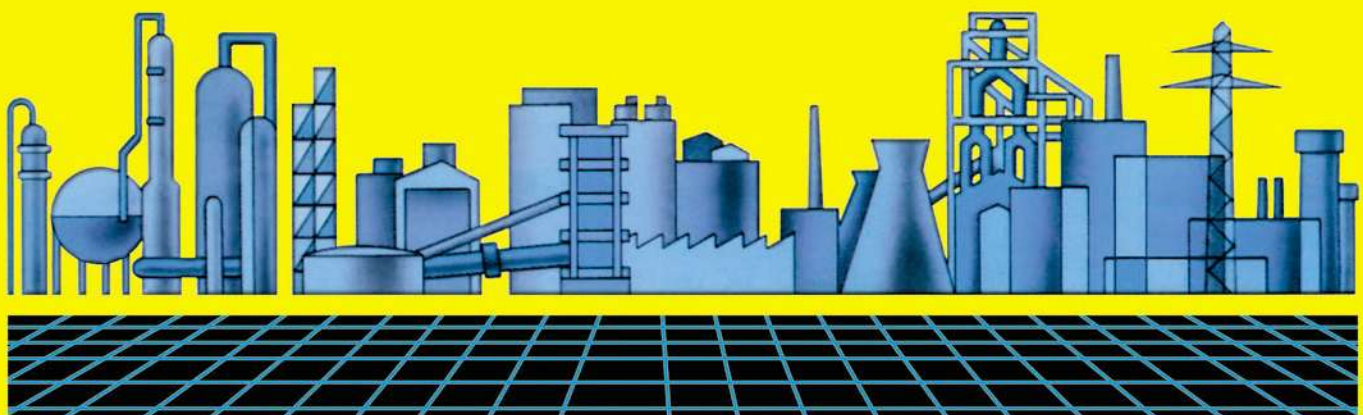


ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

2'2024

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідоцтво Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.
Свідоцтво перереєстровано у Міністерстві юстиції України
КВ № 24313-ПР від 06.02.2020 р.
Ідентифікатор медіа R30-02564, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 11.01.2024 №33

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Наказ Міністерства освіти та науки України №886 від 02.07.2020)

Категорія журналу «Б»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, член-кор. НАН України

Технічний редактор

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц., зав.каф. ІППА НТУ "ХПИ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньова, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ ХНУМГ

В. Є. Вєдь, д-р техн. наук, професор, професор каф. ІППА НТУ "ХПИ"

П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ТЖПБ НТУ "ХПИ"

П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав.каф. АУТС НТУ "ХПИ"

Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПИ"

А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, професор каф. ТЕТ НТУ "ХПИ"

О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного

забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил

ім. І.Кожедуба

В. А. Маляренко, д-р техн. наук, професор, професор каф. СЕЕМ

ХНУМГ

П. О. Капустенко, канд.техн. наук, професор, акад. Академії

будівництва України

Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Католицький

університет, Будапешт, Угорщина

Шарифа Рафидан Ван Алві, PhD, professor, Малайзійський університет

технології

Девид Дж. Кукулька, PhD, професор, Державний університет Нью-

Йоркського коледжу у Буффало, США

Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, Падерборнський університет,

Германія

Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато,

Мехіко

Петар Варбанов, старший науковий співробітник NETME Center -

SPIL, Технологічний університет Брно, Чеська республіка

Майкл Уолмслі, BE, PhD ChemEng, Університет Вайкато, Окленд,

Нова Зеландія

П. Стехлік, PhD, проф., Директор Технологічного університету Брно

(Чеська республіка)

Панос Сеферліс, PhD., проф., університет Арістотеля в Салоніках,

Греція

Журнал включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://ite.khpi.edu.ua>

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyansky, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU "KhPI"

Technical editor

K. O. Gorbunov, PhD, Assistant Professor, professor NTU "KhPI"

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

O. P. Arsenyeva, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov

National University of Municipal Economy named after O.M.

Beketova

V. E. Ved, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

P. O. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

P. O. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

G. L. Khavin, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

A. M. Hanzha, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"

O. B. Anipko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kozhedub Kharkiv

Air Force University

V. A. Malyarenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov

National University of Municipal Economy named after O.M.

Beketova

P. O. Kapustenko, PhD, professor NTU "KhPI"

Ferenc Friedler, PhD, professor,

Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary

Sharifah Rafidah Wan Alwi, PhD, professor, Universiti Teknologi

Malaysia,

David J. Kukulka, PhD., professor, State University of New York

College at Buffalo, USA

Eugeny Kenig, prof., dr.-ing., Paderborn University, Germany

Martín Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato,

Mexico

Petar Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre -

SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic

Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New

Zealand

Petr Stehlik, PhD., professor, Director of Institute BRNO University

of Technology, Czech Republic

Panos Seferlis, PhD., professor, Aristotle University of Thessaloniki,

Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Гарсев Л. А., Рябова І. Б.</i> Інтенсифікація рекуперативного теплообміну в процесах виробництва ректифікованого етилового спирту.....	3
<i>Рищенко І. М., Биканов С. М., Горбунов К. О., Миронов А. М., Льченко М. В.</i> Комплексна тепла інтеграція процесу ректифікації суміші бензол-толуол.....	14

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Дзевочко О. М., Подустов М. О., Дзевочко А. І., Панасенко В. О., Пашко А. І.</i> Математична модель процесу очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки у виробництві ПАР.....	23
<i>Аніпко О. Б., Баулін Д. С.</i> Модель масопереносу, деякі особливості технологій та основні параметри апарату для регенерації нітроцелюлозних порохів.....	35
<i>Павлова В. Г., Кошельник О. В., Пугачова Т. М., Круглякова О. В.</i> Розрахунок процесів паро- і кристалоутворення при теплообміні в плівкових випарних апаратах.....	51
<i>Шутинський О. Г., Снурніков Д. В.</i> Математичне моделювання газопроводу системи газоочищення у виробництві сталі.....	60
<i>Шульга І. В., Владимиренко В. В., Лаврова І. О.</i> Рациональні технологічні засади отримання коксу із заданими показниками питомого електричного опору.....	70

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Бабіченко А. К., Красніков І. Л., Бабіченко Ю. А., Кравченко Я. О., Лисаченко І. Г., Панасенко В. О.</i> Методологія системного аналізу у розв'язуванні технічних протиріч холодильних комплексів виробництв аміаку.....	84
<i>Кривобок А. В.</i> Розробка складів нікель-цинкового фериту з високою діелектричною проникністю для радіопоглинаючих матеріалів.....	94
<i>Гурін І. В., Невлюдов І. Ш., Овчаренко В. С., Токарева О. В.</i> Система автоматичного управління з нейромережевими регуляторами для підвищення якості ВВКМ.....	104
<i>Петік І. П., Діхтярь А. М., Андреева С. С., Шаповаленко Д. О., Карюк А. О., Кібенко Н. Ю.</i> Розробка ароматизованої олійної композиції на основі конопляної олії, стабілізованої від окиснення.....	117

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Ходаков О. Л., Саркісян Г. О., Василик О. В., Мирошніченко О. М., Делі В. Ю., Ткаченко Л. О., Ульман Я. М.</i> Вивчення впливу технології на якість рожевих ігристих виноматеріалів Піно Нуар.....	127
<i>Сторінка редколегії.....</i>	145

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 5 від 24.05.2024 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : Щоквартальний науково-практичний журнал. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 2. – 146 с.

Журнал наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій різноманітних галузей промисловості.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2024

Л. А. Гарєв, аспірант, І. Б. Рябова, к. техн. н., доцент

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: теплова інтеграція, ректифікаційна колона, мережа рекуперативних теплообмінників, енергоефективність, виробництво етилового спирту.

