміром ≥ 350 -600 мкм призводить до відкладень на стінках сушильних камер через нерівномірність висушування крапель полідисперсного складу у факелі розпилю;

- наявність органічних кислот (9-17%) у високовуглеводному продукті (≥ 70 -80%), показники кислото середовища (рН=2,5-3,7) і їх нестабільність у часі визначає належність багатьох плодів гетерогенних систем до складних термопластичності та адгезійності матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння;

- термо- та ксеростврадливість фрагментів клітковини, волокон, кісточок насіння та ін. біоактивних речовин плодової сировини при сушінні розпилюванням, свідченням чого є потемніння і висока гігроскопічність порошку, погіршення органолептичних та структурно-механічних характеристик, що вимагає застосування біополімерних структуруючих добавок.

Структуруючі добавки з натуральної природної сировини стали невід'ємними засобами корегування властивостей харчових середовищ, в т.ч. дитячих та дієтичних [5, 12]. До них належать білки тваринного (наприклад, молочні, сироваткові) та рослинного (наприклад, соєві) походження, похідні крохмалевмісних продуктів: мальтодекстрин, циклодекстрин, крохмальна патока.

Крохмальна патока є добре розчинним у воді колоїдним біополімером з рН $\geq 4,6$, який широко використовується у фармацевтичній, харчовій (у

т.ч. дитяче харчування) та ін. галузях[1, 13]. Завдяки її буферним властивостям гальмуються небажані ферментативні і окислювальні процеси у гетерогенних системах, стабілізуються показники кислотності. За рахунок таких добавок, як нормально оцукрена патока, яка містить 55-60% термостійких декстринів ($T_{пл} > 145^{\circ}\text{C}$), плодів гетерогенні системи набувають термостійкості при сушінні і консервуванні [2, 3, 6].

Враховуючи близькі до закордонних аналогів (мальтодекстрину) характеристики, доступність, багатофункціональність та дієтичні якості, саме крохмальну патоку було використано у нашій роботі як коригуючого засобу текучості плодів гетерогенних систем на стадії підготовки до розпилювального сушіння.

Мета роботи полягала у дослідженні впливу ДІВЕ-обробки різних видів плодової сировини в роторно-пульсаційних апаратах двох типів та введених біополімерних добавок на характеристики одержаних плодів гетерогенних систем як об'єктів розпилювального сушіння.

Матеріали та методи. В дослідженнях використовувалося:

- плоди малини і полуниці, що перероблялись разом з кісточками насіння, а також абрикосів (без кісточок) згідно ДСТУ ISO 22000:2019 (ISO 22000:2018, IDT) «Системи управління безпечністю харчових продуктів. Вимоги до організацій харчового ланцюгу», що перероблялись у композиції з бланшованими плодами моркви, кількість якої у складі композицій складала $\leq 15\%$ від загальної маси сухих речовин, згідно ДСТУ 7035:2009 Морква свіжа. Технічні умови. (далі по тексту АМ-композиції)

- пюре свіжих томатів (далі по тексту томатне пюре) згідно ДСТУ 3246-95 Томати свіжі. Технічні умови.

В якості структуруючих добавок використовувались:

- крохмальна патока (далі по тексту патока) - в Україні виробляється у формі рідкого концентрату з вмістом сухих речовин 78% згідно з ДСТУ 4498:2005 Патока крохмальна. Технічні умови;

- концентрат сироваткового білка (далі по тексту КСБ) з вмістом білка $\geq 80\%$, одержаний методом ультрафільтрації підсирної сироватки згідно ДСТУ 4458:2005. Концентрати білкові молочні. Технічні умови.

Роторно-пульсаційні апарати (далі по тексту РПА) двох типів, на яких проводились дані дослідження у режимі рециркуляції плодів гетерогенних систем, відрізнялись, як показано в таблиці 1, за технічними і конструктивними характеристиками [10]. Дослідження проводились з фіксацією загального часу гідромеханічної обробки, температури гетерогенних систем до і після обробки та мікроструктурним аналізом їх дисперсного складу морфометричним методом за максимальним лінійним розміром частинок нерозчинних фракцій з використанням оптичної (мікроскоп МБІ-4У32) та цифрової техніки.

Масова частка сухих речовин плодів гетерогенних систем визначалась згідно з ДСТУ 7804:2015. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методика визначення сухих речовин або вологи.

Показники кислого середовища плодів гетерогенних систем визначались згідно ДСТУ ISO 1842:2013. Продукти плодоовочеві. Метод визначення рН (ISO 1842:1991, IDT)

Викладення основних результатів досліджень. ДІВЕ-обробкою ми називаємо гідромеханічну обробку плодів мас в умовах дії механізмів дискретно-імпульсного введення енергії, які реалізуються в РПА. Така ДІВЕ-обробка забезпечує приведення частинок нерозчинних фракцій фізичних структур плодів (клітковини, волокон, шкірок, кісточок насіння) до такого ступеня дисперсності, при якому досягається переважно в присутності декстринвмісної добавки достатній для подачі в розпилювальну сушарку дискового типу стан текучості плодової гетерогенної системи, який ми називаємо **нормалізованим**, а сам процес – **нормалізацією за дисперсним складом**.

Дослідження проводились на експериментальному стенді, наведеному на рис. 1, з фіксацією наступних

Таблиця 1. Технічні та конструктивні характеристики РПА, використаних у дослідженнях

Марка РПА	Тип апарату	Потужність, кВт	Продуктивність, кг/год	Міждисковий просвіт, мм	Міжциліндровий просвіт, мм	Кількість статорів/роторів, шт	Частота обертання ротора, об/хв.
АР-3000	дисково-циліндричний	3,0	500-3000	0,1	0,09	1/1	2880
БГ-3	циліндричний	5,5	400-500	-	0,5-0,8	2/1	3000

характеристик плодових мас до і після ДІВЕ-обробки і введення біополімерної структуруючої добавки: стану текучості, температури T_p , дисперсного складу гетерогенної системи (за $\delta_{\max}$) як критерія оцінки ефективності ДІВЕ-обробки, вмісту сухих речовин C_o та показників рН плодового середовища (табл. 1).

На відміну від ягід і томатного пюре (поставка від агрофірми-виробника) плоди абрикосів (без кісточок) разом з плодами бланшованої моркви перед завантаженням до приймальної ємності (3) піддавались попередньому подрібненню у шнековому пристрої (2). З включенням насоса (6) плодова маса і (через пару хвилин) разом із структуруючою біополімерною добавкою (або комплексом добавок) з приймальної ємності (3) спрямовувалась до РПА (5) в режимі рециркуляції до одержання однорідної гетерогенної системи заданого ступеня дисперсності, який для експериментальної розпилювальної сушарки з дисковим розпилювачем Ц-18 визначався за максимальним розміром мікрочастинок нерозчинних фракцій і складав $\delta_{\max} \leq 100-15 \text{ мкм}$.

Одержані в результаті ДІВЕ-обробки плодові маси без добавок за фізичним станом представляли собою високовологі (табл. 1) щільні нетекучі маси з аномальними реологічними властивостями, характерними для «неньютонівських» рідин. Введення до їх складу патоки як структуруючої біополімерної добавки сприяло не тільки збільшенню вмісту сухих речовин (табл. 1), а й покращенню текучості.

Ягідні композиції з малини і полуниці відрізнялись від інших досліджених гетерогенних систем найменшим, як показано в таблиці 2, вмістом сухих речовин (5-10%) і найбільшим вмістом органічних кислот. За таких показників рН (табл. 2) ягідних рідинних систем, характерних для кислих середовищ, вірогідність адгезійних явищ при їх подальшому розпилювальному сушінні була достатньо високою, що вимагало введення біополімерних структуруючих добавок для їх нейтралізації.

Як показано в таблиці 3, загальна кількість введених до ягідних композицій під час ДІВЕ-обробки біополімерних добавок складала 65-75%. При цьому

Таблиця 2. Характеристики плодових гетерогенних систем, що пройшли ДІВЕ-обробку без/з структуруючими добавками

Плодова сировина	Ступінь фракціонування	Без добавок		З патокою	
		рН	C_o , %	рН	$C_{\text{сусп}}$, %
Полуниця	Сік	2,7	5,0-7,0	4,2	16,0-18,0
Малина	пюре	3,0	7,0-10,0	4,1	18,0-27,0
Абрикоси з морквою	пюре	3,6	13,0-14,0	4,3	22,5-27,5
Томати	пюре	3,4	20,0	4,5	24,0-27,0

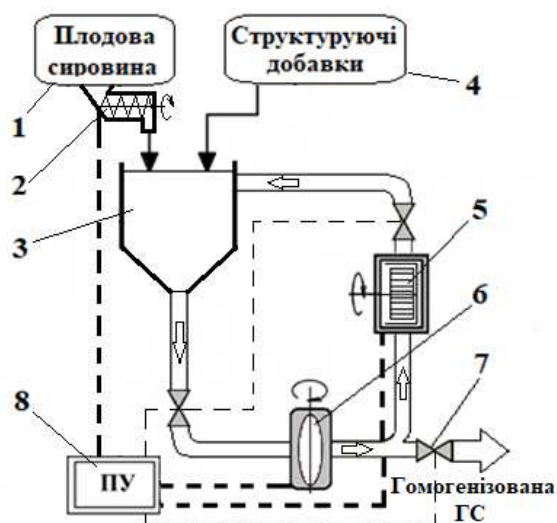


Рис. 1. Схема експериментального стенду ДІВЕ-обробки плодових мас в режимі рециркуляції:

1 – плодова сировина; 2 – шнекова подача плодової сировини; 3 – приймальна ємність; 4 – структуруючі добавки; 5 – РПА; 6 – насос; 7 – запірно-регулювальна апаратура; 8 – пульт управління

завдяки буферним властивостям патоки для підвищення і стабілізації показників рН на рівні $\geq 4,0$ (табл. 2) композицій та уникнення коагуляції білків сироватки у кислому середовищі соків та пюре, які подавалась до РПА, спочатку вводилась патока, а потім КСБ.

У досліді № 1 (табл. 3) введення до полуничного соку з $C_o=5,0\%$ під час ДІВЕ-обробки 78%-го концентрату патоки (50% від загальної маси сухих речовин) і порошкового КСБ (25% від загальної маси С.Р.) сприяло збільшенню вмісту сухих речовин до $C_{\text{сусп}}=16\%$ (табл. 2) та нейтралізації кислого середовища до значень $\text{pH}=4,2$.

У дослідях № 2-5 (табл. 3) введення біополімерних добавок до ягідних пюре також сприяло покращенню фізико-хімічних характеристик ягідних гетерогенних систем як об'єктів розпилювального сушіння. Показники кислого середовища ($\text{pH}=3,0-3,6$) нейтралізувались до значень $\text{pH}=4,1-4,5$ (табл. 2), що важливо було досягти на стадії підготовки їх до розпилювального сушіння для уникнення в подальшому адгезійних явищ в камері сушильної установки.

Експериментально встановлено, що більш ефективним в одержанні ягідних гетерогенних систем із заданими дисперсними характеристиками, що відповідають умовам ефективного процесу розпилювального сушіння подібних рідинних систем ($\delta_{\text{max}} \leq 100-150 \text{ мкм}$) (крива 1, рис. 2, а), виявився апарат циліндричного типу БГ-3 (№2-4, табл. 2). Так, за кривими $\delta_{\text{max}}=f(\tau)$ (рис. 2, а) заданий ступінь дисперсності гетерогенної системи в апараті БГ-3 досягався вже на 3-й хв., а на 5-й знижувався до $\delta_{\text{max}} \leq 80 \text{ мкм}$ при її нагріванні до $T_{\text{сусп}}=25^\circ\text{C}$ (крива 1, рис. 2, б).

В малиновій гетерогенній системі після обробки в апараті АР-3000 значення δ_{max} виявились у 4 рази більшими (крива 2, рис. 2, а) за ті ж значення після обробки в апараті БГ-3, що може бути пов'язано з конструктивними особливостями робочого органу апарату (набором статор/ротор) і меншою його потужністю (табл. 1). А через затримання в міждисківних просвітах і зазорах статора-ротора кісточок насіння малини її температура на 2-й і 5-й хв. зросла відповідно до 45°C і 55°C

Табл. 3. Кількість структуруючих добавок, введених до складу ягідних композицій в процесі їх ДІВЕ-обробки

№ досліду	Марка апарату	Вид сировини	СД - патока, %	КСБ, %
1.	БГ-3	Полуничний сік	50,0	25,0
2.		Полуничне пюре з кісточками насіння	60,0	-
3.		Полуничне пюре з кісточками насіння	42,0	29,0
4.		Малинове пюре з кісточками насіння	44,0	28,0
5.	АР-3000	Малинове пюре без кісточок насіння	75	-

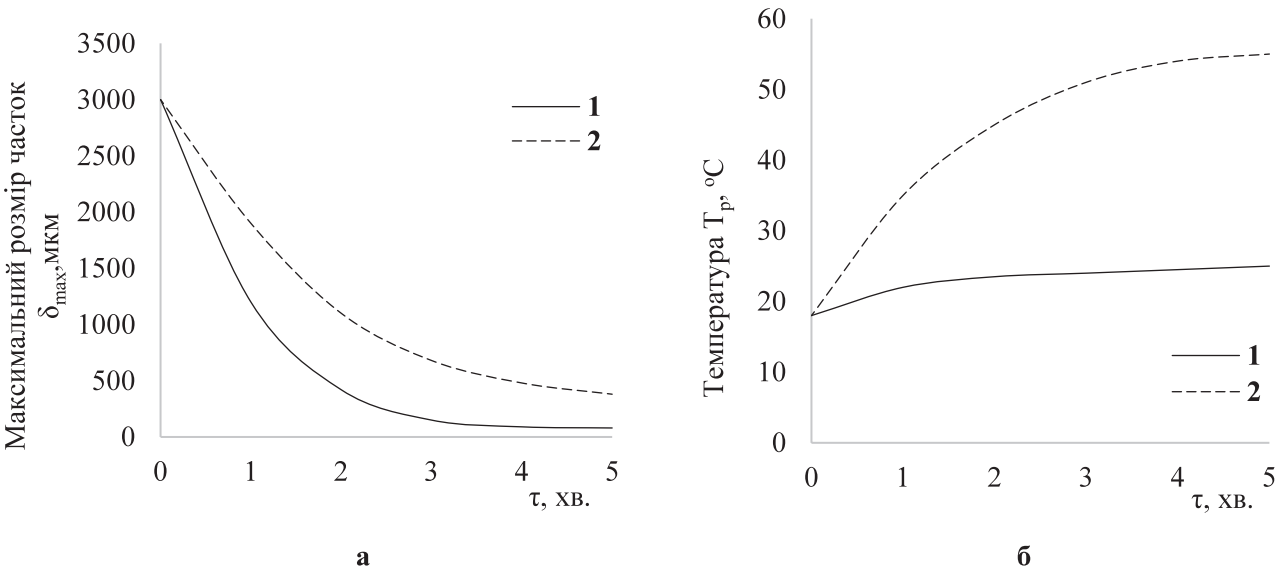


Рис. 2. Кінетичні залежності: а) ступеня дисперсності малинової гетерогенної системи і б) її температури від часу ДІВЕ-обробки: 1 – БГ-3; 2 – АР-3000

(крива 2, рис. 2, б), що може спричинити руйнування термолабільних біоактивних речовин вихідного сировинного продукту.

Таким чином, одержання ягідних гетерогенних систем із заданими дисперсними характеристиками у найменший час при незначному нагріванні було досягнуто в РПА марки БГ-3.

Фруктово-овочеві композиції, підготовлені з абрикосів та моркви (АМ-композиції), де кількість пробланшованої моркви складала $\leq 15\%$ від загальної маси сухих речовин композиції, попередньо подрібнювались у шнековому апараті. Одержані після шнекового подрібнювача АМ-композиції представляли собою пастоподібні маси з дисперсними частинками розміром $\delta \leq 1600-3200 \mu\text{м}$, що на порядок вище заданих показників дисперсності для плодових гетерогенних систем і вимагало додаткової ДІВЕ-обробки у роторно-пульсаційному апараті.

В досліді №1 за 5 хв. обробки в апараті АР-3000 в режимі рециркуляції АМ-композиція набувала консистенції більш ущільненої в'язкої нетекучої маси. Для надання їй текучого стану в пасту була введена вода, в результаті чого вміст сухих речовин з $11,2\%$ знизився до $8,0\%$, що не сприяло одержанню високоякісного порошку при подальшому висушуванню: порошок був темнішого відтінку і доволі гігроскопічним.

Після ДІВЕ-обробки такої ж нетекучої АМ-композиції з $C_0 = 14,0\%$ з введеною у різній кількості патокою як біополімерною добавкою вміст сухих речовин в гетерогенних системах збільшився і складав:

- в досліді №2 - $C_0 = 23,5\%$ (АМ-композиція : патока = 1:1) і

- в досліді №3 - $C_0 = 27\%$ (АМ-композиція : патока = 1:1,5), при цьому вони набули більш текучого стану, що важливо для одержання однорідного за дисперсним складом крапель факелу розпилу і рівномірного їх висушування у розпилювальній сушарці. Одержані в подальшому партії порошків АМ-композицій з патокою були яскравого помаранчевого кольору з приємним абрикосовим смаком і запахом, а за відсутністю гігроскопічних властивостей зберігали свою однорідність і сипкість понад 1 рік.

Як видно з кінетичних залежностей $\delta_{\text{max}} = f(\tau)$ (рис. 3, а), за 5хв. обробки в апараті АР-3000 максимальні розміри часток АМ-композиції складали $\delta_{\text{max}} \leq 400 \mu\text{м}$ (крива 2), що в 4 рази більше за максимальні розміри часток після апарату БГ-3 (крива 1). Цілком очевидно, що одержання заданих дисперсних параметрів гетерогенної системи АМ-композиції в РПА циліндричного типу БГ-3 обумовлений збільшенням на одну одиницю у порівнянні з першим апаратом (АР-3000) набор робочих органів (статор/ротор/статор) і більшою його потужністю. (табл. 1). Відмічалось, що температура АМ-композиції в обох апаратах збільшилась всього до $27-30^\circ\text{C}$ (рис.3, б), що важливо для збереження біоактивних складових речовин плодової сировини.

Як показав мікроструктурний аналіз, після ДІВЕ-обробки в апараті БГ-3 АМ-композиція з патокою

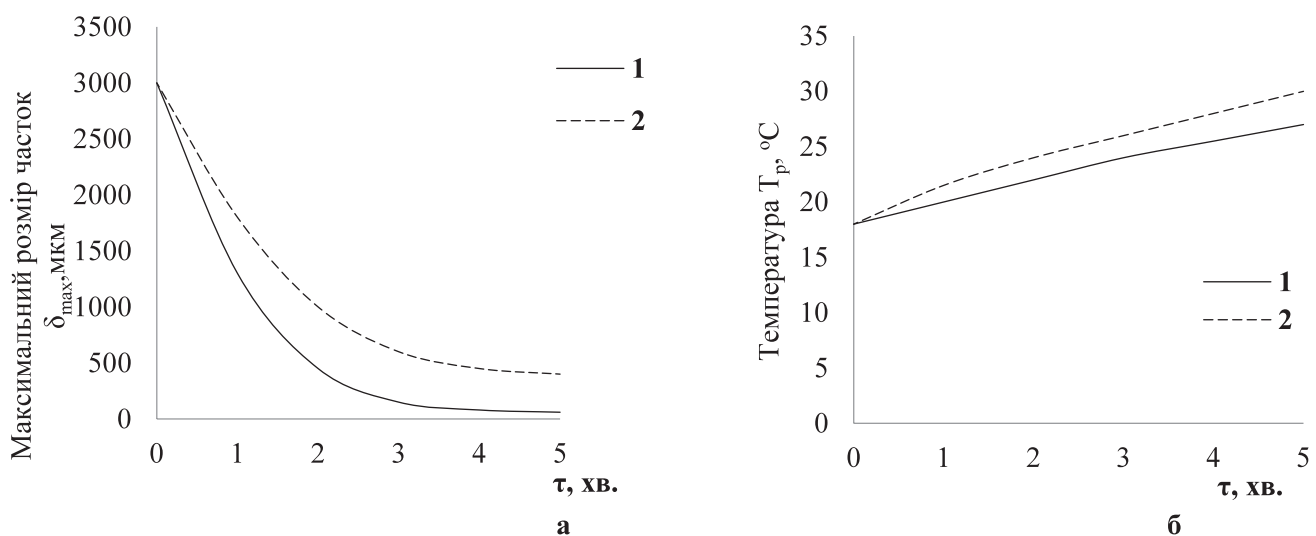


Рис. 3. Кінетичні залежності: а) ступеня дисперсності гетерогенної системи АМ-композиції і б) її температури від часу ДІВЕ-обробки: 1 – БГ-3; 2 – АР-3000

(дослід №3) містила ~90% часток розміром 20-80мкм, решта часток (до 10%) мала розміри $\delta_{\max} \leq 100 \dots 150$ мкм, що відповідає вимогам до дисперсного складу плодівих гетерогенних систем.

Мікроструктурний аналіз дисперсних часток послідовно відібраних на кожній хвилині ДІВЕ-обробки проб АМ-композицій показав не тільки динаміку зменшення розмірів часток продовж усіх 5хв., а й доступність, прозорість і незахищеність клітинної будови зрізів клітковини і волокнистих фрагментів структур, які вимагали локального їх обволікання захисним шаром посиленого декстринами, вуглеводами або білками складу завдяки введеним біополімерним добавкам.

За результатами мікроструктурного аналізу було встановлено, що вже на 2-й хв. ДІВЕ-обробки в апараті БГ-3 розміри часток АМ-композиції без патоки складали $\delta_{\max} < 450$ мкм (крива 1, рис. 3, а), а об'єм рідкої фази гетерогенної системи збільшувався настільки, що покращились умови для розчинення біополімерної добавки - патоки. Тобто, введення патоки до плодівих мас має відбуватись саме на 2-й хвилині їх ДІВЕ-обробки, що сприяє обволіканню дисперсних часток, що творених під час деструкції структурних систем плодів, і, тим самим, консервації їх у дисперсійному середовищі гетерогенної системи до подачі в сушарку.

Овочевий продукт, поставлений однією з агрофірм південного регіону України у формі охолодженого пюре зі свіжих томатів без смакових або стабілізуючих добавок, мав стан щільної нетекучої маси з частинка-

ми розміром 1600-3200мкм, через що підлягав ДІВЕ-обробці до заданого ступеня дисперсності.

Томатне пюре за близьких з наведеними вище плодівими гетерогенними системами показників рН (табл. 2) відрізнялось від них більшим вмістом сухих речовин (20%) і схильністю до піноутворення під час тривалої гідромеханічної обробки, що призводило до збільшення її об'єму.

Дослідження з томатним пюре проводились як без біополімерних добавок, так і з додаванням патоки у кількості від 20% до 50% від загальної маси сухих речовин.

За кінетичними залежностями $\delta_{\max} = f(\tau)$ (рис. 4, а) заданий ступінь дисперсності гетерогенної системи томатного пюре із патокою при їх співвідношенні як 1:1, досягався за 3хв. в апараті БГ-3 (крива 1). На 5-й хв. ДІВЕ-обробки максимальні розміри часток зменшувались до рівня $\delta_{\max} \leq 80$ мкм, при цьому температура гетерогенної системи не перевищувала $T_{\text{суп}} = 28^\circ\text{C}$ (крива 1, рис. 4, б), чому сприяло введення патоки.

Максимальні розміри часток цієї ж композиції за 3 хв гідромеханічної обробки в апараті АР-3000 складали $\delta_{\max} \leq 1600$ мкм, а за 5хв. обробки - $\delta_{\max} \leq 1215$ мкм (крива 2, рис. 4, а), що на порядок вище за результати обробки в апараті БГ-3, при цьому температура продукту за цей час зросла до 45°C (крива 2, рис. 4, б)

Слід зауважити, що за меншого вмісту патоки у складі томатної композиції (20-25% від загальної маси С.Р.) погіршувалась результативність ДІВЕ-обробки.

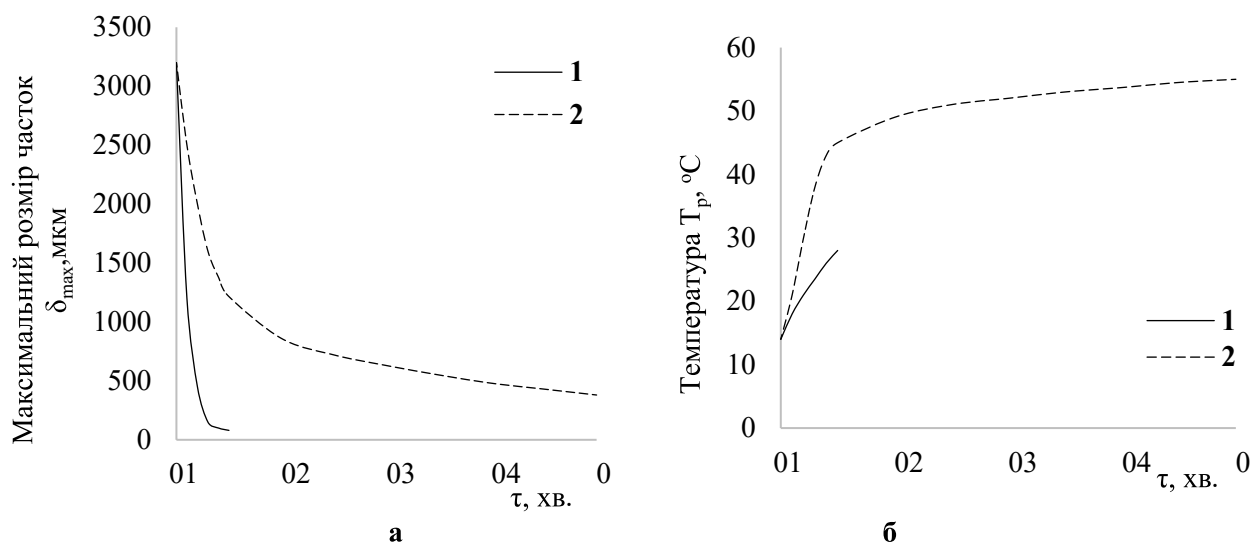


Рис. 4. Кінетичні залежності: а) ступеня дисперсності гетерогенної системи томатного пюре з патокою у співвідношенні 1:1 і б) її температури від часу ДІВЕ-обробки: 1 – БГ-3; 2 – АР-3000

Так, за 5хв. обробки в апараті БГ-3 максимальний розмір часток складав лише $\delta_{\max} \leq 300-350$ мкм, а в апараті АР-3000 – у 4 рази більший – $\delta_{\max} \leq 1450$ мкм.

Для одержання більшого ступеня дисперсності томатної композиції обробку її в апараті АР-3000 було продовжено, що викликало ще більше її нагрівання: на 20-й хв. – до 52°C і на 40-й – до 55°C (крива 2, рис. 4, б). Проте заданого ступеня дисперсності досягти так і не вдалось: за 40 хв. гідромеханічної обробки максимальний розмір часток томатної композиції знизився лише до $\delta_{\max} \leq 380$ мкм (крива 2, рис. 4, а). Це, на наш погляд, пояснюється пружно-пластичними властивостями дисперсних частинок нерозчинних фракцій томатів, здатних прослизати крізь міждисківі і міжциліндрові просвіти робочих органів апарату АР-3000 в процесі ДІВЕ-обробки, що спостерігалось і при обробці деяких ягідних композицій.

Результатом тривалої (40хв.) ДІВЕ-обробки томатного пюре без патоки стало одержання спіненої не текучої в'язкої маси, а з часом – гелеутворення. Такі небажані ефекти спостерігались при ДІВЕ-обробці багатьох плодових мас без біополімерних добавок, що свідчить про доцільність їх введення до плодових мас за умов максимального скорочення часу їх ДІВЕ-обробки, у т.ч. для уникнення перегрівання.

Висновки

Дослідження впливу ДІВЕ-обробки плодової сировини в РПА двох різних конструкцій дозволило визначити найбільш ефективний тип апарату та умови, при яких процес нормалізації за дисперсним складом, стабілізації показників кислотності та покращення текучих властивостей ГС як об'єктів розпилювального сушіння незалежно від виду плодової сировини можна досягти за лічені хвилини при мінімальному прогріванні термолабільного сировинного матеріалу.

Експериментально встановлено, що в РПА циліндричного типу марки БГ-3 за 3-5хв. досягається одержання достатньо текучої і структурованої, нормалізованої за дисперсним складом ($\delta_{\max} \leq 100-150$ мкм) і стабілізованої за показниками рН на рівні ≥ 4 плодової гетерогенної системи, температура якої не перевищує 25-28°C, що дозволяє за умов введення біополімерної добавки (крохмальної патоки) на 2-й хв. ДІВЕ-обробки плодової гетерогенної системи досягти консервуючого ефекту і, тим самим, зберегти термолабільні біоактивні речовини вихідної сировини у її дисперсійному середовищі до моменту подачі її в сушарку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Saeid Jafari, Seid Mahdi Jafari, Mahdi Ebrahimi, Isaya Kijpatanasilp, Kitipong Assatarakul, A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: Characterization, food application and in vitro gastrointestinal digestion, Food Hydrocolloids, Volume 134, 2023, 108068, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108068>.
2. Mohammad Rezaul Islam Shishir, Wei Chen, Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices, Trends in Food Science & Technology, Volume 65, 2017, Pages 49-67, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>.
3. Долинский А.А., Турчина Т.Я., Жукотський Е.К. Сучасні методи впливу на структуроутворюючі властивості складних матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння / Наукові праці ОНАХТ. 2014. Вип. 45, Т.3. С. 13-17.
4. Zhang Fei, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou, Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder, Particology, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.017>.
5. Andrea Bassani, Daniele Carullo, Francesco Rossi, Cecilia Fiorentini, Guillermo D. Garrido, Gintaras V.R. Reklaitis, Irene Bonadies, Giorgia Spigno, Modeling of a spray-drying process for the encapsulation of high-added value extracts from food by-products, Computers & Chemical Engineering, Volume 161, 2022, 107772, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107772>.
6. Ismail Tontul, Ayhan Topuz, Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties, Trends in Food Science & Technology, Volume 63, 2017, Pages 91-102, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>.
7. Шаркова Н.А., Жукотский Э.К., Турчина Т.Я., Декуша А.В., Макаренко А.А. Дослідження впливу ДІВЕ-обробки плодового тіла гриба шийтаке на фізико-механічні властивості грибної суспензії. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т.41, № 1. С. 27-33.
8. Дьяконова А.К., Безусов А.Т. Структурообразование в производстве консервированных продуктов. Одесса: «Optimum». 2006. 249 с.
9. Dolinsky A. A., Maletskaya K. D., Snezhkin Y. Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods. Drying technology, 2000. 18(3), 747-758.
10. Басок Б.И., Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р. Энергосберегающая безотходная технология гомогенизации плодовоовощного и цитрусового сырья. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25, №4. С. 90-94.

11. Saygi G., Erbay G., Koca N., Pazır N. Energy and exergy analyses of spray drying of a fruit puree (cornelian cherry puree). *International Journal of Exergy*. 2015 Vol.16, No.3.
12. Gong Z., Yu M., Wang X., Shi X. Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. *International Journal of Food Properties*. 2018. Vol. 21, Issue 1. P. 2229-2238.
13. Bastos Daniele, Gonçalves Maria, Andrade Cristina, de Lima Araujo Katia, Rocha-Leão Maria Helena.. Microencapsulation of cashew apple (*Anacardium occidentale*, L.) juice using a new chitosan-commercial bovine whey protein isolate system in spray drying. *Food and Bioprocess Processing*. 2012. 90. 683-692. Doi: 10.1016/j.fbp.2012.04.005.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DPEI-TREATMENT AND BIOPOLYMER ADDITIVES ON THE CHARACTERISTICS OF FRUIT HETEROGENEOUS SYSTEMS AS OBJECTS OF SPRAY DRYING

Turchina T.Ya¹., Avdieieva L.Yu.², Makarenko A.A.³, Kozak M.M.⁴

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

¹PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0003-4902-3732>

²Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-3434-1669>

³PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2338-5364>

⁴<https://orcid.org/0000-0003-2589-4998>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.3>

This research focuses on the crucial stage of raw material preparation in spray drying technologies, as it defines the potential properties of liquid heterogeneous systems and the characteristics of the resulting powder. The objective of this study was to examine the influence of DPEI treatment on different types of fruit and vegetable raw materials in two types of rotor-pulsation apparatus, along with the introduction of biopolymer additives, on the characteristics of obtained heterogeneous systems destined for spray drying. The article presents the results of investigating the effects of two types of rotor-pulsation apparatus, as well as the physico-chemical and morphological peculiarities of fruit and vegetable raw materials, on the dispersion process to obtain water suspensions with specified dispersion and structural-mechanical properties. Challenges encountered during the drying process of plant-based raw materials are highlighted, and the characteristics of the obtained suspensions (temperature, pH, degree of dispersion, flowability) after hydro-mechanical processing of heterogeneous systems are presented. The necessity of using biopolymer additives is justified. Three types of fruit and vegetable compositions were utilized in the research: berry, fruit-vegetable, and vegetable. To enhance thermal stability and improve structural, moisture-conductive, and structural-

mechanical properties of the heterogeneous systems, as well as to create optimal conditions for subsequent spray drying, biopolymer additives such as starch syrup and whey protein concentrate were employed.

Based on the experimental and analytical investigations, it was determined that the introduction of structuring biopolymer additives during the first 2 minutes of hydro-mechanical treatment of fruit and vegetable masses improved their flowability and thermal stability during subsequent drying. This approach also resulted in pH stabilization at a level of ≥ 4.0 , preservation of newly formed nano- and micro-particles of insoluble fractions and other thermolabile substances of the raw material in the dispersed medium of the heterogeneous system until it was fed into the spray dryer.

Key words: municipal solid waste, RDF, thermal analysis, destruction, decomposition, heat of combustion.

References 13, tables 3, figures 4.

1. Saeid Jafari, Seid Mahdi Jafari, Mahdi Ebrahimi, Isaya Kijpatanasilp, Kitipong Assatarakul, A decade overview and prospect of spray drying encapsulation of bioactives from fruit products: Characterization, food application and in vitro gastrointestinal digestion, Food Hydrocolloids, Volume 134, 2023, 108068, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108068>.

2. Mohammad Rezaul Islam Shishir, Wei Chen, Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices, Trends in Food Science & Technology, Volume 65, 2017, Pages 49-67, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>.

3. Долинський А.А., Турчина Т.Я., Жуковський Е.К. Сучасні методи впливу на структуроутворюючі властивості складних матеріалів як об'єктів розпилювального сушіння / Наукові праці ОНАХТ. 2014. Вип. 45, Т.3. С. 13-17.

4. Zhang Fei, Youyu Lu, Shaoyan Zhu, Funian Han, Guanghua Wen, Ping Tang, Zibing Hou, Mathematical model and numerical investigation of the influence of spray drying parameters on granule sizes of mold powder, Particology, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.017>.

5. Andrea Bassani, Daniele Carullo, Francesco Rossi, Cecilia Fiorentini, Guillermo D. Garrido, Gintaras V.R. Reklaitis, Irene Bonadies, Giorgia Spigno, Modeling of a spray-drying process for the encapsulation of high-added value extracts from food by-products, Computers & Chemical Engineering, Volume 161, 2022, 107772, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107772>.

6. Ismail Tontul, Ayhan Topuz, Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties, Trends in Food Science & Technology, Volume 63, 2017, Pages 91-102, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>.

7. Шаркова Н.А., Жуковский Э.К., Турчина Т.Я., Декуша А.В., Макаренко А.А. Дослідження впливу ДІВЕ-обробки плодового тіла гриба шийтаке на фізико-механічні властивості грибної суспензії. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т.41, № 1. С. 27-33.
8. Дьяконова А.К., Безусов А.Т. Структурообразователи в производстве консервированных продуктов. Одесса: «Optimum». 2006. 249 с.
9. Dolinsky A. A., Maletskaya K. D., Snezkin Y. Fruit and vegetable powders production technology on the bases of spray and convective drying methods. Drying technology, 2000. 18(3), 747-758.
10. Басок Б.И., Ободович А.Н., Пироженко И.А., Коба А.Р. Энергосберегающая безотходная технология гомогенизации плодовоовощного и цитрусового сырья. Промышленная теплотехника. 2003. Т.25, №4. С. 90-94.
11. Saygi G., Erbay G., Koca N., Pazir N. Energy and exergy analyses of spray drying of a fruit puree (cornelian cherry puree). International Journal of Exergy. 2015 Vol.16, No.3.
12. Gong Z., Yu M., Wang X., Shi X. Functionality of spray-dried strawberry powder: effects of whey protein isolate and maltodextrin. International Journal of Food Properties. 2018. Vol. 21, Issue 1. P. 2229-2238.
13. Bastos Daniele, Gonçalves Maria, Andrade Cristina, de Lima Araujo Katia, Rocha-Leão Maria Helena. Microencapsulation of cashew apple (Anacardium occidentale, L.) juice using a new chitosan-commercial bovine whey protein isolate system in spray drying. Food and Bioproducts Processing. 2012. 90. 683-692. Doi: 10.1016/j.fbp.2012.04.005.

Отримано 25.07.2023

Received 25.07.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 66.063.62, 62.93

ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНИЙ ВВОД ЕНЕРГІЇ (ДІВЕ) ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

Ободович О.М.¹, д.т.н., Хоменко В.О.², Сидоренко В.В.³, к.т.н., Степанова О.Є.⁴, к.т.н.¹професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: tdsittf@ukr.net²гол. конструктор Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, e-mail: xbo1959@gmail.com³с.н.с., старший дослідник, Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>, e-mail: vrangel08@i.ua⁴с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>, e-mail: super-olesya2807@ukr.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.4>

В статті наведено огляд конструктивних особливостей роторно-пульсаційних апаратів в яких реалізується метод дискретно-імпульсного вводу енергії – метод інтенсифікації тепломасообмінних процесів, що сприяє розробці та впровадженню енергозберігаючих технологій в різних галузях промисловості.

The article provides an overview of the design features of rotor-pulsation devices in which the method of discrete-pulse energy input is implemented – a method of intensification of heat and mass exchange processes, which contributes to the development and implementation of energy-saving technologies in various industries

Бібл. 8, рис. 5.

Ключові слова: дискретно-імпульсне введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, інтенсифікація тепломасообмінних процесів, енергозберігаючі технології. N – потужність електродвигуна; ω_0 – кутова швидкість; M – моменти сил гідродинамічного опору;

ДІВЕ – дискретно-імпульсний ввід енергії;

РПА – роторно-пульсаційний апарат.

Вступ. Розробка і впровадження нових енергозберігаючих технологій є одним з головних завдань підприємств в різних галузях промисловості.

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено новий підхід до інтенсифікації тепломасообмінних процесів у гетерогенних системах, в основі якого лежить принципово новий метод дискретно-імпульсного вводу енергії (ДІВЕ), реалізація якого оптимально вирішує питання в багатьох технологічних процесах таких як: диспергування, емульгування, перемішування гомогенізація та ін.

Суть методу ДІВЕ полягає в тому, що енергія яка вводиться в апарат, розподілена дискретно в просторі (по всьому робочому об'єму системи), і в кожному елементі об'єму виділяється ефективна питома потужність у

виділі коротких імпульсів, тобто дискретно в часі. Цей принцип можна реалізувати практично, коли в рідкому середовищі рівномірно розподілити досить велику кількість газових бульбашок, які швидко розширюються і стискаються при періодичних і різких скидах тиску в системі. Система розподілена в рідині пульсуючих бульбашок є трансформатором енергії від зовнішнього джерела (наприклад, компресора), що працює в стаціонарному режимі, в енергію, дискретну за часом і простором. Це забезпечує в будь якій точці робочого об'єму високу питому потужність, виділену в імпульсі. Аномально високе значення швидкостей, прискорень і локальних тисків поблизу міжфазної границі бульбашок зумовлюють появу потужних гідродинамічних факторів: ударних хвиль, розвинутої турбулентності і

т.п., а це, в свою чергу, дає змогу досягти граничних значень інтенсивності подрібнення при менших витратах енергії [1].

Мета ДІВЕ полягає в інтенсифікації тепломасообмінних та гідродинамічних процесів в технологічних середовищах, а також створенні методики їх оптимізації та способів управління.

Ідея ДІВЕ полягає в тому, щоб попередньо стаціонарно і довільним станом розподілену в робочому об'ємі енергію акумулювати в локальних дискретних точках системи і в подальшому імпульсно реалізувати для досягнення необхідних теплофізичних ефектів. Нетрадиційні методи інтенсифікації тепломасообмінних процесів шляхом дискретно-імпульсного введення енергії в дискретні середовища лягли в основу нових технологій отримання емульсій різних видів. В багатьох галузях промисловості та побуті широко застосовуються емульсії різних видів, що зумовлює постійне підвищення вимог до їх якості, у першу чергу, стійкості та однорідності. Тому є висока потреба в розробці високоефективного обладнання та визначення раціональних технологічних режимів при обробці систем типу “рідина-рідина” [2].

Мета роботи. Провести огляд існуючих модифікацій роторно-пульсаційних апаратів (РПА), в яких реалізується метод ДІВЕ, їх конструктивні особливості та галузі застосування.

В інституті технічної теплофізики НАН України було створено обладнання, принцип роботи якого полягає в реалізації методу ДІВЕ, зокрема роторно-пульсаційні апарати (РПА).

Роторно-пульсаційні апарати (РПА) представляють собою високоефективне малогабаритне обладнання для створення однорідних сумішей різних рідин з широкою можливістю їх застосування. За допомогою РПА оптимально вирішуються питання в багатьох технологічних процесах таких як: диспергування, емульгування, перемішування та гомогенізація різних систем, а саме порошкоподібних, рідких, багатокомпонентних, високо та низько в'язких середовищ в багатьох галузях промисловості. Найважливішим показником роботи РПА являється розмір дисперсних частинок емульсії, що отримується після обробки в РПА з механічної суміші взаємно нерозчинних рідин або компонентів, що важко змішуються.

Використання роторно-пульсаційних апаратів найбільш перспективним є в таких галузях промисловості:

1. Целюлозно-паперова – для вирівнювання помелу волокон у паперовій масі, приготування композицій

волокнистих суспензій і диспергування волокнистої суспензії при різних концентраціях маси.

2. Харчова:

- у виробництвах молока і молокопродуктів – для гомогенізації незбираного молока, відновлення сухого молока, приготування йогуртів, плавлених і м'яких сирів;

- при гомогенізації дозволяє досягати рівномірного розподілу жиру, збільшити однорідність продукту, також продукт набуває стійкості до відстоювання вершків і розвитку процесів окислення, збільшується термін зберігання;

- у хлібопекарському виробництві – для приготування тіста із зерна і круп [4];

- у спиртовому виробництві – для мокрого помелу зерна [5];

- для приготування соків, квасу, майонезу, гірчиці, рибних, фруктових та овочевих паст і пюре, переробка ягід і фруктів – на джеми і повидла, овочів і грибів – на ікру.