Традиційно в Україні виробляється багато етилового спирту для потреб харчової, фармацевтичної, паливної галузей. Як відомо, актуальнішою проблемою сучасної промисловості є високе питоме споживання енергії в хімічній та переробній промисловості [1], і виробництво етанолу, на жаль, не є виключенням. З 2020 року в Україні знято державну монополію на виробництво спирту, і саме тому, зниження собівартості продукції є необхідною умовою здорової конкуренції виробників етанолу на внутрішньому та зовнішньому ринках. Україна має суттєву сировинну базу для виробництва етилового спирту, що робить цю галузь однією з перспективних для економіки країни. Наданням поштовху для розвинення означеної галузі може стати зниження питомих витрат енергії на виробництво шляхом енергоефективної модернізації підприємств, що вже існують [2,3].

Технологічний процес виробництва етилового спирту є складним та багатостадійним. Велика доля витрат енергії в цьому процесі припадає на процес дистиляції, який вимагає багаторазового випарювання суміші з подальшою конденсацією пари, що утворюється. Дослідження енергетичного потенціалу процесу саме дистиляції вказує на наявність досить великої кількості енергії, яку можна перерозподілити всередині технологічної схеми. Метою даного дослідження було встановити енергетичний потенціал процесу та визначити шляхи модернізації технологічної схеми з метою мінімізації споживання нею енергії зі зовнішніх джерел.

На основі регламентної документації апаратурно-технологічної схеми установки централізованої розгонки головної фракції етилового спирту та звіту з енергоаудиту даної установки було здійснено екстракцію даних технологічних потоків.

Енергоефективну схему обраного технологічного процесу наведено на рис. 1. Відповідно до технологічного регламенту у бражній колоні (БК) відбувається концентрування водно-спиртової рідини; в епюраційній колоні (ЕК) ,відповідно, епюрація спирту-сирцю, виділення головних домішок та метанолу; у ректифікаційній колоні (РК) – підвищення міцності та пастеризація спирту, виведення вищих спиртів з зон їх концентрування; на метанольній колоні (МК) проводиться остаточне очищення етанолу від легколетючих домішок, які відбираються у вигляді ефірної (ЕФ) та метанольної (МФ) фракцій або у вигляді об'єднаної фракції [4]. Схему технологічного процесу отримання етанолу показано на рис. 1.

Рисунок 1 – Енерго-технологічна схема ректифікації етилового спирту на комплексі колон

Задля аналізу з наведеної схеми було обрано низку технологічних потоків, які мають суттєвий енергетичний потенціал, що може бути використаний для теплової інтеграції енергії всередині технологічної схеми [5]. Короткі характеристики обраних для інтеграції потоків є наступними:

1. Пара, що залишає бражну колону. Направляється на підігрів браги, що заходить в БК до рекуперативного теплообмінника Т-1 та конденсатора С-1, де вона конденсується. Початкова температура пари 80 °С, кінцева 76 °С, витрати 0,72 кг/с.
2. Бражний дистиллят БК, що охолоджується у дефлегматорі С-2 та надходить до епіюраційної колони. Початкова температура 76 °С, кінцева 61 °С, витрати 0,72 кг/с.
3. Пара епіюраційної колони, що конденсується в дефлегматорі С-3. Початкова температура 70,7 °С, кінцева 61,4 °С, витрати 1,16 кг/с.
4. Конденсат гріючої пари з куба ЕК, що виходить з кип'ятильнику ЕК Н-2. початкова температура 141 °С, кінцева 60 °С, витрати 0,90 кг/с.
5. Барда, що виходить з кубу бражної колони. Початкова температура 90 °С, кінцева 60 °С, витрати 6,39 кг/с.
6. Лютерна вода, що є гріючим агентом у Т-2. Початкова температура 99 °С, кінцева 81 °С, витрати 2,43 кг/с.
7. Конденсат граючої пари РК, МК, що виходить з кип'ятильників Н-5, Н-6. Початкова температура 100 °С, кінцева 80 °С, витрати 3,8 кг/с.

8. Брага, що нагрівається у теплообміннику Т-1 та у нагрівачі Н-3. Початкова температура 33 °С, кінцева 85 °С, витрати 5,3 кг/с.

9. Нижній продукт бражної колони, що випаровується у кип'ятильнику Н-1, початкова температура 97 °С, кінцева 99 °С, витрати 0,9 кг/с.

10. Рідина в кубі ЕК, що випарюється в кип'ятильнику Н-2. Початкова температура 73 °С, кінцева 78 °С, витрати 1,2 кг/с.

11. Хімічно-небезпечні речовини (ХНР) гідроселекції, що підігріваються в Т-2 перед вводом до колони розділення ефірно-альдегідних фракцій (КРЕАФ). Початкова температура 68 °С, кінцева 79 °С, витрати 1,9 кг/с.

Вода на замес, що підігрівається у нагрівачі Н-9. Початкова температура 66 °С, кінцева 85 °С, витрати 1,5 кг/с.

У схемі, що існує, відбувається утилізація теплоти конденсації пари у дефлегматорі бражної колони Т1 для нагрівання бражки та лютерна вода підігріває ХНР у Т-2.

Для рішення задачі використовувався метод пінч-аналізу, який включає побудову складених кривих, визначення можливої кількості рекуперативного тепла з подальшою побудовою мережі теплообмінників з максимальною рекуперацією теплоти [6, 7, 8, 9]. На базі екстрагованих з технологічної схеми відомостей складено таблицю поточкових даних, що наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Поточкові дані технологічної схеми

№ потоку	Найменування потоку	Тип потоку	G, кг/с	Ts, °С	Tt, °С	CP, кДж/°С	ΔH, кВт
1	Конденсація випару БК на підігрівачах браги	Гарячий	0,72	80	76		1070
2	Охолодження бражного дистиляту БК на дефлегматорі	Гарячий	0,72	76	61	2,36	35
3	Конденсація парів ЕК на дефлегматорах	Гарячий	1,16	70,7	61,4		1970
4	Конденсат гриючої пари з куба БК	Гарячий	0,92	141	60	3,84	311
5	Барда	Гарячий	6,39	90	60	25,4	762
6	Лютерна вода	Гарячий	5,28	99	81	2,8	50,4
7	Конденсат парів РК, МК	Гарячий	3,8	100	80	3,8	76
8	Нагрів браги	Холодний	0,3	33	85	18,9	982
9	Випаровування в БК	Холодний	0,9	97	99		2029
10	Випаровування в ЕК	Холодний	1,2	73	78		2044
11	ХОВ гідроселекції	Холодний	1,9	68	79	7,93	87,23
12	Вода на заміс	Холодний	1,5	66	85	17,32	329

В результаті побудови складових кривих хіміко технологічної системи комплексу колон виробництва спирту були визначені цільові значення гарячих та холодних утиліт для мінімальної різниці температур між потоками в теплообмінній системі, що існує складає, $\Delta T_{\min} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$. Було встановлено, що дана схема використовує лише незначну кількість теплової енергії технологічних потоків та потребує модернізації. Складові криві процесу, що існує, наведені на рис. 2.

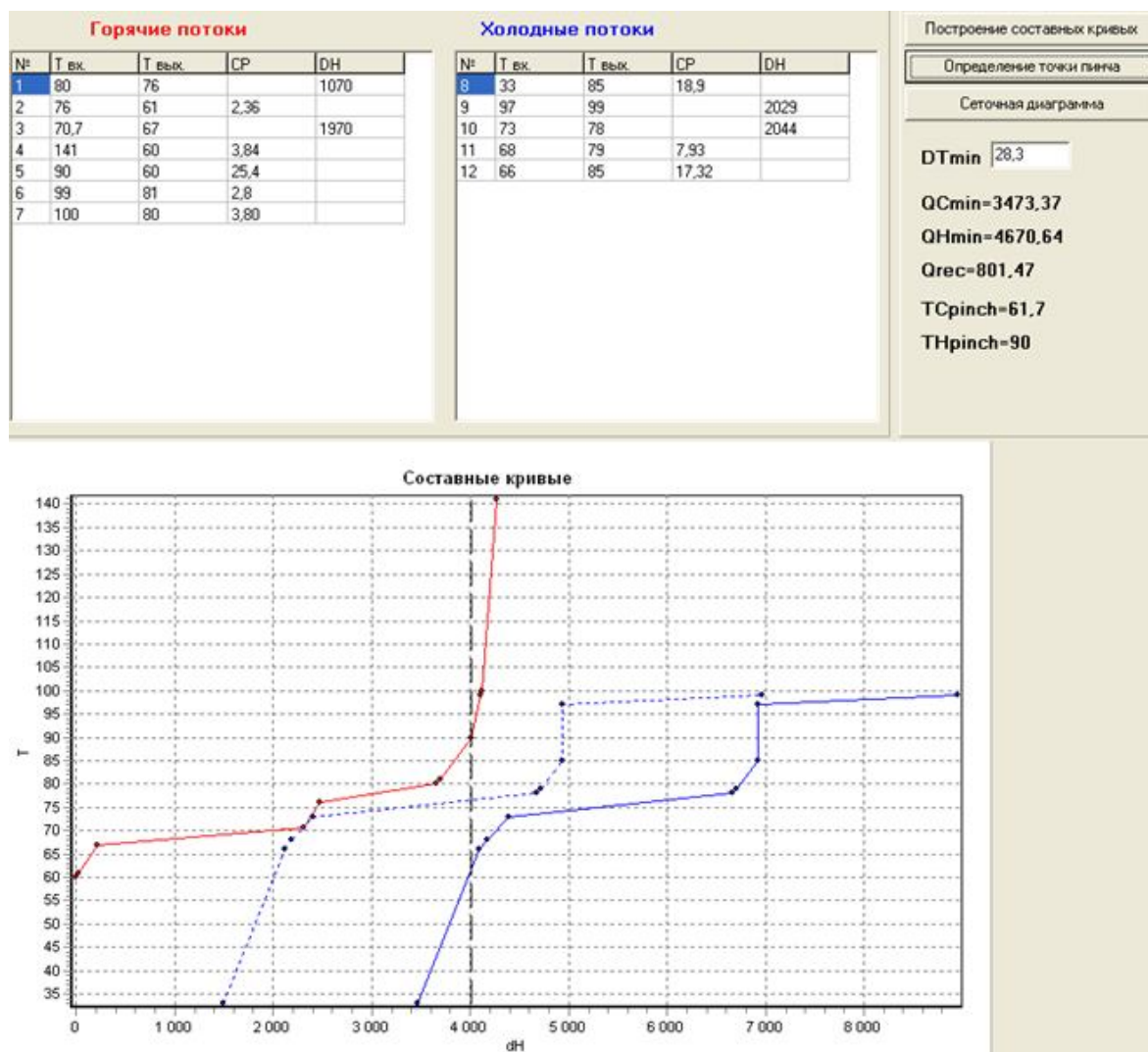


Рисунок 2 – Складові криві інтегрованого процесу з $\Delta T_{\min} = 28,3 \text{ }^\circ\text{C}$

На основі цих даних розробляємо сіткову діаграму для системи технологічних потоків існуючого процесу, основні параметри яких були екстраговані в процесі дослідження роботи комплексу колон по виробництву спирту. Сіткова діаграма існуючого процесу наведена на рис. 3.

Аналіз схеми, яка існує, показав що можливості рекуперації теплоти між технологічними потоками не є вичерпаними, а велике значення температурного напору обумовлення використанням застарілого теплообмінного обладнання [10].

У проєкті реконструкції планується використання вискоєфективного сучасного теплообмінного обладнання – пластинчастих теплообмінних апаратів [11, 12].

Це дозволить розглядати варіанти реконструкції теплообмінної системи для мінімальних значень ΔT_{\min} з урахуванням компромісу між економією гарячих холодних утиліт та капітальних витрат на реконструкцію.

Рисунок 3 – Сіткова діаграма технологічної системи ректифікації етилового спирту

В результаті використання методології пінч-аналізу для даної системи було визначено оптимальне значення $\Delta T_{\min}=10$ °С. Складові криві технологічних потоків ректифікаційної установки при $\Delta T_{\min}= 10$ °С представлені на рис. 4.

Розрахунки показали, що для значення мінімальної різниці температур між гарячими та холодними потоками 10 °С, рекуперація всередині технологічної схеми зростає до 1400 кВт.

Побудова сіткової діаграми модернізованого процесу та розміщення теплообмінного обладнання відбувалося на базі виконаних розрахунків у відповідності до правил пінч-проекування.

При розміщенні теплообмінних апаратів у підсистемі, що знаходиться вище пінча, мають виконуватися такі умови:

$$CP_H \leq CP_C, \quad (1)$$

де CP_C і CP_H – потокові теплоємності холодних та гарячих потоків, кВт/°С.

В підсистемі нижче пінча мають виконуватися наступні умови:

$$CP_C \leq CP_H \tag{2}$$

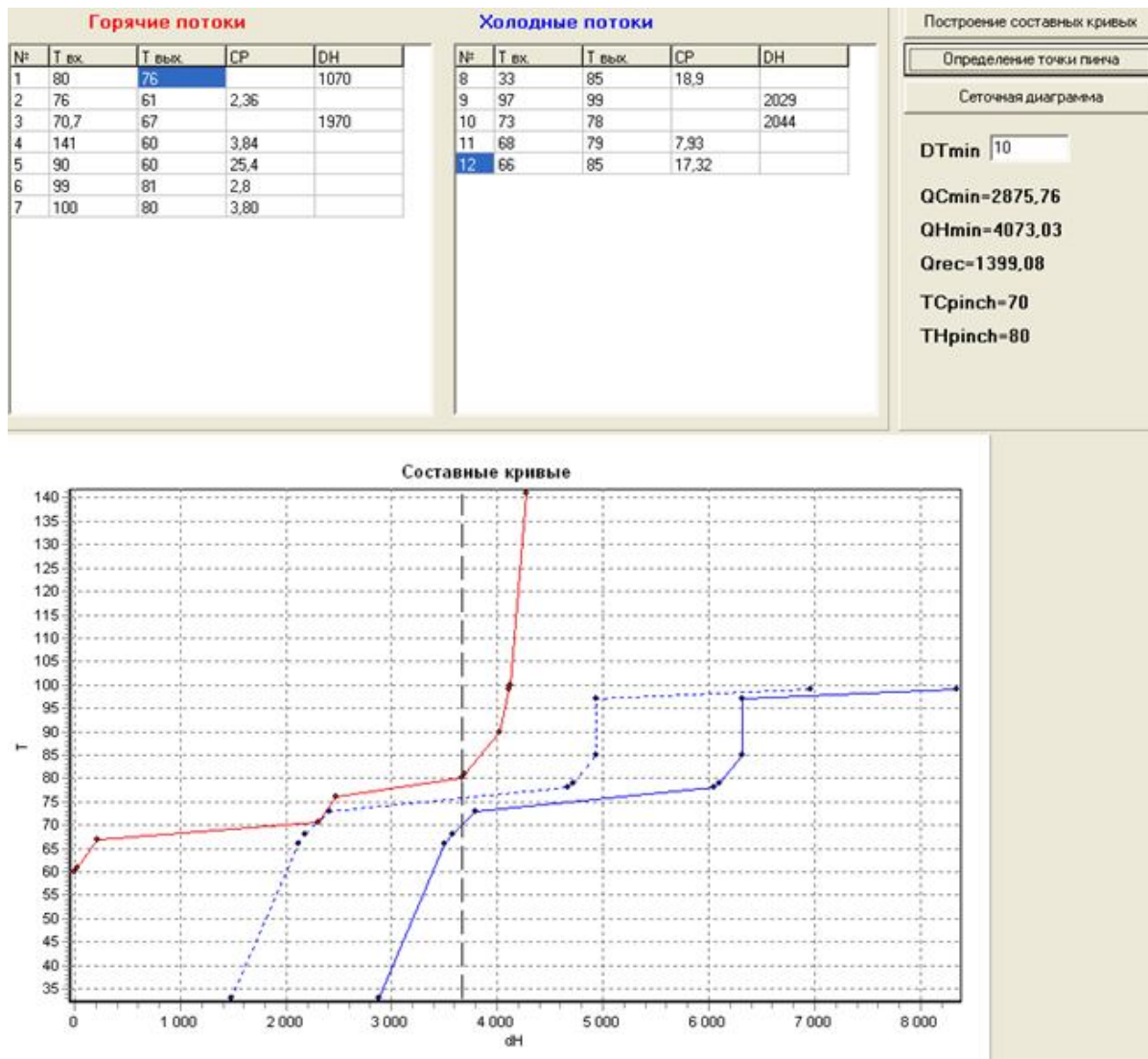


Рисунок 4 – Складові криві процесу інтеграції

На рисунку 5 наведено проектне розміщення теплообмінних апаратів вище й нижче пінча з урахуванням дотримання вимог пінч-проекткування – CP вимог, вимог евристичних відміток та ін. [6].