3. Косметична, парфумерна та фармакологічна – для приготування кремів, вазеліну, мазей, шампунів, бальзамів, лосьйонів, гелів, лікарських препаратів у формі розчину.

4. Сільське господарство – для приготування заміниacza незбираного молока для відкорму молодня, як з сухого молока, так і зі свіжої рослинної сировини (ріпаку, люпину, сої); переробка грубих харчових відходів при виробництві кормів для тварин, птиці та риби; підвищення ефективності мінеральних і органічних добрив (гною тварин і птишиного посліду).

5. Виробництво будівельних та оздоблювальних матеріалів: приготування рідкої фази клею з сухих компонентів (досягається скорочення циклу приготування до 30 разів); приготування пластифікаторів, мастик, пігментів, водоемульсійних фарб; приготування активованих водоцементних суспензій при виробництві бетону і пінобетону різних модифікацій і призначень.

6. Нафтопереробний: приготування котельного та пічного палив з відходів нафтопродуктів і відпрацьованого масла; приготування, літолу, масел і мастил; приготування водопаливних емульсій (“мазут-вода”, “дизельне паливо-вода”), біопаливних емульсій (“торф-вода-мазут”, дизпаливо); переробки відстою бензо- і нафтоцистерн; виробництва різних модифікацій бітуму.

7. Хімічна промисловість – для виробництва лакофарбових виробів, кислот, миючих засобів, хімікатів,

барвників, чорнил, різних видів технічних розчинів, а також для утилізації відходів хімічних і нафтопереробних виробництв.

8. Підготовки питної води, очищенні стічних вод. РПА може бути встановлений у технологічну лінію підготовки питної води, а також на станціях аерації при очищенні стічних вод. Це дає можливість очищати воду від заліза, марганцю, сірководню, карбондіоксиду, фтору, а також регулювати водневий показник шляхом насичення і абсорбування киснем повітря рідких середовищ.

Огляд існуючих конструкцій РПА та їх особливості.

Взагалі, існує багато розробок роторно-пульсацийних апаратів різної конструкції в залежності від їх використання. Дане обладнання може використовуватися як окрема установка так і встановлюватись в технологічних лініях. В основному всі РПА за конструктивними особливостями можна розподілити наступним чином:

- за геометричною формою робочих органів (дискові, циліндричні, у вигляді зубів тощо);
- за кількістю пар робочих органів (один статор і один ротор; два статори і один ротор; два статори і два ротори та ін.);
- за геометрією прорізів в робочих органах (круглі та щільні продовжні);
- за принципом виконання монтажу (горизонтальні та вертикальні);
- за наявністю інших робочих елементів (мішалки, ножі, крильчатки з лопатками та ін.);
- за продуктивністю (об'єму речовини, що обробляється в апараті за одиницю часу).

Найчастіше, робочі органи РПА представляють собою систему коаксіальних циліндрів або дисків з зазорами між ними, що зазвичай не перевищують 1 мм. Статори жорстко закріплюються в корпусі або з кришкою корпусу, а ротори з'єднані в різний спосіб з приводом установки, обертаються з високою кутовою швидкістю. Ротори та статори розміщені послідовно. Циліндричні тіла або диски оснащені радіальними прорізами прямокутної або круглої форми. Внаслідок обертання роторів, прорізи в роторах та статорах періодично співпадають або взаємно перекриваються. При співпадині прорізів середовище, що обробляється, тече через прорізи в радіальному напрямку за рахунок відцентрових сил та перепаду тиску. В момент взаємного перекриття прорізів в роторах та статорах радіальний рух середовища гальмується і в

потоці середовища виникають локальні імпульси тиску, що відіграють важливу роль для процесу гомогенізації гетерогенних середовищ.

Важлива особливість даних апаратів, що відрізняє їх від апаратів подібної дії в тому, що рух рідкого середовища має обертально-пульсацийний характер. Обертально-пульсацийні потоки характеризуються високими рівнями локальних швидкостей, прискорень, градієнтів тиску, нормальних та дотичних напруг, зміни яких відбуваються за дуже короткі проміжки часу і в обмежених об'ємах робочої зони апарату. До важливих характеристик процесу, що розглядається слід віднести велику вірогідність виникнення турбулентних пульсацій, адіабатного закипання середовища, кавітації та акустичних ефектів. З цим, головним чином, пов'язані основні механізми силової дії на гетерогенне середовище з сторони робочих органів РПА, що призводить до ефективного подріблення дисперсних частинок. Оскільки всі ці ефекти силової дії на середовище мають переважно локальний характер в просторі і імпульсний в часі, то РПА відносяться до апаратів, що працюють з реалізацією методу ДІВЕ.

Проведення теоретичних досліджень РПА дають можливість правильно підібрати моделі для розрахунків гідродинамічних процесів РПА, дозволяють ефективно використовувати апарати подібного типу в енергозберігаючих технологіях в багатьох галузях промисловості.

При розробці конструкцій РПА виникає необхідність розрахунку мінімальної потужності електродвигуна N , необхідної для того, щоб ротор обертася з постійною кутовою швидкістю ω_0 , долаючи сили гідродинамічного опору.

$$N = \omega_0 \cdot \bar{M}, \quad (1)$$

де ω_0 – кутова швидкість;

$\bar{M}$ – моменти сил гідродинамічного опору, що діють на ротор та визначаються з урахуванням в'язкості середовища [3].

Також при проектуванні РПА, виборі режимів роботи апарату, слід також враховувати явище дисипації енергії в потоці, що являє собою процес нагрівання рідини при проходженні через робочі органи РПА внаслідок перетворення механічної енергії в тепло. Суттєвий перегрів вузлів та деталей апарату може призвести до їх пошкодження, тому слід враховувати цей фактор при визначенні зазорів між ротором та статорами, а також визначенні геометрії прорізів ро-

бочих органів РПА. Важливу роль при проектуванні конструкцій відіграє можливість встановлення та контролю бажаних зазорів між коаксіальними циліндрами роторів і статорів, так як від їх величини залежить якість обробки компонентів.

Наведені нижче роторно-пульсаційні апарати відрізняються їх конструктивними особливостями.

На рис. 1 представлена конструкція РПА з одним ротором та двома статорами [6].

Робочий вузол роторно-пульсаційного апарату містить корпус 7, в якому розташовані із зазором між собою співвісні ротор 1, внутрішній 2 та зовнішній 3 статори, що виконані у вигляді циліндричних втулок із поздовжніми прорізами 4. При цьому, наприклад, зовнішній статор 3 по товщині виконано з двох частин 5 і 6, встановлених з можливістю повороту одна відносно одної та фіксацією в заданому положенні (рис. 1).

Робочий вузол роторно-пульсаційного апарату працює в такий спосіб. Залежно від параметрів і властивостей оброблюваного рідкого середовища взаємним поворотом на необхідний кут частин 5 і 6 зовнішнього статора 3 досягають необхідного ступеня взаємного перекриття поздовжніх прорізів 4, після чого фіксують положення частин 5 і 6 зовнішнього статора 3 між собою.

До робочого вузла роторно-пульсаційного апарата подається рідка система. Внаслідок обертання ротора 1, що знаходиться на валу, виникає відцентрова сила, за рахунок якої та перепаду тиску рідина послідовно проходить крізь поздовжні прорізи статора 2, ротора 1 та статора 3, а також міжциліндрові зазори. При цьому потік піддається значній гідромеханічній дії поздовжніх прорізів ротора 1 та статорів 2, 3 та їх міжциліндрових зазорів, внаслідок значних градієнтів зсувних напружень, прискорень та тиску.

Крім того, потік середовища проходить крізь систему високоінтенсивних кінематичних вихорів, що виникають у прорізах ротора 1 та статорів 2, 3.

За рахунок вищезазначених факторів у вузлі роторно-пульсаційного апарату реалізуються інтенсивна гомогенізація та емульгування оброблюваної системи.

Розглянутий робочий вузол роторно-пульсаційного апарату, що є нескладним у виготовленні та зручним в експлуатації, дає можливість за рахунок збільшення тривалості обробки за один цикл інтенсифікувати процеси гідродинамічної обробки рідких систем та, як наслідок, підвищити якість кінцевого продукту.

Конструкція РПА представлена на рис. 2 [7] більш вдосконалена ніж РПА на рис. 1 тим, що є можливість з більшою точністю практично встановити зазори між статорами та роторами і зафіксувати їх.

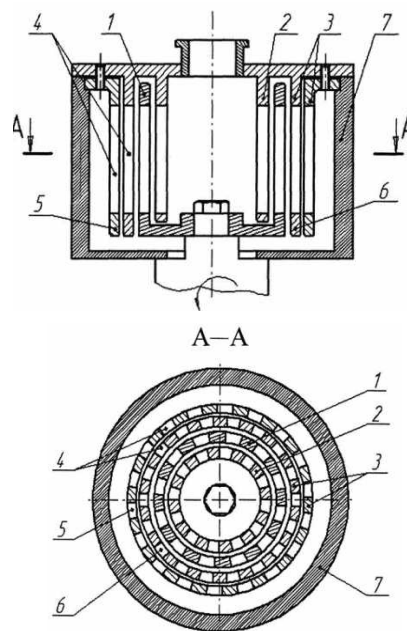


Рис. 1. РПА з одним ротором та двома статорами:

1 – ротор; 2 – статор внутрішній; 3 – статор зовнішній; 4 – поздовжні прорізи ротора та статорів; 5, 6 – частини зовнішнього статора; 7 – корпус

В даній конструкції РПА (рис. 2) шпонкове з'єднання з валом приводу замінено муфтою у вигляді зубчатого вінця, що закріплена на валу разом з комплектом роторів, а комплект статорів виготовлений з торцевим буртиком, який встановлений на зовнішній торцевій поверхні корпусу. Запропонована конструкція забезпечує встановлення двох комплектів коаксіальних циліндрів (статорів та роторів) з рівномірними зазорами між ними завдяки тому, що статори можна вільно переміщувати по торцевій поверхні корпусу перпендикулярно до осі обертання для отримання рівномірних зазорів з наступною фіксацією штифтами комплекту статорів з корпусом. Заміна шпонкового з'єднання роторів з валом приводу обертання торцевою муфтою у вигляді зубчатого вінця дозволяє уникнути псування вала і розбивання посадок, що забезпечує стабільну величину зазорів між роторами і статорами та дозволяє знімати вал з приводу обертання без використання спеціальних пристроїв.

Пристрій працює таким чином. Рідина подається в РПА через вхідний патрубок 8, проходить через рухомі 3 нерухомі 4 статори та ротори з прорізами 5, де відбувається її обробка. При цьому рідина зазнає впливу високих швидкостей і напружень зсуву та пульсацій тиску, внаслідок чого відбувається інтенсивне переміщення рідини з отриманням високоякісних дисперсій і емульсій з розміром частинок 0,1-2 мкм. Далі рідина через патрубок відведення продукту 2 відводиться з пристроєм.

Особливостями конструкції апарату (рис. 3) [8] є те, що апарат містить корпус з встановленими в ньому ротором і статором з робочими елементами у вигляді зубів. Корпус апарату розділений на дві секції перегородками, в яких є отвори різного діаметру. Одна з перегородок насаджується на вал до основи ротора і кріпиться до нього шпонкою, а друга – розташована в середній частині корпусу, причому нижньою стороною спирається на втулку, надітою на вал, а верхньою стороною закріплена гайкою.

Технічним результатом в даній конструкції багатосекційного роторно-пульсаційного апарату є те, що за рахунок встановлених в корпусі розділових перегородок з різним діаметром отворів збільшується час перебування частинок в апараті, що дозволяє інтенсифікувати протікання технологічних процесів і підвищити якість одержуваної суміші, а також підвищити ефективність процесів в апараті.

Недоліками даної конструкції апарату є складність у виготовленні робочих органів, оскільки різні діаметри робочих отворів. Також розділові перегородки здійснюють додатковий гідравлічний опір та збільшують витрати енергії на проведення процесів в апаратах.

Особливостями конструкції апарату (рис. 4) [8] є те, що на робочих поверхнях ротора і статора виконані концентрично розташовані по колу ряди шипів відповідно, що чергуються відповідно з пазами, причому ротор встановлений на вал приводу з можливістю реверсив-

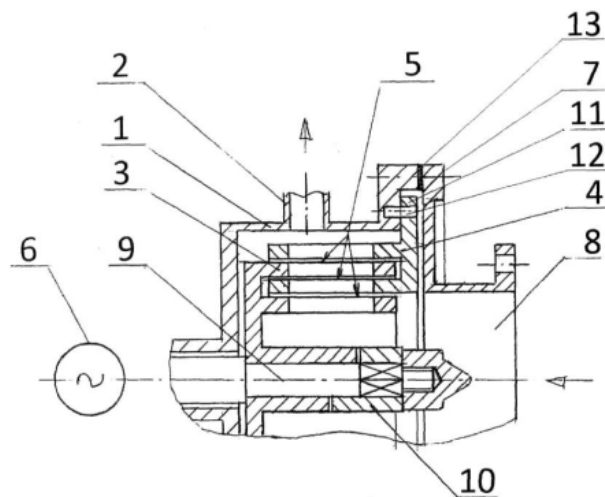


Рис.2. Конструкція РПА з можливістю встановлення зазорів між статорами і ротором та його фіксацією: 1 – корпус; 2 – патрубок відведення продукту; 3 – ротор з прорізами; 4 – статор з прорізами; 5 – прорізи ротора та статора; 6 – привід вала обертання; 7 – кришка корпусу; 8 – вхідний патрубок; 9 – вал приводу; 10 – торцева муфта; 11 – буртик статора; 12 – штифт; 13 – прокладка

ного обертання. На робочій поверхні ротора встановлені вхідні лопатки, при цьому шипи останнього ряду є вихідними лопатками і мають різну форму по довжині і по поперечному перерізі в різних варіантах виконання. Лопатки для можливості реверсивного обертання ротора

мають однакові по обидва боки кути атаки “ α ” і кути виходу “ β ”. Осі симетрії вхідних лопаток, додаткових вхідних лопаток і вихідних лопаток розташовані радіально, а поздовжня вісь напірного патрубку і центральні осі ротора і статора розташовані на одній прямій.

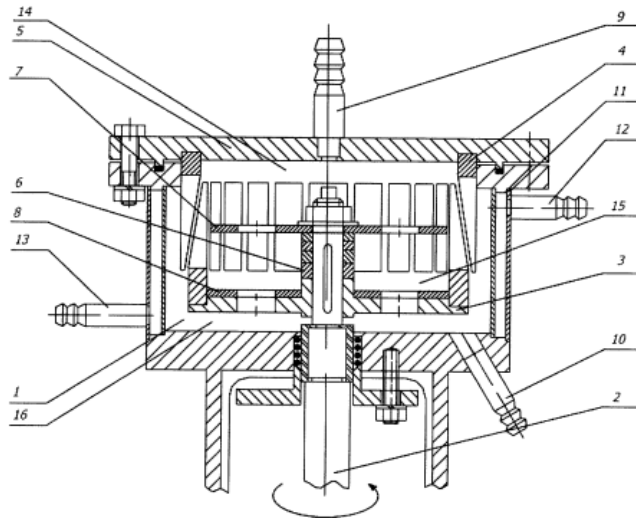


Рис. 3. Багатосекційний роторно-пульсаційний апарат з робочими елементами ротора і статора у вигляді зубів: 1 – корпус; 2 – вал; 3 – ротор; 4 – статор; 5 – кришка; 6 – регулювальні шайби; 7, 8 – перегородки; 9, 10 – патрубки для введення та виведення компонентів; 11 – сорочка; 12, 13 – вхідний та вихідний патрубок холодоносія; 14 – робоча порожнина; 15 – нижня частина робочої області; 16 – зовнішня порожнина апарату

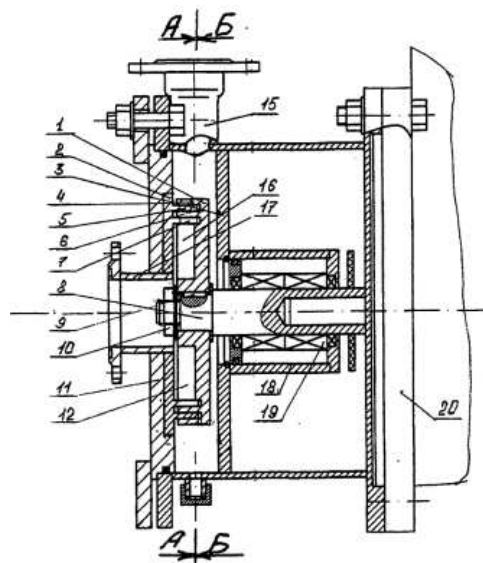


Рис. 4. Конструкція РПА з можливістю реверсивного обертання ротора: 1 – ротор; 2 – статор; 3 – корпус; 4, 5 – ряди шипів; 6, 7 – пази; 8 – привідний вал; 9, 10 – фіксуючі пристрої; 11 – кришка; 12 – вхідні лопатки; 13 – додаткові вхідні лопатки; 14 – вихідні лопатки; 15 – напірний патрубок; 16 – камера попереднього змішування; 17 – впускний патрубок; 18 – корпус підшипника; 19 – підшипниковий вузол; 20 – фіксуюча плита

Дана конструкція РПА сприяє збільшенню терміну служби апарату. При обертанні ротора 1 в одному напрямку, наприклад за годинниковою стрілкою, у ротора 1 зношуються ліві кромки вхідних лопаток 12, додаткових вхідних лопаток 13, шипів 4 і вихідних лопаток 14, також у статора 2 зношуються ліві кромки шипів 5. При їх зносі апарат перемикають на реверсивне обертання, тобто на обертання проти годинникової стрілки.

Недолікам конструкції є встановлений у верхній частині апарату вихідний патрубок, що заходиться в радіальному напрямі дії відцентрової сили. Таке розташування патрубку потребує створення додаткового напору апаратом для прокачування оброблюваного середовища вище рівня вхідного патрубку, або встановлення додаткового допоміжного обладнання насоса, що також збільшує питомі витрати енергії.

На рис. 5 представлено РПА, який може бути встановлений у технологічну лінію підготовки питної води, а також на станціях аерації при очищенні стічних вод. Це дає можливість очищати воду від заліза, марганцю, сірководню, карбондіоксиду, фтору, а також регулювати водневий показник шляхом насичення і абсорбування киснем повітря рідких середовищ.

В основі очищення води від заліза, марганцю, сірководню, карбондіоксиду, фтору, а також регулювання рН лежать аераційно-окислювальні процеси. Для прискорення цих процесів необхідно інтенсифікувати перенесення кисню крізь приграничний газовий дифузійний шар води до межі розподілу фаз “вода-повітря” та перенесення кисню крізь приграничний шар води від межі розподілу фаз “вода-повітря”, дифузії кисню в об’ємі води, гомогенну реакцію окислення.

РПА складається з корпусу, в якому є вхідний патрубок з приєднаним до нього ежекторним вузлом та вихідний патрубок. В середині корпусу на валу РПА, що з’єднаний з валом електродвигуна через пальцеву муф-

ту та підшипниковий вузол, встановлено ротор, з трьома рядами наскрізних отворів круглого перерізу. В середині ротора приварено 6 лопастей, що підсилюють насосний ефект. Статор встановлений у корпусі, має отвори у формі каналів з різним діаметром, що підсилює гідродинамічні процеси, які протікають в РПА. Процес насичення води киснем відбувається самовсмоктуванням повітря за рахунок розрідження, яке створюється у всмоктуючому трубопроводі РПА та ежекторному вузлі.

При проходженні водоповітряної суміші через робочі органи РПА відбувається абсорбція кисню, котрого вистачає для окислення сполук заліза, марганцю, сірководню, що перевищують норми вмісту в воді в 10-50 разів. Після проходження через робочі органи РПА, водоповітряна суміш подається на окислювально-фільтраційну колону.

Висновки.

Огляд існуючих модифікацій РПА, в яких реалізується метод ДІВЕ, дозволяє зробити висновки щодо їх ефективного застосування в різних галузях промисловості.

Важлива особливість даних апаратів в тому, що рух рідкого середовища має обертально-пульсаційний характер, який характеризується високими рівнями локальних швидкостей, прискорень, градієнтів тиску, нормальних та дотичних напруг, зміни яких відбуваються за дуже короткі проміжки часу і в обмежених об’ємах робочої зони апарату. До важливих процесів, що відбуваються в РПА, слід віднести виникнення турбулентних пульсацій, адіабатного закипання середовища, кавітації та акустичних ефектів. З цим пов’язані основні механізми силової дії на гетерогенне середовище з сторони робочих органів РПА.

Описаними прикладами конструкцій РПА не обмежується їх промислове застосування. Їх безсумнівні переваги зумовлюють постійне вдоско-

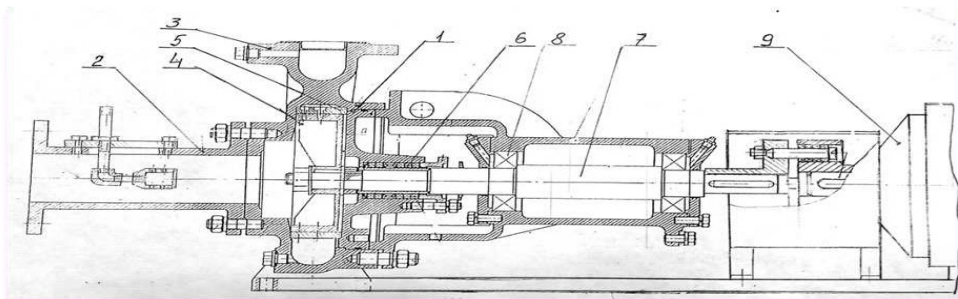


Рис. 5. Конструкція РПА для аераційного очищення питної води та стоків:

1 – корпус; 2 – вхідний патрубок з ежекторним вузлом; 3 – вихідний патрубок; 4 – ротор; 5 – статор; 6 – вузол ущільнення; 7 – вал РПА; 8 – підшипниковий вузол; 9 – електродвигун

налення конструкцій та знаходження нових шляхів використання РПА, де реалізується метод дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) для інтенсифікації гідродинамічних та тепломасообмінних процесів, що відкриває подальші перспективи для впровадження цього типу апаратів, як складових інноваційних технологій і прогресивних виробництв.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Долінський А.А.* Принцип дискретно-імпульсного вводу енергії та його використання у технологічних процесах. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К. Академперіодика, 2015. 464 с.
2. *Долінський А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А.* Метод дискретно-імпульсного вводу енергії та його реалізація: Монографія. – Х.: Віровець АП “Апостроф”, 2012. – 185 с.
3. *Басок Б.И., Давиденко Б.В.* Особенности гидродинамики, теплопереноса и процессов диспергирования в рабочих объемах цилиндрических роторно-пульсационных аппаратов. Микро-и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К. Академперіодика, 2015. 464 с.
4. *Ободович О.М.* Розробка енерго- і ресурсозберігаючих теплотехнологій дискретно-імпульсного вводу енергії при підготовці хлібопекарських дріжджів для виробництва / О.М. Ободович // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2007. №2 (21). С. 35-39.
5. *Ободович А.Н.* Дискретно-імпульсний ввід енергії в технології бродильного і хлібопекарного виробництва / А.Н. Ободович // Вібращії в техніці та технологіях. 2008. №7. С. 68-77.
6. *Патент UA* на корисну модель № 25017 В 01F 7/02. Робочий вузол роторно-пульсацийного апарата / Басок Б.І., Давиденко Б.В., Луніна А.О.; власник патенту: Інститут технічної теплофізики НАН України. – u 200702188; заявл. 01.03.2007. Опубл. 25.07.2007. Бюл. № 11.
7. *Пат. 118407 Україна*, МПК В01F7/28 (2006.01). Пристрій для обробки рідини / Долінський А.А., Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Радченко Н.Л.; власник патенту: Інститут технічної теплофізики НАН України. – № a201705347; заявл. 31.05.2017. Опубл. 10.01.2019. Бюл. № 1/2019.
8. *Колобашкін Л.В.* Процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсацийному апараті: магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра зі спеціальності 8.05050303. / Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського, Інженерно-хімічний факультет, Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв, Київ, 2018.

DISCRETE-PULSE ENERGY INPUT (DPEI) AND ITS IMPLEMENTATION USING ROTOR- PULSATION APPARATUS

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

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

²Chief designer, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: xbo1959@gmail.com

³PhD (Engin.), Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7735-7719, e-mail: vrangel08@i.ua

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.4>

The article provides an overview of the design features of rotor-pulsation devices in which the method of discrete-pulse energy input is implemented – a method of intensification of heat and mass exchange processes, which contributes to the development and implementation of energy-saving technologies in various industries.

The idea of DPEI is to accumulate the energy previously distributed in the working volume in a stationary and arbitrary state in local discrete points of the system and then implement it in pulses to achieve the necessary thermophysical effects. Non-traditional methods of intensification of heat and mass exchange processes by means of discrete-pulse energy input into discrete environments formed the basis of new technologies for obtaining emulsions of various types. In many industries and everyday life, emulsions of various types are widely used, which leads to a constant increase in the requirements for their quality, first of all, stability and uniformity. Therefore, there is a high need for the development of highly efficient equipment and the determination of rational technological modes for processing “liquid-liquid” systems.

In the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, equipment was created, the principle of which is to implement the DPEI method, in particular, rotary-pulsation apparatus (RPA).

Rotary-pulsation devices (RPA) are highly efficient, small-sized equipment for creating homogeneous mixtures of various liquids with a wide range of applications. With the help of RPA, issues are optimally solved in many technological processes, such as: dispersion, emulsification, mixing and homogenization of various systems, namely powdery, liquid, multicomponent, high and low viscosity media in many industries. The most important indicator of RPA performance is the size of dispersed emulsion particles obtained after processing in RPA from a mechanical mixture of mutually insoluble liquids or components that are difficult to mix.

References 8, figures 5.

Key words: discrete-pulse energy input, rotary-pulsation apparatus, intensification of heat-mass exchange processes, energy-saving heat technologies.

1. Dolinskiy, A.A. (2015). Pryntsyp dyskretno-impul'snoho vvodu enerhiyi ta yoho vykorystannya u tekhnolohichnykh protsesakh [The principle of discrete-pulse energy input and its use in technological processes]. Mikro- i nanourovnevyie protsessy v tekhnologiyakh DPEI: Tematicheskyy sbornik statey; Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy. – K. Akadempriodika. 464 p. (in Ukr.)

2. Dolinskiy, A.A., Obodovich, A.N., Borkhalenko, YU.A. (2012). Metod diskretno-impul'snogo vvoda energii i yego realizatsiya [Discrete-pulse energy input method and its implementation]: Monohrafiya. – KH.: Virovets' AP “Apostrof”. 185 p. (In Rus.)

3. Basok B.Y., Davydenko B.V. (2015). Osobennosti gidrodinamiki, teploperenosa i protsessov dispergirovaniya v robuchikh ob'yemakh tsilindricheskikh rotno-impul'satsionnykh apparatov [Features of hydrodynamics, heat transfer and dispersion processes in the working volumes of cylindrical rotary-pulsation devices]. Mikro- i nanourovnevyie protsessy v tekhnologiyakh DPEI: Tematicheskyy sbornik statey; Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy. – K. Akadempriodika. 464 p. (In Rus.)

4. Obodovych, O.M. (2007). Rozrobka enerho- i resursozberihayuchykh teplotekhnolohiy dyskretno-impul'snoho vvodu enerhiyi pry pidhotovtsi khlibopekars'kykh drizhdzhiv dlya vyrobnystva [Development of energy- and resource-saving thermal technologies of discrete-pulse energy input in the preparation of baker's yeast for production]. Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. № 2 (21). pp. 35-39. (in Ukr.)

5. Obodovych, A.N. (2008). Diskretno-impul'snyy vvod energii v tekhnologii brodil'nogo i khlibopekarnogo proizvodstva [Discrete-pulse energy input into fermentation and baking technologies]. Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. №7. pp. 68-77. (In Rus.)

6. *Basok, B.I., Davydenko, B.V., Lunina, A.O. etc.* (2007). *Robochyy vuzol rotorno-pul'satsiynoho aparata* [The working unit of the rotary-pulsation apparatus]. Patent of Ukraine for a utility model № 25017 B01F7/02; declared 01.03.2007; published 25.07.2007, № 11. (in Ukr.)

7. *Dolins'kyi, A.A., Hartvih, A.P., Tselen, B.YA., Konyk, A.V., Radchenko, N.L.* (2019). *Prystrii dlya obrobky ridyny* [Device for liquid processing]. Patent of Ukraine for the invention № 118407 B01F7/28 (2006.01); declared 31.05.2017; published 10.01.2019, № 43. (in Ukr.)

8. *Kolobashkin, L.V.* (2018). *Protses peretvorenniya enerhiyi u potokakh ridyny v rotorno-pul'satsiynomu aparati* [The process of energy conversion in fluid flows in a rotary-pulsation apparatus]: *mahisters'ka dysertatsiya na zdobuttya stupenya mahistra zi spetsial'nosti 8.05050303. / Kyivskyy politekhnichnyy instytut imeni I. Sikors'koho, Inzhenerno-khimichnyy fakul'tet, Kafedra mashyn ta aparativ khimichnykh i naftererobnykh vyrobnytstv, Kyiv.* (in Ukr.)

Отримано 06.12.2023
Received 06.12.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 66.047

ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ВИПАРЮВАННЯ ТА СУШІННЯ РІДИННИХ ПРОДУКТІВ В ЄДИНОМУ ВИПАРНО-СУШИЛЬНОМУ АГРЕГАТІ

Шморгун В.В.¹, канд. техн. наук, Мартюк О.В.²

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

¹провідний наук. співр., старший наук. співр. shmorgun@nas.gov.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6303-7220>

²молодший наук. співр., martiuk o76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.5>

Досліджено реальні енерговитратні показники технології суміщення випарювання та сушіння рідинних продуктів в єдиному агрегаті. Наведено результати апробації даної технології на прикладі роботи в промислових умовах агрегату "ИСПАР-700", розробленого в Інституті технічної теплофізики НАН України.

The energy consumption indicators of the technology of combining evaporation and drying of liquid products in a single unit were studied. The results of the approbation of this technology are presented on the example of the operation in industrial conditions of the "ИСПАР-700" unit, developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Бібл. 5, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: розпилювальне сушіння, випарювання, випарно-сушильний агрегат, енерговитратні показники, аналіз енерговитрат.

В результаті суттєвого зростання цін на енергетичні ресурси виникли суттєві зміни в факторах, що впливають на собівартість кінцевої продукції. Загальною закономірністю стало суттєве зростання частки енергетичної складової в собівартості продукції. Також зросли платежі за використання водних ресурсів, більш прискіпливим стало питання контролю за шкідливими викидами виробництв в навколишнє середовище. В зв'язку з цим, все більший інтерес почав виявлятися до менш енерговитратних технологій, до розробок альтернативних, екологічно більш безпечних технологій та енерговитратних систем.

Виходячи з цього, виникає інтерес проаналізувати розроблену в Інституті технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України та апробовану в низці виробництв України технологію суміщення процесів випарювання та сушіння в єдиному випарно-сушильному агрегаті "ИСПАР-700" продуктивністю 700 кг випареної вологи на годину для отримання порошкових молочних продуктів. Ця технологія, в деякому аспекті, є альтернативною до традиційної технології окремого випарювання молочних продуктів у вакуум-випарних апаратах з подальшим висушуванням концентратів в розпилювальних сушильних установках. Традиційна технологія має свої переваги, які пов'язані з досить високою енергетичною ефективністю реалізації процесу випарювання

в багатокорпусних вакуумних випарних апаратах. Її ж недоліками, в свою чергу, є потреба в потужній котельній установці, в жорсткій залежності технологічних параметрів процесів від режимів роботи котельні (параметрів пару), використання для підтримання вакууму значного обсягу холодної води, суттєвих скидів в каналізаційну мережу води, забрудненої молочними продуктами, значні викиди в навколишнє середовище пилевидної фракції кінцевої продукції (порошку) разом з відпрацьованим в сушильній установці теплоносієм.

Технологічна схема використання в єдиному агрегаті процесів випарювання та сушіння на прикладі роботи випарно-сушильної установки "ИСПАР-700" передбачає теплозабезпечення від власних теплогенераторів, здійснення процесу випарювання розчину на першій стадії методом розпилювального зневоднення, глибоку утилізацію тепла відпрацьованого в сушильній стадії теплоносія за рахунок його подачі у випарну камеру, поверненням в процес пилевидної фракції порошку.

Поєднання в єдиному агрегаті процесу розпилювального зневоднення та сушіння базується на проведенні в Інституті технічної теплофізики НАН України теоретичних та експериментальних дослідженнях та виявлених закономірностях зневоднення крапель розчинів [1]. Дослідження показали, що для кожного розчину існує критична вологість – вологість кіркоутворення,

яка поділяє процес зневоднення на два періоди, які принципово відрізняються: низькотемпературний - "випарний", що протікає при температурі рівноважного випаровування, і високотемпературний - "сушильний", в якому температура краплі підвищується і який, в свою чергу, складається з періодів кіркоутворення, кипіння, і власне періоду сушіння. У випарному періоді видалення вологи відбувається з поверхні краплі при температурі, близькій до температури, так званого, «мокрого термометра». Інтенсивність видалення вологи при цьому визначається в основному зовнішніми процесами тепловологопереносу і на цій стадії можливе застосування високотемпературного теплоносія без небезпеки перегріву продукту, який зневоднюється. У сушильному ж періоді інтенсивність видалення вологи з краплі сповільнюється, зона випаровування просувається вглиб краплі і її температура починає зростати. При досягненні розчином температури кипіння відбувається інтенсивне пароутворення всередині частинки і поверхнева оболонка в періоді кипіння, при відносно постійній температурі, може зазнавати значних деформативних змін [2]. Після закінчення періоду кипіння з частки видаляється вся "вільна" волога і в заключному періоді сушіння при монотонному підвищенні тем-

ператури відбувається видалення "зв'язаної" вологи аж до досягнення часткою рівноважної вологості. Для термолабільних продуктів дуже важливо не допускати перегріву продукту. Тому в сушильній стадії зневоднення, коли температура краплі зростає, для збереження якісних показників продукту потрібне застосування більш м'яких температурних режимів сушіння.

Дослідження показали, що існують методи управління кінетикою процесу зневоднення, які дозволяють як зменшувати термічний вплив на продукт при розпилювальному сушінні, так і підвищувати інтенсивність знімання вологи з об'єму апарату [2,3]. Уточнення фізичної моделі процесів перенесення тепла та вологи при зневодненні краплі розчину дозволило створити математичну модель процесів тепло- і вологопереносу в розпилювальному апараті, описавши її системою інтегро-диференціальних рівнянь 2-го порядку, та розробити методику розрахунку габаритів камери [4]. Розв'язання задач з оптимізації дозволили розрахувати випарювально-сушильний агрегат з рециркуляцією розчину "ИСАР-700" для процесів отримання порошкоподібних молочних продуктів.

При застосуванні агрегату "ИСАР-700" технологічна схема висушування молочних продуктів здійснюється наступним чином (рис. 1).

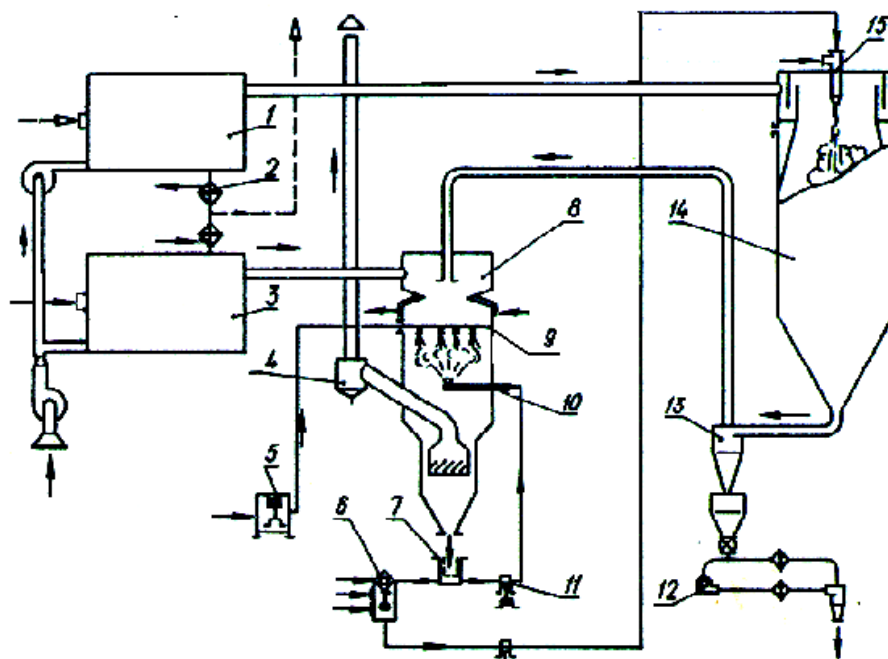


Рис. 1. Технологічна схема висушування молочних продуктів на базі агрегату ИСАР-700:
 1, 3 – вогневі калорифери; 2 – підігрівачі технічної води; 4 – сепаратор; 5, 11 – насоси;
 6 – емульгатор; 7 – ємність з концентрованим розчином; 8 – випарна камера;
 9 – форсунки; 10 – гідравлічна форсунка; 12 – система охолодження та транспортування порошку; 13 – циклон; 14 – сушильна камера; 15 – пневматична форсунка

В вогневих калориферах (1,3) теплоносії підігрівається до температур 200...250 °С і подається в випарну (8) та сушильну (14) камери. Вихідний розчин (молочні відвійки, склотини, сироватка) насосом високого тиску (5) подається у форсунки (9) випарної камери (8). Зконцентрований продукт після виходу з камери насосом (11) частково подається на рециркуляцію у форсунки (10) випарної камери, інша частина концентрату після змішування з необхідними домішками та проходження емульгатора (6) подається на пневматичну форсунку (15) сушильної камери (14). У сушильній камері в потоці теплоносія концентрат висушується і порошок після проходження системи пневматичного транспортування (12) подається на фасування. Відпрацьований у випарній камері теплоносії з низькою температурою, близькою до температури мокрого термометра, після проходження сепаратора (4) викидається в атмосферу. Це дозволяє підвищити термічний к.к.д. агрегату, а також практично ліквідувати викиди продукту в атмосферу. Товарний вихід продукту при роботі агрегату досягав значень 97,7 %. Розвинута поверхня контакту крапель, мала тривалість перебування крапель у камерах, невисокі температури нагрівання продукту (45...50 °С) при його випарюванні та висушуванні прак-

тично повністю унеможливило термічне розкладання білків і вітамінів, про що свідчить висока розчинність кінцевого продукту (понад 99 %) та подвійний, у порівнянні з порошком, отриманим із застосуванням вакуум-випарних апаратів (в яких тривалість термічної обробки на 1-2 порядки вища), вміст вітамінів А, С, Е.

Система охолодження при пневматичному транспортуванні порошку (12), що застосовується в агрегаті, дозволяє за досить короткий термін знизити температуру продукту перед його затарюванням і тим самим забезпечити належні умови для тривалого зберігання сухих молочних продуктів. При використанні агрегату "ИСАР-700" для отримання заміниacza незбираного молока відпадає необхідність у будівництві очищувальних систем, вартість яких є досить високою і може дорівнювати вартості будівництва основного виробництва.

Теплотехнічні показники роботи агрегату при напрацюванні партій порошкових молочних продуктів – заміниacza незбираного молока, отриманого на основі молочних відвійок, жирів та вітамінів з використанням випарно-сушильного агрегату "ИСАР-700", наведені в таблиці.

Їх аналіз свідчить про те, що вихідний продукт (молочні відвійки) у випарній камері упарювався

Таблиця. Теплотехнологічні показники роботи технологічної лінії отримання порошкового заміниacza незбираного молока при використанні агрегату «ИСАР-700»

Показник	Тривалість роботи, годин		
	12	34	7
Продуктивність по випареній волозі, кг/год			
- випарної камери	550	575	565
- сушильної камери	130	135	135
- Агрегату	680	710	700
Концентрація вихідного розчину, %	9,7	9,3	9,2
Концентрація розчину після випарної камери, %	28	30	30
Вміст вологи в порошку, %	3,1	3,5	3,7
Температура порошку, °С	51	52	52
Продуктивність по порошку, кг/год	57,1	60,6	59,8
Температурні показники теплоносія, °С			
- на вході у випарну камеру	211	228	218
- на виході з випарної камери	53	52	51
- на вході у сушильну камеру	187	189	183
- на виході із сушильної камери	89	90	88
Потужність, що споживається електрообладнанням, кВт:	120	120	120
Витрати палива, кг/ год	59	59	59

від початкової концентрації 9,2...9,7 % до кінцевої 28...30 % при температурах теплоносія на вході у випарну камеру 211...228 °С і на виході 51...53 °С. У сушильній камері концентрат висушувався до кінцевої вологості 3,1...3,7% при $t_{\text{вх}} = 183...189\text{ °С}$ і $t_{\text{вих}} = 88...90\text{ °С}$. При напрацюванні порошків замітника незбираного молока продуктивність камер по випареній волозі становила: випарної – 550...575 кг/год, сушильної – 130...135 кг/год. Загальна продуктивність агрегату становила 700 кг/год по випареній волозі [5].

В номінальних режимах електроенергетичне обладнання агрегату працювало із сумарним навантаженням 120 кВт. Вогневими калориферами для підігрівання повітря за 1 год споживалось 59 кг рідкого палива (мазуту). Ця кількість палива з урахуванням його теплотворної здатності еквівалентна 645 кВт.год теплової енергії. Таким чином у виробництві сухого замітника незбираного молока для здійснення процесу випарювання 700 кг вологи на годину випарно-сушильним агрегатом ИСАР-700 споживалося 765 кВт.год електричної та теплової енергії, тобто менше 1,1 кВт.год енергії в перерахунку на 1 кг випареної вологи.