Були розраховані зміни потокових ентальпій для гарячих та холодних потоків. З метою максимізації теплових навантажень теплообмінників в рекупераційній системі були визначені зміни потокових ентальпій для відповідних температурних інтервалів

Зміна ентальпії гарячих потоків:

$$\Delta H_n = CP_n (T_{PH} - T_{Sn}), \tag{3}$$

де n – номер потоку; T_{PH} – пінч температура гарячих потоків, °С; T_{Sn} – температура по-стачання, °С.

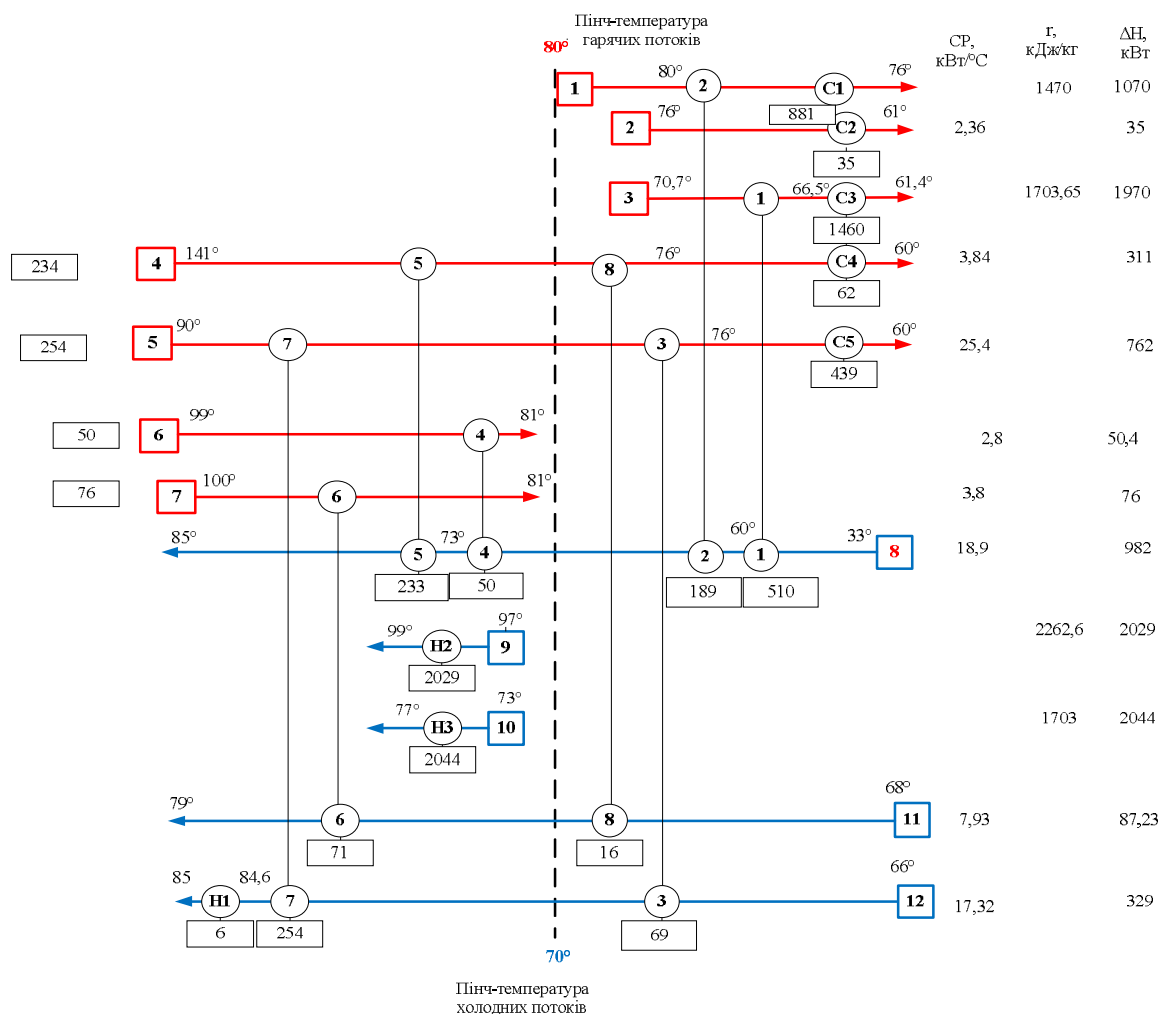


Рисунок 5 – Сіткова діаграма технологічної системи ректифікації етилового спирту

ВИСНОВКИ. Таким чином, в процесі енергоефективної модернізації теплообмінної рекуперативної системи в складі комплексу колон з виробництва спирту отримана значна економія гарячих та холодних утиліт. Енергетичні показники ефективності проекту реконструкції наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Енергетичні показники ефективності проекту

Технологічна схема	Гарячі утиліти Q_{Hmin} , кВт	Холодні утиліти Q_{Cmin} , кВт
До реконструкції	4670,64	3473,37
Після реконструкції	4073,03	2875,76
Економія теплової енергії, %	12,8	17,2

Термін окупності проекту реконструкції теплообмінної рекуперативної системи комплексу колон з виробництва спирта станом складе близько 0,6 року. Розрахунки техніко-економічних показників проекту проведені у відповідності до поточних цін на енергоресурси та актуалізовану інформацію по цінам на теплообмінне обладнання у виробників.

Дослідження, які були проведені в теплообмінних системах виробництву спирту, показали перспективні можливості застосування методів теплової інтеграції задля підвищення енергоефективності хіміко-технологічних систем.

Були визначені подальші напрямки досліджень з метою збільшення енергозберігаючого потенціалу спиртових виробництв. Це пов'язано з застосуванням методу інтеграції теплового насосу, який базується в нашому випадку на використанні технологій механічної рекомпресії парів ректифікаційного комплексу колон. Дослідження в цьому напрямку ведуться та будуть відображені в наступних публікаціях.

Література

1. Енергетична стратегія України до 2035 р. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564.
2. Бевз, В. В. Розвиток механізму енергозбереження на підприємствах харчової промисловості / В. В. Бевз // Вчені записки : збірник наукових праць. – Київ : КНЕУ, 2011. – № 13. – С. 169–173.
3. Енергоефективність в агробізнесі: виклики майбутнього і як бути до них готовими? <https://www.interagro.in.ua/enerhoefektyvnist-v-ahrobiznesi-vyklyky-maybutn-oho-iaak-buty-do-nykh-hotovymy/> 26–29 жовтня на *AgroEnergyDAY 2020*, м. Київ.
4. Технологія спирту / Під ред. проф. В.О. Маринченка. – Вінниця: „Поділля-2000”, 2003. – 496 с.
5. Linnhoff B. and Vredeveld D.R. Pinch Technology Has Come Of Age. *Chemical Engineering Progress*, 1984, vol. 80, no. 7, pp. 33–40.
6. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2000. – 456 с.
7. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 412 с.
8. Song C., Qiu Y., Liu Q., Ji N., Zhao Y., Kitamura Y., Hou X. Process intensification of cellulosic ethanol production by waste heat integration. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 132, pp. 115–122. doi: 10.1016/j.cherd.2018.01.016.
9. Ulyev L., Vasiliev M., Boldyryev S. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 222, pp. 454–464. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.062.
10. Boldyryev S., Krajačić G., Duić N. Cost Effective Heat Exchangers Network of Total Site Heat Integration. *Chemical Engineering Transaction*, 2016, vol. 52, pp. 541–546. doi: 10.3303/CET1652091.
11. Pan M., Bulatov I., Smith R. Improving heat recovery in retrofitting heat exchanger networks with heat transfer intensification, pressure drop constraint and fouling mitigation. *Applied Energy*, 2016, vol. 161, pp. 611–626. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.073.
12. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 232 с.

Bibliography (transliterated)

1. Energetichna strategiya Ukraini do 2035 r. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564.
2. Bevz, V. V. Rozvitok mehanizmu energozberezhennya na pidpriemstvah harchovoyi promislivosti / V. V. Bevz // Vcheni zapiski : zbirnik naukovih prats. – Kiyiv : KNEU, 2011. – # 13. – P. 169–173.
3. Energoefektivnist v agrobiznesi: vikliki maybutnogo i yak buti do nih gotovimi? <https://www.interagro.in.ua/enerhoefektyvnist-v-agrobiznesi-vyklyky-maybutn-oho-i-iak-butiy-do-nykh-hotovymy/> 26–29 zhovtnya na AgroEnergyDAY 2020, m. Kiyiv.
4. Tehnologiya spirtu / Pid red. prof. V.O. Marinchenka. – VInnitsya: „Podillya-2000”, 2003.– 496 p.
5. Linnhoff B. and Vredeveld D.R. Pinch Technology Has Come Of Age. Chemical Engineering Progress, 1984, vol. 80, no. 7, pp. 33–40.
6. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M. Osnovy integratsii teplovyih protsessov.– Harkov, NTU «HPI», 2000.– 456 p.
7. Meshalkin V.P, Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. Osnovy teorii resursoberegayuschih integrirovanyih himiko-tehnologicheskikh sistem. – Harkov: NTU "HPI", 2006. – 412 p.
8. Song C., Qiu Y., Liu Q., Ji N., Zhao Y., Kitamura Y., Hou X. Process intensification of cellulosic ethanol production by waste heat integration. Chemical Engineering Research and Design, 2018, vol. 132, pp. 115–122. doi: 10.1016/j.cherd.2018.01.016.
9. Ulyev L., Vasiliev M., Boldyryev S. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. Journal of Environmental Management, 2018, vol. 222, pp. 454–464. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.05.062.
10. Boldyryev S., Krajačić G., Duić N. Cost Effective Heat Exchangers Network of Total Site Heat Integration. Chemical Engineering Transaction, 2016, vol. 52, pp. 541–546. doi: 10.3303/CET1652091.
11. Pan M., Bulatov I., Smith R. Improving heat recovery in retrofitting heat exchanger networks with heat transfer intensification, pressure drop constraint and fouling mitigation. Applied Energy, 2016, vol. 161, pp. 611–626. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.073.
12. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. Platinchatyie teploobmenniki v promyshlennosti. – Harkov: NTU «HPI», 2004 . – 232 p.

УДК 66.048.05:665.6

Л. А. Гарев, аспирант, І. Б. Рябова, к. техн. н., доцент

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСАХ
ВИРОБНИЦТВА РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ**

Традиційно в Україні виробляється багато етилового спирту для потреб харчової, фармацевтичної, паливної галузей. Україна має суттєву сировинну базу для виробництва етилового спирту, що робить цю галузь однією з перспективних для економіки країни. Зниження собівартості продукції є необхідною умовою здорової конкуренції виробників етанолу на внутрішньому та зовнішньому ринках. Наданням поштовху для розвинення

означеної галузі зниження питомих витрат енергії на виробництво шляхом енергоефективної модернізації підприємств, що виробляють етанол.

На сьогодні одним з методів зменшення питомих витрат енергії на виробництво етилового спирту є метод інтеграції теплових потоків, що базується на пінч-аналізі і не потребує тотальної реконструкції виробництва.

Отримання даних технологічних потоків було здійснено на основі регламентної документації апаратурно-технологічної схеми установки централізованої розгонки головної фракції етилового спирту (ГФЕС) та звіту з енергоаудиту даної установки, який був здійснений на одному з спиртових підприємств України.

Для теплової інтеграції існуючого процесу, було обрано чотири колони установки централізованої розгонки етилового спирту: бражну та епюраційну, ректифікаційну та метанольну. Були розраховані тепловий та матеріальний баланси цих колон установки.

Для максимальної реалізації енергетичного потенціалу технологічних потоків, були використані принципи пінч-проекування та спроектовано сіткову діаграму.

Для оптимізації рекуперації теплової енергії було обрано $\Delta T_{\min} = 10$ °C. Це призвело до необхідності використання енергоефективного теплообмінного обладнання (пластинчатих теплообмінних апаратів). Суттєве зменшення використання зовнішніх утиліт (холодних на 17,2 % та гарячих – на 12,8 %) для обраних технологічних потоків та невеликий термін окупності проекту (близько шести місяців) робить доцільним використання такого роду рішення проблеми.

Ключові слова: тепла інтеграція, ректифікаційна колона, мережа рекуперативних теплообмінників, енергоефективність, виробництво етилового спирту.

Л. А. Гарев, И. Б. Рябова

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА РЕКТИФИЦИРОВАННОГО ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Традиционно в Украине производится много этилового спирта для нужд пищевой, фармацевтической, топливной отраслей. Украина имеет существенную сырьевую базу для производства этилового спирта, что делает отрасль одной из перспективных для экономики страны. Снижение себестоимости продукции является необходимым условием здоровой конкуренции производителей этанола на внутреннем и внешнем рынках. Предоставлением толчка для развития указанной отрасли снижение удельных затрат энергии на производство путем энергоэффективной модернизации уже существующих предприятий.

На сегодняшний день одним из методов уменьшения удельных затрат энергии на производство этилового спирта является метод интеграции тепловых потоков, базирующийся на пинч-анализе и не требующий тотальной реконструкции производства.

Получение данных технологических потоков было осуществлено на основе регламентной документации апаратурно-технологической схемы установки централизованной разгонки главной фракции этилового спирта (ГФЭС) и отчета по энергоаудиту данной установки, осуществленного на одном из спиртных предприятий Украины.

Для тепловой интеграции существующего процесса были выбраны четыре колонны установки централизованной разгонки этилового спирта: бражную и эпюрационную, ректификационную и метанольную. Были рассчитаны тепловой и материальный баланс этих колонн установки.

Для максимальной реализации энергетического потенциала технологических потоков были использованы принципы пинч-проектирования и спроектирована сетевая диаграмма.

Для оптимизации рекуперации тепловой энергии было выбрано $\Delta T_{\min} = 10$ °C. Это привело к необходимости использования энергоэффективного теплообменного оборудования. Существенное уменьшение использования внешних утилит (холодных на 17,2 % и горячих – на 12,8 %) для выбранных технологических потоков и небольшой срок окупаемости проекта (около шести месяцев) делает целесообразным использование такого рода решения проблемы.

Ключевые слова: тепловая интеграция, ректификационная колонна, сеть рекуперативных теплообменников, энергоэффективность, производство этилового спирта.

L. A. Hariiev, I. B. Riabova

INTENSIFICATION OF RECOVERY HEAT EXCHANGE IN RECTIFIED ETHYL ALCOHOL PRODUCTION PROCESSES

Traditionally, a lot of ethyl alcohol is produced in Ukraine for the needs of the food, pharmaceutical, and fuel industries. Ukraine has a significant raw material base for the production of ethyl alcohol, which makes this industry one of the most promising for the country's economy. A reduction in the cost of production is a necessary condition for healthy competition of ethanol producers on the domestic and foreign markets. Providing an impetus for the development of the specified industry is the reduction of specific energy costs for production through energy-efficient modernization of existing enterprises.

Today, one of the methods of reducing the specific energy consumption for the production of ethyl alcohol is the method of integration of heat flows, which is based on pinch analysis and does not require a total reconstruction of the production.

Obtaining data on technological flows was carried out on the basis of the regulatory documentation of the equipment and technological scheme of the installation of the centralized distillation of the main fraction of ethyl alcohol and the report on the energy audit of this installation, which was carried out at one of the alcohol enterprises of Ukraine.

For the thermal integration of the existing process, four columns of the centralized ethanol distillation unit were chosen: fermentation and purification, rectification and methanol. The thermal and material balances of these columns of the installation were calculated.