Висновки

Отримані показники (1,1 кВт.год енергії, або 861 ккал в перерахунку на 1 кг випареної вологи) свідчать про високу теплову ефективність реалізації випарного та сушильного процесів при зневодненні молочних продуктів розпилювальним методом в одному агрегаті. З урахуванням повторного використання відпрацьованого в сушильній камері теплоносія в процесі випарювання, викидами в атмосферу теплоносія з відносно низьким температурним потенціалом (51...53 °С), істотно менших (практично відсутніх) викидів порошку в навколишнє середовище (в порівнянні з традиційною технологією упарювання молочних продуктів у вакуум-випарних апаратах і сушінням концентрату в розпилювальних сушильних установках), відсутності потреби в парі, а значить і в котельні, відсутності потреби в великих обсягах води для функціонування вакуум-випарних апаратів, відсутніх зливів в каналізацію значних об'ємів забрудненої молочними продуктами води, технологія здійснення процесів випарювання та сушіння молочних продуктів розпилювальним методом в єдиному агрегаті може розглядатися як ефективною, як з точки зору енергетичних витрат, так і екологічної чистоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Оптимизация процессов распылительной суши.- Киев: Наукова думка, 1984.-240с.
2. Долинский А.А., Малецкая К.Д., Шморгун В.В. Кинетика и технология суши распылением. Киев: Наукова думка, 1987. 224с.
3. Долинский А.А., Малецкая К.Д., Распылительная сушка: В 2-х т., Т.1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения.- Киев: Академперіодика. 2011.-376 с.
4. Долинский А.А., Дамский Л.М., Малушенко А.Т. Расчет процессов переноса в распылительных аппаратах - В кн.: Опыт применения распылительных сушильных установок. Киев: Наукова думка, 1976, С.62-68.
5. Долинський А.А., Шморгун В.В., Шморгун А.В. Підвищення ефективності роботи розпилювальних сушарок. Аспекти енергозощадження.- Київ: ВД “Академперіодика”, 2006.-141с.

ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF EVAPORATION AND DRYING OF LIQUID PRODUCTS IN A SINGLE EVAPORATION-DRYING UNIT

Shmorgun V.V.¹, Martiuk O.V.²

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

¹PhD (Engin.), Leading Researcher; shmorgun@nas.gov.ua, <http://orcid.org/0000-0001-6303-7220>

²Junior Researcher; martiuk_o76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.5>

The energy consumption indicators of the technology of combining evaporation and drying of liquid products in a single unit were studied. The results of the approbation of this technology are presented on the example of the operation in industrial conditions of the "ИCAP-700" unit, developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Analysis of thermo-technological processing characteristics as applied to producing dry powdered milk products with using the evaporation-type recirculation drier "ИCAP-700" has been performed. It has been shown that the given technology, which allows the performance of both evaporation and drying processes with the aid of the same spray drier, may be considered as a very efficient method of dehydration from viewpoints of energy saving and environmental protection.

Thus, in the production of dry substitute for whole milk, 703 kWh were consumed for the evaporation process of 700 kg of moisture per hour by the "ИCAP-700" evaporation-drying unit. Electrical and thermal energy, i.e. 1.1 kWh of energy per 1 kg of evaporated moisture. These indicators testify to the high thermal efficiency of both the heat generators included in the "ИCAP-700" unit, as well as the practical implementation of evaporation and drying processes during the dehydration of dairy products by the spray method. Taking into account the significantly smaller (practically absent) emissions of powder into the

environment, compared to the traditional technology of evaporation of dairy products in vacuum evaporators and drying of the concentrate in spray dryers, the absence of the need for steam, and therefore also in the boiler room, the absence of the need for large volumes of water for the operation of vacuum-evaporating devices, the absence of discharges into the sewage network of used water contaminated with dairy products, the technology of carrying out the processes of evaporation and drying of dairy products by the spray method in a single unit with its own autonomous heat generators can be considered as very effective, both from the point of view of energy consumption, and environmental cleanliness.

References 5, tables 1, figures 1.

Keywords: evaporation, spray drying, evaporation-drying unit, energy consumption indicators, analysis.

1. Dolinsky A.A., Ivanytskyi G.K. [Optimization of spray drying processes], Kyiv: [Scientific Thought] 1984.240p. (in Rus.)

2. Dolinsky A.A., Maletskaya K.D., Shmorgun V.V. [Kinetics and technology of spray drying]. Kyiv, [Scientific Thought], 1987. 224p. (in Rus.)

3. Dolinsky A.A., Maletskaya K.D. [Spray drying]. Kyiv, [Academperiodical], 2011, V.1, 376p. (in Rus.)

4. Dolinsky A.A., Damsky L.M., Malushenko A.T. [Calculation of transfer processes in spray apparatus], In the book: [Experience in the use of spray dryers]. Kyiv, [Scientific Thought], 1976, pp. 62- 68. (in Rus.)

5. Dolinsky A.A., Shmorgun V.V., Shmorgun A.V. [Improving the efficiency of spray dryers. Aspects of energy saving]. Kyiv, [Scientific Thought], 1984. 240p. (in Ukr.)

Отримано 04.10.2023

Received 04.10.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 663.551

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Булій Ю.В.¹, к.т.н., Ободович О.М.², д.т.н., Степанова О.Є.³, к.т.н.¹пров.н.с., доцент, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська 68, Київ, 01601, Україна, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1905-3706>, e-mail: yvbuliy@gmail.com²професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: tdsittf@ukr.net³с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>, e-mail: super-olesya2807@ukr.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.6>

У виробничих умовах визначена ефективність інноваційної технології ректифікованого спирту, яка передбачає подачу на тарілку живлення розгінної колони спиртовмісних фракцій у вигляді несконденсованої в дефлегматорах основних колон пари. Таке рішення дозволяє зменшити загальні витрати води на 0,032 м³/дал (5,1 %), а гріючої пари на 1,2 кг/дал (1,9 %) в перерахунок на безводний спирт у порівнянні з відомим способом. Очікуваний прибуток для заводу потужністю 3000 дал спирту на добу становитиме близько 1,5 млн. грн. на рік. Збільшення кількості несконденсованої пари від 2 до 5 % для живлення колони дозволить зменшити витрату гріючої пари від 10 до 8,8 кг/дал, а прибуток збільшити на 33,3 %. Під час випробувань якісні показники ректифікованого спирту відповідали нормативним для сорту "Люкс".

The efficiency of the innovative technology of rectified alcohol has been determined under production conditions, which provides for the supply of alcohol-containing fractions in the form of non-condensed in the deflegmators of the main columns of vapour to the feed plate of the impurity concentration column. This solution allows to reduce the total water consumption by 0,032 m³/dal (5,1 %) and the heating vapour by 1,2 kg/dal (1,9 %) in terms of anhydrous alcohol in comparison with the known method. The expected profit for the plant with a capacity of 3000 dal of alcohol per day will be about UAH 1,5 million per year. Increasing the amount of non-condensed vapour from 2 to 5 % to feed the column will reduce the heating vapour consumption from 10 to 8,8 kg/dal, and increase the profit by 33,3 %. During the tests the qualitative indicators of rectified alcohol corresponded to the normative ones for "Lux" grade.

Бібл. 11, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: брагоректифікаційна установка, розгінна колона, дефлегматор, конденсатор, спирт, пара, спиртовмісні фракції.

С – питома теплоємність, кДж/(кг·К);

F – поверхня теплопередачі конденсатора;

G – кількість пари, кг/год.;

N – потужність, дал/доба;

n – кількість робочих днів на рік;

P – витрати пари; кг/дал б.с.;

Q – теплове навантаження;

r – теплота конденсації пари, кДж/кг;

t – температура, °C;

б.с. – безводний спирт;

В – вартість природного газу для промислових підприємств, грн./м³;

БРУ – брагоректифікаційна установка;

КВСП – кубова водно-спиртова рідина;

П – прибуток, грн./рік;

РзК – розгінна колона;

СЕАК – сивушно-ефіроальдегідний концентрат;

Індекси:

k – конденсація;

o – охолодження;

v – відомий спосіб;

i – інноваційний спосіб.

В умовах зростаючих цін на енергоносії актуальною задачею для спиртової галузі є розроблення і впровадження енергоефективних технологій ректифікованого етилового спирту, які дозволяють зменшити витрати води і пари та збільшити вихід готового продукту із одиниці сировини. Для її вирішення впроваджують модернізовані брагоректифікаційні установки (БРУ), які

працюють під розрідженням або передбачають обігрів одних колон вторинною парою високого потенціалу інших колон, що працюють під тиском, оснащують установки розгінною та сивушною колонами, збільшують кількість контактних пристроїв, використовують тепло барди і лютерної води, закритий обігрів колон, впроваджують установки циклічної дії тощо [1, 2]. Перспектив-

ним напрямом у створенні енергоефективних технологій є оптимізація роботи теплообмінного обладнання, що входить до складу БРУ, а також використання теплоти вторинної пари [3, 4].

На більшості спиртових заводах України використовують БРУ непрямої дії. Під час роботи таких установок водно-спиртові пари із верхньої частини бражної, епіюраційної і спиртової колон надходять в міжтрубний простір їх дефлегматорів, в яких конденсуються переважно висококиплячі леткі компоненти – вода, складні естери та вищі спирти сивушного масла, температура кипіння яких становить 102-138 °С і вище. Пари, що містять низькокиплячі леткі компоненти – метиловий спирт (температура кипіння 64,3 °С), ефіри та альдегіди, температура кипіння яких є нижчою за температуру кипіння етилового спирту (78,3 °С) і не сконденсувалися в дефлегматорах, надходять для подальшої конденсації в конденсатори [1].

Для конденсації пари в труби конденсаторів і дефлегматорів послідовно подають холодну воду в протитоці з вторинною парою. У разі включення в технологічну схему спиртовловлювачів вода на охолодження послідовно проходить спочатку через труби спиртовловлювачів, а далі конденсаторів і дефлегматорів. В зимній період температура охолодної води становить 10-15 °С, а в літній період 20-25 °С. Температура води на виході після дефлегматорів становить 65-70 °С. Після конденсації низькокиплячих летких домішок в конденсаторах температура води підвищується в середньому на 2-3 °С, тому на охолодження дефлегматорів в їх труби надходить більш тепла вода.

Найчастіше продуктивність БРУ знижується влітку. Це пояснюється недостатніми об'ємами води на охолодження навіть при повністю відкритій запірній арматурі або недостатньою площею поверхні теплопередачі дефлегматорів. У першому випадку потрібно збільшувати переріз трубопроводів підводу води, у другому – передбачати збільшену проти розрахункової площі поверхні теплопередачі дефлегматорів. У разі нестачі води на охолодження теплообмінного обладнання влітку воду попередньо охолоджують в пароежекторних, абсорбційних або компресійних холодильних машинах. В зимній період воду охолоджують в повітряних конденсаторах. Всі вищенаведені способи потребують додаткових енерговитрат.

Питанням оптимізації роботи теплообмінного обладнання присвячена значна кількість наукових праць. Одними із факторів оптимізації є відповідність поверхні теплопередачі дефлегматорів і конденсаторів їх тепловому навантаженню, а також способи їх приєднання

до водяної комунікації. В розрахунках поверхні теплопередачі дефлегматора теплове навантаження визначається за кількістю тепла, яке виділилось під час конденсації спиртової пари, що утворює флегму. Практично ця величина становить 98-99,5 %. На частку конденсатора залишається не більше 2-2,5 % пари. Пара, що виходить із верхніх частин колон, конденсується в дефлегматорах за температури 60-65 °С. В конденсаторах пара конденсується за більш низької температури (20-30 °С). В якості конденсаторів використовують вертикальні кожухотрубні теплообмінники. Відомі випадки використання і горизонтальних багатоходових (по пару і воді) конденсаторів, які встановлюють безпосередньо над дефлегматорами. До недавніх часів широко застосовувались мідні одноходові конденсатори. Сучасні БРУ оснащені конденсаторами, виготовленими із нержавіючої сталі марки 08X12H10, 10X12H10T (AISI 304, AISI 316), в середині яких в трубних решітках ввальцьовані або приварені труби діаметром 25-38 мм довжиною 1,5-3 м. Діаметр кожуха конденсатора дорівнює 300-800 мм [5].

В підігрівачах бражки установки непрямої дії конденсується 80-90 % пари, що виходить із бражної колони. Теплове навантаження на конденсатори епіюраційної, спиртової, розгінної колон і колони кінцевого очищення незначне: в них конденсується 0,5-2 % пари. В конденсаторі сивушної колони конденсується близько 1/5-1/6 частина пари, що виходить із колони. Для цих колон теплове навантаження на конденсатор (Q) складається із теплоти конденсації (Q_k) і теплоти охолодження конденсату (Q_o):

$$Q = Q_k + Q_o = G \cdot r + G \cdot c \cdot (t_k - t_o), \quad (1)$$

де G – кількість пари, яка надходить в конденсатор, кг/год.; r – теплота конденсації пари, кДж/кг; c – питома теплоємність конденсату, кДж/(кг·К); t_k і t_o – відповідно температура конденсації і температура охолодження конденсату, °С (або К).

Для розрахунку поверхні теплопередачі конденсатора визначають окремо поверхню конденсації (F_k) і поверхню охолодження (F_o):

$$(F_k) = \frac{Q_k}{\Delta t_k \cdot k_k}, \quad (2)$$

$$(F_o) = \frac{Q_o}{\Delta t_o \cdot k_o}. \quad (3)$$

Коефіцієнт теплопередачі в значній мірі залежить від швидкості руху води в трубах конденсатора, яка змінюється в широких межах – від 0,01 до 0,5 м/с.

У разі перевантаження колони по паровому потоку для запобігання втрат спирту з неконденсованими газами розрахункову площу поверхні конденсатора необхідно збільшити щонайменше на 20 %. У цьому випадку конденсатори слугують резервною поверхнею теплопередачі.

Існують різні способи приєднання дефлегматорів і конденсаторів БРУ до продуктової і водяної комунікацій [6]. В більшості випадків на заводах використовують схему послідовного приєднання, згідно якої спирто-водяна пара і вода на охолодження надходять в нижній барабан дефлегматора, а відводяться з верхнього (рис. 1а).

Недоліком такої схеми є зменшення інтенсивності процесу теплообміну в напрямку руху води від барабана до барабана. Щоб зберегти постійну швидкість пари і уникнути зниження коефіцієнта теплопередачі, необхідно зменшувати розміри барабанів в напрямку руху пари.

Істотні переваги має паралельне приєднання барабанів дефлегматора до водяної комунікації (рис. 1б). За цієї схеми корисна різниця температур між спирто-водяною парою і водою в барабанах дефлегматора приблизно однакова і достатньо велика, тому процес конденсації пари протікає інтенсивно в кожному барабані. Найбільш раціональною схемою приєднання дефлегматорів є протитоківна схема з введенням спирто-водяної пари у верхній барабан, а води – в нижній.

Для оптимізації роботи теплообмінного обладнання вагоме значення мають схеми з'єднання дефлегматорів і вертикальних конденсаторів БРУ. На спиртових заводів зустрічається схема, за якої спирто-водяна пара із дефлегматора надходить у верхню частину міжтрубного простору конденсатора, а неконденсовані гази відводяться у спиртовловлювач з нижньої частини конденсатора (рис. 1).

Більш ефективним є спосіб, згідно якого спирто-водяна пара із дефлегматора надходить в середню частину конденсатора, а неконденсовані гази відводяться з верхньої його частини (рис. 2). Через те, що густина спирто-водяної пари, що надходить в конденсатор, за підвищеного вмісту спирту є більшою від густини повітря, то повітря збирається переважно у верхній частині конденсатора, звідки його відводять. Ту ж частину повітря, яка потрапляє у нижню частину конденсатора, відводять через штуцер для виходу неконденсованих газів.

Для підвищення експлуатаційних характеристик БРУ авторами розроблена інноваційна технологія ректифікованого етилового спирту, яка передбачає живлення розгінної колони спиртовмісними фракціями у пароподібному стані: парою, яка надходить із сепаратора вуглекислого газу, а також парою, що не конденсувалася в дефлегматорах бражної, епіюраційної та спиртової колон.

Метою роботи було дослідження ефективності інноваційної технології ректифікованого етилового спирту у виробничих умовах: визначення витрати води на охолодження дефлегматорів бражної, епіюраційної, спиртової та розгінної колон, витрати пари на обігрів колон БРУ; розрахунок очікуваної економічної ефективності.

Матеріали і методи. Методи досліджень – аналітичні, розрахункові, фізико-хімічні та хроматографічні з використанням приладів та методики досліджень, що застосовуються у виробництві спирту етилового ректифікованого [7]. Витрати води контролювали за допомогою витратомірів постійного перепаду тиску РМ, вторинної пари – за допомогою витратомірів TVA [8].

Виклад основних результатів досліджень. Відомі способи отримання ректифікованого спир-

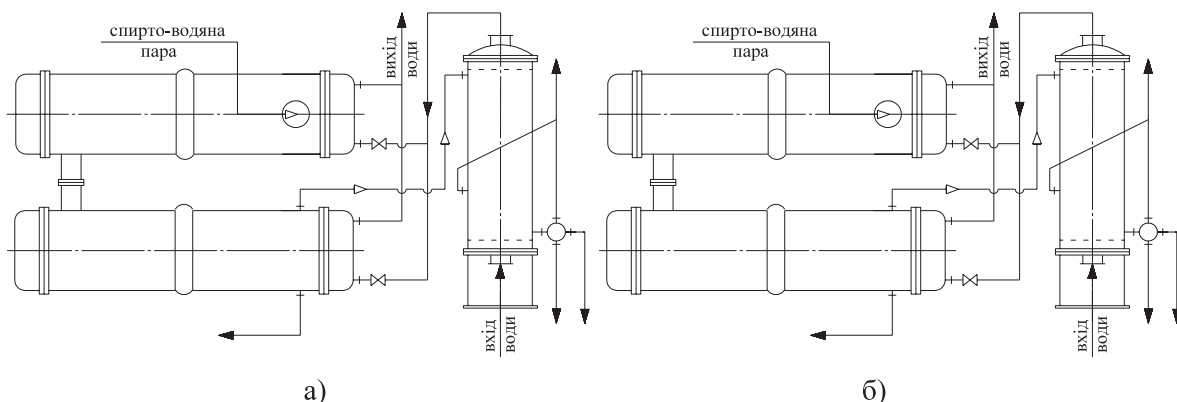


Рис. 1. Схема послідовної (а) і паралельної (б) подачі води із конденсатора в барабани дефлегматора

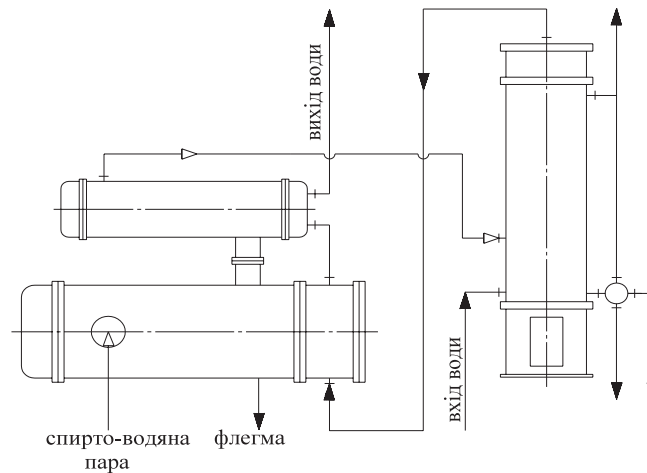


Рис. 2. Схема приєднання продуктивних і водяних комунікацій до барабанів дефлегматора і конденсатора

ту в БРУ непрямої дії, оснащеної розгінною колоною (РзК), передбачають введення на її тарілку живлення спиртовмісних напівпродуктів і побічних продуктів у вигляді конденсату пари з температурою 25-30 °С із спиртовловлювачів, конденсатора сепаратора вуглекислого газу, конденсаторів бражної, епіюраційної і спиртової колон, а також конденсату парів сивушної фракції і сивушного спирту [9]. Для ефективного виділення і концентрування летких домішок спирту в РзК необхідною умовою є додаткові витрати тепла на їх нагрівання до температури 75-80 °С, що відповідає температурі на тарілці живлення, а також збільшення витрати гріючої пари на 28,7 % (від 2,56 до 3,59 кг/кг безводного спирту (б.с.), введеного в колону) [3].

Для оптимізації роботи БРУ запропоновано подавати на тарілку живлення РзК спиртовмісні фракції у пароподібному стані – пари із сепаратора вуглекислого газу, що не сконденсувалася в дефлегматорах бражної, епіюраційної (головну фракцію) і спиртової колон (непастеризований спирт), а також пари сивушної фракції і сивушного спирту. Технічне рішення виключає необхідність додаткової витрати гріючої пари на попереднє нагрівання і догрівання цих фракцій до температури кипіння для їх випаровування в РзК. Для подачі фракцій живлення у вигляді пари різниця тисків в місцях їх відбору і вводу в колону повинна становити 0,1-5 м вод. ст. [10].

Дослідження ефективності запропонованого способу проводились у виробничих умовах ДП “Чуднівський спиртовий завод”. Апаратурно-технологічна схема ресурсо- та енергозберігаючої БРУ з використанням інноваційного способу представлена на рис. 3.

Установка працювала наступним чином. Дозріла спиртова бражка (Б) спочатку надходила в бражний

підігрівач 3, в якому підігрівалася водно-спиртовою парою із бражної колони (БК) 2 до температури 70-85 °С, далі в сепаратор 1 для звільнення від вуглекислого газу та інших несконденсованих газів, після чого поступала на тарілку живлення БК 2. В сепараторі 1 разом з несконденсованими газами виноситься деяка кількість спирту. Для його вилучення пару із верхньої частини сепаратора 1 спрямовували в концентраційну частину РзК 11 через витратомір FIT4 і аналогову заслінку VGA4. В нижні частини БК 2, ЕК 5, СК 7 і РзК 11 безперервно подавали гріючу пару (П). Із кубової частини БК 2 виводили звільнену від спирту і летких домішок барду (БрД). В труби дефлегматорів 4, 6, 8, 9, 13, конденсатора 17 і спиртовловлювача 18 подавали воду на охолодження. Конденсат водно-спиртової пари із підігрівача 3 і водяної секції дефлегматора 4 подавали у верхню частину ЕК 5. Звільнений від головних (естерів та альдегідів), частини верхніх проміжних (вищих спиртів сивушного масла) і кінцевих (метилового спирту) домішок спирту бражний дистилят — епіурат (Е) подавали на живлення СК 7. Несконденсовані в дефлегматорі 6 низькокиплячі пари головної фракції (ГФ) спрямовували через витратомір FIT3 і аналогову заслінку VGA3 в концентраційну частину РзК 11. В СК 7 відбувалася очистка етилового спирту від проміжних і кінцевих домішок та його концентрування. Ректифікований (пастеризований) спирт (РС) відбирали з 5-, 7- та 10-ї тарілок, рахуючи зверху СК 7. Проміжні домішки виводили із цієї колони у вигляді двох продуктів: сивушної фракції (СФ), яку відбирали із парового простору 5-, 7-, 9- та 11-ї тарілок, рахуючи знизу колони, і сивушного спирту (СС), який відбирали із парового простору 17-, 20- та 25-ї тарілок, рахуючи знизу. Для вилучення етилового спирту пари СФ і СС спрямовували в концентраційну частину РзК

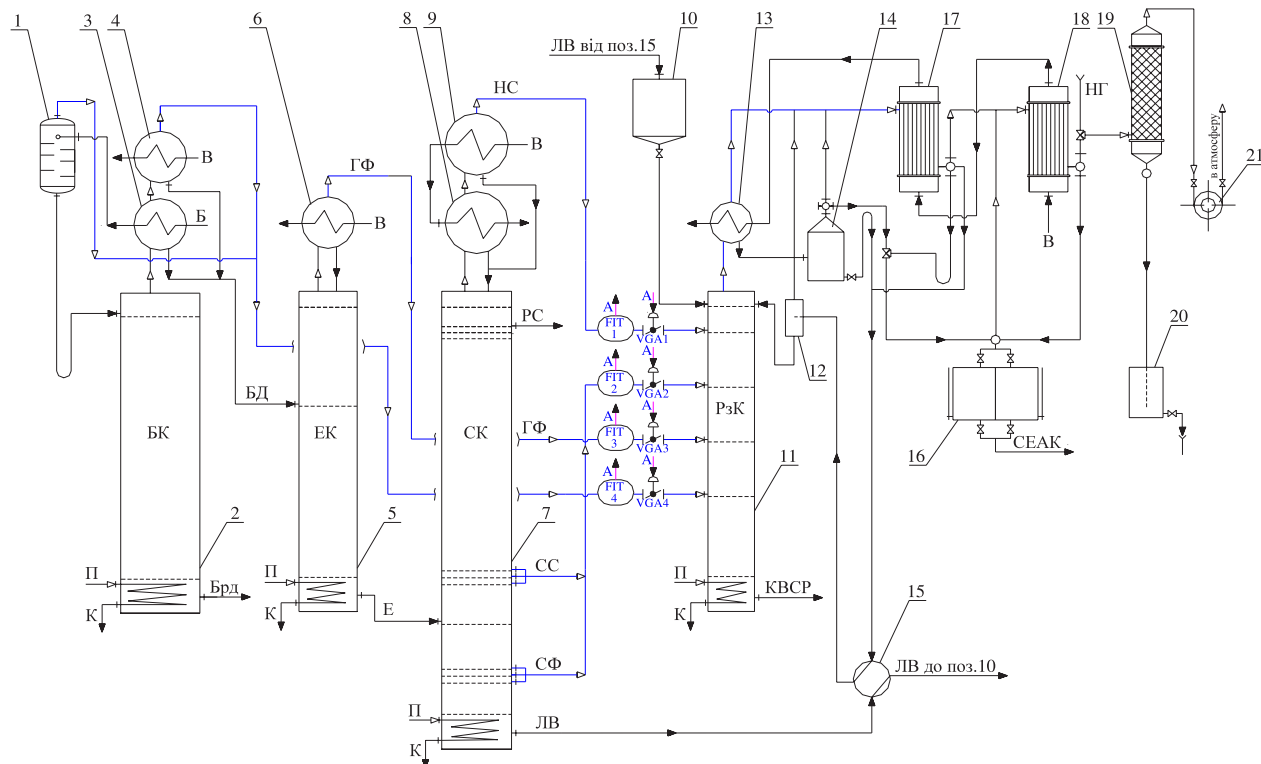


Рис. 3. Енергоефективна БРУ з потоками живлення розгінної колони у пароподібному стані:

- 1 – сепаратор вуглекислого газу; 2 – бражна колона; 3 – підігрівач бражки; 4, 6, 8, 9, 13 – дефлегматори; 5 – спиртова колона; 7 – спиртова колона; 10 – напірний збірник лютерної води; 11 – розгінна колона; 12 – сепаратор флегми; 14 – декантатор; 15 – теплообмінник; 16 – збірник СЕАК; 17 – конденсатор розгінної колони; 18 – спиртовловлювач; 19 – барометричний конденсатор; 20 – барометричний ящик; 21 – вакуум-насос.

Умовні позначення: БК – бражна колона; Б – бражка; БД – бражний дистилят; БрД – барда; В – вода на охолодження; ГФ – головна фракція спирту етилового; ЕК – епюраційна колона; ЛВ – лютерна вода; СЕАК – сивушно-естеро-альдегідний концентрат; СС – сивушний спирт; СФ – сивушна фракція; РзК – розгінна колона; РС – ректифікований спирт; КВСП – кубова водно-спиртова рідина; К – конденсат; П – пара

11 через витратомір FIT2 і аналогову заслінку VGA2. Низькокиплячі водно-спиртові пари, що містили головні та кінцеві домішки, які не сконденсувалися в дефлегматорах 8 і 9, через витратомір FIT1 і аналогову заслінку VGA1 спрямовували у верхню зону концентраційної частини РзК 11. Вищевказані витратоміри і заслінки були встановлені на відповідних парових трубопроводах. Керування роботою заслінок відбувалося за допомогою аналогового сигналу (А), який надходив від контролера. Для подачі несконденсованих парів із сепаратора 1, дефлегматорів 4, 6, 9 і парів СФ та СС в РзК 11 різниця тисків в місцях їх відбору і введення в колону становила 0,5-1 м вод. ст. Для забезпечення такого режиму РзК 11 працювала під розрідженням, яке підтримувалося за

допомогою вакуум-насосу 21 і барометричного конденсатора 19 з барометричним ящиком 20.

Для проведення гідроселекції на верхню тарілку РзК 11 із напірного збірника 10 безперервно надходила лютерна вода (ЛВ) з температурою 90-95 °С в такій кількості, щоб концентрація спирту в кубовій рідині становила 4-8 % об. В РзК 11 спиртовмісні пари побічних продуктів і напівпродуктів брагоректифікації розділялися на два потоки: верхній, збагачений головними (складні етери, альдегіди) і проміжними (вищі спирти СФ і СС, у тому числі С3, С4, С5), домішками спирту, та нижній – кубову водно-спиртову суміш, звільнену від них. Пара, яка виходила із верхньої частини колони, конденсувалася в дефлегматорі 13, з яко-

го її конденсат самопливом надходив в декантатор 14. В декантаторі гетерогенна суміш розшаровувалась на сивушно-ефіроальдегідний концентрат (СЕАК), який відбирали із верхньої частини декантатора, і збагачений водою нижній шар, який спрямовували на верхню тарілку РзК 11 у вигляді флегми на зрошення. Флегму попередньо підігрівали теплом ЛВ в теплообміннику 15 до температури 90-95 °С, яка відповідала температурі на верхній тарілці колони 11, і пропускали через сепаратор 12 для відділення газів. Вихід СЕАК становив біля 0,4-0,5 % від введенного в БК 2 спирту. Кубову водно-спиртову рідину (КВСП), звільнену від головних, проміжних і частини кінцевих домішок, безперервно виводили із нижньої частини РзК 11 і далі подавали на верхню тарілку БК 2.

Тиск води в робочому колекторі становив 25 м вод. ст. і забезпечував подачу води у поверхні теплообмінників та задану швидкість води в трубах теплообмінників. Для розрахунків приймали температуру води на вході в дефлегматори рівною 20 °С, на виході – 70 °С.

На першому етапі проводили дослідження ефективності відомого способу – типової ректифікації, згідно якого в дефлегматорах основних колон конденсувалося 98 % від кількості пари, що виходила із верхньої частини кожної колони. Несконденсовану пару подавали в їх конденсатори, з яких конденсат пари в кількості 2 % направляли на тарілку живлення РзК. На другому етапі досліджували ефективність інноваційної технології за двома способами. За способом І на тарілку живлення РзК подавали не конденсат пари, а несконденсовану в сепараторі вуглекислого газу і дефлегматорах основних колон пару в кількості 2 %. За способом ІІ витрати води на охолодження дефлегматорів зменшували таким чином, що в дефлегматорах конденсувалося 95 % пари від кількості пари, що виходила із кожної колони, а на тарілку живлення РзК подавали несконденсовану в них пару в кількості 5 %. Під час досліджень контролювали якість отриманого спирту етилового ректифікованого.

Витрати води і гріючої пари перераховували на 1 дал б.с. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Із таблиці видно, що використання способу І дозволило зменшити загальні витрати води на охолодження на 0,013 м³/дал б.с. (2,1 %), а витрати пари в РзК – на 0,9 кг/дал б.с. (1,4 %). За способом ІІ витрати води зменшилися на 0,032 м³/дал б.с. (5,1 %), а пари – на 1,2 кг/дал б.с. (1,9 %). При цьому спирт етиловий ректифікований за своїми якісними показниками відповідав нормативним показникам спирту сорту “Люкс” згідно ДСТУ 4221:2003 [11].

Прибуток (П) від впровадження інноваційної технології розраховували для спиртового заводу середньої потужності (3000 дал спирту на добу) за формулою:

$$П = (P_v - P_i) \cdot N \cdot n \cdot k \cdot V \text{ (грн./рік)}, \quad (4)$$

де P_v – витрати пари згідно відомого способу, кг/дал б.с.;

P_i – витрати пари згідно інноваційного способу, кг/дал б.с.;

N – потужність спиртового заводу, дал/добу;

n – кількість робочих днів на рік;

k – коефіцієнт перерахунку витрати природного газу для отримання пари, м³/кг;

V – вартість природного газу для промислових підприємств, грн./м³ з ПДВ.

За умови використання способу І прибуток становить:

$$\dot{I} = (64 - 63,1) \cdot 3000 \cdot 330 \cdot 0,08 \cdot 20,3 = 1446984 \text{ грн./} \partial^3 \partial.$$

За умови використання способу ІІ прибуток становить:

$$\dot{I} = (64 - 62,8) \cdot 3000 \cdot 330 \cdot 0,08 \cdot 20,3 = 1929312 \text{ грн./} \partial^3 \partial.$$

Таблиця 1. Витрати води (W) і пари (P) в БРУ непрямої дії, оснащеної розгінною колоною

Колони, БРУ	W, м³/дал б.с.			P, кг/дал б.с.		
	відомий спосіб	інноваційний		відомий спосіб	інноваційний	
		спосіб І	спосіб ІІ		спосіб І	спосіб ІІ
Бражна	0,065	0,064	0,062	20	20	20
Епюраційна	0,154	0,151	0,146	12	12	12
Спиртова	0,282	0,276	0,268	22	22	22
Розгінна	0,128	0,125	0,121	10	9,1	8,8
БРУ	0,629	0,616	0,597	64	63,1	62,8

Висновки.

1. Використання інноваційної технології ректифікації етилового спирту дозволить оптимізувати роботу теплообмінного обладнання і розгінної колони шляхом подачі на її тарілку живлення спиртовмісних фракцій у вигляді пари.

2. Організація парових потоків живлення розгінної колони призводить до зменшення загальних витрат води на охолодження на 0,013 м³/дал б.с. (2,1 %) і пари на 0,9 кг/дал б.с. (1,4 %). За обраного способу прибуток для заводу потужністю 3000 дал спирту на добу становитиме близько 1,5 млн. грн. на рік.

3. У разі збільшення об'ємів спиртовмісної пари шляхом збільшення кількості несконденсованої пари в дефлегматорах основних колон від 2 до 5 % витрати води зменшуються на 0,032 м³/дал б.с. (5,1 %), а пари на 0,9 кг/дал б.с. (1,9 %). За такого режиму роботи установки прибуток для заводу потужністю 3000 дал спирту на добу збільшується на 33,3 % порівняно із способом І.

4. Під час використання відомого та дослідження інноваційних способів ректифікації спирт етиловий ректифікований за своїми якісними показниками відповідав вимогам ДСТУ 4221:2003 для спирту сорту "Люкс".

5. Відсутність в технологічній схемі конденсаторів основних колон і спиртовловлювачів дозволяє зменшити металоємність БРУ на 10 %.

Враховуючи отримані позитивні результати, доцільним є дослідження ефективності роботи РЗК та інших колон БРУ за умови збільшення об'ємів спиртовмісних парів, які надходять на їхні тарілки живлення, до 10-25 % і більше.

ЛІТЕРАТУРА

1. Українець А.І., Шиян П.Л., Сосницький В.В. (2006). Перспективні напрямки енергозбереження в спиртовому виробництві. Харчова і переробна промисловість. № 4. С. 4-12.
2. Міщенко О.С. (2020). Енергоефективна технологія переробки фракції головної етилового спирту з отриманням спирту етилового ректифікованого. Харчова промисловість. № 28. С. 115-122.
3. Шиян П.Л. (2009). Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія. / П.Л. Шиян, В.В. Сосницький, С.Т. Олійнічук. – К.: Видавничий дім "Асканія", 424 с.
4. Bulii, Y., Kuts, A., Yuryk, I., Forsiuk, A. (2021). Improving the efficiency of mass-exchange between liquid and steam in rectification columns of cyclic action, Ukrainian Food Journal, 10 (2), pp. 346-360.
5. Цыганков П.С. (2001). Руководство по ректификации спирта / П.С. Цыганков, С.П. Цыганков // М.: ПИЩЕПРОМИЗДАТ. 400 с.
6. Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування: Навч. посіб. / За ред. проф. І.Ф. Малежика. – К.: НУХТ, 2012. 543 с.
7. Горілки, спирт етиловий та водно-спиртові розчини. Газохроматографічний метод визначення вмісту мікрокомпонентів: ДСТУ 4222:2003. [Чинний від 2004-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. 18 с.
8. Бондаренко С.Г., Складанний Д.М., Абрамова А.О. (2020) Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання рівня та витрат. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 117 с.
9. Маринченко В.О., Домарецький В.А., Шиян П.Л. та ін. (2003) Технологія спирту // під ред. проф. В.О. Маринченко. Вінниця: "Поділля – 2000". 496 с.
10. Патент UA на винахід № 126533 B01D 3/14 (2006.01), C12 F3/10 (2006.01), C12 P7/00. Спосіб отримання ректифікованого спирту / Булій Ю.В., Дмитрук А.П., Дмитрук П.А. Заявка а 202005971. Дата подання – 18.09.2020. Дата, з якої є чинними права – 27.10.2022. Опубл. 26.10.2022. Бюл. № 43/2022.
11. Спирт етиловий ректифікований. Технічні умови: ДСТУ 4221:2003. [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.

ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGY OF RECTIFIED ETHYL ALCOHOL

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

¹PhD (Engin.), Assistant, National University of Food Technologies, Volodymyrska str., 68, Kyiv, 01601, Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-1905-3706, e-mail: yvbuliy@gmail.com

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

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-7179-7251, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.6>

In the conditions of rising energy prices, the urgent task for the alcohol industry is the development and implementation of energy-efficient technologies of rectified ethyl alcohol, which allow reducing water and steam consumption and increasing the output of the finished product from a unit of raw materials. To solve it, modernized distillation units (BRU) are being implemented, which work under rarefaction or provide for the heating of some columns by the secondary steam of high potential of other columns operating under pressure, equipping the units with booster and sieving columns, increasing the number of contact devices, using the heat of bard and Luther water, closed column heating, introducing cyclical installations, etc. A promising direction in the creation of energy-efficient technologies is the optimization of the operation of the heat exchange equipment included in the BRU, as well as the use of the heat of secondary steam.

One of the factors for optimizing heat exchange equipment is the correspondence of the heat transfer surface of dephlegmators and condensers to their heat load, as well as the methods of their connection to water communication. Also, to optimize the operation of heat exchange equipment, the connection schemes of dephlegmators and vertical condensers of BRU are of great importance.

The efficiency of the innovative technology of rectified alcohol has been determined under production conditions, which provides for the supply of alcohol-containing fractions in the form of non-condensed in the dephlegmators of the main columns of vapour to the feed plate of the impurity concentration column. This solution allows to reduce the total water consumption by 0,032 m³/dal (5,1 %) and the heating vapour by 1,2 kg/dal (1,9 %) in terms of anhydrous alcohol in comparison with the known method. The expected profit for the plant with a capacity of 3000 dal of alcohol per day will be about UAH 1,5 million per year. Increasing the amount of non-condensed vapour from 2 to 5 % to feed the column will reduce the heating vapour consumption from 10 to 8,8 kg/dal, and increase the profit by 33,3 %. During the tests the qualitative indicators of rectified alcohol corresponded to the normative ones for "Lux" grade.

References 11, tables 1, figures 3.

Keywords: distillation unit, impurity concentration column, dephlegmator, condenser, alcohol, vapour, alcohol-containing fractions..

1. *Ukrayinets, A.I., Shyyan, P.L., Sosnytskyi, V.V.* (2006). Perspektivni napryamky enerhozbezheniya v spyrtovom vyrobnytstvi [Promising directions of energy saving in alcohol production]. *Kharchova i pererobna promyslovist'*, 4, 4-12. (in Ukr.)

2. *Mishchenko, O.S.* (2020). Enerhoefektyvna tekhnolohiya pererobky fraktsiyi holovnoyi etylovoho spytu z otrymannym spytu etylovoho rektyfikovanoho [Energy-efficient technology for processing the fraction of the main ethyl alcohol to obtain rectified ethyl alcohol]. [*Kharchova promyslovist'*], 28, 115-122. (in Ukr.)

3. *Shyyan, P.L.* (2009). Innovatsiyni tekhnolohiyi spyrtovyi promyslovosti [Innovative technologies of the alcohol industry]. *Teoriya i praktyka: monohrafiya / P.L. Shyyan, V.V. Sosnytskyi, S.T. Oliynichuk.* – K.: [Vydavnychyy dim "Askaniya"], 424 p. (in Ukr.)

4. *Bulii, Y., Kuts, A., Yuryk, I., Forsiuk, A.* (2021). Improving the efficiency of mass-exchange between liquid and steam in rectification columns of cyclic action, [*Ukrainian Food Journal*], 10 (2), pp. 346-360.

5. *Tsygankov, P.S., Tsygankov, S.P.* (2001). *Rukovodstvo po rektifikatsii spirta* [Guide to the rectification of alcohol]. M.: [PISHCHEPROMIZDAT], 400 p. (In Rus.)

6. *Protsesi i aparaty kharchovykh vyrobnytstv* [Processes and devices of food production]. *Kursove proektuvannya: Navch. posib. / Za red. prof. I.F. Malezhyka.* – K.: [NUKHT], 2012, 543 p. (in Ukr.)

7. *Horilky, spyrt etylovyy ta vodno-spyrtovi rozchyny. Hazokhromatohrafichnyy metod vyznachennya vmistu mikrokomponentiv* [Vodka, ethyl alcohol and water-alcohol solutions. Gas chromatographic method of determining the content of microcomponents], [DSTU 4222:2003]. Chynnyy vid 2004-01-01. – K.: [Derzhspozhyvstandart Ukrayiny], 2003, 18 p. (in Ukr.)

8. *Bondarenko, S.H., Skladannyi, D.M., Abramova, A.O.* (2020). *Tekhnolohichni vymiryuvannya i prylady. Vymiryuvannya rivnya ta vytrat* [Technological measurements and devices. Level and cost measurement]. Kyiv: [KPI im. Ihorya Sikors'koho]. 117 p. (in Ukr.)

9. *Marynchenko, V.O., Domaretskyi, V.A., Shyyan, P.L.* ta in. (2003). *Tekhnolohiya spyrtu* [Alcohol technology] // pid red. prof. V.O. Marynchenko. [Vinnytsya: "Podillya", 2000, 496 p. (in Ukr.)

10. *Buliy, YU.V., Dmytruk, A.P., Dmytruk, P.A.* (2022). *Sposib otrymannya rektyfikovanoho spyrtu* [The method of obtaining rectified alcohol]. Patent of Ukraine for the invention № 126533 B01D 3/14 (2006.01), C12 F3/10 (2006.01), C12 P7/00; declared 18.09.2020; published 26.10.2022, № 43.

11. *Spyrt etylovyy rektyfikovanyy. Tekhnichni umovy* [Rectified ethyl alcohol. Specifications]: DSTU 4221:2003. Chynnyy vid 2008-01-01. – K.: [Derzhspozhyvstandart Ukrayiny], 2007, 12 p. (in Ukr.)