To maximize the energy potential of technological flows, the principles of pinch design were used and a grid diagram was designed.

To optimize heat energy recovery, $\Delta T_{\min} = 10$ °C was chosen. This led to the need to use energy-efficient heat exchange equipment. A significant reduction in the use of external utilities (cold by 17.2 % and hot by 12.8 %) for the selected technological flows and the short payback period of the project (about six months) make it reasonable to use this kind of solution to the problem.

Keywords: heat integration, distillation column, network of recuperative heat exchangers, energy efficiency, ethyl alcohol production.

І. М. Рищенко, д. техн. н., професор, С. М. Биканов, к. техн. н., доцент,
К. О. Горбунов, к. техн. н., доцент, А. М. Миронов, к. техн. н., доцент,
М. В. Ільченко, к. техн. н., доцент

КОМПЛЕКСНА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Вступ. Процеси ректифікації широко використовуються в хімічній та нафтохімічній промисловості для розділення сумішей речовин. При здійсненні процесу початкову суміш нагрівають, в кубі колони відбувається процес випаровування, пари, що виходять із верху колони, підлягають конденсації, також необхідно охолоджувати отримані продукти. Таким чином, процес ректифікації потребує великих витрат гарячих та холодних утиліт. Отже, проблема зменшення енергетичних витрат в процесі ректифікації є актуальною задачею.

Однім із шляхів вирішення цієї задачі є проведення теплової інтеграції процесу ректифікації методом пінч-аналізу [1–3]. Цей метод спочатку застосовувався для нафтохімічних виробництв, де зосереджено багато ректифікаційних колон і теплообмінників. Наприклад, в роботі [4] розглянуто теплову інтеграцію на заводі первинної переробки нафти. Потім цей метод набув розповсюдження і в інших виробництвах. Наприклад, за допомогою пінч-аналізу проведено теплову інтеграцію на підприємствах харової промисловості, при виробництві цукру [5], здійснено теплову інтеграцію при випарюванні солей [6]. Проведення теплової інтеграції процесу ректифікації досліджувалось в різних роботах. Наприклад, в роботі [7] показано інтеграцію процесу ректифікаційної при виробництва етилового спирту. Комплексна теплова інтеграція процесу ректифікації суміші метанол-етанол досліджувалась в роботі [8]. Процес ректифікації суміші метанол-вода досліджувався в роботі [9]. Застосування термокомпресії та методів пінч-аналізу для проведення процесу ректифікації суміші вода-оцтова кислота показано в роботі [10]. Проведено теплову інтеграцію суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах в роботі [11].

Постановка задачі. Оскільки питання зменшення енерговитрат в процесі ректифікації є актуальною задачею, покажемо проведення комплексної теплової інтеграції при ректифікації суміш бензол-толуол. Для рішення задачі використаємо метод пінч-аналізу із застосуванням термокомпресії пара, який виходить із верху колони.

Основна частина. Продуктивність ректифікаційної установки безперервної дії дорівнює 11 т/год початкової суміші, її склад 52 % мас. бензолу, склад дистилляту та кубового залишку 96 % та 2,5 % мас. відповідно. За основу візьмемо принципову технологічну схему ректифікації. Для укладання таблиці основних технологічних потоків треба було визначити їх розрахункові характеристики. На основі матеріального та теплового балансу процесу ректифікації розраховано витрати потоків, їх температури, визначено їх теплоємності та теплове навантаження. В якості технологічних потоків, які підлягають тепловій інтеграції, було обрано три гарячих та два холодних потоки. Гарячі потоки це дистиллят, кубовий залишок та пар, що виходить із верху колони. Холодні потоки складають початкова суміш та куб колони. Потоків теплоємності (CP) та теплове навантаження (ентальпія) потоків (ΔH) розраховуємо за формулою [1]:

$$\Delta H = G \cdot c \cdot (T_s - T_T) = CP \cdot \Delta T.$$

В роботі [12] проведено теплову інтеграцію суміші бензол-толуол, але вона була зовнішньою, без використання термокомпресії. У деяких роботах [10, 13] вказувалось на можливість застосування термокомпресії в процесі ректифікації. Пари, що виходять із верху колони, стискаються в компресорі до тиску, який забезпечує достатнє підвищення температури пара для того, щоб його можна було використати для обігрівання куба колони. Було досліджено можливість застосування термокомпресії і в процесі ректифікації суміші бензол-толуол. Розраховано, що необхідний ступінь стискання парів в нашому випадку дорівнює трьом: $P_2/P_1 = 3$. Очікувана температура пара після стискання дорівнює близько 126 °С, температура його конденсації 121 °С. Така температура конденсації достатня, щоб забезпечити процес випаровування в кубі колони.

Отже, початкові дані для проведення комплексної теплової інтеграції: витрати, температури, потокові теплоємності та теплове навантаження основних технологічних потоків процесу ректифікації суміші бензол-толуол наведено в потоковій таблиці 1.

Таблиця 1 – Потоківі дані технологічної схеми процесу ректифікації бензол-толуол

№	Назва потоку	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_T, ^\circ\text{C}$	G, кг/с	CP, кВт/°C	$\Delta H (Q), \text{кВт}$
1	P	гор.	82	30	1,618	2,977	154,804
2	W	гор.	109	30	1,438	2,593	204,847
3	Пар G	гор.	126	121	5,112	373,493	1867,463
4	F	хол.	25	91	3,056	5,541	365,706
5	Куб	хол.	109	109	–	–	1867,463

Побудовано складові криві існуючого процесу (рис. 1), з яких видно, що для існуючого процесу рекуперація тепла відсутня. Необхідна кількість тепла гарячих утиліт для існуючої схеми (з можливою термокомпресією) складає $Q_H=2233,16 \text{ кВт}$, холодних $Q_C=2227,11 \text{ кВт}$.

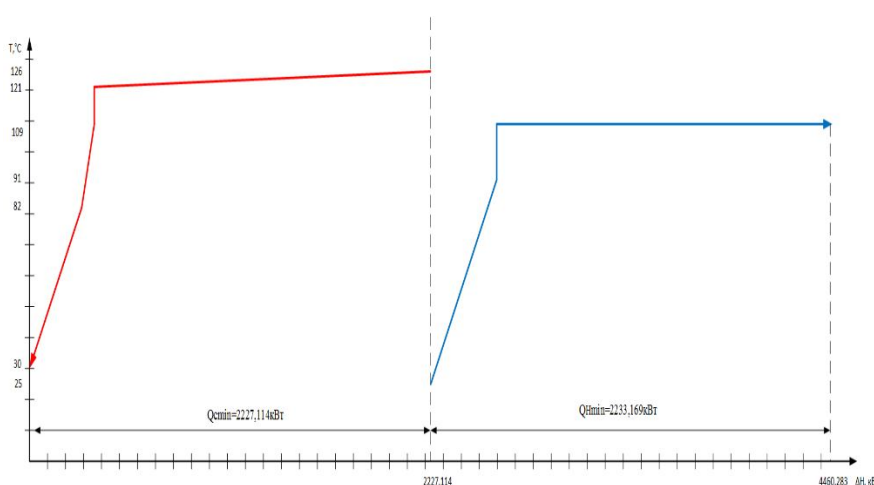


Рисунок 1 – Складові криві існуючого процесу

Надалі, на основі техніко-економічних міркувань, задаємо мінімальну різницю температур, яка для існуючого процесу складає 12 градусів: $\Delta T_{\min} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$. Зрушуємо складові криві уздовж ентальпійної осі і отримуємо розташування складових кривих для заданої мінімальної різниці температур $\Delta T_{\min} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2).

Перекриття кривих вказує на можливість отримати рекуперацію тепла у кількості $Q_{\text{рек}}=2186,82 \text{ кВт}$ для процесу ректифікації суміші бензол-толуол із використанням термокомпресії. При цьому мінімальна кількість гарячих утиліт складає $Q_{\text{Нmin}}=46,35 \text{ кВт}$, холодних $Q_{\text{Сmin}}=40,29 \text{ кВт}$. Ці результати підтверджуються розрахунками за методом табличного алгоритму, за допомогою якого уточнено температури пінча гарячих і холодних потоків, які становлять $T_{\text{Нпінч}}=82 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Спінч}}=70 \text{ }^\circ\text{C}$.