Отримано 14.10.2023

Received 14.10.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 661.961.11

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ВОДНЮ З ВИКОРИСТАННЯМ БОРОГІДРИДУ НАТРІЮ

Трошенькін Б.А.¹, д.т.н., Кравченко О.В.², член-кор. НАН України, Трошенькін В.Б.³, к.т.н

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгірного НАН України, 61046, Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10

¹професор., ORCID 0000-0003-1505-4717, тел. +38 (057)-349-47-75,;

²ORCID 0000-0003-0048-6744; e-mail: krav@ipmach.kharkov.ua, тел. +38 (067) 570-03-16,

³e-mail: troshenkinv@gmail.com, ORCID 0000-0001-9661-9489, тел. 067-79-55-267

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.7>

Розроблено процес отримання водню гідролізом суспензії натрійборгідриду (NaBH_4) в мінеральній олії, який у поєднанні з паливними елементами призначений для використання в енергоустановках безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Створений процес дозволяє уникнути можливого вибуху БПЛА у разі застосування розробленого раніше процесу гідролізу натрійборгідриду, стабілізованого розчином їдкою натру. Дано порівняння характеристик цих двох технологічних процесів.

Бібл. 7.

Ключові слова: водень, натрійборгідрид, кинетика реакції, тепломасообмін, конструкція реактора.

Останнім часом активізувалися роботи зі створення безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Більшість з них на цей час мають реактивну тягу або оснащено двигунами внутрішнього згоряння [1]. До недоліків таких БПЛА можна віднести наявність теплового сліду та великий рівень акустичного шуму. Тому рішенням цих проблем є використання електричних двигунів, у тому числі з паливними елементами. В цьому випадку енергоємність натрійборгідриду (NaBH_4) та простота обслуговування газогенераторів з його використанням дозволяють у поєднанні з паливними елементами значно збільшити надійність та дальність польоту, забезпечити нове покоління БПЛА безшумністю та відсутністю суттєвого високотемпературного теплового сліду.

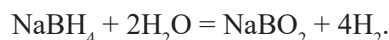
Як відомо, БПЛА широко використовуються у різних галузях господарської діяльності. Дрони забезпечують: контроль стану нафто- та газопроводів, оцінку розвитку сільгосподарських посівів, картографування площі повеней та лісових пожеж тощо.

Натрійборгідрид є білою кристалічною речовиною. Добре закупореним може зберігатися тривалий час без розкладання.

Увага до цієї речовини обумовлена, насамперед, значною кількістю вмісту водню. Так, при взаємодії з водою на кожен кілограм NaBH_4 виділяється $2,37 \text{ м}^3$ водню. У той час як при взаємодії, наприклад, алюмінію з водним розчином їдкою натру утворюється лише $1,24 \text{ м}^3/\text{кг}$ водню, а при взаємодії кремнію - $1,59 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Іншими не менш важливими перевагами NaBH_4 є висока термічна стабільність і здатність розчинятися у воді.

Гідроліз натрійборгідриду відповідає рівнянню:



На БПЛА нескладно розмістити ємність з NaBH_4 і компактний генератор водню. Дрон, оснащений електродвигуном, здатний літати тривалий час. Попередні розрахунки показують, що паливні елементи які використовуються в даний час, можуть виробляти значно більше енергії, ніж такіж, за масою літій-іонні батареї.

Раніше розроблений процес був орієнтований головним чином на застосування у наземних та морських транспортних засобах [2].

З метою підвищення надійності енергоустановки у складі БПЛА, що працює на NaBH_4 пропонується замінити ємнісний реактор з природною циркуляцією на більш ефективний плівковий генератор водню і виключити зі складу використовуваного обладнання найбільш громіздкі агрегати і системи з великими масогабаритними характеристиками.

У запропонованому раніше технологічному процесі отримання водню NaBH_4 подавали до реактора у вигляді розчину, стабілізованого їдким натром (NaOH). Застосування NaOH призводить до підвищення вибухонебезпечності БПЛА. У присутності NaBH_4 гідроксид натрію зазнає зміни кристалічної модифікації:

α -NaOH в β -NaOH.

Отримана нестабільна форма β -NaOH розпадається на Na_2O і H_2 . Перекис натрію взаємодіє з NaBH_4 з високим екзотермічним ефектом, що призводить до вибуху [3].

Підвищити безпеку процесу вдалося при заміні розчину NaBH_4 , стабілізованого NaOH, на суспензію NaBH_4 в мінеральній олії (вазелинової, веретенної тощо) [4].

Необхідність заміни реактора пояснюється кількома причинами. У вивченому процесі основні дослідження були проведені у балонному реакторі об'ємом $0,2 \text{ м}^3$, встановленому вертикально (внутр. діаметр $0,332 \text{ м}$, довжина $2,62 \text{ м}$). Швидкість реакції в основному залежить від інтенсивності природної циркуляції розчину, що виникає при газоутворенні. Реакція супроводжується виділенням значної кількості тепла. Відведення цього тепла в навколишнє БПЛА повітря утруднене. Крім того, в даному ємнісному реакторі міститься значна кількість реагентів, що не дозволяє швидко його відключити. Перелічені недоліки усуваються в трубчастому плівковому апараті. В цьому випадку інтенсивність тепловіддачі в навколишнє середовище в 3-4 рази вище, ніж за природної циркуляції потоків в реакторі.

У плівковому апараті знаходиться незначна кількість реагентів, що дозволяє швидко виводити його з роботи. Для розрахунку плівкових реакторів можна скористатися рекомендаціями, розробленими для плівкових випарників [5, 6].

Зниження ваги енергоустановки БПЛА досягається за рахунок виключення зі складу відомої реакторної установки низки систем. Випробувана установка складалася з трьох основних блоків: блок підготовки реагентів, реакторний блок та блок очищення та зберігання водню. Устаткування блоку підготовки реагентів включає ємність для приготування розчину NaBH_4 , ємність для приготування розчину стабілізатора NaOH, ємність для приготування розчину каталізатора (CoCl_2) і відповідні насоси для подачі розчинів в реактор. Усі перелічені види устаткування видаляються. Залишається лише ємність для зберігання суспензії натрійборгідриду і дозувальний насос для подачі її в реактор.

Також немає потреби у блоці зберігання водню. Для очищення водню від крапель достатньо сепаратора самого плівкового апарату.

Далі наведено результати випробувань обох систем, а також послідовність розрахунку тепломасообміну в апаратах з природною циркуляцією та зі плівкою, що стікає.

Кінетику процесу взаємодії NaBH_4 з водою вивчали в реакторі об'ємом $1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (внутр. діаметр $72 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, довжина $0,24 \text{ м}$).

При 170°C 10%-вий (% мас.) розчин натрійборгідриду в $1,2 \text{ N}$ їдкою натра виділяє водень зі швидкістю $0,0374 \text{ м}^3/\text{с}$ на 1 кг гідриду. Повнота реакції становить $99,1\%$.

Досліди на балонному реакторі ємністю $0,2 \text{ м}^3$ показали зниження швидкості виділення водню по відношенню до зафіксованої в кінетичному реакторі. Це видно у випадку генерації водню при подачі в реактор 40% розчину NaBH_4 стабілізованого 4%-вим (% мас.) NaOH в присутності CoCl_2 . Концентрація натрійборгідриду в реакторі підтримувалася на рівні 20%. Запуск реактора проводили при попередньому розігріві до $70\text{--}90^\circ\text{C}$. Подальше підвищення температури забезпечувалося за допомогою теплового ефекту реакції. Приблизно через 7-9 хвилин температура реакторі піднімалася до 185°C , тиск - до $2,0 \text{ МПа}$. При кількості каталізатора CoCl_2 не більше 1,5% мас. у перерахунку на кількість NaBH_4 температура реакції знижується до $90\text{--}100^\circ\text{C}$. Збільшення кількості CoCl_2 до 5% мас. призводить до зростання температури реакції до 200°C , а швидкість реакції зростає від $0,0158 \text{ м}^3/\text{с}$ до $0,075 \text{ м}^3/\text{с}$ на 1 кг NaBH_4 . При цьому продуктивність реакторної установки зростає до 5 кг водню на годину.

Порівняльний аналіз закономірностей реакцій взаємодії натрійборгідриду та активованого алюмінію з водою виявив ряд переваг та недоліків цих способів отримання водню.

Так, застосування натрійборгідриду дозволяє отримати з одиниці маси активної частини речовини приблизно вдвічі більше водню, ніж при використанні активованого алюмінію.

Властивість гідриду розчинятися у воді дозволяє уникнути розшарування вихідного продукту перед подачею в реактор, що вкрай складно забезпечити у разі приготування пульпи з частинками алюмінію.

При цьому недоліком першого способу виробництва перед другим є необхідність дотримання жорстких вимог щодо техніки безпеки через негативний вплив гідриду на організм людини. Те ж саме стосується продуктів реакції, що зливаються, які необхідно піддавати рекуперації.

Експериментальні дані підтверджують положення про те, що у гетерогенних системах швидкість реакції пропорційна величині площі поверхні каталізатора.

При фіксованій поверхні швидкість виділення водню симбатна зміні хімічної спорідненості.

Оскільки під час реакцій відбувається суттєве збільшення об'єму системи, то в умовах гравітації виникає природна циркуляція потоків. Інтенсивність циркуляції впливає, в свою чергу, на швидкість процесу газовиділення.

Зі збільшенням діаметра апарату водень, що утворюється, піднімається переважно по центральній частині апарату, що знижує ефект циркуляції рідини газом. Тому критерій Рейнольдса підйомного потоку входить з негативним ступенем в залежності швидкості газовиділення від хімічної спорідненості.

Ситуація змінюється, якщо як визначальний розмір прийняти діаметр частинки і врахувати ковзання фаз. В цьому випадку виявляється протилежний вплив числа Рейнольдса.

Отже, закони тертя у трифазних потоках неінваріантні щодо зміни просторового масштабу систем, чи, інакше кажучи, перетворень подоби.

У реакціях, що супроводжуються виділенням тепла, зручніше спочатку розраховувати інтенсивність теплообміну і оцінювати швидкість масообміну.

Залужування розчину уникається при заміні балонного реактора з природною циркуляцією на плівковий апарат, в якому час перебування кінцевого продукту обчислюється секундами.

Застосування масляних суспензій NaBH_4 для одержання водню дозволяє виключити перегрів та організувати рівномірний процес. Одночасно вдається підвищити економічність за рахунок зменшення втрат водню під час зберігання та виключення гідрооксиду натрію. Олію регенерують і використовують повторно. Вивчення гідролізу масляних суспензій NaBH_4 виконано у межах зміни параметрів, що відповідають режимам експлуатації автономних установок.

Масові співвідношення NaBH_4 /масло 1:8 та 1:5 є оптимальними. 15% суспензія NaBH_4 (співвідношення 1:5) є більш в'язкою, у зв'язку з чим, для застосування рекомендується 10% суспензія NaBH_4 (співвідношення 1:8).

Зі збільшенням концентрації NaBH_4 з 0,2 до 1,0% мас. швидкість виділення водню зростає. При подальшому зростанні гідроліз згасає. Оптимальне масове співвідношення $\text{H}_2\text{O}/\text{NaBH}_4$ становить 9:1.

Разом з тим, застосування низькоконцентрованих суспензій NaBH_4 є недоцільним через значні витрати води. Тому найбільш прийнятними є 5-10%-ві концентрації NaBH_4 . При збільшенні температури з 70 до 160°C швидкість виділення водню збільшується в 32 рази, ступінь перетворення на 17,5%. Мінімальна температура практично повного гідролізу масляної суспензії NaBH_4 менша, ніж у лужного розчину і дорівнює 150°C.

Збільшення тиску в реакторі з 0,1 до 1,5 МПа позитивно впливає на швидкість гідролізу масляної суспензії натрійборгідриду. Ступінь перетворення NaBH_4 збільшується при цьому на 14%, швидкість виділення водню зростає в 1,94 рази.

Подальше збільшення тиску призводить до зниження виходу водню та зростання часу гідролізу. Таким чином, з проведеної серії експериментів стає ясно, що гідроліз масляної суспензії натрійборгідриду не слід проводити при тисках більших ніж 1,5 МПа.

Встановлені співвідношення вихідних реагентів слід зберігати при обробці масляних суспензій ультразвуком. Крім того, досліди показали, що час гідролізу масляних суспензій у цьому випадку скорочується в 1,5-1,8 рази, вихід водню підвищується на 3,5-4,5%, а швидкість виділення водню збільшується в 1,6-1,8 рази.

Гідроліз масляної суспензії NaBH_4 ускладнений топоміхічними явищами, що зумовлені утворенням твердого метаборату натрію.

У зв'язку з цим для узагальнення дослідних даних прийнято рівняння Б. Ф. Єрофєєва:

$$\alpha = 1 - e^{-kt^n},$$

тут повнота реакції $\alpha = V_\tau/V_{max}$, де V_τ - об'єм газу, що утворюється за час τ ; V_{max} - загальний об'єм отриманого газу, що залежить від температури; k - константа швидкості реакції, яка залежить від температури та природи речовин; n - степінь, яка враховує на яких елементах поверхні теплообміну зароджуються пухирці газу. Значення n і k визначені після подвійного логарифмування дослідних даних.

Разом з тим, молекулярно-кінетичний підхід, розвинутий Єрофєєвим, не торкається енергетичних характеристик реакцій.

Для розрахунку швидкості реакції більш обґрунтовано використання у цьому випадку рівняння [2, 6]:

$$d\alpha/d\tau = L \sum v_i \mu_i,$$

де L - коефіцієнт, який визначається експериментальним шляхом з уточненням значень залежно від рівняння Єрофєєва; $\sum v_i \mu_i$ - хімічна спорідненість; Σ - підсумовування по всіх фазах і речовинах, що беруть участь у реакції; v_i - стехіометричне число; μ_i - хімічний потенціал, що визначається за енергією Гіббса [6]:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ.$$

Для реакції взаємодії NaBH_4 з водою теплота реакції $\Delta H_{298}^\circ = -215,0$ кДж/кг та ентропія $\Delta S_{298}^\circ = 0,353$ кДж/кг.

Як виявилось швидкість реакції симбатна зміні значення спорідненості, але прямої пропорційності не неотримується.

Каталітичний гідроліз NaBH_4 має феноменологічний коефіцієнт L у 25 разів нижчий, ніж той самий коефіцієнт реакції алюмінію з водою. У той же час хімічна спорідненість відрізняється лише у 1,9 раза. Застосування ультразвуку для приготування масляної суспензії NaBH_4 скорочує різницю між коефіцієнтами L у два рази. Це також видно за значеннями коефіцієнтів тепловіддачі між фазами. Так при взаємодії алюмінію, активованого індієм, галієм та оловом, з розчином їдкого натру спостерігаються теплові потоки в межах 3000-4000 Вт/м², коефіцієнт тепловіддачі має значення 1500-1700 Вт/(м² · с).

Значення коефіцієнтів тепловіддачі для випадку каталітичного гідролізу NaBH_4 значно менше. Частково це пояснюється тим, що в сплаві алюмінію виникають мікрогальванічні елементи, що різко інтенсифікує реакцію.

Гальмування процесу виникає також залужуванням середовища внаслідок утворення боратів натрію. Так, при накопиченні продуктів реакції (NaBO_2) з 10% до 50% швидкість виділення водню зменшується вдвічі.

Для забезпечення нормального вивантаження пульпи з реактора кількість метаборату натрію у продуктах реакції не повинна перевищувати 25-30%.

При використанні трубчастих апаратів зі плівкою, що стікає, необхідно користуватися для оцінки внутрішнього теплообміну рекомендаціями роботи [7]. Зовнішній теплообмін БПЛА із навколишнім повітрям забезпечується за рахунок конвекції.

Висновки

1. Розроблено процес отримання водню гідролізом натрійборгідриду в мінеральній олії. Процес у поєднанні з паливними елементами призначений для використання в енергоустановках безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Створений процес дозволяє уникнути можливого вибуху БПЛА у разі застосування розробленого раніше процесу гідролізу натрійборгідриду, стабілізованого розчином їдкого натру.

2. Дано порівняння показників обох процесів. У лужному процесі при використанні ємнісного реактора з природною циркуляцією метод розрахунку складено з урахуванням послідовності розрахунку випарників, термодинамічних та кінетичних закономірностей реакцій, а також даних випробувань дослідних реакторів.

3. Заміна ємнісного реактора на плівковий апарат зі стікаючою плівкою, а також виключення лужних систем дозволяє збільшити керованість енергоустановки

БПЛА. Тепломасообмін усередині труб оцінюється за нормами для випарників зі плівкою, що стікає. Віддача тепла БПЛА в довкілля розраховується залежно від конвективного теплообміну.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Халатов А. А.* Бойові малорозмірні безпілотні літальні апарати з реактивною тягою / А. А. Халатов, О. Ф. Немчін, Є. О. Шквар, А. В. Кузьмін, С. Г. Кобзар. Під ред. Академіка НАН України, д.т.н., проф. А.А. Халатова // Ін-т техн. теплофізики НАН України. - Дніпро: Ліра, 2023, - 144 с. ISBN 978-966-981-807-2.

2. *Трошенькин Б.А., Трошенькин В.Б.* Тепломассообмен при производстве водорода в реакциях борогидрида натрия с водой // Тез. докл. XV Минск. междунар. форума по тепло- и массообмену, 23-26 мая 2016 г. - Минск ИТМО им А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. - Т. 2. - С. 180-184. Режим доступа - https://www.itmo.by/doc/mif_15/Tom2.pdf (Полный текст доклада на CD-«XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum (MIF-XIV). Section 3. Heat and mass transfer in reacting systems.- № 3-19»: В.А. Трошен'кин, В.В. Трошен'кин. Heat and mass transfer in the production of hydrogen in the reaction of sodium borohydride with water. Научное издание ISBN 978-985-7138-05-0).

3. *Мухеева В.И.* Метод физико-химического анализа в неорганическом синтезе. - М.: Наука, 1975. - 272 с..

4. *А. с. 1487366 СССР* МКИ СО1В 35/12. Способ получения десятиводной буры / Т. Н. Долгих, Т. Б. Олейник, Б. А. Трошенькин. - Приоритет 23.04.1987; Оpubл. 15.02.89, Бюл. № 22.

5. *Трошенькин Б.А.* Циркуляционные и пленочные испарители и водородные реакторы. - Киев: Наук. думка, 1985. - 176 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/3495851/>.

6. *Трошенькин Б.А., Трошенькин В.Б.* Тепломассообмен при производстве водорода в реакциях борогидрида натрия с водой // Доклад с презентацией на XV Минском Международном форуме по тепло- и массообмену (ММФ-XV). - Минск, 23-26 мая 2016. - 13 с.. - 13 сл. Режим доступа: <https://www.twirpx.link/file/3457437/>; <https://www.twirpx.com/file/3457433/>.

7. *РТМ 26-01-71-75* (Руководящий технический материал). Испарители со стекающей пленкой. Методика теплового и гидромеханического расчета. - М.: Мин-во хим. и нефт. машиностроения СССР, 1975, - 43 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/3494809/>

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF OBTAINING THE HYDROGEN BY USING SODIUM BOROHYDRIDE

Troshen'kin B.A.¹, Kravchenko O.V.², Troshen'kin V.B.³

A. Pidhirny Institute of Mechanical Engineering Problems of National Academy of Sciences of Ukraine, 61046, Kharkiv, Dm. Pozharsky str., 2/10

¹Dr. Sci. (Engin.), Professor, tel. +38 (057) 349-47-75, ORCID 0000-0003-1505-4717;

²Corresponding member of NAS of Ukraine, Head of Non-Traditional Energy Technologies Depart., tel. +38 (067) 570-03-16, e-mail: krav@ipmach.kharkov.ua, ORCID 0000-0003-0048-6744;

³Ph.D., tel. +38 (067) 79-55-267, e-mail: troshenkinv@gmail.com, ORCID 0000-0001-9661-9489

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.7>

The process of hydrogen obtaining by hydrolysis of a suspension of sodium borohydride (NaBH_4) in mineral oil has been developed, which, in combination with fuel cells, is intended for use in power plants of unmanned aerial vehicles (UMAVs). The created process allows to avoid a possible UMAVs explosion in the event of using the previously developed sodium borohydride hydrolysis process stabilized with caustic soda solution.

A comparison of the characteristics of these two technological processes is given.

For the alkaline process during the use of a capacitive reactor, the calculation method is made taking into account the calculation sequence of evaporators with natural circulation, thermodynamic and kinetic patterns of reactions, as well as test data of experimental reactors.

For NaBH_4 oil suspension hydrolysis devices, a method recommended by the standards for calculating film evaporators is proposed.

The replacement of the capacitive reactor and related alkaline systems with a film device is justified, which will allow to increase the controllability of the UMAVs power plant and improve the heat release into the environment. The film apparatus provides a two to three times increase in the intensity of heat and mass transfer between phases.

The kinetics of the process of interaction of NaBH_4 oil suspension with water was studied in a volume reactor

$1,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ (inner diameter $72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, length 0,24 m).

The use of NaBH_4 oil suspensions for obtaining hydrogen allows to eliminate overheating and organize a uniform process. At the same time, it is possible to increase efficiency

by reducing hydrogen losses during storage and eliminating NaBH_4 . The oil is regenerated and reused. The study of the hydrolysis of NaBH_4 oil suspensions was carried out within the limits of changing the parameters corresponding to the operating modes of autonomous installations.

It is shown that NaBH_4 /oil mass ratios of 1:8 and 1:5 are optimal. 15% suspension of NaBH_4 (ratio 1:5) is more viscous, therefore, 10% suspension of NaBH_4 (ratio 1:8) is recommended for use.

References 7.

Keywords: gas-fired boilers, flue gases, recirculation, heat recovery, condensation prevention.

1. Khalatov A.A., Nemchin O.F., Shkvar Ye.O., Kuzmin A.V., Kobzar S.G. [Small-size jet-powered combat unmanned aircraft systems] / ed. Khalatov A.A. Dnipro : Lira, 2023. 144 pp. ISBN 978-966-981-807-2. (in Ukr.).

2. Troshen'kin B.A., Troshenkin V.B. [Heat and mass transfer in the production of hydrogen in the reactions of sodium borohydride with water] // [Proc. report XV Minsk. International Forum on Heat and Mass Transfer], May 23-26, 2016 - Minsk Institute of Heat and Mass Transfer named after A.V. Lykov of National Academy of Sciences of Belarus. 2016. V. 2, P. 180-184. Access mode - https://www.itmo.by/doc/mif_15/V.2.pdf. (in Rus.).

2. Mikheeva V.I. [Method of physical-chemical analysis in inorganic synthesis]. M.: [Nauka], 1975. 217 p. (in Rus.).

4. A.S. 1487366 USSR MKI SO1V 35/12. [Method for producing borax decahydrate] / T. N. Dolgikh, T. B. Oleinik, B. A. Troshen'kin. Priority 04/23/1987; Publ. 02/15/89, Bulletin. No. 22. (in Rus.).

5. Troshen'kin B.A. [Circulating and film evaporators and hydrogen reactors]. Kyiv: [Naukova Dumka], 1985. - 176 pp. Access mode: <https://www.twirpx.com/file/3495851/> (in Rus.).

6. Troshenkin B.A., Troshenkin V.B. [Heat and mass transfer in the production of hydrogen in the reactions of sodium borohydride with water] // [Report with presentation at the XV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer (MMF-XV)]. Minsk, May 23-26, 2016, 13 pp. Access mode: <https://www.twirpx.link/file/3457437/>. (in Rus.); 13 slides. Access mode: <https://www.twirpx.com/file/3457433/>. (in Rus.).

7. GTM 26-01-71-75 [(Guiding technical material). Evaporators with flowing film. Methods of thermal and hydromechanical calculations]. M. [Ministry of Chemistry and petroleum engineering of the USSR], 1975, 43 pp. Access mode: <https://www.twirpx.com/file/3494809/> (in Rus.).

Отримано 14.11.2023

Received 14.11.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 621.643.053, 006.91:681.121.089

РОЗРАХУНОК ОБ'ЄМНОЇ ВТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЧЕРЕЗ НЕЩІЛЬНОСТІ З'ЄДНАНЬ В ТРУБОПРОВОДІ

Демченко В.Г., к.т.н., Коник А.В., к.т.н., Погорєлова Н.Д., Хоменко М.В.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.8>

Розглянуто важливу проблему матеріальних втрат природного газу при його транспортуванні та розподілі. Визначено можливі місця розгерметизації трубопроводу при транспортуванні газу та на газорозподільному пункті. Наведено результати чисельного аналізу об'ємної втрати газу через негерметичність різьбового з'єднання. Встановлено графічні залежності змін показників витратоміра від тиску та проведено оцінку економічної складової об'ємних втрат через нещільність з'єднань, через які відбувається витік газу.

This work considers the important problem of material losses of natural gas during its transportation and distribution. Possible places of depressurization of the pipeline during gas transportation and at the gas distribution point have been determined. The results of the numerical analysis of the volume loss of gas due to the leakiness of the threaded connection are given. Graphical dependences of changes in flowmeter indicators on pressure were established and the economic component of volumetric losses due to leaky connections through which gas leakage occurs was evaluated.

Бібл. 9, рис.6, табл. 1.

Ключові слова: витік газу, розрахунок об'ємних втрат, різьбове з'єднання.

У 2022 році на території України було видобуто 18,01 млрд м³ газу [1]. До початку повномасштабного вторгнення за дозволом НКРЕКП допустимий об'єм технологічних втрат газу при транспортуванні становив приблизно 5% (тобто 0,9 млрд м³ газу) на рік [2]. У грошовому вираженні це становить 7,164 млрд. грн. (розрахунок проведено за вартістю газу для населення: 1 м³ газу коштує 7,96 грн) [3].

Крім того, необхідно враховувати матеріальні втрати газу, які не підлягають точному аналітичному визначенню. До них відносяться втрача газу через нещільності з'єднань, через які відбуваються витіки. Витік газу відбувається через порушення герметичності трубопроводів найчастіше на фланцевих та різьбових з'єднаннях у газорозподільних пунктах (далі через порушення герметичності ГРП). Причини пошкодження можуть бути несхожі, як і об'єм втрат та їх наслідки. Потрібно зазначити, що окрім значних економічних втрат, витік газу негативно впливає на здоров'я людей та має шкідливий вплив на оточуюче середовище внаслідок високої вибухопожежонебезпеки та його токсичної дії.

З урахуванням вищезазначеного зменшення об'ємних втрат газу через порушення герметичності та їх розрахунок є актуальним науковим питанням.

Метою роботи є дефініція місць витіку газу, проведення розрахунку об'ємних втрат газу внаслідок порушення герметичності на різьбовому з'єднанні та оцінка їх економічної складової.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити можливі місця витіку газу;
- встановити причини пошкоджень, що спричиняють витік газу;
- розглянути вплив негерметичності різьбового з'єднання на роботу витратоміру;
- розрахувати об'ємні втрати газу та їх вплив на економічну складову.

Об'єкт досліджень – газовий трубопровід ГРП.**Предмет досліджень** – розрахунок об'ємних втрат газу через порушення герметичності.**Можливі місця витіку газу та їх причини порушення герметичності**

Транспортування газу до споживача здійснюється трубопроводами з редукацією тиску на ГРП. Найбільш розповсюдженими причинами матеріальних втрат є порушення герметичності в місцях з'єднання труб та пошкодження цілісності труби. На ГРП можливі порушення герметичності на перехідниках (муфтах), під накидними гайками та на різьбових з'єднаннях. Причини таких порушень герметичності можуть бути:

- зміна хімічних та фізичних властивостей герметика або його відсутність;
- використання невідповідних матеріалів;
- фізичне пошкодження деталей трубопроводу та ГРП;
- втручання (відкручування, провертання чи знімання) в різьбові з'єднання.

Для запобігання самовільного втручання в конструкції ГРП встановлюють пломби кваліфіковані співробітники відповідальні за якість та безпеку його роботи [4]. Приклад порушення щільності різьбового з'єднання продувної труби та пломбування ГРП наведений на рисунку 1.

В даному випадку в місці переходу використано фторопласт, що може стати однією з причин витоку газу, рисунок 1. Зазначимо, що коефіцієнт температурного розширення фторопласту становить $\alpha_f = 25 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а коефіцієнт температурного розширення сталі становить $\alpha_s = 12,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, тобто майже у 20 разів менше. Отже, в холодну пору року на такому з'єднанні в неопалювальному приміщенні може виникнути негерметичність внаслідок температурного звуження металу на різьбовому з'єднанні та утворенні нещільності прилягання витків.

Для вчасного виявлення витоку газу необхідно проводити планові технічні огляди та перевірку стану герметичності за допомогою газоаналізатора та мильної емульсії.

Розрахунок об'ємних втрат газу через негерметичність різьбового з'єднання

Порядок розрахунку на прикладі метричної різьби з'єднання, яка має найбільше розповсюдження у використанні при встановленні елементів ГРП, представлено на рисунку 2.

Сторони гайки і болта мають порожнини, порожнина зі сторони болта має більшу площу перерізу, рисунок 2. Тому у розрахунку витікання газу через різьбове з'єднання до уваги приймаємо більшу площу перерізу.

Розрахункова схема представлена на рисунку 3. Переріз, через який відбувається витікання газу, виділено сірим кольором. Площу перерізу визначаємо за методикою, викладеною в [6].

Для розрахунку необхідно знати параметри різьбового з'єднання для визначення кроку [7]. Тоді:

$$x = \frac{P}{4} \quad (1)$$

$$R = 0,14434 \cdot P \quad (2)$$

Проміжний кут:

$$\alpha = \arcsin \frac{x}{D} \quad (3)$$

Центральний кут:

$$\varphi = \alpha \frac{360}{\pi} \quad (4)$$

Площа круга:

$$S = \pi \frac{D^2}{4} \quad (5)$$

Площа сектора:

$$S_c = S \frac{\varphi}{360} \quad (6)$$



Рис. 1. Приклад порушення щільності різьбового з'єднання на ГРП

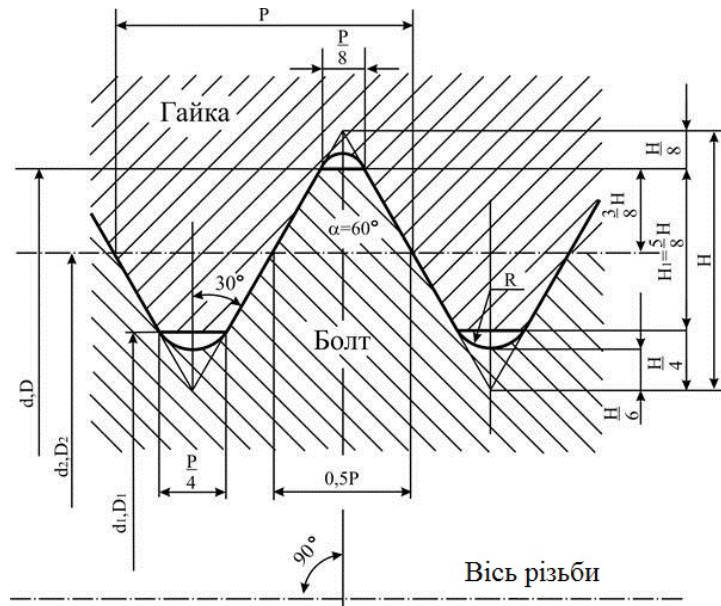


Рис. 2. Параметри профілю метричної різьби [5], де: H - висота вихідного рівностороннього трикутника;
 H_1 - робоча висота профілю; $d = D$ - номінальні значення зовнішніх діаметрів болта і гайки;
 $d_1 = D_1$ - номінальні значення внутрішніх діаметрів болта і гайки;
 $d_2 = D_2$ - номінальні значення середніх діаметрів болта і гайки; d_3 - величина внутрішнього діаметра по дну западин; α - кут профілю різьби ($\alpha = 60^\circ$); P - крок різьби ($Pn = P \times n$ - хід багатоходових різьб;
 n - число ходів); R - радіус закруглення дна западини різьби болта

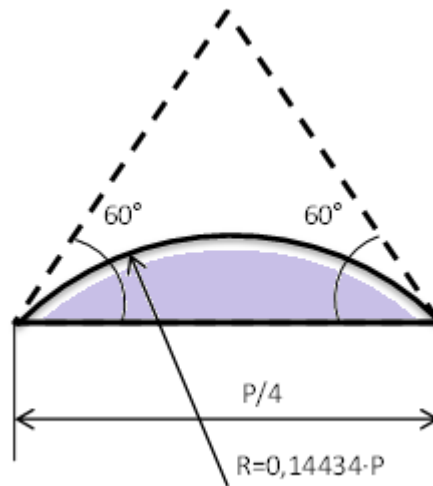


Рис. 3. Фрагмент різьбового з'єднання

Площа сегмента:

$$S_{св2} = S_c - \frac{x \cdot D \cdot \sin \alpha}{4} \quad (7)$$

Еквівалентний діаметр перерізу:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{св2}}{\pi}} \quad (8)$$

Визначаємо довжину порожнини, через яку втрачається газ. Оскільки різьбове з'єднання повинно мати не менше трьох витків, приймаємо, що з'єднання має три і більше витки. Зі збільшенням числа витків втрати газу будуть зменшуватись, оскільки подовжується шлях його руху. Тоді довжина:

$$l = \pi \cdot D_p \cdot n \quad (9)$$

де D_p - діаметр різьби, n - число витків.

Масова витрата газу визначається за формулою [5]:

$$M = S_{свг} \sqrt{\frac{(P_n^2 - P_k^2) \cdot d}{\lambda \cdot z \cdot R \cdot T_{cp} \cdot l'}} \quad (10)$$

де P_n – початковий тиск, у нашому випадку - абсолютний тиск (манометричний тиск плюс атмосферний) у газопроводі;

P_k – кінцевий тиск;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору. Він залежить від витрати газу, тому зазвичай для попереднього розрахунку приймається значення 0,01.

z – коефіцієнт стисливості газу, який визначається за формулою:

$$z = 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \cdot \Delta^{1,5}}{T_{cp}^{3,5}}, \quad (11)$$

де P_{cp} , T_{cp} – середні тиск газу і температура відповідно;

Δ – відносна густина газу за повітрям.

Розраховуємо середній тиск:

$$P_{cp} = \frac{2}{3} \left(P_n + \frac{P_k^2}{P_n + P_k} \right) \quad (12)$$

Враховуємо, що температура на короткому відрізку практично незмінна. Для визначення об'ємної втрати оцінюємо густину газу за умов витікання:

$$\rho = \frac{P_{cp}}{z \cdot R \cdot T_{cp}} \quad (13)$$

Отже, об'ємна втрата:

$$q = \frac{M}{\rho} \quad (14)$$

Об'ємна втрата на добу становить:

$$q_d = q \cdot 24 \cdot 3600 \quad (15)$$

Для уточнення коефіцієнтів гідравлічного опору проводимо наступні розрахунки. Визначаємо швидкості газу:

$$W = \frac{q}{S_{свг}} \quad (16)$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re = \frac{W \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (17)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості газу.

Коефіцієнт гідравлічного опору:

$$\lambda = 0,067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot k}{d} \right)^{0,2} \quad (18)$$

де k – еквівалентна шорсткість.

Розрахунок уточнення проводиться за формулами 10, 14-18 до значення похибки гідравлічного опору $< 5 \%$.

Для приладу розглянемо розрахунок об'ємних втрат газу через негерметичність різьбового з'єднання М20 з кроком 2,5 мм площею 1,0 мм². Результати розрахунку зведено в таблицю 1.

Отже, у результаті проведеного розрахунку встановлено, що через одне різьбове з'єднання за добу втрачається 0,422 кубічних метра газу, економічні втрати, по вартості газу для населення, становлять – 3,359 грн, на місяць – 100,774 грн і на рік – 1209,28 грн [3]. Якщо вважати, що на кожному ГРП є декілька місць різьбових з'єднань, то ця сума зростає в рази - залежно від їх кількості.

Вплив негерметичності трубопроводу на роботу приладів обліку газу

Прикладом впливу негерметичності різьбового з'єднання на роботу витратоміру, що фіксує витрати газу, можуть бути представлені у вигляді графіко-аналітичної залежності тиску від втрат газу. Для контролю кількості витрат газу ставлять витратоміри, за допомогою яких також можна виявити витік газу [8]. Розрахунок проводиться за наступною методикою [6].

З формули масової витрати газопроводу 10 визначається кінцевий тиск газу за:

$$P_k = \sqrt{P_n^2 - \frac{16 \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot z \cdot R \cdot T_{cp} \cdot l}{\pi^2 \cdot d^5}} \quad (19)$$

Табл. 1. Результати розрахунку прикладу

Критерій	Значення
Початковий тиск у газопроводі, P_n , Па	753325
Кінцевий тиск у газопроводі, P_k , Па	101325
Температура газу, T_{cp} , К	273
Густина газу, ρ , кг/м ³	4,725
Масова витрата газу, M , кг/с	23,1•10 ⁻⁶
Об'ємна втрата, q , м ³ /с	4,884•10 ⁻⁶
Об'ємна втрата на добу, q_d , м ³ /добу	0,422

Об'ємна витрата дорівнює величині витоку газу за формулою 14, а швидкість газу, як:

$$W = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d^2} \quad (20)$$

Критерій Рейнольдса та коефіцієнт гідравлічного опору розраховуються за формулами 17 і 18, відповідно.

Для конкретного прикладу (площа витоку 1,0 мм²) використовувались наступні значення: коефіцієнт стисливості $z=0,9893$; коефіцієнт газової сталої $R=512,68 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; середня температура газу $T_{cp}=273 \text{ К}$.

Для проведення розрахунків використовувалась програма Mathcad. Об'ємна величина витоку газу змінювалась від 0,2 г/с до 10 г/с. Було розраховано:

- зменшення тиску газу на вході у витратомір в залежності від величини витоку при тиску у газопроводі 0,5 МПа та 1,0 МПа;

- зменшення тиску газу на вході у витратомір при величині витоку до 2,5 м³/д. при тиску у газопроводі 1,0 МПа.

Результати розрахунків наведено на рисунках 4,5. По аналогії можуть бути проведені розрахунки на інші параметри тиску та площі витоку газу.

При збільшенні тиску у газопроводі, втрати тиску за однакової величини витоку збільшуються, рисунки 4 та 5. Якщо витратомір має похибку 0,1 % при максимальній

величині тиску 1,6 МПа, то випадкова абсолютна похибка становитиме 1600 Па. Тоді перевищення похибки вимірювань почнеться за витоку газу від 200 м³/доба при тиску у газопроводі 0,5 МПа або за витоку газу 150 м³/добу при тиску у газопроводі 1 МПа. Такі витоки будуть супроводжуватись акустичними ефектами і їх виявлення є досить легким.

Розглянемо витоки, які складають до 2 м³/добу, рисунок 6.

При величині витоку до 2,0 м³/добу зміна тиску на вході витратоміра не перевищує 1 Па, що взагалі важко зафіксувати вимірювальними приладами, і становить 1/1600 точності витратоміра, рисунок 6. Отже, можна зробити висновок, що витоки на імпульсних лініях витратоміра, які не перевищують 2,0 м³/добу, не впливають на точність вимірювань.

Висновки

1. Технологічні втрати природного газу при його транспортуванні та розподілі становлять приблизно 0,9 млрд м³ газу на рік. Матеріальні втрати газу через нещільності з'єднань та порушення герметичності трубопроводів і газорозподільних пунктах потребують проведення розрахунків.

2. Сформульовано причини порушення герметичності та можливі місця витоку газу в процесі експлуатації газорозподільної мережі.

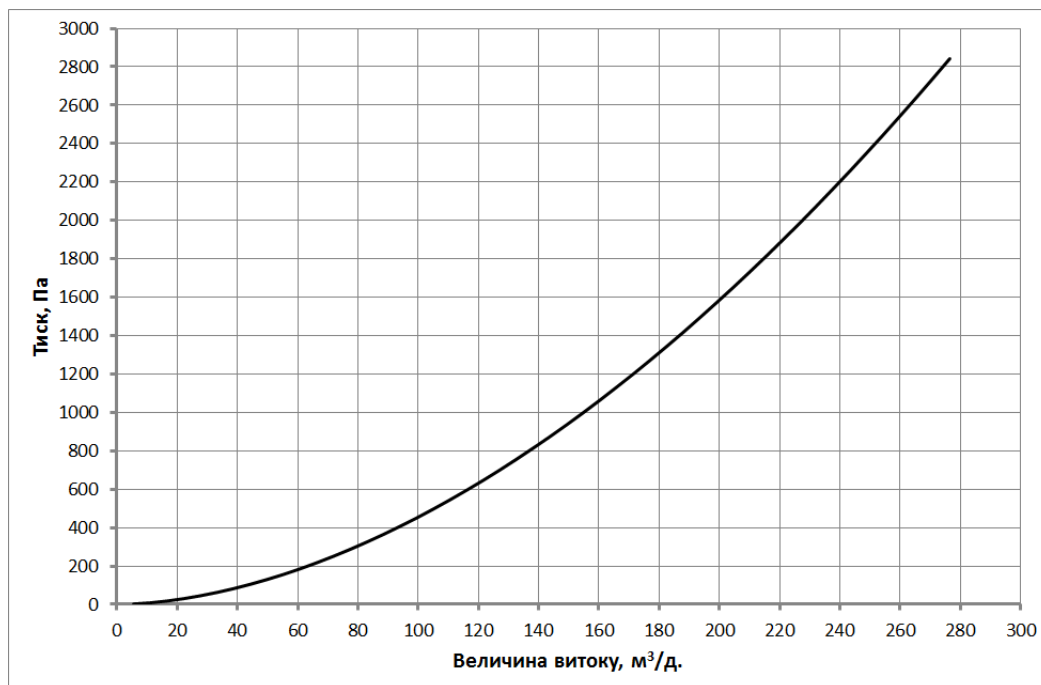


Рис. 4. Зменшення тиску газу на вході у витратомір в залежності від величини витоку при тиску у газопроводі 0,5 МПа

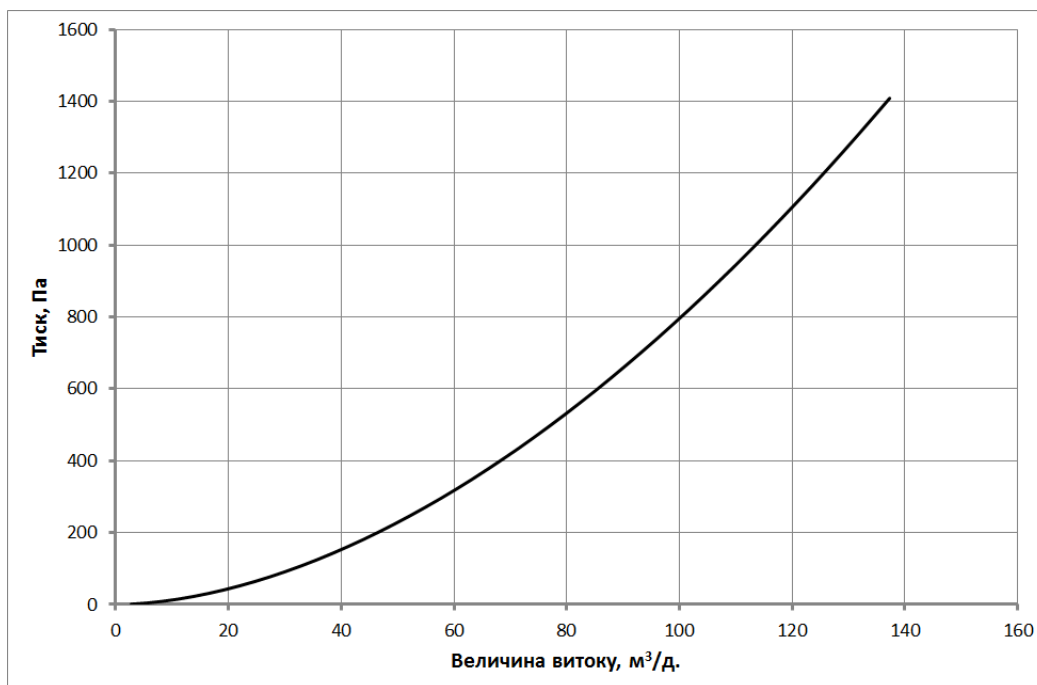


Рис. 5. Зменшення тиску газу на вході у витратомір в залежності від величини витоку при тиску у газопроводі 1,0 МПа

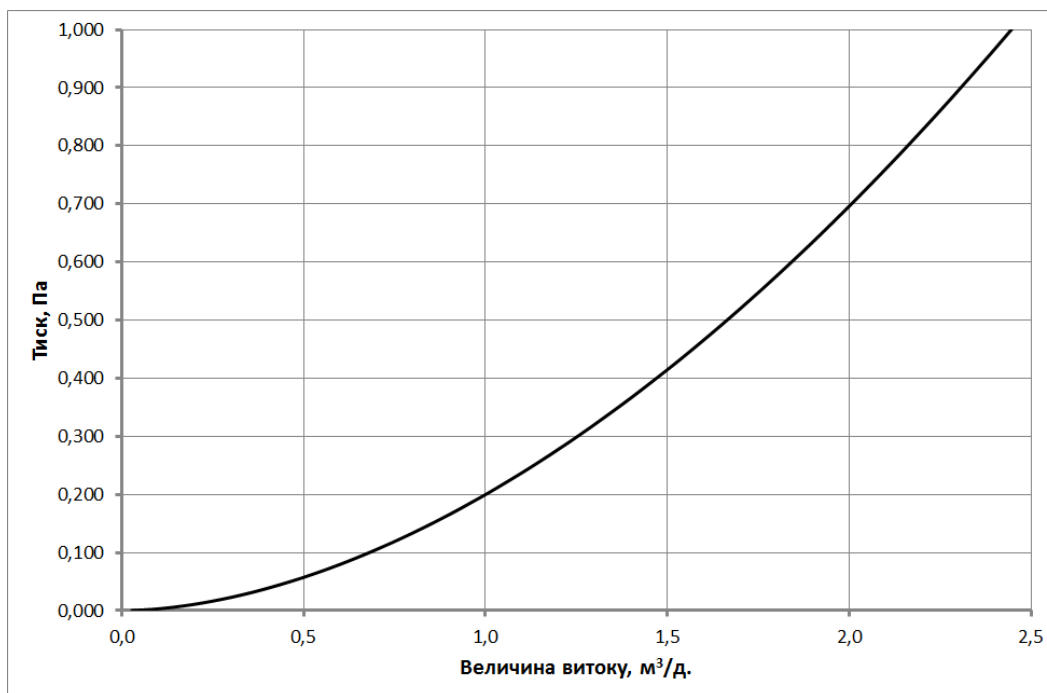


Рис. 6. Зменшення тиску газу на вході у витратомір при величині витоку до 2,5 м³/д. при тиску у газопроводі 1,0 МПа

3. Зазначено, що витік газу має шкідливий вплив на оточуюче середовище та високу вибухопожежонебезпеку.

4. Наведено алгоритм розрахунку об'ємних втрат газу через негерметичність різьбового з'єднання. В

результаті проведеного аналізу розглянуто вплив втрат газу на економічну складову, встановлено, що через одне різьбове з'єднання за добу втрачається 0,422 м³ газу.

5. Показано, як за допомогою приладу обліку газу можна виявити витік газу. Приведено графіко-аналітичні залежності тиску від втрат газу, з яких випливає, що витратомір не фіксує втрати витоку газу менше 2,0 м³/добу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Інтернет ресурс*: <https://expro.com.ua/novini/ukrana-v-2022r-skorotila-vidobutok-gazu-na-6-do-185-mlrd-kub-m>
2. *Інтернет ресурс*: <http://iplex.com.ua/doc.php?regnum=101608533&red=100003508c7a123ca9016deb786e33667fbc53&d=5>
3. ДСТУ ISO 68-1:2005 (ISO 68-1:1998, IDT) Національний стандарт України. Нарізі ISO загального призначення. Основний профіль Частина 1. Нарізі метричні.
4. *Інтернет ресурс*: <https://index.minfin.com.ua/tariff/gas/>
5. *Інтернет ресурс*: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0318-98#Text>
6. Борисенко О.А. Аналітична геометрія: Навчальний посібник / О.А. Борисенко, Л.М. Ушакова. – Х. : Основа, 1993. – 192 с. – 46-50
7. Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. – Київ:-АренаЕКО, - 2002. – 600 с.
8. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Метрологія та вимірювання: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. - 292 с.
9. *Інтернет ресурс*: <https://www.ua-systems.com.ua/vitratomir-lichilnik-gazu-rg-ont>

CALCULATION OF VOLUME LOSS OF NATURAL GAS DUE TO LEAKNESS OF CONNECTIONS IN THE PIPELINE

Demchenko V.G.¹, Konyk A.V.², Pogorelova N.D.³,
Khomenko M.V.⁴

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine. dr-demch@meta.ua

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine. alina_tds@ukr.net

³Chief Designer (Engin.) of the laboratory, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine, n_pogorelova@i.ua

⁴Leading Engineer, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, str. Maria Kapnist, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine, kh_maryna@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.8>

This work considers the important problem of material losses of natural gas during its transportation and distribution. It is shown that only normative losses of gas during its transportation in Ukraine amount to about 0.9 billion cubic meters per year. Possible places of depressurization of the pipeline during gas transportation and at the gas distribution point have been determined. The results of the numerical analysis of gas volume loss due to the leakiness of the threaded connection are given on a specific example. The graphical and analytical dependence of the error of a typical flow meter on the change in gas pressure was established, and the economic component of volumetric losses due to leaky connections through which gas leakage occurs was evaluated.

Conclusions

1. Technological losses of natural gas during its transportation and distribution amount to approximately 0.9 billion m³ of gas per year. Material losses of gas due to leaky connections and violations of the tightness of pipelines and gas distribution points require calculations.

2. Formulated causes of leak tightness and possible places of gas leakage during operation of the gas distribution network.

3. It is noted that the gas leak has a harmful effect on the environment and a high explosion and fire hazard.

4. The algorithm for calculating volumetric gas losses due to the leakiness of the threaded connection is given. As a result of the analysis, the impact of gas losses on the economic component was considered, it was established that 0.422 cubic meters of gas is lost per day through one threaded connection.

5. It is shown how a gas leak can be detected using a gas meter. Graphical analytical dependences of pressure on gas losses are presented, from which it follows that the flow meter does not record gas leakage losses of less than 2.0 m³/day.

References 9, fig. 6, table. 1.

Keywords: gas leak, volume loss calculation, threaded connection.

1. Internet resource: <https://expro.com.ua/novini/ukrana-v-2022r-skorotila-vidobutok-gazu-na-6-do-185-mlrd-kub-m>

2. Internet resource: <http://iplex.com.ua/doc.php?regnum=101608533&red=100003508c7a123ca9016deb786e33667fbc53&d=5>

3. DSTU ISO 68-1:2005 (ISO 68-1:1998, IDT) National Standard of Ukraine. General purpose ISO threads. Main profile Part 1. Metric threads.

4. Internet resource: <https://index.minfin.com.ua/tariff/gas/>

5. Internet resource: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0318-98#Text>

6. Borysenko O.A. Analytical geometry: Study guide / O.A. Borysenko, L. M. Ushakova. - Kh.: Osnova, 1993. - 192 p. - 46-50

7. Pipeline gas transport / M.P. Kovalko, V.Ya. Grudz, V.B. Mikhalkiv and others. - Kyiv: -Arena EKO, - 2002. - 600 p.

8. Suslikov L.M., Studenyak I.P. Metrology and measurement: Study guide. - Uzhhorod: UzhNU Publishing House, 2014. - 292 p.

9. Internet resource: <https://www.ua-systems.com.ua/vitratomir-lichilnik-gazu-rg-ont>

Отримано 15.08.2023

Received 15.08.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 620.92

АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИКИ ПОСТАЧАННЯ БІОПАЛИВ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ОБ'ЄКТИ

Желєзна Т.А.¹, канд. техн. наук, Драгнєв С.В.², канд. техн. наук¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, провідний науковий співробітник, zhelyezna@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0002-9607-3022>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, dragnev@secbiomass.com, <https://orcid.org/0000-0003-3754-4186><https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.9>

Розглянуто складові ланцюга постачання твердих біопалив. Проведено огляд кращих практик організації заготівельно-логістичних операцій постачання біомаси для енергетичних потреб. Проаналізовано особливості технологій заготівлі біомаси аграрного походження, деревної біомаси, біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень. Розроблено рекомендації щодо запровадження кращих практик логістики біомаси в Україні.

The components of supply chain for solid biomass fuels are considered. An overview of the best practices in biomass harvesting and logistics for supplying to bioenergy facilities has been conducted. The features of harvesting technologies for biomass of agricultural origin, wood biomass, biomass from the pruning and removal of perennial agricultural plantations are analyzed. Recommendations for the introduction of biomass logistics best practices in Ukraine have been developed.

Бібл. 15, табл. 2.

Ключові слова: біомаса, біопаливо, тверде біопаливо, післяжнивні рештки, порубкові залишки, деревні тріски.

ОВБСН – обрізка та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень;

ПТК – промислово-торгівельна компанія;

ТЕС – теплова електростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

ТЛЦ – торговельно-логістичний центр;

ЦТ – централізоване теплопостачання;

р.м. – робоча маса;

с.м. – суха маса;

Q – нижча теплота згорання;

W – вологість.

Індекси:

t – тепловий;

e – електричний.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю заміщення викопних палив відновлюваними джерелами енергії, зокрема біомасою. Біомаса є вуглецево-нейтральним паливом, використання якого не робить внеску до глобального парникового ефекту. Логістика постачання біопалива є важливою складовою біоенергетичних проєктів, від якої у багатьох залежить їх фінансова ефективність. **Метою** роботи є аналіз кращих підходів до організації заготівельно-логістичних операцій постачання біомаси на енергетичні об'єкти, а також розробка рекомендацій для їх впровадження в Україні. **Методи дослідження** включають проведення розрахунків, вивчення та аналіз літературних, статистичних та інших даних.

Складові ланцюга постачання твердих біопалив

Оптимальна логістика постачання біомаси на енергетичні об'єкти є однією з важливих передумов успішності реалізації біоенергетичних проєктів. Частка

логістичних витрат у ланцюгах постачання становить 30...50% вартості біопалива у кінцевого споживача, а у випадку далеких міжнародних перевезень (наприклад, деревних гранул морським транспортом) ця частка може сягати більше 75% [1, 2].

Склад і складність заготівельно-логістичних операцій, що впливає на вартість кінцевого продукту, залежить від джерела біомаси та її виду. Сільське господарство, лісове господарство, харчова і переробна промисловість та інші галузі щорічно продукують велику кількість різноманітних видів біомаси у вигляді відходів або побічних продуктів, які можуть бути залучені до енергетичного сектору. Порубкові залишки, післяжнивні рештки, біомаса від обрізки або видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень, енергетичні рослини, інші види твердої біомаси потребують індивідуальних підходів до заготівлі та постачання на об'єкти енергетики. Логістика постачання

залежить не тільки від виду біомаси, але й від її торгової форми (гранули, брикети, тріски, тюки). Чим більш ущільнена біомаса, тим ефективнішим є її транспортування з економічної і енергетичної точки зору у перерахунку на тону-кілометр. Так, наприклад, за однакових умов питома вартість і витрати енергії на перевезення вантажівкою великих тюків соломи (густина 160 кг/м^3 , насипна щільність $70 \dots 160 \text{ кг/м}^3$) майже у 1,6 разів вище, ніж для гранул з соломи (густина 900 кг/м^3 , насипна щільність $500 \dots 700 \text{ кг/м}^3$) [3].

Основні елементи логістичної схеми постачання біомаси включають її заготівлю, зберігання, транспортування і попередню обробку. Кожний з елементів має свої різновиди, наприклад, зберігання може відбуватися на краю поля (тюки соломи), на центральному, проміжному або оперативному складі. Перевезення може реалізовуватися трактором з причепом (тюки соломи на невелику відстань від поля), спеціалізованим транспортом (деревні тріски, гранули) або звичайними вантажівками. Організацією кожного етапу загального ланцюга постачання біомаси можуть займатися як власник енергетичного об'єкту, так і залучені сторонні компанії. В залежності від річного обсягу споживання паливної сировини можливі наступні схеми взаємодії з постачальниками: власник енергетичного об'єкту самостійно виконує заготівлю, зберігання та доставку біомаси; власник делегує всі стадії постачання стороннім організаціям; схема розмежування повноважень, коли, наприклад, заготівлею та доставкою біомаси займається стороння організація, а її зберігання відбувається на складах власника.

Кожний з варіантів має свої переваги і недоліки. Так, коли власник енергетичного об'єкту самостійно виконує заготівлю та доставку біомаси, він може оперативно вирішувати проблеми і гнучко приймати рішення, але при цьому несе повну відповідальність за весь процес постачання. Закупівля біопалива на біржі або у логістичних компаній-посередників зазвичай гарантує надійність і якість поставок. Завадити такому варіанту може лише відсутність біопаливної біржі та організацій, що спеціалізуються на постачанні біопалива. Позитивною стороною укладання прямих договорів з власником біомаси є відсутність посередників, що може призвести до зменшення ціни. Ризиком такого підходу є можливість непередбачуваного росту вартості біомаси при укладанні нового контракту з її власником після закінчення поточного. Цей ризик є особливо високим за відсутності практики довгострокових угод на постачання і недостатньому рівню розвитку біопаливного ринку.

Купівля біомаси на біржі є розповсюдженою практикою в країнах ЄС. Відомим успішним прикладом в

Європі є литовська біопаливна біржа Baltpool, яка ефективно функціонує з 2012 р. [4] За цей час біржа розширила географію своєї роботи на ряд інших країн ЄС – Латвію, Естонію, Польщу, Фінляндію, Швецію, Данію. Сьогодні на Baltpool відбувається електронна торгівля деревним паливом: трісками (п'ять видів), гранулами (чотири види), подрібненою використаною деревиною (два види), сумішшю лігніну та деревної біомаси. Іншим прикладом є американська біопаливна біржа Midwest, на якій запроваджено електронну торгівлю багатьма видами деревної біомаси та агробіомаси для продавців і покупців з США та Канади. Представлені на біржі види біопалив включають деревні гранули, брикети, тріски, тирсу, деревний лом, обрізки плодівих дерев, солом, стебла кукурудзи, стрижні кукурудзи, лушпайку рису, біомасу енергетичних рослин (верба, міскантус, тополя, свічграс) та деякі інші види.

Заготівля і постачання біопалива аграрного походження

Основними особливостями заготівлі післязбираних решток (наприклад, соломи) є сезонність і обмежений термін виконання заготівельних робіт, а також складність логістики. Збір соломи з поля має відбуватися відразу після збору урожаю зернових. Це мінімізує ризик росту вологості біомаси внаслідок опадів та дозволяє одразу приступити до необхідних операцій по обробці ґрунту. Згідно типових сівозмін господарств, збір соломи з полів може тривати не більше 14 днів після закінчення збору урожаю зернових. Повний набір заготівельних операцій соломи включає згрібання, тюкування, складування, перевезення тюків по полю та по автомобільних дорогах, навантаження і розвантаження з вантажівок або причепів, зберігання на полі та на проміжному складі. Зазвичай операціями, які обмежують швидкість виконання заготівлі, є вивіз тюків з поля і їх складування.

Рекомендується заготовляти солом у вигляді великих прямокутних тюків ($2,5 \times 1,2 \times 1,3 \text{ м}$, щільність від 140 кг/м^3) при обсягу її утворення не менше 3 т/г та за вологості не більше 15%. Для операцій вантаження/розвантаження ефективним вважається використання фронтальних або телескопічних навантажувачів 1,5 т з вильотом стріли $10 \dots 12 \text{ м}$. При перевезенні автомобільними дорогами перевагу слід віддавати вантажівкам з причепом довжиною 7,5-8 м кожна складова автопоїзду. Тимчасове зберігання на території об'єктів енергетики рекомендується у закритих складах з висотою складування до 8 м ($6 \times 1,3 \text{ м}$) [5].

В організації постачання соломи для енергетичних потреб найбільш досвідченою в Європі є Данія, де працює велика кількість котельень, ТЕЦ і ТЕС на

соломі. Датська організація постачальників соломи об'єднує фермерів, для яких забезпечення соломою біоенергетичних установок є пріоритетним видом діяльності. Існує локальна торгівля соломою (контракти з фермерами на 1...10 років), оптова і торгівля на основі тендерів або аукціонів (контракти з фермерами, кооперативами на 1...5 років) [6]. Так, наприклад, тюкована солома для котлів системи ЦТ м. Рінгстед ($2 \times 8,5 \text{ МВт}_t$) закуповується через тендери у місцевих фермерів із укладанням контрактів на постачання терміном на 1...3 роки (табл. 1).

В Данії продовжуються дослідження, спрямовані на вдосконалення логістики постачання соломи. Роботи ведуться в двох основних напрямках: збільшення щільності тюків і перехід з використання великих тюків ($2,4 \times 1,2 \times 1,3 \text{ м}$) на середньо-великі ($2,4 \times 1,2 \times 0,9 \text{ м}$), оскільки останні дозволяють ефективніше використовувати вантажопідйомність транспортних засобів. Вантажівки можуть перевозити три шари середньо-великих тюків замість двох шарів великих. Оскільки середньо-великі тюки виробляються практично з такою ж вагою, як і великі, то можна транспортувати майже на 50% більше соломи на вантажівці, тим самим значно зменшуючи питомі витрати [7].

В Україні також є практичні приклади ефективної логістики постачання соломи. Один з них – заготівля соломи для котельні птахокомплексу Дніпровський (м. Нікополь) (див. табл. 1). Великі тюки соломи постачаються з власних полів підприємства площею 3 тис. га, розташованих в радіусі 15 км. Вологість соломи при заготівлі становить 10...12%, на складі котельні – 15%, а котли ($2 \times 5 \text{ МВт}_t$) працюють при вологості біомаси до 17%. Щорічно для потреб котельні заготовлюється близько 10 тис. т соломи із використанням двох прес-підбирачів, кожний з яких може обробляти до 50 га/день. Є також третій прес-підбирач, але він не застосовується, оскільки техніка не встигає вивозити тюки з поля і складувати їх. Заготівля виконується протягом липня-серпня. Загальний успішний досвід підприємства по заготівлі соломи становить більше 10 років.

Викликає інтерес концепція створення торгівельно-логістичних центрів для біомаси сільськогосподарського походження, реалізована в деяких країнах ЄС. Принцип функціонування таких центрів полягає в інтегруванні виробництва і постачання біопалива у звичайну діяльність аграрних компаній. Наприклад, ТЛЦ Tchiggerl Agram (Австрія) постачає стрижні кукурудзи (цілі або подрібнені) і гранули зі стрижнів кукурудзи місцевим побутовим та промисловим споживачам. При цьому основний вид діяльності компанії – вирощування зернових культур і виробництво кормових гранул для худоби.

Заготівля і постачання деревного палива

Деревні відходи, доступні для енергетичних потреб, утворюються головним чином в процесі лісозаготівлі (порубкові залишки, або лісосічні відходи), а також при виробництві меблів, паперу, деревинностружкових плит, деревинноволокнистих плит та іншої подібної продукції (тирса, стружки, обрізки). Обсяг порубкових залишків складає близько 14% від заготівлі круглого лісу. При розпилюванні колод утворюється 35% відходів від обсягу переробки деревини, при виробництві дверних і віконних блоків – 31%, паркету – 30%, меблів – 54% [8].

В процесі рубок головного користування виробляється паливна деревина (дрова, тріски), яка являє собою готове для споживання біопаливо. Для отримання дров використовується низькоякісна деревина. Операції виробництва дров включають навантаження сировини, її доставку, розвантаження, штабелювання, зберігання та сушку, подачу на переробку, розкряжування, розколювання, облагородження, штабелювання готових дров, їх пакування, маркування, відвантаження та розвантаження у споживача. При доставці дров часто використовують поперечне розміщення. Для збільшення місткості кузовів при перевезенні короткомірних лісоматеріалів (довжиною до 2 м) можливе збільшення корисного об'єму кузова за рахунок вертикальної установки лісоматеріалів та формування шапки. Таке укладання також зменшує випадання дров при транспортуванні. Малі партії дров (до $6...8 \text{ м}^3$) перевозяться насипом у кузовах вантажівок або причепах (коефіцієнт повнодеревності 0,4). Штабелювання дров дозволяє більш ефективно використовувати вантажопідйомність транспортного засобу (коефіцієнт повнодеревності 0,67). При зазначених способах перевезення вантажні операції потребують значних витрат часу, тому при великих обсягах виробництва дров застосовують їх доставку на палетах, сітках об'ємом 1...3 м^3 . В такому випадку вантажні операції можуть проводитися механізовано, зокрема, маніпуляторами.

Для отримання паливних трісок може використовуватися більша номенклатура сировини порівняно з дровами, зокрема, тонкомірна деревина і великомірна деревина неправильної форми (пні, обламки стовбурів, стовбури з кроною). Комплексна заготівля ділової деревини та деревної біомаси для виробництва паливних трісок дозволяє знизити витрати на планування, управління та інші основні витрати з розрахунку на кубічний метр лісової продукції. Крім того, застосування лісозаготівельних машин для виконання різних робіт мінімізує питомі витрати. Такі підходи реалізовано, наприклад, у Фінляндії, де постачання деревних трісок на котельні ЦТ та ТЕЦ зазвичай інтегровано у загальну си-

Табл. 1. Кращі приклади організації постачання біопалива на енергетичні установки в ЄС, США і Україні

Вид енергетичної установки (розташування)	Потужність	Вид біопалива	Підхід до логістики постачання біопалива
Котельня системи ЦТ (с. Ульб'єрг, Данія)	1 МВт _т	Основне: солома (до W20%). Додаткове: деревні тріски (до W30%), тирса	Солома у вигляді великих тюків постачається місцевими фермерами. Склад соломи на котельні: 700 великих тюків по 550 кг кожний
Котельня на птахокомплексі Дніпровський (м. Нікополь, Україна)	2×5 МВт _т	Солома (до W17%)	Тюкована солома постачається з власних полів підприємства з радіусу 15 км. Заготівля, доставка власною технікою. Зберігання: 3 склади, 2 скирти.
ТЕЦ системи ЦТ (Лісб'єрг, Данія)	38 МВт _е + 110 МВт _т	Основне: солома. Додаткове: деревні тріски (до 50% загального обсягу біопалива)	Тюковану солому доставляють з місцевих фермерських господарств.
Завод з виробництва біоетанолу компанії DuPont (м. Невада, США, 2015-2018 рр., зараз завод не існує)	113 млн л/рік	Стебла кукурудзи	Тюковані стебла кукурудзи постачалися місцевими фермерами на контрактній основі (500 постачальників в радіусі 48 км, 76 тис. га)
ТЕЦ Järvenpää (Фінляндія)	23 МВт _е + 60 МВт _т	Основне: тріски лісової деревини. Додаткове: деревні/картонні відходи, торф, кінський гній	Тріски виробляються з стовбурів, невеликих дерев і порубкових залишків. Всі види біомаси постачаються з радіусу 100 км вантажівками
ТЕЦ Värtan (Стокгольм, Швеція)	130 МВт _е + 280 МВт _т	Деревні тріски	Деревні тріски постачаються у спеціальних контейнерах морським (3-4 доставки на тиждень) і залізничним (6 днів на тиждень) транспортом
Котельня з паровим котлом на ПТК «Шабо» (Одеська область, Україна)	1,6 т пари/год	Виноградна лоза	Біомаса постачається з виноградників компанії. Радіус заготівлі лози – до 10 км.
Котел системи ЦТ м. Вілафранка-дель-Пенедес (Іспанія)	400 кВт _т	Виноградна лоза	Лоза збирається у 45 фермерів в радіусі до 15 км від місця зберігання. Обрізки залишаються на землі протягом 30 днів для зменшення вологості до 30%.
ТЕЦ і котельня аграрної компанії Nufri (Іспанія)	2 МВт _е + 10 МВт _т ; 10 МВт _т	Деревина видалених фруктових садів	Компанія надає послуги з видалення садів, а отриману біомасу використовує як паливо на ТЕЦ і котельні. Радіус заготівлі – до 40 км.

стему торгівлі круглим лісоматеріалом. Постачальники деревних трісок купують їх у компаній, які займаються торгівлею лісоматеріалами. Доставка до енергетичного об'єкта здійснюється самим постачальником або найманою транспортною компанією. Оплата залежить від енергетичного вмісту біопалива, що передбачає ретельний контроль якості. Сучасні підприємства-виробники гранул зазвичай мають власні ТЕЦ на біомасі для забезпечення своїх потреб у технологічному теплі. Надлишок теплової енергії подається у місцеву систему ЦТ. Поставка гранул на ТЕЦ та котельні часто відбувається за прямими контрактами між виробником і споживачем.

В європейській практиці ведення лісового господарства розрізняють три основні варіанти отримання деревних трісок з порубкових залишків: виробництво безпосередньо на місці утворення відходів лісозаготівлі, на площадці біля лісової дороги або на території біоенергетичної установки. На сьогодні найбільш розповсюдженим варіантом (особливо у Фінляндії і Швеції) є виробництво деревних трісок з лісосічних відходів на площадці біля лісової дороги. В цьому випадку порубкові залишки збираються і доставляються форвардером до дороги, де викладаються у формі валів для сушки протягом певного періоду часу. Тріски виробляються пересувною рубальною машиною, агрегованою з сільськогосподарським трактором, після чого вивозяться з лісу вантажівками та спеціальними трісковозами з або без причепів/напівпричепів. Інша опція цього варіанту полягає у виробництві і перевезенні деревних трісок комбінованою машиною – автотрісковозом, оснащеним рубальним модулем [9-11].

У разі подрібнення порубкових залишків на місці їх утворення в лісі потрібна високомобільна рубальна машина, оснащена контейнером для трісок об'ємом 15...20 м³. Рубальна машина перевозить тріски на площадку біля дороги. Тріски з контейнера (який нахилиється для розвантаження) переміщуються у вантажівку для доставки споживачу. Такий варіант не підходить для заготівлі великих обсягів деревної біомаси. При виробництві деревних трісок з лісосічних відходів на території енергетичного об'єкта або на проміжному складі має місце незалежна робота рубальної машини і вантажівки. Замість мобільних рубальних машин можуть використовуватися стаціонарні дробарки. Для підвищення ефективності логістики, у цьому варіанті рекомендується перевезення порубкових решток з лісу до місця подрібнення у вигляді тюків або в'язанок.

Належне зберігання деревного біопалива є важливою складовою загального ланцюга постачання. При зберіганні трісок у купах під час опадів зволожується не дуже глибокий поверхневий шар, а характеристики

основної маси біопалива залишаються незмінними. При такому способі зберігання у періоди ясної погоди тріски підсушуються. Для запобігання злежуванню, започаткуванню процесів гниття, утворенню плісняви та іншим негативним явищам необхідно виконувати ворухіння забуртованих трісок. Приблизно раз на два тижні купу з трісками треба перемішувати на інше місце. В середньому за 2...3 місяці втрата вологи складає 7...10%. Існуючий досвід зберігання трісок в складських приміщеннях, що не обладнані системами якісної вентиляції, свідчить про негативні наслідки через утворення великої кількості пари в середині приміщень.

Прикладом комплексного підходу до реалізації ланцюга постачання є робота торгівельно-логістичних центрів для деревної біомаси в Австрії. Такі центри були створені з метою підвищення надійності, ефективності та обсягів постачання деревного біопалива споживачу шляхом залучення власників лісу як безпосередніх гравців ринку біомаси. Сьогодні ТЛЦ Австрії координують весь процес – від заготівлі і доставки біопалива до центру до його постачання кінцевим споживачем. Існують мінімальні вимоги до інфраструктури і обладнання центру, а також обсягу деревини, що зберігається. Передові ТЛЦ обладнані автоматизованою системою, яка дозволяє приймати та вести облік поставленої деревини у період відсутності працівників. Торгівельно-логістичні центри для деревної біомаси існують і в інших країнах ЄС, але їх діяльність відрізняється від класичного прикладу Австрії. Так, в Німеччині і Словенії ТЛЦ окрім своїх основних функцій можуть займатися також вирощуванням енергетичних рослин, експлуатацією котельнь та мереж ЦТ, реалізацією нових біоенергетичних проєктів, а також продажом, встановленням і обслуговуванням котлів на деревній біомасі [12].

Біомаса від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень

До деревного біопалива можна віднести біомасу від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень (садів, виноградників), хоча в ЄС фахівці класифікують її як вид агробіомаси. Даний напрямок біоенергетики є відносно новим, особливо у порівнянні із досвідом використання лісової деревини і соломи. Тим не менш, вже зараз в Європі є чимало прикладів успішної роботи комерційних енергетичних установок на біомасі ОВБСН. Серед таких прикладів виробництво технологічної пари з виноградної лози у котельні ПТК «Шабо» (Одеська область); отримання теплової енергії з виноградної лози для системи ЦТ м. Вілафранка-дель-Пенедес (Іспанія);

робота ТЕЦ $2 \text{ МВт}_e + 10 \text{ МВт}_t$ і котельні 10 МВт_t на деревині видалених фруктових садів аграрної компанії Nufri (Іспанія) (див. табл. 1) [13].

При обрізці плантацій дерев біомаса утворюється в обсязі $1...5 \text{ т/га}$. Можна виділити три підходи до заготівлі такої біомаси. У першому випадку вітки переміщуються або стягуються на край плантації, де відбувається їхнє подрібнення або тюкування. Другий варіант полягає у поєднанні операцій збору з подрібненням або тюкуванням обрізків. В обох випадках біомаса контактує з ґрунтом і може бути забрудненою ґрунтом і камінням. Третій варіант – поєднання операції обрізки з подрібнення, в результаті чого біомаса не контактує з ґрунтом, а отримане біопаливо є чистим. Даний варіант наразі ще знаходиться в стадії розвитку, але є перспективним через свої переваги.

При заготівлі біомаси від видалення багаторічних насаджень (обсяг до 50 т/га) можна викорчувувати цілі дерева з наступним подрібненням на краю плантації або у міжрядді; виконувати рубку наземної частини дерева з подрібненням на місці, на краю плантації або на спеціальному терміналі. При викорчуванні цілих дерев отримана біомаса містить каміння і ґрунт, тому її якість значно нижча порівняно з лісовою деревиною. При застосуванні опції подрібнення дерев у міжрядді (без стягування на край плантації), забруднення біомаси значно менше. Якщо заготовлюється тільки наземна частина дерева, біопаливо є незабрудненим, але в землі залишаються пні і потрібні додаткові витрати на їх вида-

лення. Теоретично можливий варіант заготівлі, в якому операція рубки поєднана з подрібненням, але для нього ще не розроблено технічних рішень і обладнання.

Кожний з описаних вище підходів до заготівлі біомаси ОВБСН характеризується своїм набором обладнання, яке може відрізнятися навіть в рамках одного варіанту і впливати на вартість отриманого біопалива. Так, наприклад, при роздільному збиранні та подрібненні обрізків вартість біопалива, доставленого споживачу, може коливатися в межах $870...1110 \text{ грн/т}$. Нижня межа передбачає використання дискового подрібнювача навісного на трактор і перевезення біомаси трактором з причепом на відстань 10 км . Верхня межа відповідає випадку застосування мобільного барабанного подрібнювача на шасі вантажного автомобіля і транспортування біомаси вантажівкою на 20 км . У варіанті поєднаних операцій збору (трактор з вилами/граблями) і подрібнення (подрібнювач причіпний на трактор з контейнером) вартість біопалива становить близько 765 грн/т при перевезенні трактором з причепом на відстань 10 км . Всі наведені випадки відповідають обсягу виходу обрізків 2 т/га .

За теплотворною здатністю біомаса/біопалива ОВБСН є близькими до лісової деревини (табл. 2). Порівняння характеристик брикетів з виноградної лози з вимогами стандарту ISO 17225-3 для брикетів класу В (сировина – деревні насадження та інша природна деревина) показує, що вони відповідають стандарту по масовій частці вологи ($M \leq 15\% \text{ р.м.}$), нижчій теплоті зго-

Табл. 2. Склад та паливні характеристики гранул і брикетів з біомаси ОВБСН [14]

Показники	Брикет		Гранули		
	з виноградної лози	з деревної тирси*	з видалених фруктових дерев	з виноградної лози	з деревної тирси*
Вологість, %	11	4...8	13	10	≤ 10
Зольність, %	3,4	0,5...1,1	4,8	4,5	$\leq 0,7$
Q, МДж/кг с.м.	18,0	19,0	18,1	17,7	19,0
Густина, т/м^3	0,61...0,72	1,15...1,25	$\sim 1,0$	$\sim 1,0$	1,2
Насипна щільність, кг/м^3	760	800...1000	530	710	600...750
Вміст окремих елементів, %:					
- вуглець C	49,0	50,0	49...51	49,0	50,0
- водень H	5,9	6,0	6,2...6,5	5,8	6,0
- азот N	0,85	$< 0,3$	0,5...1,0	0,81	$< 0,3$
- сірка S	0,05	$< 0,04$	0,01	0,07	$< 0,04$
- хлор Cl	0,05	$< 0,03$	$< 0,03$	0,02	$< 0,03$
Температура плавлення золи, $^{\circ}\text{C}$	1300	> 1100	> 1000	1380	> 1100

* Для порівняння.

рання ($Q \geq 14,9$ МДж/кг р.м.), вмісту азоту ($N \leq 1,0\%$ с.м.) та сірки по верхній межі ($S \leq 0,05\%$ с.м.). Не відповідають стандарту зольність брикетів з виноградної лози (вимога $A \leq 3,0\%$) і вміст хлору (вимога $Cl \leq 0,03\%$). Щодо вимог до якості гранул за EN plus, гранули з біомаси ОВБСН можуть задовольняти вимогам по нижчій теплотворній здатності, насипній щільності, температурі плавлення золи, вмісту азоту і хлору (для ENplus B).

Подрібнені обрізки та видалена деревина часто характеризуються значною негомogeneousністю маси. Наявність занадто крупних часток може призводити до забивання шнеків і утворення перемичок у паливних бункерах енергетичних установок. Для запобігання цьому подрібнену біомасу з високим ступенем неоднорідності треба додатково просіювати перед кінцевим споживанням. Крім того, існують практичні рекомендації для мінімізації попаданню ґрунту і каміння при заготівлі біомаси ОВБСН.

Висновки та рекомендації для України

Ефективна логістика постачання біомаси мінімізує її вартість як палива «на вході» енергетичного об'єкту. Це є важливим, оскільки паливна складова є найбільшою (до 70% і вище) і часто вирішальною у формуванні ціни виробленої енергії. Вартість вихідної сировини також значно впливає на рентабельність виробництва всіх видів біопалива. Крім цього важливими факторами є належна якість біомаси та вчасність її доставки на біоенергетичний об'єкт.

Україні необхідно вивчати і впроваджувати кращий європейський досвід реалізації заготівельно-логістичних операцій постачання біомаси для енергетичної конверсії, зокрема, післяжнивних решток, лісової та іншої деревини, біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень. Фахівці Інституту технічної теплофізики НАН України брали участь у розробці проєктів базових документів, у тому числі законодавчих, для створення в Україні системи електронної торгівлі біомасою, а також для практичної реалізації концепції виробництва деревних трісок з порубкових залишків на площадці біля лісової дороги [4, 15].

Пропозиції по створенню системи електронної торгівлі в Україні враховують кращу світову практику роботи біопаливних бірж, у тому числі біржи Baltpool. Відповідний проєкт закону було зареєстровано у Верховній раді України у 2022 році (№ 8052 від 19.09.2022). Рекомендації по запровадженню виробництва деревних трісок з лісосічних відходів передбачають низку заходів, які потребують законодавчого врегулювання. Ці заходи включають покладання на постійних лісокористувачів обов'язку вивезення поруб-

кових решток до найближчих доріг, заборону суцільного та часткового спалювання порубкових решток, уведення обліку порубкових решток шляхом врахування їх повної маси у лісорубних квитках. Для кожної з пропозицій розроблено проєкти нормативно-правових актів. Дотепер ці напрацювання, нажаль, ще не були розглянуті і затверджені на офіційному рівні. Однак, вони залишаються актуальними, оскільки країні необхідно розвивати ринок біомаси як палива для прискорення заміщення викопних палив відновлюваними джерелами енергії.

Іншими актуальними напрямками для вітчизняної біоенергетики є освоєння технологій заготівлі стебел кукурудзи і соняшника, розвиток вирощування енергетичних рослин, створення торгівельно-логістичних центрів для деревної/аграрної біомаси або реалізація інших подібних концепцій, запровадження практики довгострокових контрактів на постачання біомаси і оплати за поставлену енергію (а не за вагу чи об'єм), розвиток спеціалізованих компаній, що займаються питаннями логістики біомаси та біопалив.

Пріоритетне використання побічних продуктів виробництва кукурудзи на зерно (а не соломи зернових колосових) має дві переваги. По-перше, кукурудзиння має кращі паливні характеристики, ніж солома; по-друге, його часткове відчуження з полів для використання як біопалива несе меншу загрозу для погіршення родючості ґрунтів. В Україні запровадити заготівлю і постачання стебел кукурудзи (а в майбутньому і стебел соняшнику) можна, наприклад, за концепцією роботи торгівельно-логістичних центрів для аграрної біомаси. В такому випадку виробництво біопалива буде складовою загальної роботи сільськогосподарської компанії і додатковим джерелом її доходу. Для реалізації цієї концепції необхідно освоїти технологію заготівлі стебел кукурудзи/соняшнику, знайти надійних споживачів виробленої продукції і укласти з ними довгострокові контракти на постачання. Будівництво нових котелень, ТЕЦ і ТЕС на біомасі сприятиме створенню компаній, які будуть займатися логістикою постачання біопалив на енергетичні об'єкти як пріоритетним видом діяльності.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Martin Junginger, Peter-Paul Schouwenberg. Sustainable biomass markets and international bioenergy trade to support the biobased economy. IEA Bioenergy, Task 40, 2019. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/11/IEA-Bioenergy_Task-40-Triennium-2016-2018-1.pdf*

2. *Biomass supply chains*. WBA fact sheet, 2018.
<https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biomass%20Supply%20Chains.pdf>
3. Гелету́ха Г., Драгне́в С., Кучеру́к П., Матве́єв Ю. Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України. Проект ПРООН/ГЕФ, 2017. – 37 с.
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/01/biofin.pdf>
4. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Баи́товий А.І. Створення конкурентного ринку біопалив в Україні. Частина 2 // Промислова теплотехніка. – 2017, т. 39, № 4, с. 76-80.
<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.11>
5. Олі́йник С., Анто́ненко В., Ча́плигін С., Зу́бенко В. Підготовка та впровадження проєктів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник / За ред. Г. Гелету́хи. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 104 с.
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/posibnyk-onovlenyi-2016.pdf>
6. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Баи́товий А.І., Гелету́ха Г.І. Огляд кращих практик організації роботи ринку біопалив у країнах ЄС // Промислова теплотехніка. – 2017, т. 39, № 5, с. 108-112. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.18>
7. *Torben Skøtt, Jørgen Hinge, Louise Krogh Johnson. Straw to Energy. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition.* – Aarhus: Food & Bio Cluster Denmark, 2021. – 56 p.
<https://agrobioheat.eu/agrobiomass-guides/>
8. Дзя́дике́вич Ю., Розу́м Р., Бу́ряк М. Основні напрями управління процесами використання відходів деревини // Наука молода. – 2011, № 15-16, с. 274-278.
<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/27395/1/%D0%94%D0%B7%D1%8F%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf>
9. *Bengt Nilsson. Extraction of logging residues for bioenergy.* Linnaeus University Dissertations N 270/2016.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1049815/FULLTEXT01.pdf>
10. *Pentti Hakkila. Developing technology for large-scale production of forest chips. Interim Report, National Technology Agency, 2003.* <https://www.iufro.org/download/file/1466/1605/02-hakkila-woodenergy-99-03.pdf>
11. *Eija Alakangas. Properties of wood fuels used in Finland. BIOSOUTH project. 2005.* https://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/06_Publications/BIOSOUTH_Wood_fuel_properties_Oct2005.pdf
12. *Report about Potentials and Limitations for the Transfer of Good Practise Examples. BioRES – Sustainable Regional Supply Chains for Woody Bioenergy, 2015.*
http://bioresproject.eu/wp-content/uploads/2016/02/Potentials-and-Limitations-for-the-Transfer-of-Good-Practice-Examples_Dec.2015.pdf
13. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Баи́товий А.І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні // Промислова теплотехніка. – 2018, т. 40, № 1, с. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>
14. Драгне́в С.В., Желе́зна Т.А., Баи́товий А.І. Техніко-економічне обґрунтування проєктів виробництва твердого біопалива з біомаси від обрізки багаторічних сільськогосподарських насаджень в Україні // Теплофізика та теплоенергетика. – 2021, т. 43, № 2, с. 68-76. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.8>
15. Гелету́ха Г.Г., Желе́зна Т.А., Драгне́в С.В., Баи́товий А.І. Аналіз можливостей заготівлі деревного палива в лісах України // Промислова теплотехніка. – 2018, т. 40, № 1, с. 61-67.
<https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

ANALYSIS OF DIRECTIONS TO OPTIMIZE LOGISTICS OF BIOMASS FUEL SUPPLY TO ENERGY FACILITIES

Zheliezna T.A.¹, Drahnev S.V.²

¹PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-9607-3022, e-mail: zhelyezna@secbiomass.com

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.9>

The objective of the work is analysis of the best options for harvesting and logistics of biomass supply to energy facilities. Another purpose is to develop recommendations for implementing best practices of biomass logistics in Ukraine. Effective logistics of biomass fuel supply is one of the important prerequisites for a successful implementation of bioenergy projects. The share of logistics cost in the whole supply chain is 30...50% for biomass delivered to the consumer. In case of long-distance international transportation this share may reach more than 75%. The composition and complexity of harvesting and logistics operations, which affects the final product cost, depends on biomass source, type and commercial form (pellets, briquettes, chips, bales). The more compressed biomass is, the more efficient its transportation is from an economic and energy point of view in terms of ton-kilometer. Effective biomass supply logistics minimizes its cost as a fuel for an energy facility. This is important because fuel cost is the largest component (up to 70% and more) and often plays the crucial role in forming the price of energy produced. It is important for Ukraine to study and implement the best European experience in harvesting and logistics operations for biomass supply for energy conversion. In particular, this includes the creation of a system for biomass electronic trading as well as practical implementation of the concept for wood chips production from felling residues on a forest roadside. Drafts of required basic documents, including legislative ones, have already been developed for these areas. Other priority tasks for the domestic bioenergy sector are the mastering of technologies for corn and sunflower stalks harvesting, development of energy crops growing, creation of trade and logistics centers for wood/agrarian

biomass or the implementation of other similar concepts, introduction of long-term contracts for biomass supply and payment for biomass delivered per its energy unit (not per ton), development of companies that specialize in biomass and biofuel logistics.