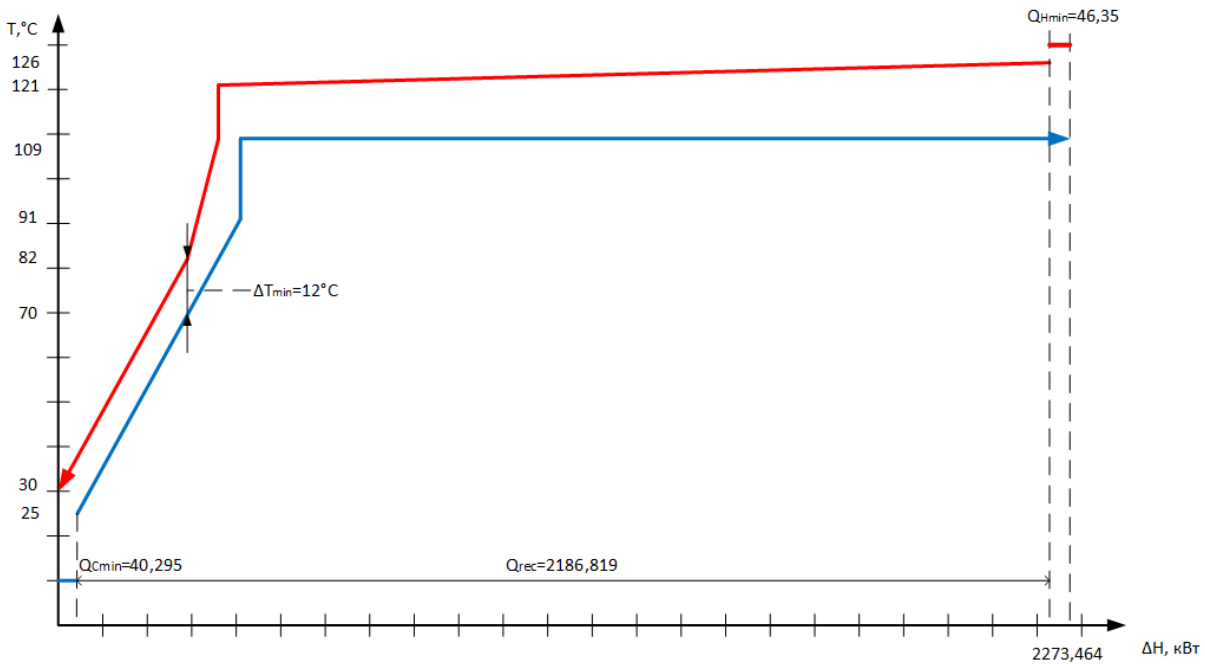


Рисунок 2 – Складові криві для $\Delta T_{\min} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$

На основі отриманих даних будуємо сіткову діаграму для розташування теплообмінників. Розташування здійснюємо згідно *CP* та *N* правилами. Згідно *CP* правилам, потік початкової суміші № 4 нижче пінча довелось розщепити на два потоки.

В результаті отримуємо чотири рекуперативних теплообмінників: РТ1, РТ2, РТ3, РТ4, один підігрівач Н (П) для нагрівання початкової суміші та два холодильники: для дистилляту С1 (Х1) і кубового залишку С2 (Х2) (рис.3). Рекуперативний теплообмінник РТ4 встановлюється в кубі колони, в нього подається пар із верху колони, який стискається компресором (термокомпресія). Інші рекуперативні теплообмінники РТ1, РТ2, РТ3 використовують тепло дистилляту та кубового залишку для підігріву початкової суміші. Розраховуємо поверхню теплообміну і запропонуємо для забезпечення рекуперації тепла пластинчасті теплообмінники фірми Alfa Laval.

Керуючись отриманою сітковою діаграмою, будуємо технологічну схему процесу ректифікації суміші бензол-толуол після реконструкції.

Як видно із схеми (рис. 4) пар, що виходить із верху колони, стискається в компресорі К. При цьому його тиск підвищується до трьох атмосфер, а його температура після стискування збільшується і становить близько $126 \text{ }^\circ\text{C}$ і він подається для обігрівання куба колони. Для забезпечення цього в кубі розташовано рекуперативний теплообмінник РТ4.

У ньому пар, згідно розрахунків, конденсується при температурі 121 °С, передаючи тепло конденсації для випаровування суміші, яка знаходиться в кубі колони. Після конденсації цей потік дроселюється, скидаючи тиск до атмосферного, потім сепарується у відстійнику Е1. Несконденсований пар направляється на рецикл, а рідина насосом перекачується у розподільвач Р1, де розділяється на дистиллят і флегму. Для забезпечення процесу термокомпресії, згідно розрахунків, може бути застосовано компресор, який забезпечує ступень стискання, що дорівнює трьом, наприклад, гвинтовий компресор МУСОМ STM510L потужністю 315 кВт.

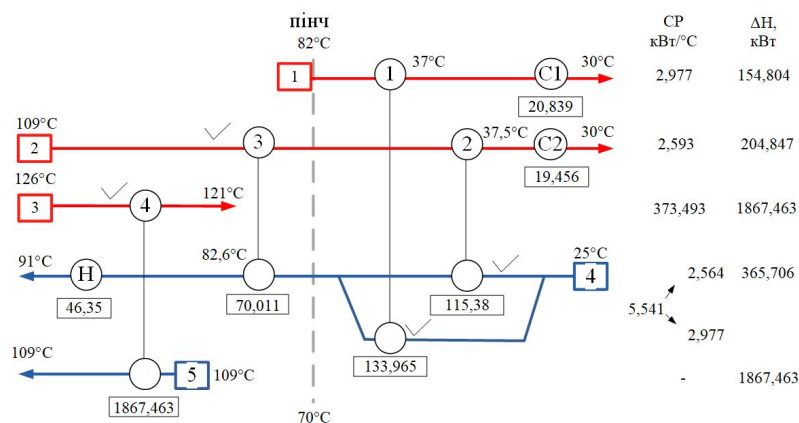


Рисунок 3 – Сіткова діаграма процесу ректифікації суміші бензол-толуол після реконструкції із використанням термокомпресії

Потік початкової суміші для забезпечення його нагрівання перед подачею у колону, спочатку розділяється на два потоки у розподільвачі Р2 та підігрівається у рекуперативних теплообмінниках РТ1 і РТ2 завдяки теплу дистилляту та кубового залишку. Потім два потоки об'єднуються і поступають у рекуперативний теплообмінник РТ3, де додатково підігріваються до 83 °С теплом потоку кубового залишку. Остаточне нагрівання потоку початкової суміші здійснюється у підігрівачі Н (П), де він підігрівається до цільової температури 91 °С, з якою він надходить до колони.

Холодильники С1 (Х1) та С2 (Х2) забезпечують охолодження дистилляту та кубового залишку до цільової кінцевої температури 30 °С.

Для реалізації подібної схеми було підібрано пластинчаті теплообмінники фірми Alfa Laval: чотири рекуперативних РТ1-РТ4, холодильники С1 (Х1), С2 (Х2) і підігрівач Н (П).

Висновки. Проведено комплексну теплову інтеграцію процесу ректифікації суміші бензол-толуол із застосуванням методу пінч-аналізу та використанням термокомпресії. Побудовано складові криві існуючого процесу та після реконструкції для мінімальної різниці температур $\Delta T_{\min} = 12^\circ\text{C}$. Для цієї мінімальної різниці температур було отримано мінімальні цільові значення гарячих та холодних утиліт, які склали $Q_{H\min}=46,35$ кВт та $Q_{C\min}=40,29$ кВт відповідно. У порівнянні із принциповою технологічною схемою процесу ректифікації значення гарячих та холодних утиліт становило $Q_H=2233,16$ кВт та $Q_C=2227,11$ кВт, що вказує на суттєве зменшення їх кількості. Зменшення споживання утиліт забезпечено рекуперацією тепла завдяки встановленню чотирьох рекуперативних теплообмінників та застосуванням термокомпресії. Компресор для забезпечення процесу потребує потужності 315 кВт. Побудовано сіткову діаграму, розташовано теплообмінники і отримано технологічну схему процесу ректифікації суміші

бензол-толуол після реконструкції. З урахуванням вартості теплообмінників, компресору, іншого обладнання та затрат на автоматизацію, строк окупності складає приблизно від двох до двох с половиною років.