References 15, table 2.

Key words: biomass, biomass fuel, solid biomass fuel, crop residues, felling residues, wood chips.

1. Martin Junginger, Peter-Paul Schouwenberg. Sustainable biomass markets and international bioenergy trade to support the biobased economy. IEA Bioenergy, Task 40, 2019. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/11/IEA-Bioenergy_Task-40-Triennium-2016-2018-1.pdf

2. Biomass supply chains. WBA fact sheet, 2018. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biomass%20Supply%20Chains.pdf>

3. Geletukha G., Drahnev S., Kucheruk P., Matveev Y. Praktychnyi posibnyk z vykorystannia biomasy v yakosti palyva u munitsypalnomu sektori Ukrainy. [Practical manual on the use of biomass as fuel in the municipal sector of Ukraine.]. UNDP/GEF project, 2017. – 37 p. (Ukr.). <https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/01/biofin.pdf>

4. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I. Stvorennia konkurentnoho rynku biopalyv v Ukraini. Chastyna 2. [Creation of the competitive biofuel market in Ukraine. Part 2.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 39, No. 4 (2017) – P. 76-80. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.11>

5. Oliynyk E., Antonenko V., Chaplyhin S., Zubenko V. Pidhotovka ta vprovadzhennia proektiv zamishchennia pryrodnoho hazu biomasoiu pry vyrobnytstvi teplovoi enerhii v Ukraini. [Preparation and implementation of projects to replace natural gas with biomass in the production of heat energy in Ukraine.]. Practical guide/Edited by G. Geletukha – K.: “Poligraph Plus”, 2016. – 104 p. Практичний посібник / За ред. Г. Гелетухи. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 104 с. (Ukr.). <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/posibnyk-onovlenyi-2016.pdf>

6. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Bashtovyi A.I., Geletukha G.I. Ohliad krashchykh praktyk orhanizatsii roboty rynku biopalyv u krainakh YeS. [Review of best practices of biofuel market operation in the EU countries.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 39, No. 5 (2017) – P. 108-112. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.18>

7. Torben Skøtt, Jørgen Hinge, Louise Krogh Johnson. Straw to Energy. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition. – Aarhus: Food & Bio Cluster Denmark, 2021. – 56 p. <https://agrobioheat.eu/agrobiomass-guides/>

8. *Dziadykevych Yu., Rozum R., Buriak M.* Osnovni napriamy upravlinnia protsesamy vykorystannia vidkhodiv derevyny. [Main areas of management of wood waste utilization processes.]. Young science. – No. 15-16 (2011) – P. 274-278. (Ukr.).

<http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/27395/1/%D0%94%D0%B7%D1%8F%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf>

9. *Bengt Nilsson.* Extraction of logging residues for bioenergy. Linnaeus University Dissertations N 270/2016.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1049815/FULLTEXT01.pdf>

10. *Pentti Hakkila.* Developing technology for large-scale production of forest chips. Interim Report, National Technology Agency, 2003. https://www.iufro.org/download/file/1466/1605/02-hakkila-woodenergy-99-03_pdf

11. *Eija Alakangas.* Properties of wood fuels used in Finland. BIOSOUTH project. 2005.

https://p29596.typo3server.info/fileadmin/Files/Documents/06_Publications/BIOSOUTH_Wood_fuel_properties_Oct2005.pdf

12. *Report about Potentials and Limitations for the Transfer of Good Practise Examples.* BioRES – Sustainable Regional Supply Chains for Woody Bioenergy, 2015.

http://bioresproject.eu/wp-content/uploads/2016/02/Potentials-and-Limitations-for-the-Transfer-of-Good-Practice-Examples_Dec.2015.pdf

13. *Geletukha G., Zheliezna T., Drahnev S., Bashtovyi A.* Perspektyvy vykorystannia biomasy vid obrizky ta vydalennia bahatorichnykh silskohospodarskykh nasadzhen dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini. [Prospects for using biomass from agrarian pruning and plantation removal in Ukraine.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 40, No. 1 (2018) – P. 68-74. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.10>

14. *Drahnev S., Zheliezna T., Bashtovyi A.* Tekhniko-ekonomichne obgruntuvannia proektiv vyrobnytstva tverdogo biopalyva z biomasy vid obrizky bahatorichnykh silskohospodarskykh nasadzhen v Ukraini. [Feasibility study of projects for the production of solid biofuels from biomass of agrarian plantations pruning and removal in Ukraine.]. Thermophysics and Thermal Power Engineering. – Vol. 43, No. 2 (2021). – P. 68-76. (Ukr.) <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2021.8>

15. *Geletukha G., Zheliezna T., Drahnev S., Bashtovyi A.* Analiz mozhlyvostei zahotivli derevnoho palyva v lisakh Ukrainy. [Analysis of opportunities for harvesting wood fuel in the forests of Ukraine.]. Industrial Heat Engineering. – Vol. 40, No. 1 (2018) – P. 61-67. (Ukr.). <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2018.09>

Отримано 15.12.2023

Received 15.12.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 536.24:621.184.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ТЕРМІЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ШЛЯХОМ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Шевчук С.І.³, Гнєдаш Г.О.⁴

¹член-кореспондент НАН України, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²канд. техн. наук, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³канд. техн. наук, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴канд. техн. наук, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.10>

Наведено результати досліджень щодо створення утилізатора скидної теплоти димових газів установок спалювання побутових відходів. Запропоновано нове технічне рішення повітрогріючого теплоутилізатора з можливістю очищення робочих поверхонь від відкладень пилу. Встановлено закономірності зміни основних показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації протягом року в практичному діапазоні зміни вхідних параметрів теплоносіїв.

The research results on the creation of recovery exchanger for waste heat exhaust gases of household waste incineration plants are presented. A new technical solution for an air-heating heat recovery exchanger with the ability to clean working surfaces from dust deposits is proposed. The regularities of changes in the main indicators of the heat recovery exchanger in different operating modes during the year in the practical range of changes in heat-transfer-agents input parameters were established.

Бібл. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: повітрогрійний теплоутилізатор, труби з мембранами, теплова ефективність, очищення поверхні теплообміну.

Q – теплопродуктивність, кВт;

t – температура, °С;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

Індекси:

вих – на виході;

вх – на вході;

г – газів;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

ут – утилізатор.

Вступ

Термічне знешкодження твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із способів боротьби з їхніми екологічними загрозами [1, 2]. Технології термічного знешкодження ТПВ охоплюють сукупність технологій, які безпосередньо спалюють побутові відходи з відновленням енергії для вироблення електричної і теплової енергії. Ці технології є досить різноманітними і мають широке застосування в розвинених країнах світу [3, 4]. Під час вибору технології термічного знешкодження побутових відходів необхідно враховувати багато факторів технічного і вартісного характеру стосовно умов її конкретного застосування. Важливими завданнями створення сміттєспалювальних установок (ССУ) є забезпечення ефективного спалювання ТПВ і глибока рекуперація утвореної теплоти. Глибина рекуперації пов'язана зі зменшенням обсягів скидного тепла шляхом утилізації теплоти відпрацьованих димових газів.

Утилізація теплоти димових газів є досить складним завданням через вміст у продуктах згоряння сміттєспалювальних установок хімічно агресивних сполук у газоподібному стані, а також твердого виносу різного хімічного та фракційного складу у вигляді пилу. Тому одним із основних завдань під час створення і експлуатації систем рекуперації скидної теплоти димових газів є використання в цих системах спеціального теплообмінного устаткування (теплоутилізаторів), що характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозійної та ерозійної дії димових газів, можливістю часткового самоочищення цих поверхонь від відкладень пилу та у разі необхідності примусового їх очищення.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Метою роботи є розроблення технічного рішення теплоутилізатора димових газів установок спалювання сміття та визначення показників його теплової ефективності.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- ознайомитись з досвідом використання сучасних ССУ та встановити основні складові димових газів;
- визначити вимоги та вихідні дані для створення теплоутилізатора ССУ та розробити його технічне рішення;
- встановити закономірності зміни основних теплових показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації ССУ.

Методика проведення досліджень.

Розроблення теплоутилізатора базувалося на основі аналізу досвіду експлуатації установок термічного знешкодження побутових відходів та багаторічному досвіді авторів щодо створення і впровадження теплоутилізаційного устаткування за словарними печами [5, 6], які характеризуються високим рівнем запиленості та агресивності димових газів.

Розрахункові дослідження виконувались з використанням відомих методів теплового розрахунку теплообмінного устаткування та результатів досліджень процесів тепло-масопереносу і гідродинаміки у водогрійних теплообмінних апаратах систем утилізації теплоти промислових словарних печей різного типу [6, 7].

Результати.

На основі аналізу досвіду експлуатації установок термічного знешкодження побутових відходів було встановлено, що в їхніх димових газах наявні оксиди вуглецю, азоту, сірки, аміак, бромоводень, хлористий, фтористий та йодистий водень та інші шкідливі сполуки, а також тверді частинки (пил). Цей пил містить переважно негорючі речовини, що входять до складу сміття, та продукти неповного згоряння, які існують у твердій або аерозольній формі. Концентрація твердих частинок у димових газах коливається здебільшого від 200 до 50000 мг на 1 м^3 сухих димових газів [8]. Тому основними вимогами до створення теплоутилізаційного устаткування ССУ є, як зазначалось, забезпечення його високої теплової ефективності, стійкості робочих поверхонь до корозійної дії димових газів, можливості очищення цих поверхонь від відкладень технологічного пилу.

На основі висунутих вимог запропоновано технічне рішення теплоутилізатора для технологічної схеми сміттєспалювальної установки з використанням турбіни. Теплоутилізатор призначений для нагрівання повітря на горіння ССУ шляхом рекуперації теплоти відпрацьованих димових газів, що відходять після турбіни. Рис. 1а ілюструє схематичне зображення цього

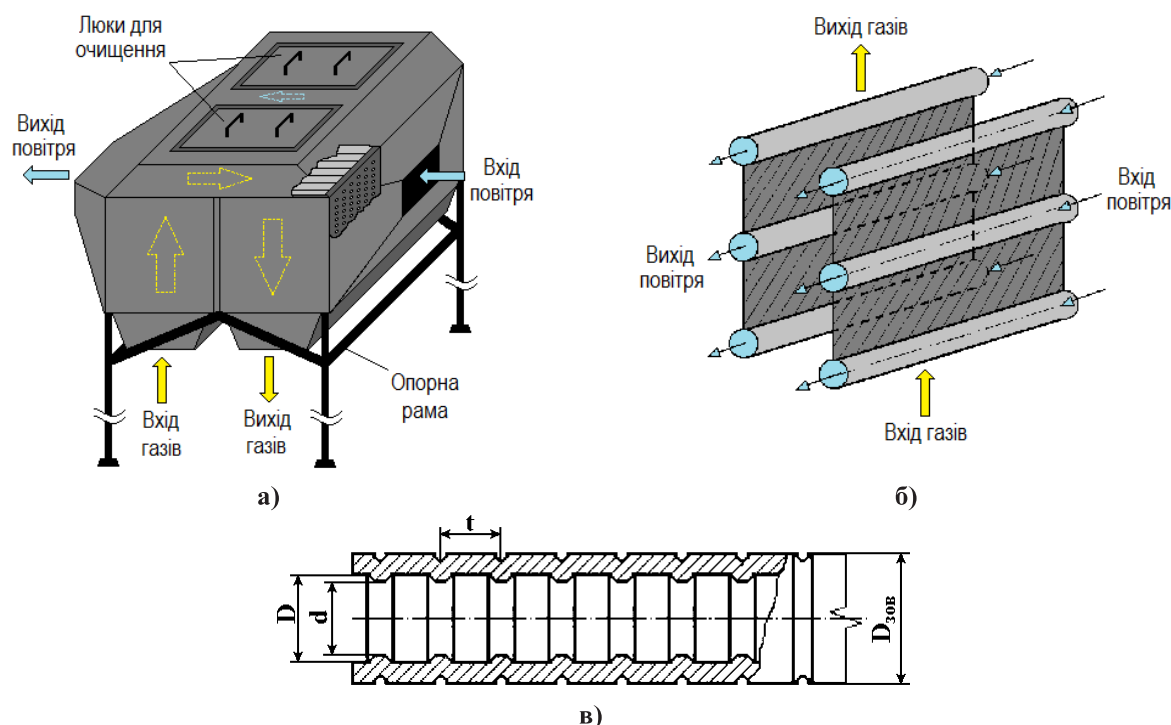


Рис. 1. Схематичне зображення повітрогрійного теплоутилізатора ССУ та його теплообмінної поверхні: а – загальний вигляд; б – теплообмінна поверхня з напрямком руху теплоносіїв; в – труба з кільцевими турбулізаторами потоку

го устаткування, а рис. 1б – схему його теплообмінної поверхні з рухом теплоносіїв.

Теплообмінна поверхня теплоутилізатора являє собою пакет сталевих панелей, утворених трубами з мембранами. На поверхню панелей з газового боку може бути нанесене захисне антикорозійне покриття. Застосовувані в панелях труби мають кільцеві турбулізатори потоку (рис. 1в) певних геометричних розмірів, які забезпечують інтенсифікацію теплообміну на їхніх внутрішніх поверхнях в 1,4 – 1,8 разів за умов помірного, порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну, зростання аеродинамічного опору. Рух теплоносіїв перехреснотоківий з проходженням димових газів у міжпанельному просторі, а повітря в трубах. Конструкційне виконання теплоутилізатора дозволяє здійснювати примусове очищення панелей з газового боку стисненим повітрям через спеціальні отвори.

Досвід експлуатації за скловарними печами [4 – 6] водогрійного теплоутилізаційного устаткування, конфігурація теплообмінної поверхні якого відповідає з газового боку конфігурації пропонованого повітрогрійного теплоутилізатора, свідчить, що конструкційне виконання панелей сприяє зменшенню їх запиленості в процесі експлуатації теплоутилізатора. Отриманий досвід свідчить також про високу ефективність очищення цієї поверхні стисненим повітрям. Таке примусове видалення відкладень пилу дозволяє практично відновлювати початкову теплопродуктивність теплоутилізатора.

Виконано розрахункові дослідження щодо показників теплової ефективності розробленого повітрогрійного теплоутилізатора димових газів у разі його використання для сміттєспалювальної установки. Дослідження виконувались в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року, а саме: за різних вхідних температур димових газів і повітря, вологості димових газів, коефіцієнта надлишку повітря, рівня запиленості

поверхні нагрівання тощо. Вихідні режимні параметри (табл. 1) для виконання розрахунків теплоутилізатора приймалися в їхньому практичному діапазоні на 1 тону ТПВ згідно з літературними даними [3, 4]. Вказаний в таблиці коефіцієнт запиленості визначає рівень зниження теплопродуктивності теплоутилізатора за наявності відкладень пилу.

Результати визначення основних характеристик теплоутилізатора за відсутності забруднень на його теплообмінній поверхні наведено на рис. 2, 3. Рис. 2 ілюструє закономірності зміни температури димових газів та повітря в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року за різних коефіцієнтів надлишку повітря в димових газах.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування пропонованого теплоутилізатора протягом року за різних значень коефіцієнта надлишку повітря в димових газах забезпечує їх охолодження до температури 107 – 152 °С та нагрівання повітря – до 131 – 151 °С для початкової температури газів $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$ °С. У разі підвищення за тих же умов температури $t_{\text{вх}}$ до 300 °С досягається вищий рівень підігрівання повітря (до температури 198 – 220 °С), але реалізується і збільшення вихідної температури димових газів в межах 168 – 227 °С.

Слід зазначити, що зменшення коефіцієнта надлишку повітря α з 2,5 до 1,5 відповідає підвищенню рівня кінцевої температури повітря: на 9 – 11 °С для $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$ °С та на 13 – 14 °С для $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 300$ °С. Таке підвищення не є суттєвим, зважаючи на відносно значне зменшення обсягів нагріваного повітря. Це пояснюється здебільшого тим, що за менших коефіцієнтів надлишку повітря відбувається зменшення швидкості його течії в трубах з кільцевими турбулізаторами потоку, яке зумовлює деяке зниження інтенсифікації теплообміну. Дана обставина вказує на те, що для ефективної експлуатації теплоутилізатора його конструкційне виконання повинно відповідати реальним режимам роботи зі зміною α в невеликих межах.

Розрахункові дані щодо закономірностей зміни за розглянутих умов теплопродуктивності теплоутилізатора $Q_{\text{ут}}$ протягом року наведено на рис. 3. За результатами досліджень значення $Q_{\text{ут}}$ змінюється в діапазоні 95 – 263 кВт. Причому величина $Q_{\text{ут}}$ зростає з підвищенням початкової температури димових газів та коефіцієнта надлишку повітря α і зменшується з підвищенням його температури $t_{\text{вх}}^{\text{г}}$.

За результатами досліджень також встановлено, що за розглянутих умов зміна початкового вологовмісту димових газів не впливає на їхній кінцевий вологовміст. Тобто в процесі теплоутилізації не реалізується глибоке охолодження цих газів, що убезпечує в процесі

Таблиця 1. Вихідні дані

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	1,8
Коефіцієнт надлишку повітря	1,5 – 2,0
Температура димових газів на вході, °С	200 – 300
Температура повітря на вході, °С	-20 – 20
Вологовміст димових газів на вході, кг/кг с.г.	150 – 200
Коефіцієнт запиленості теплообмінної поверхні	0,5 – 1,0

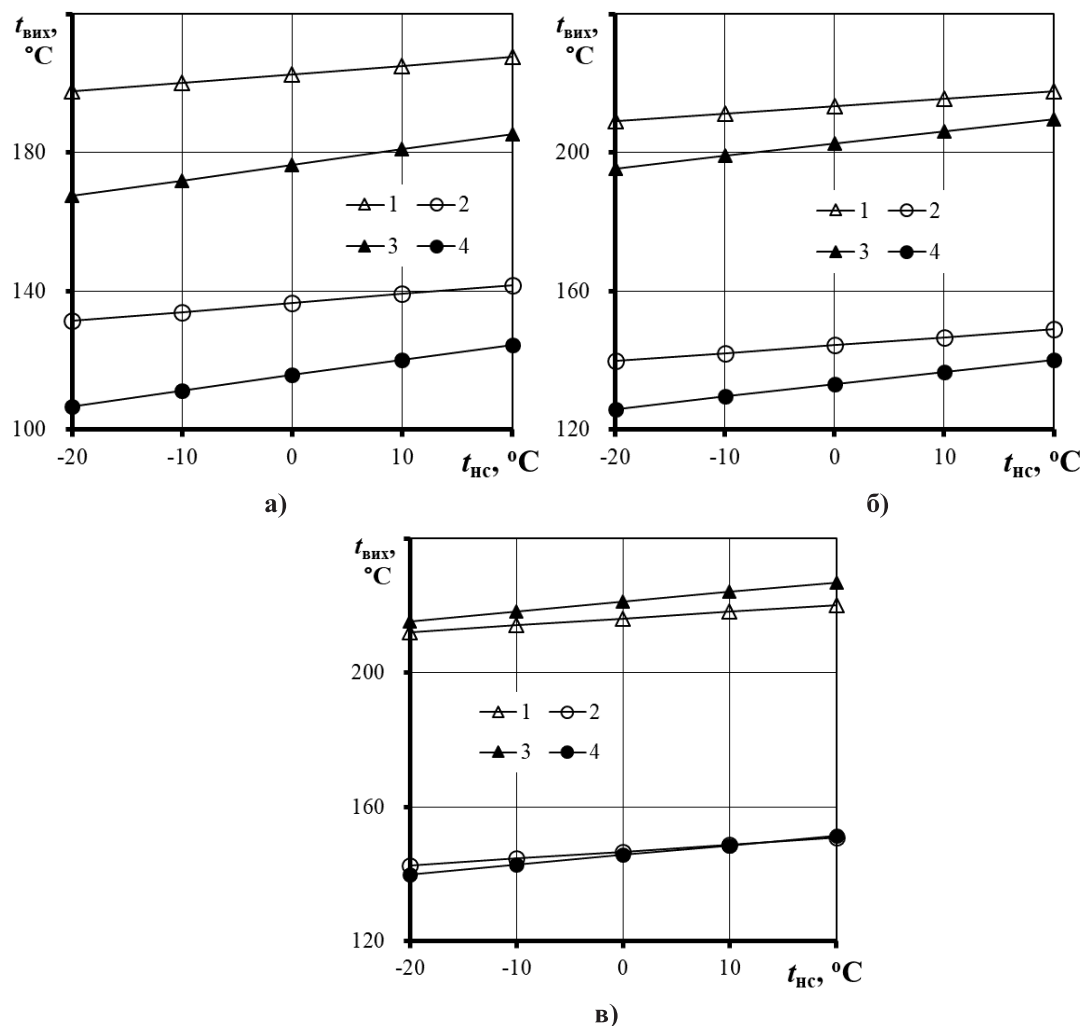


Рис. 2. Залежність температур повітря $t_{\text{вих}}^{\text{а}}$ (1, 2) та димових газів $t_{\text{вих}}^{\text{г}}$ (3, 4) на виході з теплоутилізатора від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ за різних температур димових газів на вході $t_{\text{вх}}^{\text{г}}$ та коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,5$ (а), $\alpha = 2,0$ (б) та $\alpha = 2,5$ (в): 1, 3 – $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 300$ °C; 2, 4 – $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$ °C

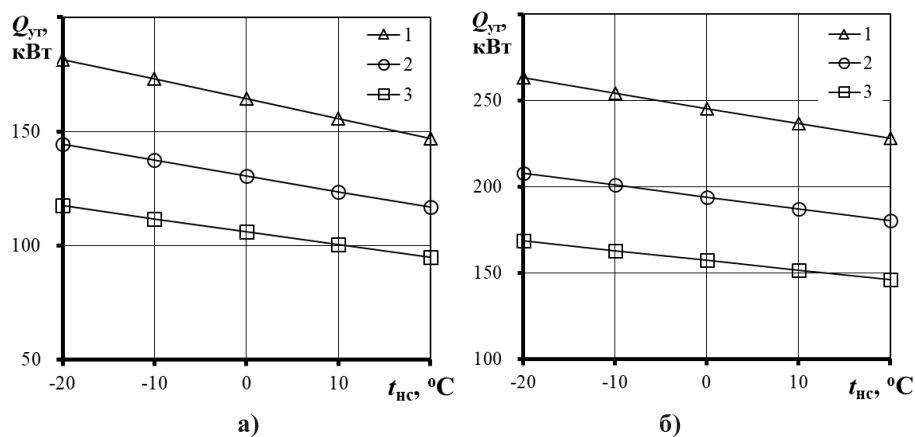


Рис. 3. Залежність теплопродуктивності теплоутилізатора від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ за різних коефіцієнтів надлишку повітря та температури відхідних газів на вході:
а) $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 200$ °C, б) $t_{\text{вх}}^{\text{г}} = 300$ °C. 1 – $\alpha = 1,5$; 2 – $\alpha = 2,0$; 3 – $\alpha = 2,5$

експлуатації робочі поверхні теплоутилізатора від корозійної дії конденсату, в якому зазвичай розчинюються корозійно активні сполуки, що містяться в димових газах.

Виконано також дослідження щодо температурних показників теплоносіїв теплоутилізатора за наявності забруднень на його теплообмінній поверхні. Дослідження виконувались в діапазоні значень коефіцієнта запиленості k від 0,5 до 1. Значення $k = 0,5$ відповідає зниженню теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ вдвічі за інших рівних умов. Аналіз отриманих результатів свідчить, що величина кінцевої температури нагріваного повітря за значень $k = 0,5$ зменшується в 1,3 – 1,4 рази і мінімальне її значення становить 96°C. За цих умов підвищується кінцева температура димових газів в 1,1 – 1,2 рази до максимального значення 245°C, що свідчить про недостатній рівень використання їхньої теплоти і необхідність здійснення примусового видалення пилових забруднень з поверхні теплообміну, як це і передбачено технічним рішенням теплоутилізатора.

На рис. 4 до прикладу наведено результати досліджень щодо залежності теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ теплоутилізатора від рівня запиленості теплообмінних поверхонь k за різних значень вхідних температур теплоносіїв (димових газів та повітря) та коефіцієнта надлишку повітря в димових газах $\alpha = 2,0$.

Наведені дані свідчать, що значення теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ за наявності відкладень пилу на теплообмінній поверхні за розглянутих умов змінюється в діапазоні 88 – 216 кВт. І це значення тим більше, чим

менший рівень запиленості поверхні, нижча вхідна температура нагріваного повітря та вища температура димових газів більший коефіцієнт надлишку повітря. Так у разі $\alpha = 2,5$ мінімальна величина $Q_{\text{ут}}$ в процесі експлуатації теплоутилізатора знижується до 72 кВт. Для підвищення теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ необхідно виконувати періодичне очищення теплоутилізатора.

Максимальний рівень забрудненості поверхні, за якого необхідно здійснювати примусове видалення пилових відкладень визначається конкретними умовами експлуатації теплоутилізатора, а саме: швидкістю запилення поверхні нагрівання, необхідним рівнем кінцевої температури повітря, умовами технічної реалізації процесу очищення тощо.

Висновки.

1. Розроблено нове технічне рішення повітрогрійного теплоутилізатора для установок термічного знешкодження побутових відходів, яке характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозії та можливістю примусового очищення цих поверхонь від відкладень пилу.

2. Виконано розрахункові дослідження та визначено основні показники теплової ефективності розробленого теплоутилізатора в залежності від початкових температур димових газів та повітря, коефіцієнта його надлишку в газах, рівня запиленості робочої поверхні та за наявності антикорозійного покриття і без нього. При цьому показано, що застосування теплоутилізатора забезпечує:

- теплопродуктивність 72 – 263 кВт;

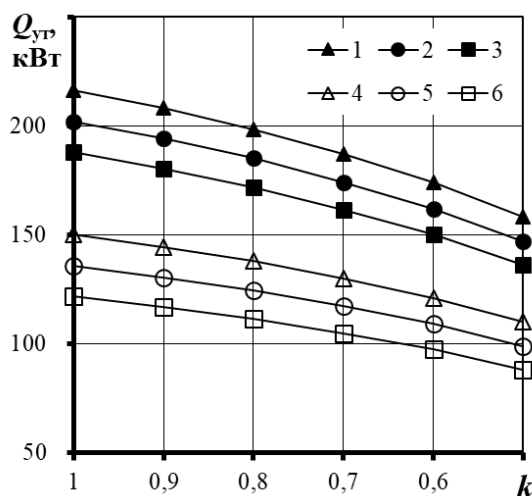


Рис. 4. Залежність теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ теплоутилізатора від коефіцієнта забрудненості k теплообмінної поверхні за різних значень температури вхідних газів і повітря на вході та коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2,0$: 1-3 – $t_{\text{вх}} = 300$ °C, 4-6 – $t_{\text{вх}} = 300$ °C;

1, 4 – $t_{\text{нв}} = -20$ °C; 2, 5 – $t_{\text{нв}} = 0$ °C; 3, 6 – $t_{\text{нв}} = +20$ °C

- охолодження димових газів до температури 107 – 245 °С;

- нагрівання повітря до 96 – 220 °С.

2. Встановлено, що відкладення пилу на теплообмінній поверхні призводить до зменшення температури нагріваного повітря в 1,3 – 1,4 рази та підвищення кінцевої температури димових газів в 1,1 – 1,2 рази. При цьому теплопродуктивність теплоутилізатора зменшується вдвічі.

3. Для підвищення ефективності теплоутилізації необхідно виконувати очищення робочих поверхонь у відповідності з технічним рішенням теплоутилізатора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Johnke B.* Emissions from waste incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. P. 455–468.

2. *Магера Ю. М.* Підвищення ефективності термічної інсінерації твердих побутових відходів: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.06 / Ін-т технічної теплофізики НАНУ Київ, 2019. 161с.

3. *Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report*, Stantec, 2011. 88p.

4. *Крот О. П.* Моделювання та оптимізація процесів термічного знешкодження побутових і промислових відходів у теплогенеруючих установках: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.03 / Харківський нац. універ. буд. та архіт., Харків, 2019. 329 с.

5. *Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О.* Особливості застосування теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей. Науковий вісник НЛТУ України. 2021. т. 31, №4. С. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418>

6. *Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Степанова А.І.* Результати експериментальних досліджень теплотехнічних характеристик водогрійних теплоутилізаторів промислових печей. Теплофізика та теплоенергетика. 2022. т. 44, №1. С. 84–91. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2022.10>.

7. *Фіалко Н.М., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Сариогло А.Г.* Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб. Киев: «София-А». 2016. 214с. ISBN 978- 966-02-7982-7.

8. *National Research Council.* (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055 (1-800-624-6242 or 202-334-3313 in the Washington metropolitan area; Internet: <http://www.nap.edu>).

IMPROVING THE PLANTS EFFICIENCY OF THERMAL INCINERATION HOUSEHOLD WASTE BY RECOVERING WASTE HEAT

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

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

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department, Professor; *orcid.org/0000-0003-0116-7673*, e-mail: *nmfialko@ukr.net*

²PhD (Engin.), Leading Researcher, Senior Research Scientist, *orcid.org/0000-0001-7476-2962*, e-mail: *navrodska-ittf@ukr.net*

³PhD (Engin.), Senior Researcher; *orcid.org/0000-0001-8046-0039*, e-mail: *s.i.shevchuk@gmail.com*

⁴PhD (Engin.), Senior Researcher; *orcid.org/0000-0003-0395-9615*, e-mail: *navrodska-ittf@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.10>

The work is devoted to research on the creation of recovery exchanger for waste heat exhaust gases of household waste incineration plants. The purpose of the work is to develop a technical solution for the heat recovery exchanger of waste incineration plants (WIP) and determine its thermal efficiency indicators. The main objectives of the study were to analysis of the modern experience of using the WIP and establish requirements for the creation of the exhaust gas heat recovery exchanger, develop a new technical solution for the heat recovery exchanger, and determine the change patterns in its main thermal indicators in different operating modes of the WIP. The known methods of thermal calculation of heat exchangers and the results of previous studies on the development and implementation of heat recovery equipment operating on dusty gases were used. The results of work on the creation of a new technical solution for an air-heating heat recovery exchanger with the ability to clean working surfaces from dust deposits are presented. The heat exchange surface of the heat recovery exchanger is composed of steel panels formed by tubes with membranes. The tubes applied have circular flow turbulizers on their internal surfaces. Turbulizers provide heat transfer intensification by 1.4 to 1.8 times with a moderate increase in aerodynamic resistance compared to other methods of heat transfer intensification. The

regularities of changes in the main indicators of the heat recovery unit in different operating modes during the year in the practical range of changes in its input parameters were established. The research results show that, depending on the initial temperatures of gases and air, the excess air ratio in exhaust gases and the dust level of the working surface, the heat recovery exchanger provides heating capacity of 72-263 kW; cooling of exhaust gases to a temperature of 107-245 °C; heating of air to 96-220 °C. It was also established that the deposition of dust on the heat exchange surface of the heat recovery unit under the considered conditions leads to a decrease in the heating air temperature by 1.3-1.4 times and an increase in the final exhaust gas temperature by 1.1-1.2 times. At the same time, the heating capacity of the heat recovery exchanger is reduced by half. To increase heat recovery efficiency, it is necessary to periodically clean the working surfaces of the heat recovery unit with compressed air.

References 8, tables 1, figures 4.

Key words: air-heating heat recovery exchanger, tubes with membranes, thermal efficiency, cleaning the heat exchange surface.

1. Johnke B. Emissions from waste incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. P. 455–468.

2. Magera Y.M. Pidvyshchennia efektyvnosti termichnoi insineratsii tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Improving of the efficiency of municipal solid waste thermal incineration]: manuscript ... PhD (Engin.): 05.14.06 / Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Kyiv, 2019. 161p. (in Ukr.)

3. Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report, Stantec, 2011. 88p.

4. Krot O.P. Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv termichnogo zneshkodzhennia pobutovykh i promyslovykh vidkhodiv u teplogeneruiuchykh ustanovkakh [Modeling and optimization of incineration processes of household and industrial wastes to heat generating plants]: manuscript ... Dr. Sci. (Engin.): 05.23.03 / Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, 2019. 329 p. (in Ukr.)

5. Fialko N.M., Prokopov V.G., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Presich G.O. Osoblyvosti zastosuvannia teploutylizatsiynykh tekhnologiy dlia gazospozhyvalnykh sklovarnykh pechey [Some features of the heat recovery technologies application for gas-fired glass furnaces]. Scientific Bulletin of UNFU. 2021. No 31(4). P. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418> (in Ukr.).

6. *Fialko N.M., Prokopov V.H., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I.* Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen teplotekhnichnykh kharakterystyk vodohriinykh teploutylizatoriv promyslovykh pechei [Results of experimental studies of the heat engineering characteristics of industrial furnace water-heating heat recovery units Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2022. Vol. 44, №1, P. 84–91. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2022.10>. (in Ukr.).

7. *Fialko N.M., Navrodskaia R.A., Sherenkovskii Yu.V., Stepanova A.I. Sariohlo A.G.* Utilizatsiia teploty otkhodiashchikh gazov steklovarenykh pechei s ispolzovaniem membrannykh trub [Heat recovery of exhaust gases from glass furnaces using membrane tubes]. K.: «Sophia-A». 2016. 214p. ISBN 978- 966-02-7982-7. (in Rus.).

8. *National Research Council.* (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055 (1-800-624-6242 or 202-334-3313 in the Washington metropolitan area; Internet: <http://www.nap.edu>).

Отримано 03.01.2024

Received 03.01.2024

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 621.165.5

УТОЧНЕНА ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ТЕЧІЇ ПАРИ В ЧАСТИНІ НИЗЬКОГО ТИСКУ ТУРБІН ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ НА МАЛОВИТРАТНИХ РЕЖИМАХ

Шубенко О. Л.¹, член-кореспондент НАН України, Голощапов В.М.², канд. техн. наук,
Котульська О.В.³, Парамонова Т. М.⁴

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, вул. Підгорного, 2/10, м. Харків, 61046, Україна

¹головний науковий співробітник; професор, orcid.org/0000-0001-9014-1357; e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua

²старший науковий співробітник, ст. наук. співр. orcid.org/0000-0002-2075-5326;

e-mail: goloshchapov36@gmail.com

³провідний інженер, orcid.org/0000-0002-5902-9313; e-mail: kot2017ov@gmail.com

⁴провідний інженер, orcid.org/0000-0002-0067-801X; e-mail: paramonova@ipmach.kharkov.ua

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.11>

Наведено фізичну модель вихрової структури потоку у проточній частині ЦНТ та умови, що на неї впливають при маловитратних режимах роботи ступенів великої віяловості. Виявлено умови виникнення і розвитку привулкового відриву та обертового вихору у міжвінцевому зазорі при зниженні відносній об'ємній витраті пари у ступені. Проаналізовано зв'язок температурного стану ступеня зі структурою потоку в ньому.

A physical model of the gas-dynamic structure of the flow at the flowing part of the LPC and what to inject into it under low-voltage modes of operation of the stage and high sluggishness has been introduced. It was revealed the vorticity and the development of the spigot vent and the overt vortex at the interventral gap with a reduced water volume at the step. The connection between the temperature class of the stage and the structure of the flow in the new one was analyzed.

Бібл. 11, рис. 3.

Ключові слова: парова турбіна, маловитратні режими роботи, витрати пари, ступені великої віяловості.

Вступ

Створення енергоринку та його розвиток в останнє десятиліття мало істотний вплив на режими роботи більшості працюючих електростанцій. У зв'язку із зростаючою роллю відновлюваних джерел енергії на енергоринку паротурбінні електростанції все частіше змушені працювати зі зниженим навантаженням або в області нерозрахункових режимів, виходячи на перехідні режими більше одного разу на добу. Отже, найбільш навантажені елементи турбіни (а це робочі лопатки останніх та передостанніх ступенів) повинні відповідати дедалі більшій експлуатаційній гнучкості, зберігаючи при цьому високий рівень надійності. Забезпечення надійної роботи ступенів ЦНТ особливо важливе для теплофікаційних турбін, які більшість часу експлуатуються у маловитратних режимах.

Дослідженню роботи ступенів великої віялості в широкому діапазоні зміни режимів присвячено велику низку робіт, які можна розділити на роботи, спрямовані на дослідження структури потоку в ступенях великої віялості; на роботи, присвячені температур-

ному стану елементів ступеня та на роботи з визначення інтегральних витрат потужності, необхідної для забезпечення експлуатації ступенів в умовах маловитратних режимів, що надходить у ступінь від стороннього джерела. Аналіз опублікованих джерел [1-2 та ін.] показав, що дослідження структури потоку проводяться на повітряних стендах чи із залученням термодинамічних показників на турбінах, що експлуатуються, а також розрахунковими методами з використанням комерційних програмних комплексів [3-4].

Аналітичні методи розрахунку показників турбіни, котрі нині застосовуються, придатні лише у досить вузькому діапазоні зміни її режимів, тобто для режимів, близьких до номінального (розрахункового). Ці методи як в одновимірній постановці, так і з урахуванням просторової форми течії базуються на результатах досліджень як плоских решіток, так і модульних ступенів малої та середньої віялості ($I_{\text{л}}/D_{\text{ср}} < 0,2$), але вони виявляються досить працездатні доти, доки у проточній частині зберігається "шаристий" характер течії. Коли лінії струму в меридіональному перерізі не-

значно викривлені і їх форма визначається головним чином формою обведення проточної частини цю модель течії умовно можна назвати моделлю складного руху робочого середовища в області турбінних режимів роботи ступенів. На глибоконарахункових режимах, коли характер руху потоку істотно змінюється, лінії струму спочатку викривляються, а потім з'являються зони (області) із зворотними течіями. Ці області для ступенів визначені як область привтулкового відриву, що формується за робочим колесом ступеня, і область вихрової течії міжвенцевому зазорі. У цих випадках існуючі методи тривимірних розрахунків в'язкого перебігу робочого середовища у вигляді комерційних програм ANSY-SCFX, крім завдання геометричних характеристик, вимагають достовірного формування граничних умов для режимів роботи, що розглядаються.

Метою даного дослідження є аналіз характеристик ступенів ЦНТ, що працюють у парових стаціонарних турбінах великої потужності, та формування фізичних моделей течії робочого середовища (пари) у таких ступенях на маловитратних режимах експлуатації з урахуванням розташування їх в проточній частині.

Основний зміст.

Режими роботи турбінних ступенів можна розділити на два види:

- турбінні – від номінального режиму до холостого ходу;
- маловитратні режими – від холостого ходу до режиму з нульовою витратою робочого середовища.

Як характеристику, що визначає режим роботи ступеня, доцільно використовувати відносну об'ємну витрату пари

$$\overline{Gv_2} = Gv_2 / Gv_{2\text{ном}}, \quad (1)$$

де Gv_2 – об'ємна витрата пари для режиму, що аналізується; G – масова витрата робочого середовища через ступень; v – питомий обсяг робочого середовища на виході з робочого колеса; $Gv_{2\text{ном}} = V2_{\text{ном}}$ – об'ємна витрата робочого середовища на номінальному режимі. Для ступенів, що працюють на вологій парі, об'ємна витрата вологої пари дуже мала в порівнянні з об'ємною витратою сухої насиченої пари, яка приймається для подальших розрахунків

$$G = G_0 \cdot x^2, \quad (2)$$

де x – ступень сухості пара на виході з робочого колеса (РК).

Відносна об'ємна витрата пари при холостому ході ступеня великої віялості визначається за отриманою автотрами залежністю

$$\overline{Gv_{2xx}} = \left[1,0 + \varphi \left(1 - \frac{1 - \psi^2}{\varphi^2} \right) \cdot \frac{tg\beta_{2\text{эф}}}{tg\alpha_{1\text{эф}}} - \frac{1}{2} tg^2 \beta_{2\text{эф}} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)_{\text{ном}} \right]^{-1} - 0,07 \cdot \left(\frac{tg\beta_{2\text{эф}}}{tg\alpha_{1\text{эф}}} - 1 + 0,968 \cdot \sqrt{tg\gamma_m} \right) \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)_{\text{ном}}^{0,5}, \quad (3)$$

де φ , ψ – коефіцієнти швидкості для напрямних та робочих лопаток; $\alpha_{1\text{эф}}$, $\beta_{2\text{эф}}$ – кути виходу потоку з напрямного та робочого апаратів; γ_m – кут нахилу периферійного меридіонального обводу напрямного апарату; v_1 , v_2 – питомі об'єми пари перед та за робочим колесом на середньому діаметрі для номінального режиму.

На номінальному режимі роботи при зменшенні масової витрати в ступенях ЦНТ потік розглядається відповідно до "шаристої" моделі течії. Ця модель працює до моменту зародження та розвитку привтулкового відриву в радіальному та окружному напрямках та моменту приєднання границі привтулкового відриву до вихідних кромок робочих лопаток у кореневій області (у втулки).

Зниження витрати робочого тіла супроводжується появою окружної складової швидкості c_{2u} на виході з каналів РК, вплив якої на структуру течії за робочим колесом залежить від конструктивного оформлення виходу з робочого колеса (раптове розширення – вихід пари у великий об'єм, встановлений за РК: короткий або довгий осьовий дифузор, осерадіальний дифузор, коаксіальний циліндричний вихід довжиною більшою за розмір робочої лопатки). Наявність твердої обмежуючої поверхні за РК на периферії при обертанні потоку створює радіальний градієнт тиску, величина якого залежить від c_{2u} . У потоці, що обертається, формується радіальна нестійкість з наступним виходом на більший радіус.

При відсутності обмежуючої поверхні за РК потік, виходячи під кутом $\beta_{2\text{эф}}$ до площини кромок робочих лопаток, продовжує рух у напрямку вектору швидкості $\vec{c}_{2u}$ на кожному радіусі РК, формуючи лінійчасту поверхню, що описується для кожного струменя, який виходить з РК на радіусі r_i рівнянням параболоїда обертання. Це означає, що при витіканні потоку з РК у велике простір патрубка за відсутності на периферії твердої кільцевої поверхні привтулковий відрив виникає вже при режимах, пов'язаних з формуванням c_{2u} у привтулковій області, тобто з величиною кута $\beta_{2\text{к}}$ у кореневій ділянці РК. Деяку затримку приєднання привтулкового відриву до вихідних кромок лопаток викликає конічний обвід привтулковій області вхідного патрубка.

Враховуючи властивості водяної пари при низькому тиску, а саме різке збільшення питомого об'єму, останні ступені в турбінах виконуються з максимальною віялістю, яка досягає значення $l/D_{cp} \approx 0,40-0,405$. Тому фізичну модель руху пари в турбіні доцільно уявити, починаючи з останнього ступеня ЦНТ та вихідного патрубку, в якому розвивається (залежно від конструкції останнього ступеня, його геометричних характеристик, оформлення внутрішньої порожнини патрубка) привтулковий відрив. Як показало дослідження газодинамічних характеристик, виникнення привтулкового відриву в залежності від кута β_{2k} у кореня робочих лопаток відбувається при $Gv_{2z=0} = 0,8-0,05$ і може бути представлено залежністю [5]

$$\overline{Gv_{2z=0}} = 1,065 \cdot (1 - 0,369 \cdot \operatorname{tg} \beta_{2k}), \quad (4)$$

а розвиток відриву на вихідних кромках робочих лопаток як [6]

$$\overline{r_{oA}} = 1,0 - \frac{1 - \overline{r_{vt}}}{\overline{Gv_{2z=0}}} \cdot \overline{Gv_2}, \quad (5)$$

де $\overline{Gv_{2z=0}}$ – відносна об'ємна витрата відповідного режиму, при якому відрив потоку приєднується до вихідних кромок робочих лопаток у кореновому перерізі; $\overline{r_{vt}} = r_{vt}/R_k$ – відношення радіусу втулки у кореновому перерізі робочих лопаток до радіусу периферійного перерізу; r_{oA} – радіальне положення граничної точки відриву від вихідної кромки лопаток (осьова координата точки А на кромках $z = 0$).

Як випливає з рівняння (5) переміщення точки А по вихідних кромках у радіальному напрямку відбувається за лінійною закономірністю аж до зовнішнього радіусу при нульовій витраті робочого середовища.

Таким чином слід прийняти, що розвиток привтулкового відриву починається за останнім ступенем низького тиску (ступінь з найбільшою віялістю в турбіні) і в міру зменшення витрати пари (навантаження турбіни) послідовно зароджується і розвивається в радіальному та осьовому напрямку в проміжних ступенях при режимах нижче холостого ходу (маловитратних режимах).

Друга вихрова структура в ступені – вихор, що обертається в міжвінцевому зазорі в окружному напрямку, який зароджується при маловитратних режимах і не пов'язаний з привтулковим відривом. Він не проникає глибоко в канали, а в режимі вентилятора підсмоктує пару зворотної течії. При цьому в основному працюють вихідні кромки та косий зріз каналів.

На формування вихору впливає кут входу потоку в робочі лопатки при профільному перерізі периферійної

області лопаток, який розрахованому для роботи на номінальному режимі. Зниження режиму роботи ступеня супроводжується зменшенням швидкості потоку у периферійній зоні та негативним кутом атаки при вході потоку у канали робочого колеса. На увігнутій поверхні профільної частини лопатки у разі зростання негативного кута атаки формується область відриву і, отже, зменшується конфузорність каналів.

Зворотна течія з вхідної частини каналів робочого колеса у міжвінцевий зазор може виникнути коли статичний тиск в ній перевищить повний тиск потоку, що виходить з каналів напрямного апарату (НА). До появи оберткового вихору повний тиск p_1^* за НА є постійною величиною по довжині лопатки.

Розподіл параметрів за радіусом підпорядковується рівнянню радіальної рівноваги

$$\frac{dp_1}{dr} = \rho \cdot \frac{c_{1u}^2}{r} \quad (6)$$

і статичний тиск у потоці перед РК (у межвенцевому зазорі) змінюватиметься за довжиною лопатки на величину

$$\Delta p_1 = \int_{r_k}^R \rho \cdot \frac{c_{1u}^2}{r} \cdot dr, \quad (7)$$

де ρ – щільність пари у міжвенцевому зазорі; c_{1u} – окружна складова абсолютної швидкості за НА.

У міжлопаткових каналах при ударному вході в РК збільшення статичного тиску можна виразити як

$$\Delta p_2 = \varphi \cdot \int_{r_k}^R \rho \cdot \frac{\Delta c_{1u}^2}{r} \cdot dr, \quad (8)$$

де $\Delta c_{1u} = u - u_p$ – збільшення окружної швидкості внаслідок удару; u – окружна швидкість режиму, що розглядається, при ударному вході потоку в канали РК; u_p – розрахункова окружна швидкість при безударному вході на номінальному режимі; φ – коефіцієнт пом'якшення удару ($\varphi < 1,0$).

Також підвищення статичного тиску відбувається за рахунок різкої зміни напрямку руху в каналі при зміні режиму

$$\Delta p_2 = (\Delta w_{1u} \cdot w_{1up}) \cdot \rho, \quad (9)$$

де $\Delta w_{1u} = w_{1u} - w_{1up}$; w_{1u} – відносна швидкість входу потоку для режиму зародження вихору, рівна $w_{1u} = c_{1u} - u$; $w_{1up} = c_{1up} - u$ – відносна швидкість на вході у РК для розрахункового режиму.

Для ступенів парових турбін складова Δp_2 для каналів РК дорівнює

$$\Delta p_2 = (c_{1u} - c_{1uR}) \cdot w_{1up} \cdot \rho \quad (10)$$

та залежить від кута β_{1p} для периферійного перерізу робочих лопаток, їх окружної швидкості у периферійному перерізі та негативного кута атаки, тобто. режим зародження обертового вихору визначається геометрією лопаткового апарату ступеня. За умови постійної повної енергії у міжвінцевому зазорі $p_1^* = \text{const}$ (кінцеві втрати в НА не враховуються) умова зародження вихору може бути представлена (при заданих параметрах робочого середовища в середньому перерізі) як

$$p_{cp} + \int_{r_{cp}}^R \rho \cdot \frac{c_{1u}}{r} \cdot dr + \rho (\Delta w_{1u} \cdot w_{1up}) = p_{cp} + \rho \frac{c_1^2}{2} = p_1^*, \quad (11)$$

яке вирішується для ступеня при його заданій геометрії (закон закрутки кутів НА, величина кута β_{1R} у периферійному перерізі та розподіл щільності ρ у міжвінцевому зазорі ступеня). При розвитку обертового вихору в міжвінцевому зазорі ця умова рівноваги порушується, вихід потоку з каналів НА перекривається зворотним перебігом вихору, що виходить у зазор з великою окружною складовою швидкості c_{1u} (осьова складова швидкості вихору при його виході з каналів РК негативна в периферійній області зазору та позитивна при повороті зворотного потоку на границі з основним потоком, що виходить із каналів НА).

Розподіл статичного тиску в радіальному зазорі необandaженого РК при роботі ступеня на різних режимах, що зменшуються, при постійній витраті (потужність зменшується за рахунок зниженням спрацьованого ступенем теплоперепаду) представлено в [7].

З рис. 1 видно як статичний тиск розподіляється вздовж каналу РК та по кроку між НА. Дослідження проведено на ступені з відношенням $l/D_{cp} = 0,205$ та циліндричними обводами проточної частини. НА виконано з кутами виходу потоку $\alpha_{1ef} = 16^\circ 23' = \text{const}$, ступінь реактивності на середньому діаметрі 0,3. На режимі 3 ($\bar{N} = N/N_{ном} = 0,10$) у вхідній частині каналу спостерігається постійний за довжиною статичний тиск, тобто. витікання потоку з каналу РК ще відсутнє, а тиск вздовж кроку каналу на виході з НА відповідає формі при номінальному режимі.

Для режиму 4 ($\bar{N} = -0,365$) у центральній частині каналу спостерігається збільшення тиску потоку з РК, спрямованого радіально. 4-й від входу дренаж фіксує тиск загальмованого потоку, а розподіл тиску відповідає руху потоку як у напрямку міжвінцевого зазору, так і виходу з РК. Цей процес посилюється при зниженні режиму аж до нульової витрати. Режим 6 ($G=0$, $\bar{N} = 1,70$) показав максимальний тиск загальмованого потоку в центрі каналу та інтенсифікацію його витікання у міжвінцевий зазор і за РК. При цьому швидкість руху потоку в радіальному зазорі в напрямку міжвінцевого зазору на 10,5 % вище швидкості руху за РК. Робоче колесо на безвитратному режимі споживає потужність на 70 % більше, ніж виробляє на номінальному режимі.

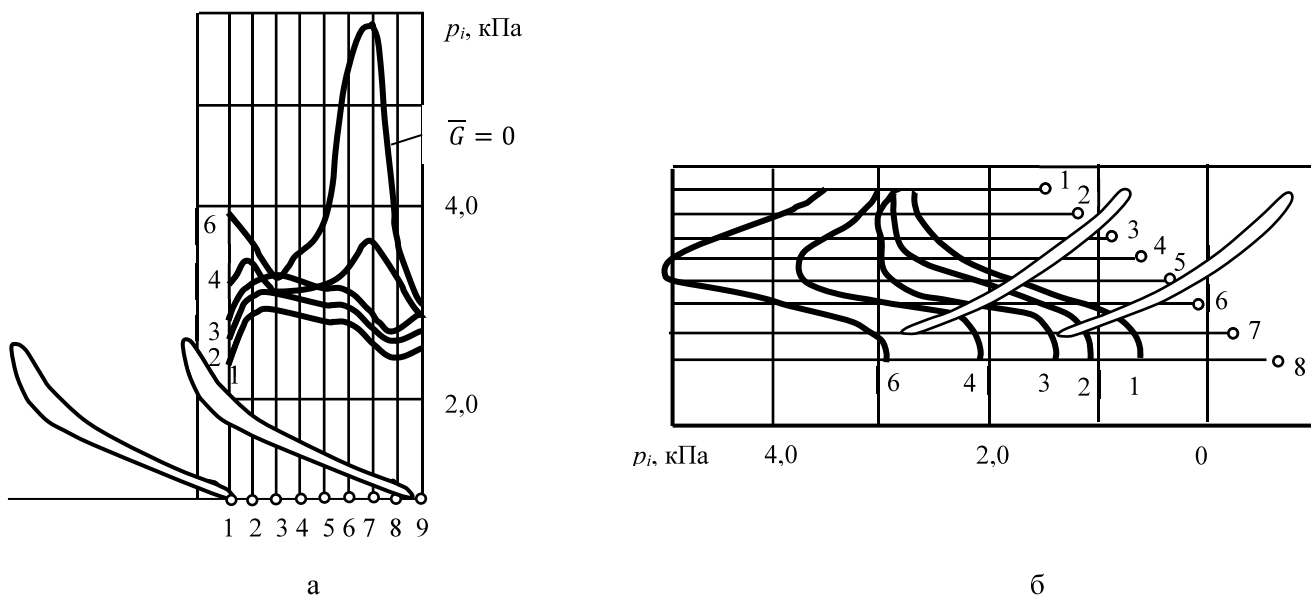


Рис. 1. Розподіл статичного тиску на зрізі соплового апарату (а) та в радіальному зазорі над робочим колесом (б) [7]

Розвиток режимних характеристик обертowego вихору після його зародження і надходження робочого середовища в міжвінцевий зазор в його периферійній області проаналізовано на основі дослідження, виконаного Л. М. Бистрицьким [8]. Досліджено ступінь з циліндричними меридіональними обводами, напрямний апарат якого виконано при відношенні $t/b = \text{const} = 0,70$ та за законом закрутки кутів виходу $\alpha_{\text{вф}} = \text{const} = 21^\circ$, відношенням $D_{\text{кр}}/l = 2,57$ ($l/D_{\text{кр}} = 0,389$). РК має змінний по довжині профіль перерізів, що створює змінний по радіусу міжвінцевий зазор, в якому при зменшенні $\overline{Gv}_2$ розвивається обертовой вихор.

На рис. 2 наведено результати траверсування потоку в міжвінцевому зазорі при розвитку обертowego вихору. Границею вихору в міжвінцевому зазорі прийнято значення $G = 1,0$ для основного потоку, що надходить у ступінь на вході НА.

Режим роботи ступеня характеризується відносною об'ємною витратою $\overline{Gv}_2$. Аналіз зміни складових швидкості при $\overline{Gv}_2 = 0,504$ показав, що зміна $\overline{c}_{1u} = c_{1u}/u_R$ (де u_R – окружна швидкість периферійного перерізу РК) ще відповідає моделі "шарової" течії, тобто c_{1u} збільшується від периферійної області течії до кореневої, а у периферійній зоні ($\bar{l} = 0,9-1,0$) c_{1u} близько до постійного значення і дорівнює $c_{1u}^{\text{пер}} = (0,32-0,33) \cdot u_R$. В привтулковій області ($\bar{l} = 0-0,06$) $c_{1u}^{\text{кор}} \approx 0,5 u_R$ та зменшується у кореневому перерізі до $c_{1u} \approx 0,41$, що відповідає величині втрат енергії у цій області.

Характерною при розвитку вихору (після формування зворотної течії, спрямованого від периферії зазору до втулки) є поява лінійної ділянки складової c_{1u} , що

зменшується під час переходу течії на менший радіус. Після проходження c_{1u} граничної лінії $G = 1,0$ між основним потоком і маси робочого середовища, яка надійшла з каналів РК в обертовой вихор, складова c_{1u} змінюється за радіусом, що відповідає її розподілу при "шарової" моделі течії (на відміну від режимів 2 і 3). Найбільш чітко це спостерігається при мінімальній дослідженій витраті ($\overline{Gv}_2 = 0,04$, режим 4). Основний потік при цьому займає привтулочную область на протязі $\bar{l} = 0-0,14$, а величина c_{1u} основного потоку близька до постійної. Осьова складова швидкості в області від $\bar{l} = 0,75$ до $0,4$ дорівнює нулю і слабо збільшується до $\bar{l} = 0,14$, що пов'язано, в основному, зі зміною радіусу міжвінцевого зазору. Радіальна компонента швидкості відповідає поведінці зворотної течії у вихорі, набуваючи негативної величини при його повороті під впливом вихідних кромок НА. Потік у вихорі має зворотну течію при великій величині c_{1u} на периферії: при $\overline{Gv}_2 = 0,254$ (режим 3) вона дорівнює $c_{1u} = 0,85 u_R$, при $\overline{Gv}_2 = 0,04$ (режим 4) – $c_{1u} = (0,71-0,73) u_R$ і близька до постійного значення на ділянці $\bar{l} = 0,8-1,0$.

Таким чином слід відмітити, що при маловитратних режимах розвиток вихору, що обертається у міжвінцевому зазорі перекриває надходження основного потоку пари через канали НА, відтісняючи його у привтулкову зону міжвінцевого зазору, а розвиток привтулкового відриву перекриває йому вихід у кореневій області робочих лопаток, направляючи основний потік у радіальному напрямку.

Складність використання рівняння (11) потребує проведення оцінки визначення режиму зароджен-

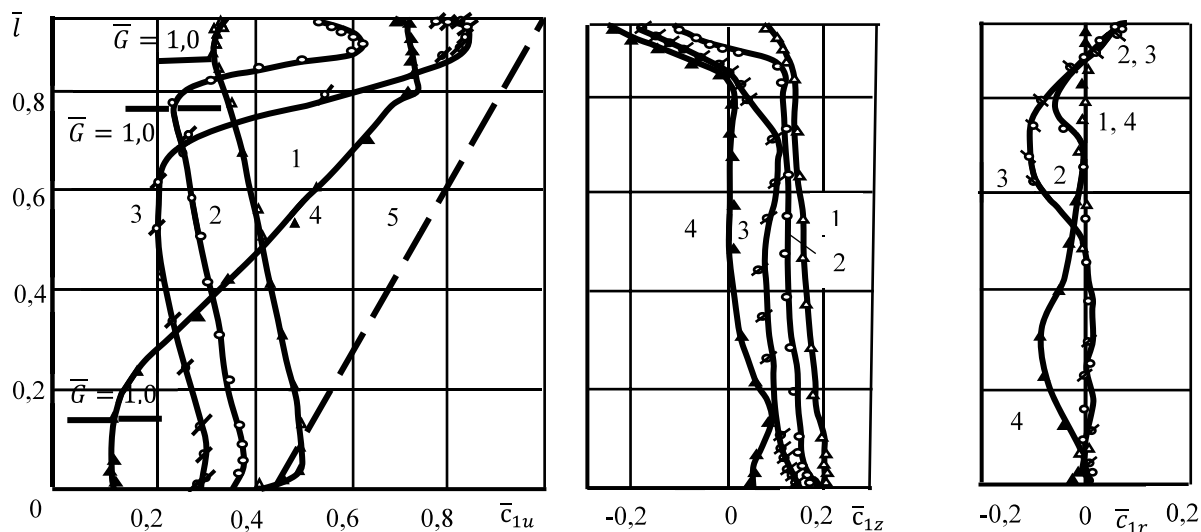


Рис. 2. Розподіл складових швидкості c_1 та u у міжвінцевому зазорі по довжині робочої лопатки для маловитратних режимів: 1 – $\overline{Gv}_2 = 0,504$; 2 – $\overline{Gv}_2 = 0,367$; 3 – $\overline{Gv}_2 = 0,254$; 4 – $\overline{Gv}_2 = 0,004$; 5 – $\bar{u}$

ня обертового вихору результатами газодинамічного дослідження ряду ступенів. Для групи ступенів, що мають закрутку кута $\alpha_{1\text{эф}} = \text{const}$ і змінний кут β_{1R} авторами була отримана залежність

$$\overline{Gv_{2R}^{\text{вихор}}} = \frac{1 + \sin \beta_{1R}}{2} \cdot \overline{Gv_{2\text{xx}}^{\text{вихор}}} \quad (12)$$

для режиму появи вихору і

$$\overline{r_{\text{нт}}} = \overline{r_{\text{вт}}} + (1 - \overline{r_{\text{вт}}}) \cdot \frac{\overline{Gv_{2\text{вихор}}}}{\overline{Gv_{2R}^{\text{вихор}}}} \quad (13)$$

де $\overline{r_{\text{нт}}}$ нижня границя вихору, що відповідає положенню лінії $\overline{G} = 1,0$.

Наявність обертового вихору та його перемішування з основним потоком усередині каналів РК супроводжується значною турбулізацією потоку, посиленою мікроевихорами, що формуються при обтіканні вихідних кромek лопаток НА потоком зі значною окружною швидкістю c_{1u} зворотної течії. Така турбулізація потоку обертового вихору призводить до великих незворотних втрат механічної енергії рухомого потоку, які перетворюються на тепло, нагріваючи масу робочої середовища вихору та основного потоку усереднені каналів робочої лопатки.

Це підтверджується численними дослідженнями теплового стану проточної частини парових турбін в умовах експлуатації [9-11]. Найбільш представницькими автори визнали результати, що отримані [11] шляхом вимірювання температури пари на обертових робочих лопатках турбіни Т-250/300-240 та Т-100/120-130. На рис. 3 наведено розподіл температури на вихідних кромках робочих лопаток останнього ступеня турбіни Т-250/300-240, яка має робочу лопатку довжиною $l = 940$ мм при середньому діаметрі $D_{\text{ср}} = 2390$ мм. Дослідження проведено на натурному стенді при ро-

бочих параметрах ЦНТ: тиск у нижньому відборі 59-147 кПа, тиск у конденсаторі 9,8-29,4 кПа, що перебиває робочий діапазон 3,5-12 кПа. Витрата пари змінювалась від 20,8 кг/с до 54,2 кг/с.

Як впливає з аналізу результатів, наведених на рисунку, розподіл температури пари на виході з РК при низькому тиску у конденсаторі (графік 1) відповідає моделі складної течії робочого середовища. Підвищення тиску в конденсаторі при постійній витраті призводить до перерозподілу температури по довжині вихідних кромek (графік 2), яке відповідає розвитку обертового вихору та збільшенню втрат енергії. Форма профілю температури при переході від вологого стану до перегрітого має вигляд характерний для руху основного потоку у середині каналів між робочими лопатками при двох незалежних переміжних потоках з різною температурою (графік 3). На графіках $t_2(\bar{l})$ можна виділити характерні точки: 1 – точка максимального значення t^{max} потоку; точка 2 – мінімальне значення t^{min} , яка близька до температури основного потоку у привтулковій області; точка 3 – температура, що дорівнює або декілька відрізняється від температури у точці 1; точка 4 – температура зворотної течії привтулкового відриву з урахуванням підсосу більш холодної пари з конденсатора (графік 4).

Така зміна температури швидко нівелюється перемішуванням потоку, який проходить над привтулковим відривом. Границею зміни профілю епюри $t_2(\bar{l})$ може бути прийнято витрату пари через ЦНТ у конденсатор p_k , яка на прикладі досліджень теплофікаційної турбіни Т-250/300-240 за аналізом, що виконано авторами, має вигляд:

– для діапазону зміни p_k від 2,5 кПа до 6,0 кПа

$$G_{\text{ЦНТ}}^{\text{рп}} = 2,769 \cdot t_{\text{нв}} - 133,0; \quad (14)$$

– для діапазону p_k від 6 кПа до 18 кПа

$$G_{\text{ЦНТ}}^{\text{рп}} = 2,769 \cdot t_{\text{нв}} + 7,155 \cdot p_k - 175,9, \quad (15)$$

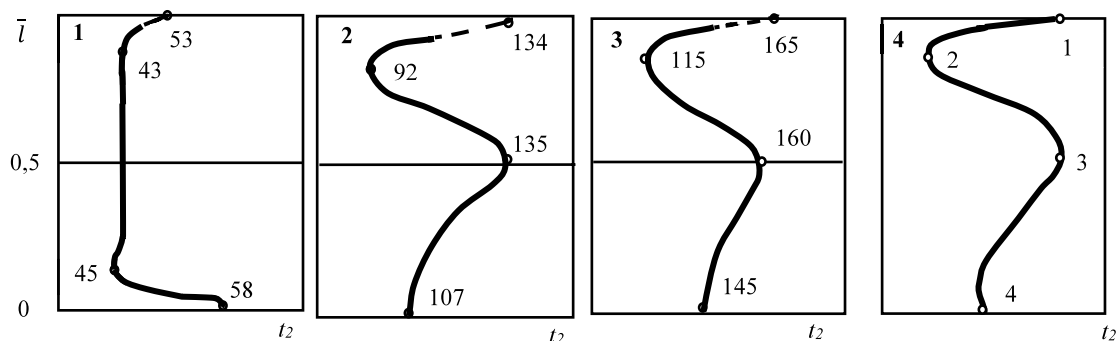


Рис. 3. Зміна температури пари на виході з робочого колеса останнього ступеня ЦНД на різних режимах роботи, °C: 1 – $G_{31} = 23,9$ кг/с; 2 – $G_{31} = 24,7$ кг/с; 3 – $G_{31} = 40,8$ кг/с

де $G_{\text{ЦНТ}}^{\text{гр}}$ – витрата пари на виході з робочого колеса, яка надійшла у два потоки ЦНТ турбіни та характеризує перехід стану пари від вологої до перегрітої, т/г; $t_{\text{нв}}$ – температура пари в нижньому теплофікаційному відборі, °C; $p_{\text{к}}$ – тиск у конденсаторі, кПа.

Аналіз температурного стану пари в проточній частині турбін різного типу показав, що найбільша різниця між $t_{\text{нв}}$ та t^{max} у точках 1 і 3 спостерігається при перехідному значенні витрати пари $G_{\text{ЦНТ}}^{\text{гр}}$ в ЦНД, яка обчислюється по рівнянням (14), (15). Зростання цієї різниці виникає за рахунок вентиляційних втрат при $G_{\text{ЦНД}} < G_{\text{ЦНД}}^{\text{гр}}$.

В продовж виконаного дослідження планується пошук механізму та конструктивна реалізація послаблення впливу на температурний стан обертового вихору і оцінка додаткових витрат енергії на роботу ступенів великої віялості.

Висновки

1. Виконано аналіз газодинамічної структури потоку та його температурного стану при маловитратних режимах роботи ступенів великої віялості та розроблено уточнену фізичну модель течії пари у ЦНТ турбіни великої потужності на маловитратних режимах.

2. Визначено умови виникнення та розвитку привтулкового відриву та обертового вихору у міжвінцевому зазорі.

3. Проаналізовано зв'язок температурного стану ступеня зі структурою потоку. Газодинамічний зв'язок привтулкового відриву та обертового вихору відсутній.

4. Основним генератором теплових втрат є обертовий вихор. Максимальний рівень температури пари знаходиться у периферійному перерізі міжлопаткових каналів робочого колеса, а потік з однаковою температурою пари виходить як в міжвінцевий зазор, так і за робоче колесо у периферійній області.

5. Фізична та розрахункова моделі роботи формуються спільно з вихідним патрубком та враховує односторонній вихід пари у конденсатор. При побудові моделі треба приймати до уваги вплив передостаннього ступеня (її привтулковий відрив) на напрямний апарат останнього ступеня.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Tajč L., Bednář L., Hoznedl M. Flow conditions in the last stage during idling operation and low output of 1000 MW. Proceedings of 18-th International Conference Engineering Mechanics. Svratka, Czech Republic, May 14–17, 2012. Paper No 31. P. 1353–1361.

2. Megerle B., Stephen T., McBean I. et al. Numerical and Experimental Investigation of the Aerodynamic Excitation of a Model Low-Pressure Steam Turbine Stage Operating Under Low Volume Flow. Jour. of Engineering for Gas Turbines and Power. 2013. Vol. 135. P. 012602-1–012602-7. doi: 10.1115/1.4007334.

3. Mambro A., Congil F., Galloni E. Influence of stage design parameters on ventilation power produced by steam turbine last stage blades during low load operation. Thermal Science and Engineering Progress. 2022, no. 28(6):101054. DOI:10.1016/j.tsep.2021.101054.

4. Arakelyan E. K. et al. Features of steam turbine stages operation in low-flow modes when modeling hydrodynamic processes in the turbine in steamless and motor modes. Procedia Computer Science: the 10th International Symposium on Frontiers in Ambient and Mobile Systems (FAMS 2020) April 6–9, 2020, Warsaw, Poland. 2020. No 170. P. 935–940.

5. Shubenko, O., Alyokhina, S., Goloshchapov, V., Kotulska, O., & Senetska, D. Separation near the bushing of the flow in the outlet nozzle of the steam turbine at the low-flow rate modes. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2023. Vol 2, is. 2. P. 53–63. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.05>

6. Шубенко А.Л., Козлоков А. Ю., Голощанов В. Н. и др. Отрывные течения в ступенях цилиндра низкого давления паровых турбин при малорасходных режимах. Харьков: Планета-Прінт, 2020. 322 с.

7. Емін О. М., Лисенко Г. М. Дослідження характеристик реактивного турбінного ступеня в області компресорних режимів. Теплоенергетика. 1972. № 3. С. 61-64.

8. Быстрицкий Л. Н. Исследование турбинных ступеней с малым отношением $D_{\text{ср}}/l$ в диапазоне режимов работы от номинального до холостого хода: дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1975. – 203 с

9. Mambro A., Galloni E., Congiu F. Assessment of the heat transfer coefficient for the prediction of ventilation power in steam turbine last stages operating at low load. Thermal Science and Engineering Progress. 2020 Vol. 18, 100542. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100542/>

10. Шубенко А.Л., Голощанов В.Н., Бабенко О.А. Температурное состояние последних ступеней цилиндров низкого давления теплофикационных турбин на малорасходных режимах. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 12 (1288). С. 11-16
doi: 10.20998/2078-774X.2018.12.02

11. Uryev E. V. et al. Investigation of the thermal state of low-pressure part of T-250/300-240 turbine. Heat Power Engineering. 1985. No. 3. P. 61–63.

REFINED PHYSICAL MODEL OF STEAM FLOW IN THE LOW-PRESSURE PART OF A HIGH-POWER TURBINE IN LOW-FLOW RATE MODES

Shubenko O. L.¹, Goloschapov V.M.², Kotulska O.V.³,
Paramonova T.M.⁴

Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering
Problems of NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

¹Corresponding member of the National Academy of
Sciences of Ukraine, professor, orcid.org/0000-0001-9014-1357;

e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua

²PhD (Engin.), orcid.org/0000-0002-2075-5326; e-mail:
goloshchapov36@gmail.com

³Leading Engineer, orcid.org/0000-0002-5902-9313;
e-mail: kot2017ov@gmail.com

⁴Leading Engineer orcid.org/0000-0002-0067-801X;
e-mail: paramonova@ipmach.kharkov.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.11>

Analytical methods for calculating the performance of the turbine are operational as long as the “layered” character of the steam flow is preserved in the flow part. However, as shown by experimental studies, the character of the flow changes significantly in low-flow rate modes. In these cases, existing methods of three-dimensional calculations require reliable formation of boundary conditions. The purpose of this study is to analyze the characteristics of low-pressure cylinder (LPC) stages operating in high-power stationary steam turbines, and to form physical models of the flow of the working medium (steam) in such stages at low-flow rate modes, taking into account their location in the flow part. It is advisable to imagine the physical model of the movement of steam in the turbine, starting from the last stage of the LPC and the outlet nozzle, in which separation of flow from the hub the develops. Its formation occurs when the relative volumetric flow rate decreases, starting with $\overline{Gv}_2 = 0.8$, depending on the angle $\beta_{2\kappa}$ at the root of the working blades. A decrease in the operating mode of the LPC turbine stages is also accompanied by a decrease the flow speed in the peripheral zone and a negative angle of attack at the flow entry into the channels of the impeller. On the concave surface of the profile part of the blade, a

separation area is formed, which rotates in the rim clearance in the circumferential direction. Reverse flow from the inlet part of the channels of the impeller into the rim clearance occur when the static pressure in it exceeds the full pressure of the flow coming out of the channels of the guide apparatus. Turbulization of the flow of the rotating vortex leads to large irreversible losses of the mechanical energy of the moving flow, which are converted into heat, heating the mass of the working medium of the vortex and the main flow averaged through the channels of the working blade. Thus, the analysis of the gas-dynamic structure of the flow and its thermal state made it possible to clarify the physical model of the steam flow in the LPC at low-flow rate modes.

1. Tajč L., Bednář L., Hoznedl M. Flow conditions in the last stage during idling operation and low output of 1000 MW. Proceedings of 18-th International Conference Engineering Mechanics. Svratka, Czech Republic, May 14–17, 2012. Paper No 31. P. 1353–1361.

2. Megerle B., Stephen T., McBean I. et al. Numerical and Experimental Investigation of the Aerodynamic Excitation of a Model Low-Pressure Steam Turbine Stage Operating Under Low Volume Flow. Jour. of Engineering for Gas Turbines and Power. 2013. Vol. 135. P. 012602-1–012602-7. doi: 10.1115/1.4007334.

3. Mambro A., Congil F., Galloni E. Influence of stage design parameters on ventilation power produced by steam turbine last stage blades during low load operation. Thermal Science and Engineering Progress. 2022, no. 28(6):101054. DOI:10.1016/j.tsep.2021.101054.

4. Arakelyan E. K. et al. Features of steam turbine stages operation in low-flow modes when modeling hydrodynamic processes in the turbine in steamless and motor modes. Procedia Computer Science: the 10th International Symposium on Frontiers in Ambient and Mobile Systems (FAMS 2020) April 6–9, 2020, Warsaw, Poland. 2020. No 170. P. 935–940.

5. Shubenko, O., Alyokhina, S., Goloshchapov, V., Kotulska, O., & Senetska, D. Separation near the bushing of the flow in the outlet nozzle of the steam turbine at the low-flow rate modes. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2023. Vol 2, is. 2. P. 53–63. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.05>

6. Shubenko, A.L., Kozlov A.Yu., Goloshchapov, V.N. et al. Separated flows in low-pressure cylinder stages of steam turbines under low-flow regimes. Kharkov: Planeta-Print, 2020. 322 s.

7. Emin O.M., Lysenko G.M. Research of the characteristics of jet turbine stage in the field of compressor modes. Teploenergetika. 1972. № 3. P. 61–64.

8. *Bystritsky L.N.* Investigation of turbine stages with a small ratio D_{cp}/l in the range of operating modes from nominal to idle: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Kharkov, 1975. – 203 s.

9. *Mambro A., Galloni E., Congiu F.* Assessment of the heat transfer coefficient for the prediction of ventilation power in steam turbine last stages operating at low load. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020 Vol. 18, 100542. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100542/>

10. *Shubenko A.L., Goloshchapov V.N., Babenko O.A.* Temperaturnoe sostoyanie poslednih stupeney tselindrov nizkogo davleniya teplofikatsionnykh turbin na maloraskhodnykh rezhimakh. *Vestnik Natsionalnogo tekhnichnogo universiteta "KhPI"*. Seriya: Energetichni nf teplofizichni protsessy i ustatkuvannya. 2018. № 12(1288). P. 11-16. doi: 10.20998/2078-774X.2018.12.02

11. *Uryev E.V.* et al. Investigation of the thermal state of low-pressure part of T-250/300-240 turbine. *Heat Power Engineering*. 1985. No. 3. P. 61–63.

Отримано 15.11.2023

Received 15.11.2023

Прийнято до друку 15.02.2024

Accepted for publication 15.02.2024

УДК 662.73

ПЕРЕРобКА ТА УТИЛІЗАЦІЯ ОСАДІВ ВІД ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ТА ПОБУТОВИХ СТИЧНИХ ВОД

Петрова Ж.О.¹, докт. техн. наук, Бадеха А.В.², аспірант¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, bergelzhanna@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-7385-8495>²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, молодший науковий співробітник, badekha@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3903-3766><https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.12>

У статті наведено експериментальні дані щодо отримання товарних продуктів з відходів очищення дренажних стічних вод звалищ сміття, а саме режимів технології переведення в газову фазу азоту, отримання оксиду кальцію з осади. Проаналізовано результати впливу внесеного в ґрунт осаду на проростання насіння та приріст зеленої біомаси.

The article provides experimental data on the production of commodity products from waste treatment of drainage waste water of garbage dumps, namely the modes of technology for transferring nitrogen to the gas phase, obtaining calcium oxide from sediments. The results of the influence of sediment introduced into the soil on the germination of seeds and the growth of green biomass are analyzed.

Бібл. 9, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: інфільтрат звалища, добрива, осад, оксид кальцію.

Т – температура, °С;

 $V_{\text{повітря}}$ – швидкість повітря, дм³/хв;

Е – ефективність очищення, %;

 C_{NH_3} – концентрація аміаку, мг/дм³;**Скорочення:**

ДСВ – дренажні стічні води;

СВ – стічні води;

Вступ. Головним завданням біотехнології води на теперішній час є підготовка питної води, а перший і найголовніший етап у цьому складному процесі – очищення забруднених вод.

Маємо чітко собі усвідомити і постійно пам'ятати, що вода на Землі не є корисною копалиною одноразового використання, як, наприклад, нафта. Вода – це вічно відновлювальний у Біосфері продукт не просто багаторазового, а нескінченного споживання. Вона постійно використовується й водночас забруднюється геть усіма суцями на Землі організмами, проте безупинно відновлюється, очищується тими самими організмами та іншими – хімічними й фізичними – факторами планетарного та космічного походження [1].

Одна із наймасовіших технологій очищення стічних вод в Україні передбачає відстоювання стічних вод з утворенням осаду, який в подальшому обробляється метановим зброджуванням для знешкодження патогенних мікроорганізмів, розкладання жироподібних речовин тощо. Відділена у відстійниках вода направляється до аеротенків, де контактує з активним мулом. Регенерований активний мул подається до контактних резервуарів

зі споруд регенерації, як правило таких самих аеротенків, як і контактні споруди. Після змішування з активним мулом, під час чого мул абсорбує завислі речовини стічних вод, суміш розділяється у вторинних відстійниках, де утворюється очищена стічна вода та вторинний осад. Останній розділяється на два потоки – найбільша частина направляється на регенерацію і потім змішується зі стічними водами, а менша становить надлишковий активний мул і є основною частиною осади, які утворюються на станціях очищення. Через великий їх об'єм мул обробляється шляхом аеробної стабілізації і направляється на мулові майданчики, що виводить з обороту значні площі земель та створює екологічну небезпеку як навколишньому середовищу та і самій людині [2].

В основу технології очищення дренажних стічних вод (ДСВ) звалищ побутових відходів покладено реагентний та баромембранний методи очищення [3].

З напрямів переробки та утилізації осади від очищення промислових та побутових стічних вод привертає увагу використання їх як сировини для отримання товарних продуктів. У розробленій технологічній

схемі передбачено відгонку аміаку повітрям у лужному середовищі. Метод відомий і вважається дешевим. Застосовується він при концентрації аміаку у воді понад 100 мг/дм^3 [4]. Експериментально нами встановлено, що концентрація амонійних сполук у ДСВ досягає 1800 мг/дм^3 , тому використання аміаку газової фази як сировини для отримання азотних добрив є привабливим напрямом. Разом з тим досвід використання вказаного методу для очищення ДСВ відсутній. Це зумовило потребу проведення досліджень щодо впливу температурного режиму, швидкості подачі повітря на ефективність переходу азотних сполук ДСВ у газову фазу. Ще одне завдання цієї роботи – способи утилізації осаду, який утворюється на реагентній стадії очищення ДСВ реагентами. Слід відмітити, що його компонентами є ряд мікроелементів, органічні та мінеральні речовини, тому порушується питання доцільності використання його як орґано-мінерального добрива. Разом з тим, з огляду на високі концентрації солей у ДСВ (до 8 г/дм^3) та отриманих осадах, виникає сумнів у доцільності внесення їх у ґрунт, оскільки це може призвести до його засолення. Відомо, що на так званих солончаках можуть рости лише деякі види рослин, переважно хвощ. Та все ж таке припущення потребує експериментальної перевірки. Крім того, використання осаду від очищення ДСВ звалищ як добрив, навіть для підживлення декоративних рослин, є сумнівним із санітарно-гігієнічної точки зору, тому що до його складу входять токсичні речовини. Альтернативою може бути отримання з осаду оксиду кальцію

високотермічним способом, адже концентрація сполук кальцію в його складі є високою, оскільки в технології очищення ДСВ передбачена обробка вапняним молоком. Слід зазначити, що термічна обробка осаду дозволить знешкодити токсичні органічні речовини та отримати такі товарні продукти, як CaO та CO_2 , що можуть використовуватись повторно при очищенні ДСВ.

Експериментальні дослідження та їх аналіз. ДСВ, на відміну від природної і стічної води (СВ), є висококонцентрованим водним розчином як за мінеральними, так і за органічними речовинами, що ускладнює технологію його очищення. Так, природна чи стічна вода може бути високомінералізованою з низьким вмістом органічних речовин (шахтна, морська) чи, навпаки, слабомінералізованою зі значним вмістом органічних речовин, наприклад, стоки комплексів з відгодівлі тварин, комбінатів з переробки м'яса, риби. Досвід з демінералізації першої та методи деструкції органічних речовин останньої були основою для розробки технологічної схеми очищення ДСВ звалищ твердих побутових відходів (рис. 1). ДСВ надходить у резервуар (1) для усереднення. На воді з резервуару (1) готували розчин вапняного молока у змішувачі (2). Готовий розчин Ca(OH)_2 зливали в резервуар (3), з якого помпою (8) це вапняне молоко та ДСВ з (1) подавали у відстійник (4), контролюючи швидкість нагнітання вапняного молока та ДСВ ротаметрами (9). Після 30 хв контакту та відстоювання освітлену воду подавали на дегазацію у відстійник (5), а потім у модуль баромембранного

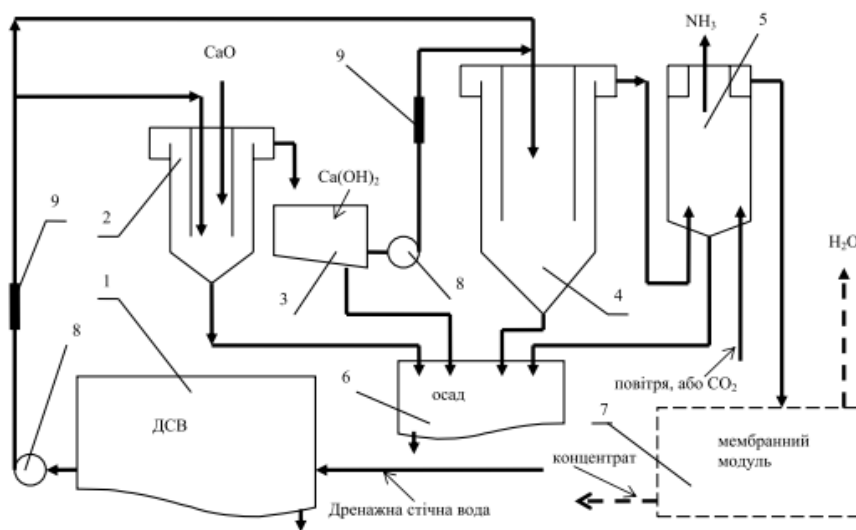


Рис. 1. Принципова технологічна схема стадії очищення реагентами ДСВ звалища:

1 – резервуар для ДСВ; 2 – вертикальний змішувач; 3 – резервуар для вапняного молока; 4 – вертикальний відстійник; 5 – вертикальний відстійник для декарбонізації води та видування аміаку; 6 – резервуар для збору осаду; 7 – модуль баромембранного очищення ДСВ; 8 – помпа; 9 – ротаметр

розділення (7). У відстійнику (5) СВ підлягала барботуванню повітрям або CO_2 . Для підвищення ефективності процесу відгонки аміаку в газову фазу СВ подавали на дегазацію в (5) через форсунку. Осад від стадії очищення ДСВ реагентами збирали в резервуар (6). Цей осад використовували в експериментальних дослідженнях із визначення його впливу на розвиток рослин та в дослідях з отримання CaO та CO_2 методом термообробки.

Як зазначено раніше, ДСВ має високий вміст мінеральних речовин – 6–8 г/дм³ у сухому залишку (визначено згідно з ГОСТ 18164), органічних речовин – 4500–5030 мг O_2 /дм³ (за ХСК), амонійного азоту – до 1800 мг/дм³ (визначено фотометричним методом). У зв'язку з такою високою його концентрацією нами проведено дослідження з використання NH_4^+ як сировини для отримання азотних добрив під сільськогосподарські культури.

Було досліджено залежність ефективності переходу аміаку в газову фазу від часу насичення ДСВ повітрям. Експеримент проведено за різних температурних режимів, результати представлено на рис. 2 та в таблиці 1.

Як свідчать наведені дані, зміни в ефективності переходу аміаку в газову фазу від часу нагнітання повітря спостерігаються в інтервалі 5–45 хв (рис. 2). Контакт СВ з масою повітря, що нагнітається протягом 40 хв, є достатнім для повноти переходу йонів NH_4^+ в молекули NH_3 .

На підставі результатів (див. табл. 1) можна дійти висновку, що інтенсифікація процесу виділення аміаку в газову фазу може бути забезпечена підвищенням температури ДСВ або прискоренням швидкості подачі повітря в процесі аерації з 3 до 7,5 дм³/хв. Крім того, підвищенням температури ДСВ до 45 °С або зміною швидкості нагнітання повітря (тобто подачі більшого об'єму в одиницю часу) кожним прийомом окремо забезпечується зниження концентрації NH_3 в очищеній воді до 19–25 мг/дм³.

Ефективність переходу аміаку в газову фазу при швидкості подачі повітря 7,5 дм³/хв досягає 80–85 % уже за 20 хв контакту з СВ (у порівнянні з необхідним часом 40 хв при швидкості нагнітання його 3,0 дм³/хв).

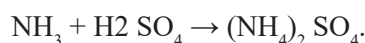
Таблиця 1. Залежність ефективності відгонки аміаку від температури, об'єму доданого у воду повітря та рН ДСВ

№	T, °C	$V_{\text{повітря}}$, дм ³ /хв	C NH_3 , мг/дм ³	pH ДСВ	C NH_3 у ДСВ, мг/дм ³	pH ДСВ ₀	E, %
1	20	3	113,1	11,0	85,0	10,2	24,8
2	20	3	111,0	12,0	58,8	9,9	36,8
3	45	3	128,0	11,1	25,0	9,8	80,4
4	20	7,5	123,8	10,1	19,0	9,6	85,6

Примітка. Час барботування ДСВ повітрям – 20 хв.

Згідно з даними таблиці 1, чим вищий водневий показник ДСВ, тим краща ефективність відгонки аміаку при ідентичності інших параметрів процесу.

З метою утилізації отриманого аміаку в технологічній схемі необхідно передбачити резервуар із сірчаною кислотою для вловлювання повітря, насиченого виділеними з води сполуками азоту, та отримання азотних добрив за реакцією:



У такий спосіб азотні сполуки, якими забруднена ДСВ, можна утилізувати (як сировину) у вигляді азотного добрива, а технологія, в якій використовується CaO для обробки ДСВ, стає економічно вигідною. Так, оксид кальцію застосовується одночасно як для створення умов ефективного перебігу процесу коагуляції електролітів, що гідролізуються в лужному середовищі (у відстійнику (4)), так і для переходу азотних сполук в аміак, тобто в газову фазу (у відстійнику (5)). У подальшому немає потреби кондиціонування осадів на стадії їх зневоднення та знезараження. Як відомо, CaO широко використовують для обробки осадів водоочищення з метою зниження їх питомого опору фільтруванню. Осад ДСВ

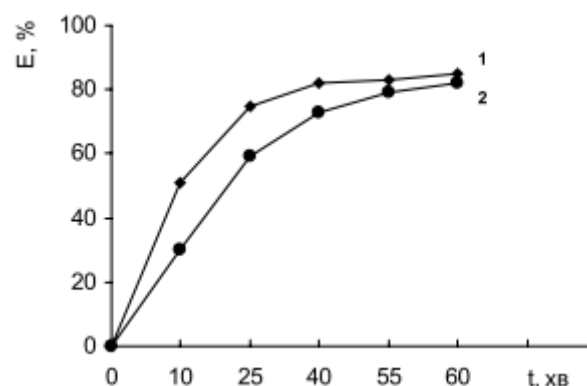


Рис. 2. Залежність ефективності очищення води від аміаку при різних термінах барботування її повітрям та температурах:
1 – $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

(6) добре зневоднюється під дією гравітації, оскільки є високолузним, його вологість становить приблизно 65 %. Крім того, осади-коагуляти від стадії очищення ДСВ реагентами можна розглядати як сировину для отримання CaO та CO_2 з метою повторного їх використання [3]. Незважаючи на те, що до складу осаду входить цілий ряд екологічно небезпечних інгредієнтів, інколи його розглядають як потенційне органо-мінеральне добриво, наприклад, для вирощування декоративних рослин. Адже ДСВ включають інгредієнти, необхідні для розвитку рослин, зокрема калій (1100 мг/дм^3), магній (88 мг/дм^3) та органічні речовини.

Визначення впливу на розвиток рослин компонентів осаду або безпосереднього зрошення ґрунту ДСВ звалища проведено в лабораторних умовах. Так, отримані в технологічній лінії очищення ДСВ осади (6) є лужними, а, як відомо, внесення лужних реагентів потребують кислі ґрунти, особливо ті, на яких вирощують злакові культури [5]. Тому експерименти було проведено з використанням зерна пшениці. Враховуючи високу мінералізацію ДСВ звалища, досліді проведено також на посівах гарбузових рослин, оскільки вони різко реагують на засоленість ґрунтів. Результати щодо ефективності проростання зернових культур наведено на рис. 3, а щодо приросту зеленої маси – на рис. 4.

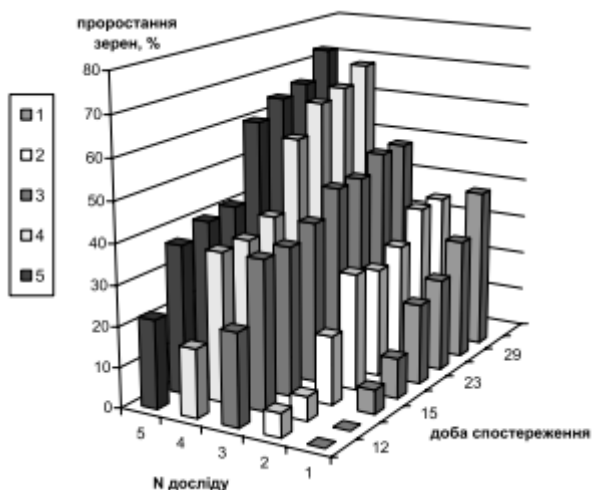


Рис. 3. Залежність ефективності проростання зернових від рН при зрошуванні ґрунту: водопровідною водою (3, 4, 5); дренажною стічною (1, 2) з рН 7 (1, 3) та з додаванням до води для зрошення CaO до досягнення нею рН 10 (2, 4); з внесенням лужного осаду в ґрунт (5). Контрольний варіант – полив водопровідною водою (3)

Відповідно до результатів дослідів, позитивний вплив на проростання зернових спостерігається в лужному середовищі незалежно від способу підвищення лужності ґрунту, що добре узгоджується з результатами, отриманими іншими авторами в аграрній галузі. Як при зрошенні злакових водопровідною водою з доведенням її рН до 10 (4), так і при внесенні лужного осаду від обробки ДСВ оксидом кальцію (5) процес проростання зерен був інтенсивнішим у порівнянні з контролем (3). Разом з тим компоненти ДСВ значно пригнічували проростання зернових як при рН 7 (1), так і при рН 10 (2). Можна відмітити, що і в цьому разі позитивний вплив лужного середовища є помітним (2). Також зазначимо, що при високому значенні рН дещо зменшується негативний вплив компонентів ДСВ (1). Результати спостереження за приростом зеленої маси рослин наведено на рис. 4.

У лужному середовищі стимулюється як процес проростання зерен (рис. 3, 4), так і в подальшому дещо зростає приріст зеленої маси рослин (рис. 4, 4) в порівнянні з контрольним дослідом (3). Разом з тим при зрошуванні ґрунту ДСВ значно уповільнювався не тільки процес проростання зерен, а й приріст зеленої маси (1, 2). На відміну від зрошення посіву ДСВ, водопровідна лужна вода (2) дещо інтенсифікує процеси проростання та приросту біомаси. Загалом, при використанні для зрошування ДСВ спостерігалось пригнічення росту рослин як у порівнянні зі зрошенням їх підлуженою водою з водопроводу, так і контрольним дослідом (рН 7). Таким чином, експерименталь-

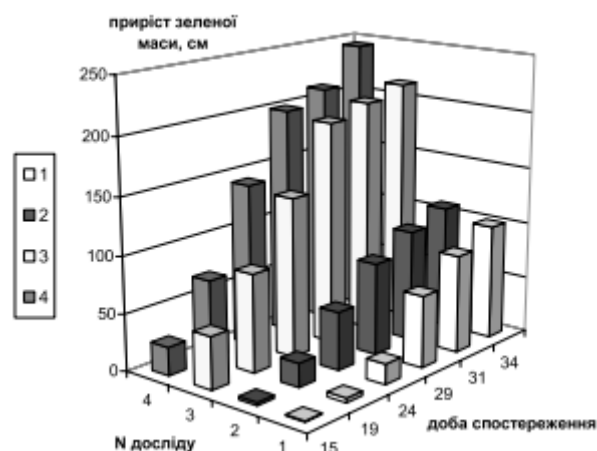


Рис. 4. Залежність ефективності приросту зеленої маси зернових від рН при зрошуванні ґрунту: водопровідною водою (3, 4); дренажною стічною (1, 2) з рН 7 (1, 3) та з додаванням CaO до рН 10 (2, 4). Контрольний варіант (3)

но підтверджено інтенсифікацію розвитку зернових культур на лузних ґрунтах. Пригнічення проростання зерен та приросту зеленої маси зернових культур при зрошенні їх ДСВ (незалежно від рН) можна пояснити високими концентраціями в ній солей.

Для підтвердження цього висновку нами було проведено дослід з використанням для посіву насіння гарбузових, котрі, як відомо, мають виразну реакцію на засоленість ґрунтів. Результати з проростання насіння гарбузових та приросту їх біомаси наведено на рис. 5, 6.

Згідно з результатами дослідів, при внесенні осаду в ґрунт значно пригнічується ефективність проростання гарбузових. Так, на 17-ту добу в контролі проросло 60 % зерен, тоді як у досліді із внесеним осадом – 10–25 %. Над тими зернами, що не проросли, на ґрунті візуально спостерігався білуватий контур з мікрокристалів солі, який повторював форму зерна, що свідчить про адсорбцію солей на їхній поверхні.

Ще інтенсивніше пригнічується розвиток самої рослини за наявності солей у ґрунті. Листя майже не розвивається. Якщо в контролі приріст біомаси з 10-ї доби до 17-ї (за 7 діб) становив 20 %, то при внесенні в ґрунт осаду – лише 5 %.

Таким чином, можна дійти висновку, що недоцільно рекомендувати використання осаду, отриманого при очищенні високомінералізованих ДСВ, як заміну добрив (навіть під декоративні рослини). Внесення такого осаду в ґрунт зумовлює його засолення та засмічення важкими металами. Так, авторами роботи [6] вказується на необхідність зниження вмісту важких металів в осадах, наприклад, ст. Бортничі (м. Київ), при використанні їх як добрива в сільському господарстві. Як виявлено

ними, осади, отримані на різних стадіях очищення навіть такої значно менш токсичної СВ, як побутова, потребують детоксикації перед внесенням у ґрунт. Особливості використання осадів від очищення СВ як добрив та необхідність їх детоксикації наведено в роботі [7]. Крім того, як було встановлено нами, до складу компонентів ДСВ входять і такі токсичні домішки, як синтетичні поверхнево-активні речовини (ПАР), гуанідин та інші похідні гомологічного ряду гуанідину, котрі розкладаються з утворенням ціанаміду, синильної кислоти.

Доцільним з екологічної та економічної точки зору є отримання з осаду ДСВ оксиду кальцію термічним способом та використання його в повторному циклі її очищення, оскільки це дозволить отримати товарні продукти, а отже, забезпечити як утилізацію, так і економічне знешкодження твердих відходів від очищення ДСВ [8; 9]. У процесі експериментальних досліджень з термообробки осаду нами встановлено, що за температури близько 850 °С за 2 год досягається розкладання карбонатів та гідроксиду кальцію (CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$) до CaO та CO_2 . За якістю отриманий продукт відповідає ДСТУ Б В 2.7.-90-99 (сорт 2). У результаті диференційно-термічного та термогравіметричного аналізу встановлено, що при 2,5–3-годинній термообробці осаду можна за температури 700 °С забезпечити розкладання його до оксиду кальцію. Відхідні гази такого процесу, збагачені CO_2 , можна утилізувати в технологічному процесі очищення ДСВ для забезпечення умов виведення в осад сполук кальцію (карбонатів) та зниження рН. Таким чином, отримані товарні продукти використовуються повторно в технології очищення ДСВ на стадії очищення її реагентами. Переробка в товарні продукти відходів, отри-

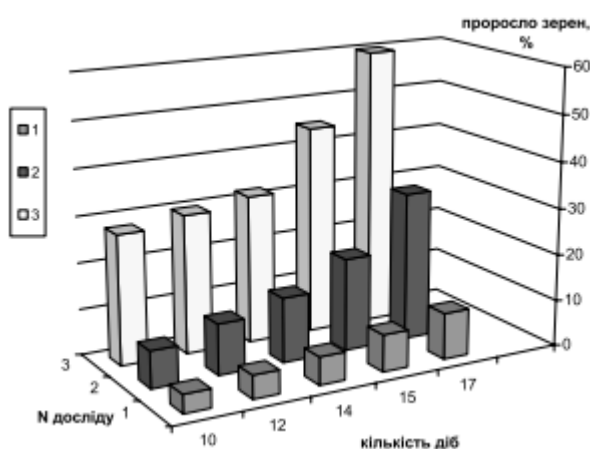


Рис. 5. Залежність ефективності проростання гарбузового насіння від кількості внесеного в ґрунт осаду: 4 % осаду (1); 8 % осаду (2); контрольний варіант – ґрунт (3)

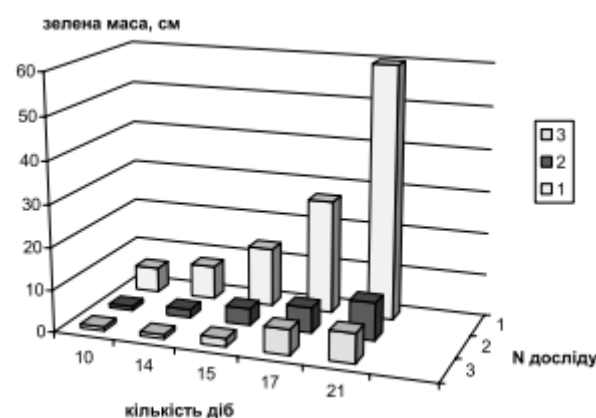


Рис. 6. Залежність ефективності приросту зеленої маси гарбузових від кількості осаду, внесеного в ґрунт: контрольний варіант (1); 4 % осаду (2); 8 % осаду (3)

маних у вигляді газів та твердої речовини при очищенні ДСВ звалища, перетворює їх у цінну сировину. Крім економічності такого підходу до утилізації цінних продуктів, метод можна віднести до запобіжних заходів щодо забруднення атмосфери та ґрунтів.

Висновки

У процесі відгонки аміаку в лужному середовищі встановлено, що об'єм повітря та швидкість його подачі мають становити 7,5 дм³/хв за температури 20 °С. За температури ДСВ 40 °С економічно доцільним є зниження інтенсивності його нагнітання до 3,0 дм³/хв. Внесення лужного осаду з високим вмістом солей у ґрунт негативно впливає на ріст рослин, хоча й стимулює процес проростання зернових. Значно пригнічується ріст гарбузових у порівнянні із зерновими культурами, що спричинено високою засоленістю ґрунтів і меншою стійкістю до цього показника гарбузових. Крім того, високий вміст токсичних речовин вказує на недоцільність внесення такого осаду в ґрунт. З екологічної та економічної точки зору раціональним є отримання з осаду термічним способом оксиду кальцію, який можна повторно використовувати на стадії очищення ДСВ реагентами в технологічній схемі (рис. 1).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гвоздяк П.І. Біотехнологія води (автомонографія). – Київ: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія». 2019. – 228 с.

2. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.А., Пазюк В.М., Новікова Ю.П. Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі // Теплофізика та Теплоенергетика – 2021. – Т. 43, № 1. – С. 5 – 12.

3. Очистка дренажной воды свалок твердых бытовых отходов с использованием оксида кальция для предмембранной обработки / В. В. Гончарук, З. Н. Шкавро, В. П. Бадеха [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13, № 5. – С. 605–612.

4. Siagg A.D., Gawor J.B. Zeolites-the way to remove ammonia // Fish. Farm. Int. – 1982. – Vol. 9, № 8. – P. 15.

5. Барабаш О.Ю. Овощеводу-любителю. 770 советов / О.Ю. Барабаш, С. Т. Гутыря, Л. О.Думыч. – К. : Довіра, 1993. – 299 с.

6. Утилизация осадков городских сточных вод / А. Делалио, В. В. Гончарук, Б. Ю. Корнилович [и др.] // Химия и технология воды. – 2003. – № 5. – С. 458–464.

7. The peculiarities of municipal water sludge utilization assoilconditioning additive [Electronic resource] / L. N. Gubanov, V. A. Filin, D. V. Boyarkin, A. V. Kotov // Вода и экология : проблемы и решения. – Mode of access: <http://www.aterandecology.ru>. – Title from the screen.

8. Ігнатенко О.П. Економіко-екологічні аспекти рециклу вторресурсів з твердих побутових відходів / О. П. Ігнатенко // Екологія і ресурси. – 2003. – № 4. – С. 115–120.

9. Твердые бытовые отходы. Проблемы и решения. Технологии, оборудование / А.М. Касимов, В.Т. Семенов, А. М. Коваленко, А. М. Александров. – Харьков : ХНАГХ, 2006. – 301 с.

PROCESSING AND DISPOSAL OF SEDIMENTS FROM THE TREATMENT OF INDUSTRIAL AND DOMESTIC WASTEWATER

Petrova Zh.O.¹, Dr. Sci. (Engin.),

Badekha A.V.², postgraduate

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

²*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine, badekha@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-3903-3766>*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.12>

Treatment of wastewater (filtrates) of solid waste landfills is one of the most acute problems of national importance. Filtrates belong to highly polluted, ecologically dangerous wastewater, as they are characterized by a high content of salts (up to 25,000mg/dm³) and organic substances (chemical oxygen absorption (COD) – 13,000 – 16,000 mg O/dm³). As a rule, filtrates are not cleaned in Ukraine today, and they end up in surface and underground waters without any treatment, which causes enormous damage to the environment.

In the industrially developed countries of the world, the reverse osmosis method is mainly used for the purification of filtrates. Thus, water purification by reverse osmosis requires 25-30% less energy than other methods. In addition, reverse osmosis provides a high degree of water purification from most types of pollution. At the same time, the efficiency and cost-effectiveness of reverse osmosis is largely determined by the adequate preliminary preparation of the filtrate, which prevents contamination of the membranes. In many cases, this is not followed in order to save money when cleaning filtrates.

In this regard, the purpose of this work is to develop a technology for complex processing of filtrates based on membrane methods to obtain clean water that meets the standards of the standard for discharge into open water bodies, and valuable substances that are suitable for industrial use.

In this regard, the purpose of this work is to develop a technology for complex processing of filtrates based on membrane methods to obtain clean water that meets the standards of the standard for discharge into open water bodies, and valuable substances that are suitable for industrial use.

The influence on plant development of sediment components or direct irrigation of the soil with landfill drainage wastewater showed that the introduction of alkaline sediment with a high salt content into the soil has a negative effect on plant growth, although it stimulates the process of grain germination.

In addition, the high content of toxic substances indicates the impracticality of introducing such sediment into the soil. From an ecological and economic point of

view, it is rational to obtain calcium oxide from sediment by a thermal method, which can be reused at the stage of treatment of drainage wastewater with reagents.

References 9, figure 6, table 1.

Key words: landfill leachate, fertilizers, sediment, calcium oxide.

1. *Hvozdiak P.I.* Biotekhnolohiia vody [Biotechnology of water]: automonography. Kyiv: Publishing House "Kyiv-Mohyla Academy, 2019. – 228 p. (in Ukr.)

2. *Sniezkin, Yu., Petrova, Z. Paziuk, V. Novikova, Y.* State of wastewater treatment technologies in Ukraine and the world. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2021, 43, 5-12. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1> (in Ukr.)

3. *Honcharuk B.V.* Ochistka drenazhnoy vodyi svalok tverdyih byitovyih othodov s ispolzovaniem oksida kaltsiya dlya predmembrannoy obrabotki [Treatment of drainage water of landfills of solid household waste using calcium oxide for pre-membrane treatment] / B. V. Honcharuk, Z. N. Shkavro, V. P. Badekha [and others] // Himiya v interesah ustoychivogo razvitiya, 2005, 13, 5, 605–612. (in Rus.)

4. *Siagg A.D., Gawor J.B.* Zeolites-the way to remove ammonia. Fish. Farm. Int., 1982, Vol. 9, № 8, 15.

5. *Barabash O.Yu. Gutyirya S.T., Dumyich L.O.* Ovoshevodu-lyubitelyu 770 sovetov [770 Soviets for an amateur vegetable grower]. Kyiv: Dovira, 1993. 299 p. (in Rus.)

6. *Delalio A.* Utilizatsiya osadkov gorodskih stochnyih vod [Utilization of city sewage sludge] / A. Delalio, V. V. Goncharuk, B. Yu. Kornilovich [and others] // Himiya i tehnologiya vodyi, 2003, № 5, 458–464. (in Rus.)

7. *Gubanov L.N., Filin V.A., Boyarkin D.V., Kotov A.V.* The peculiarities of municipal water sludge utilization assoilconditioning additive [Electronic resource]. Voda i ekologiya: problemy i resheniya. Mode of access: <http://www.aterandecology.ru>. Title from the screen.

8. *Ihnatenko O.P.* Ekonomiko-ekolohichni aspekty retsyklu vtorresursiv z tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Economic and ecological aspects of recycling secondary resources from solid household waste]. Ekolohiia i resursy, 2003, № 4, 115–120. (in Ukr.)

9. *Kasimov A.M., Semenov V.T., Kovalenko A.M., Aleksandrov A.M.* Tverdyie byitovyie othodyi. Problemy i resheniya. Tehnologii, oborudovanie [Solid household waste. Problems and solutions. Technologies, equipment]. Kharkov: Harkovskiy natsionalnyiy universitet gorodskogo hozyaystva, 2006. 301 p.

Отримано 09.07.2023

Received 09.07.2023

Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024

УДК 621.18-5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІКИ ПАЛЬНИКА ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ОКСИДІВ АЗОТУ ДЛЯ ПИЛОВУГІЛЬНОГО КОТЛА ТПП 312

Кобзар С.Г., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, провідний науковий співробітник, с.н.с., e-mail: skobzar@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0002-8615-4400

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.13>

Створено концепцію пальника зі зменшеною генерацією оксидів азоту для котла ТПП 312 в принцип роботи якого покладено умову затягування горіння, шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню димовими газами рециркуляції. Отримані результати показують, що запропонована концепція пальника, дозволяє отримати зниження оксидів азоту до 15%. Максимальне зниження оксидів азоту спостерігається при 10% рециркуляції димових газів.

The concept of a burner with reduced generation of nitrogen oxides for the TPP 312 boiler was created. It was used the principle of prolonging combustion process by separating the high-temperature zone from free oxygen by flue gas. The obtained results are shown that the proposed concept of the burner allows reduce nitrogen oxides up to 15%. The maximum reduction of nitrogen oxides was observed at 10% recirculation of flue gases.

Бібл. 5, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: рециркуляція димових газів, спалювання вугілля, оксиди азоту.

d – діаметр, м;

T – температура, К;

$[Y_i]$ – масова концентрація компоненти.

Індекси:

e – електрична потужність, Вт.

Скорочення:

ТЕС – теплова електростанція.

Індустріалізація людського життя призводить до збільшення забруднення атмосфери в основному продуктами згоряння органічного палива. За виключенням водяної пари, всі інші складові продуктів згоряння активно впливають на навколишнє середовище. Оксиди азоту є найбільш шкідливими з усіх продуктів, що забруднюють атмосферу, тому для зменшення негативно впливу треба докладати зусиль по зменшенню оксидів азоту в процесі горіння. Це досягається удосконаленням процесу згоряння, яке досягається так званими «первинними» та «вторинними» методами. Первинні методи направлені на зменшення викидів оксидів азоту безпосередньо під час горіння в топці чи камері згоряння, а вторинні методи направлені на видалення шкідливих речовин з продуктів згоряння після виходу їх з топки чи камери згоряння [1].

Ідея дослідження полягає у підвищенні екологічності котла ТПП 312, шляхом створення концепції низькоемісійного пальника на базі штатного. Об'єкт дослідження – котлоагрегат ТПП 312 виробництва має П-подібну компоновку, топка котла відкритого типу. Котел оснащений 16-ма пальниками, що розташовані у два яруси [2]. На теперішній час котли ТПТ-312

Ладизинської ТЕС оснащені реконструйованими силами станції пальниками [2].

Дослідження гідродинаміки потоку в моделі пальника. Проведено окреме дослідження гідродинаміки завихреного потоку в моделі пальника котла ТПП 312 з різною кількістю лопатей для завихрення вторинного повітря. В моделі пальника використовувалися аксіальні лопаті з кутом повороту потоку у 57 градусів. Стандартний пальник може бути оснащений 8 чи 24 лопатками завихрення периферійного повітря. На рис. 1 наведено лінії швидкості для пальника з 24 лопатками для завихрення периферійного вторинного повітря. Попередні розрахунки показали, що варіант пальника з 8 лопатками має кращі екологічні характеристики порівняно з випадком коли встановлено 24 лопатки, тому в подальшому використовувався варіант пальника з 8 лопатками для завихрення периферійного повітря.

На виході з кожного кільцевого каналу визначалось осереднене значення співвідношення тангенційної складової до осьової, яке в подальшому використовувалось для завдання граничних умов при розрахунку котла.

Коефіцієнт витрати визначалися на виході з кожного кільцевого каналу як співвідношення маси повітря

через канал до загальної маси повітря, що подається у пальник – індекс 1 відповідає внутрішньому каналу, індекс 2 – зовнішньому. Були проведені розрахунки для навантаження котлоагрегату 240 – 300 МВт_е, які характеризуються підвищеним рівнем генерації оксидів азоту.

Результати дослідження впливу навантаження котлоагрегату на структуру потоку на виході з пальника наведено в таблиці 1. Результати таблиці 1 використовували для завдання граничних умов на зрізі пальників при розрахунку термогазодинаміки котла ТПП 312.

Термогазодинаміка топки котла. Було побудовано комп'ютерну модель газового тракту котла ТПП 312, опис допущень та спрощень, що були використані при побудові моделі описано в роботі [4]. Задача розв'язувалася в тримірній постановці. Осереднені за числом Рейнольдса рівняння Нав'є-Стокса вирішувалися для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості

моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії. Для замкнення рівняння руху використовувалася RNG $k-\varepsilon$ модель турбулентності. Густина суміші газів розраховувалася за допомогою закону ідеального газу для суміші газів. Вплив гравітації враховувався шляхом завдання сили земного тяжіння в напрямку протилежному напрямленню осі Z. Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer). Рух твердих часток моделювався методом Лагранжа.

Характеристики палива. Котли ТПП 312 на ДТЕК Ладизинська ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Аналіз даних по якості вугілля, яке приходить на станцію згідно сертифікатів на вугілля марок Г (Г 0-100 енергетичне) та ДГ (ДГ 0-100 енергетичне) дав можливість вивести осереднені характеристики вугілля які використовувалися для вдосконалення моделі горіння пакету прикладних програм [3]. Моделювання проводилось за

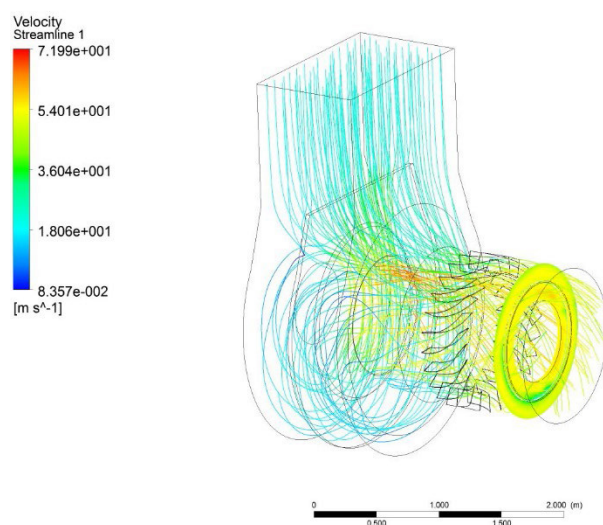


Рис. 1. Лінії швидкості в пальнику з 24 лопатками для завихрення периферійного вторинного повітря

Таблиця 1. Вплив навантаження котла ТПП 312 на структуру потоку на виході з пальника

Навантаження, МВт _е	Витрата вугілля, кг/пальник	Витрата вторинного повітря, кг/пальник	Коефіцієнт витрати, внутрішнього каналу, m_1	Коефіцієнт витрати, зовнішнього каналу, m_2	Співвідношення тангенційної швидкості до осьової на виході зі внутрішнього каналу, u_1/w_1	Співвідношення тангенційної швидкості до осьової на виході зі зовнішнього каналу, u_2/w_2
300	2,15	16,84	0,505	0,495	0,603	0,899
280	2,0054	15,53	0,51	0,49	0,59	0,903
260	1,8625	14,23	0,518	0,482	0,597	0,927
240	1,72	12,92	0,519	0,481	0,596	0,924

допомогою пакету прикладних програм ANSYS CFX. Осереднені характеристики суміші вугілля марок Г та ДГ, яке використовується на ДТЕК Ладизинська ТЕС наведені в табл. 2.

Для помелу вугілля використовуються кульові барабанні млини, які дають наступний розподіл Розіна-Раммлера пилу за фракціями:

$$R_x = \exp\left(-\left(\frac{d}{77,4}\right)^{1,23}\right).$$

Модель горіння твердого палива. Для моделювання горіння частинок твердого палива використовувалася вбудована в пакет CFX стандартна модель. Згідно цієї моделі транспорт частинок моделювався шляхом розв'язання рівняння руху частинки в постановці Лагранжа. Зміну розміру діаметру частинки твердого палива прийнято пропорційною зміні її зовнішньої поверхні чи масі (у разі, коли частинка вважається непроникною для газів реагентів).

При потрапленні частинки твердого палива в топку котла з нею відбуваються наступні процеси: сушка; термічна деструкція; горіння вуглецю.

Термічна деструкція. В дослідженні було прийнято, що процес термічної деструкції твердого палива починається після досягнення температури виходу летких $T_{devol} = 700$ К для вугілля. Передбачалося, що тверде паливо під час термічної деструкції розкладається на коксовий залишок (CHAR) та леткі, склад яких був визначений виходячи зі складу горючої маси палива (Табл.2):



Зміна маси частинки залежить від матеріалу твердого палива, залишку летких у матеріалі та задовольняє закону Ареніуса з властивими конкретному матеріалу значеннями енергії активації E_{vol} та передекспонентним фактором k_{vol0} :

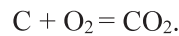
$$k_{vol} = k_{vol0} \exp\left(-\frac{E_{vol}}{RT_p}\right). \quad (2)$$

Кінетичні параметри у виразі (2) були взяті з [4], значення яких $k_{vol0} = 6,6 \times 10^4$ 1/с та $E_{vol} = 104,5$ кДж/моль.

Таблиця 2. Фізико-хімічні характеристики вугілля

Елементний склад на робочу масу (г), %							Вихід летких, %	Q_i^r , МДж/кг
C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^r	W ^r		
58,86	4,01	6,52	1,45	1,86	24,3	3	42	23,56

Горіння коксового залишку. Для моделювання гетерогенного горіння коксового залишку використовувалася стандартна дифузійно-кінетична модель горіння вуглецю. Прийнято, що горіння відбувається на зовнішній поверхні за сумарною (брутто) реакцією:



Горіння летких. Після виходу летких згідно виразу (1), їх горіння відбувається у гомогенному середовищі. Горіння відбувається за двостадійним механізмом:



Горіння в середині топки котла лімітується в першу чергу процесом змішування палива та окиснювача, тому середня швидкість хімічної реакції горіння газозафазних реакцій (3) та (4) визначалася за моделлю дисипації вихорів.

Швидкість реакції за моделлю дисипації вихорів Магнусена [5], визначається за формулою:

$$R_{EDC} = A_{EDC} \frac{\varepsilon}{k} \rho \cdot \min\left\{\bar{Y}_{fuel}, \frac{\bar{Y}_{ox}}{s}, B_{EDC} \frac{1}{1+s} \bar{Y}_{prod}\right\},$$

де $\bar{Y}_{fuel}$, $\bar{Y}_{ox}$ – масова концентрація палива та окислювача, s – стехіометричне відношення реакції паливо/окислювач; A_{EDC} і B_{EDC} константи моделі. В моделі дисипації вихорів використовувалися стандартні значення констант $A_{EDC} = 4$ і $B_{EDC} = 0,5$.

Модель утворення оксидів азоту. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використовувалися термічний, швидкий та паливний механізми утворення оксидів азоту.

Концепція пальника. В основу створення концепції пальника зі зменшеною генерацією оксидів азоту для котла ТПП 312 було покладено умову затягування горіння, шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню. Це було зроблено шляхом створення на периферії центрального каналу аеросуміші кільцевого каналу, куди подавались димові гази зі змістом кисню 6%. Площа кільцевого каналу для рециркуляції димових газів складала 0,1 від площі каналу аеросуміші. Зріз стандартного та модифікованого пальників показано на рис. 2.

При завданні граничних умов, а саме витрати вторинного повітря, враховувався кисень, що надходив з димовими газами. Корекція витрати вторинного повітря робилась таким чином, щоб підсумковий надлишок котлоагрегату становив 1,15. Витрата первинного повітря, яке використовується для транспорту вугільного пилу, залишалась сталою для всіх розрахунків. При відсутності

рециркуляції димових газів у кільцевий канал вся витрата аеросуміші подавалась рівномірно у внутрішній та зовнішній канали, тобто моделювалась робота стандартного пальника (рис.2, а). При моделюванні роботи модифікованого пальника, вся витрата аеросуміші подавалась в центральний канал, а газу рециркуляції у кільцевий.

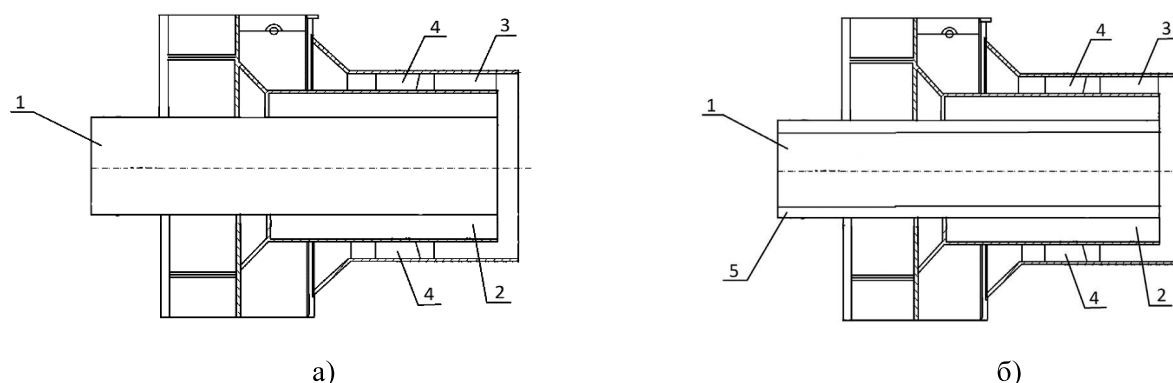


Рис. 2. Будова пальника котла ТПП 312: а) – стандартний; б) – концепція модифікованого:
1 – канал аеросуміші; 2 – канал первинного повітря; 3 – канал вторинного повітря;
4 – лопатки аксіального завихрювача; 5 – канал димових газів

Таблиця 3. Вплив рециркуляції на екологічні та технологічні показники котла ТПП 312

Рециркуляція, %	Емісія NO, кг/с	Вуглець, що не згорів, кг/с
Навантаження котла 300 МВт _г		
0	0,18	1,68
5	0,164	2,02
10	0,15	2,12
15	0,17	1,771
Навантаження котла 280 МВт _г		
0	0,174	1,045
5	0,158	1,45
10	0,146	1,07
15	0,16	1,72
Навантаження котла 260 МВт _г		
0	0,147	0,46
5	0,134	1,33
10	0,125	1,03
15	0,133	0,89
Навантаження котла 240 МВт _г		
0	0,138	0,236
5	0,12	0,801
10	0,115	1,12
15	0,123	1,25

Результати дослідження. Вплив на оксиди азоту та втрати вуглецю, що не згорів в залежності від проценту рециркуляції димових газів для різних режимів навантаження показані в таблиці показані в таблиці 3. Отримані результати показують, що при застосуванні рециркуляції у кільцевий канал, спостерігається зменшення оксидів азоту на виході з розрахункової області, при цьому зі зростанням рециркуляції спостерігається збільшення втрат з вуглецем, що не згорів.

Значення відносної зміни викидів оксиду азоту в залежності від проценту рециркуляції для різних навантажень показано на рис. 3. Отримані результати показують, що запропонована концепція пальника, яка основана на затягуванні горіння шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню димовими газами, дозволяє отримати зниження оксидів азоту до 15%. Максимальне зниження оксидів азоту спостерігається при 10% рециркуляції димових газів.

Висновки

Створено концепцію пальника зі зменшеною генерацією оксидів азоту для котла ТПП 312 в принцип роботи якого покладено умову затягування горіння, шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню димовими газами рециркуляції. Отримані результати показують, що запропонована концепція пальника, дозволяє отримати зниження оксидів азоту до 15%. Максимальне зниження оксидів азоту спостерігається при 10% рециркуляції димових газів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Frederick N, Agrawal R.K., Wood P.E., Wood S.C.* Induced Flue Gas Recirculation for NO_x Control: Application on Boilers and Process Heaters// Energy Texas Industries press. - Report 03 ETEC.-2004.- p.24.
2. *Кобзар С.Г., Халатов А.А.* Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладизинська ТЕС // Вісник НТУУ ХПІ. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №13(1056). – С. 85 - 91.
3. *Кобзар С.Г., Коваленко Г.В., Халатов А.А.* Комп'ютерне моделювання ерозії конвективних поверхонь нагріву котла ТПП 312 // Промышленная теплотехника. – 2017. – Т.39 – №.5. – С.78–83.
4. *H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim.* Coal devolatilization at high temperatures/Symp. Combust., 16 (1977), pp. 411-425
5. *Magnussen B.F., Hjertager B.W.* On the structure of turbulence and a general is ededdy dissipati on concept for chemical reaction in turbulent flow // 19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.

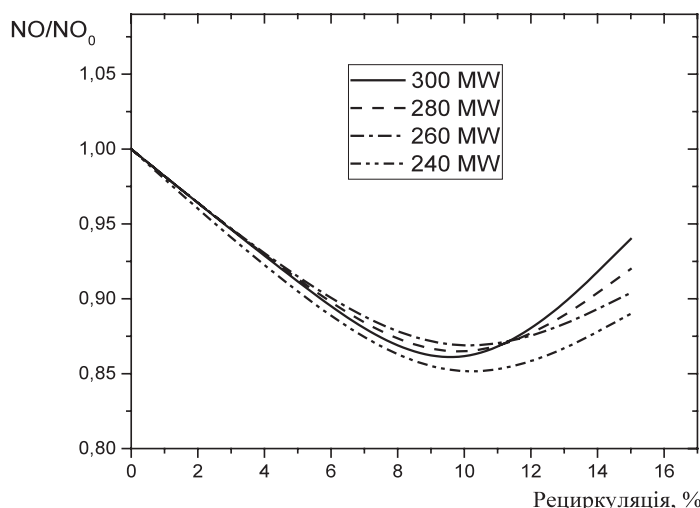


Рис. 3. Значення відносної зміни викидів оксиду азоту в залежності від проценту рециркуляції для різних навантажень

THE INVESTIGATION OF THE THERMOGASDYNAMICS OF A BURNER WITH REDUCED GENERATION OF NITROGEN OXIDES FOR A COAL DUST BOILER TPP 312

Kobzar S.G.

*Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine,
Marii Kapnist, 2a, Kiev, 03680, Ukraine,
PhD, skobzar@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0002-8615-4400*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2024.13>

The paper was consider the influence of the flue gas recirculation in inner duct of coal dust burner. The concept of a burner with reduced generation of nitrogen oxides for the TPP 312 boiler was created. It was used the principle of prolonging combustion process by separating the high-temperature zone from free oxygen by flue gas. The obtained results are shown that the proposed concept of the burner allows reduce nitrogen oxides up to 15%. The maximum reduction of nitrogen oxides was observed at 10% recirculation of flue gases.

Bibliography 6, fig. 3, tabel 3.

Keywords: flue gas recirculation, coal combustion, nitrogen oxides.

1. *Frederick N, Agrawal R.K., Wood P.E., Wood S.C.* Induced Flue Gas Recirculation for NO_x Control: Application on Boilers and Process Heaters// Energy Texas Industries press. - Report 03 ETEC.-2004.- p.24.

2. *Kobzar S.G., Khalatov A.A.* [Determination of the efficiency of reducing emissions of nitrogen oxides by a system of step-by-step combustion of a boiler of coal TPP-312 of block # 6 of DTEK Ladyzhinsk TPP], [Bulletin of NTUU KhPI. Series: Power and heat engineering processes and equipment]. 2014 # 13 (1056). P.85-91 (in Ukr.)

3. *Kobzar, S., Kovalenko, G., & Khalatov, A.* (2017). [Computer modeling of the erosion of the convection heat transfer surfaces of boiler TPP 312], Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2017. 39(5), 78-83. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.13> (in Ukr.)

4. *H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim.* Coal devolatilization at high temperatures/Symp. Combust., 16 (1977), pp. 411-425

5. *Magnussen B.F., Hjertager B.W.* On the structure of turbulence and a general is ededdy dissipati on concept for chemical reaction in turbulent flow // 19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.

Отримано 19.09.2023

Received 19.09.2023

*Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024*