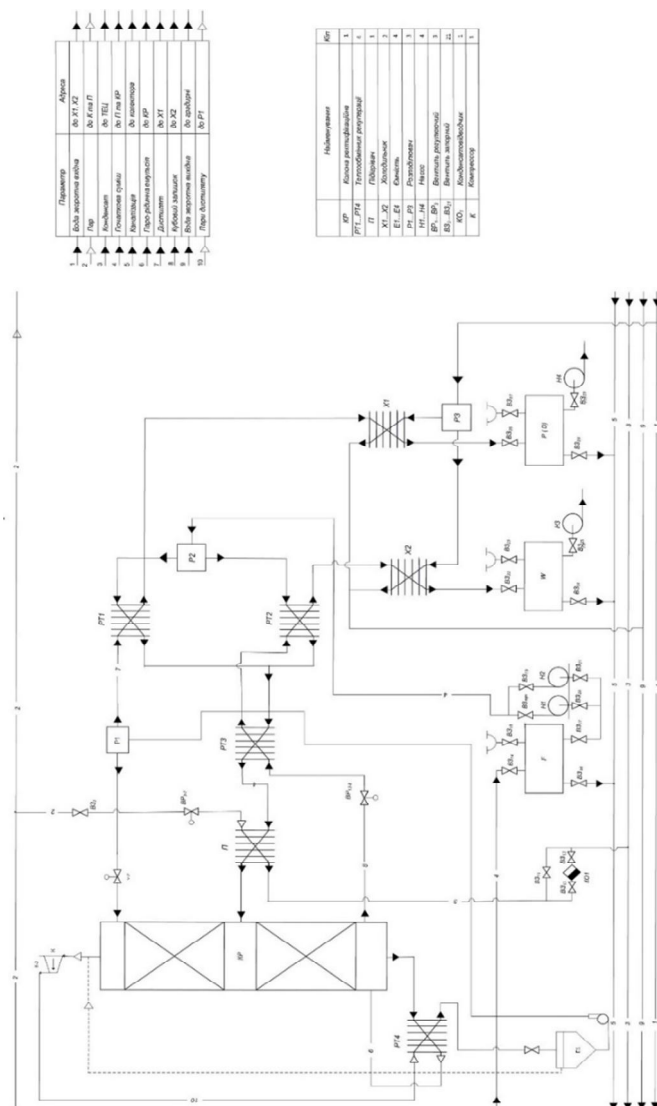


Рисунок 4 – Технологічна схема процесу ректифікації суміші бензол-толуол після реконструкції із використанням термокомпресії

Література

1. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульєв Л.М. Основи інтеграції теплових процесів.– Харків: НТУ «ХПІ». 2000.–456 с.
2. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.
3. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.
4. Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульєв Л.М., Болдирев С.О., Арсеньєва О.П., Тарновський М.В. Інтеграція теплових процесів на установці первинної переробки

нафти АВТ А 12/2 при роботі у зимовий час. // Теоретичні основи хімічної технології. – 2009.–Т.43.–№6.–С. 665–676.

5. Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульєв Л.М., Болдирєв С.О. Покращення теплової інтеграції на цукрових заводах. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2002. – №2. – С. 11–16.

6. Биканов С.М., Бабак Т.Г., Данилов Ю.Б., Биканова В.В. Застосування методу пінч-аналізу при проведенні теплової інтеграції процесу випарювання хлориду магнію. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2020. – №1. – С. 13–21.

7. Рябова. І.Б., Гарєв А.О., Граєв Л.А., Горбунов К.О. Інтеграція технологічних потоків бражної та епюраційної колони в процесі виробництва ректифікованого етилового спирту. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2021. – №2. – С. 30–40.

8. Биканов С.М., Перевертайленко О.Ю., Гарєв А.О., Горбунов К.О., Рябова І.Б., Гапонова О.О., Кармазіна Ю.А. Дослідження доцільності використання механічної рекомпресії при комплексної теплової інтеграції ректифікаційних колон // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) – Одеса: 2013 – Вип. 43. – Том 1. – 209 с. – С. 127–131.

9. Комплексна тепла інтеграція процесу ректифікації із використанням термокомпресії. // Биканов С.М., Бабак Т.Г., Горбунов К.О., Рищенко І.М. Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків. – НТУ «ХПІ». – 2022. – №3. – С. 12–21.

10. Використання енергетичного потенціалу процесу ректифікації суміші вода-оцтова кислота. // Рябова І.Б., Селіхов Ю.А., Коцаренко В.О., Горбунов К.О., Бабак Т.Г. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) – Одеса: 2016 – Вип. 1. – Том 80. – С. 113–117.

11. Бабак Т.Г., Биканов С.М., Горбунов К.О., Пономаренко Є.Д., Соловей Л.В. / Теплова інтеграція потоків процесу розділення гетероазетропної суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах. // Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – С. 3–13.

12. Чернишов І.С., Бабак Т.Г., Фесенко Е.О., Топунова Т.В. Енергоефективна інтеграція теплової схеми при ректифікації суміші бензол-толуол. // Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 1. – С. 9–18.

13. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Компенсуючий тепловий насос в процесах хімічної технології. Хімічна промисловість. – 2000. – №9. – с. 454.

Bibliography (transliterated)

1. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulev L.M. Osnovi Integratsiyi teplovih protsesiv.– Harkiv: NTU «HPI». 2000.–456 p.

2. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.

3. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.

4. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulev L.M., Boldirev S.O., Arseneva O.P., Tarnovskiy M.V. Integratsiya teplovih protsesiv na ustanovtsi pervinnoyi pererobki nafti AVT A 12/2 pri roboti u zimoviy chas. // Teoretichni osnovi himichnoyi tehnologiyi. – 2009.–Т.43.–#6.–Р. 665–676.

5. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulev L.M., Boldirev S.O. Pokraschennya teplovoyi Integratsiyi na tsukrovih zavodah. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv – NTU «HPI». – 2002. – #2. – P. 11–16.

6. Bikanov S.M., Babak T.G., Danilov Yu.B., Bikanova V.V. Zastosuvannya metodu pinch-analizu pri provedenni teplovoyi Integratsiyi protsesu viparyuvannya hloridu magniyu. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv – NTU «HPI». – 2020. – #1. – P. 13–21.

7. Ryabova. I.B., Garev A.O., Graev L.A., Gorbunov K.O. Integratsiya tehnologichnih potokiv brazhnoyi ta epyuratsiynoyi koloni v protsesi virobnitstva rektifikovanogo etilovogo spirtu. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv – NTU «HPI». – 2021. – #2. – P. 30–40.

8. Bikanov S.M., Perevertaylenko O.Yu., Garev A.O., Gorbunov K.O., Ryabova I.B., Gaponova O.O., Karmazina Yu.A. Doslidzhennya dotsilnosti vikoristannya mehanichnoyi re-kompresiyi pri kompleksnoyi teplovoyi Integratsiyi rektifikatsiynih kolon // Naukovi pratsi Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy (ONAHT) – Odessa: 2013 – Vip. 43. – Tom 1. – P. 127–131.

9. Kompleksna teplova integratsiya protsesu rektifikatsiyi iz vikoristannyam termo-kompresiyi. // Bikanov S.M., Babak T.G., Gorbunov K.O., Ryshchenko I.M. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv. – NTU «HPI». – 2022. – #3. – P. 12–21.

10. Vikoristannya energetichnogo potentsialu protsesu rektifikatsiyi sumishi voda-otstova kislota. // Ryabova I.B., Sellhov Yu.A., Kotsarenko V.O., Gorbunov K.O., Babak T.G. // Naukovi pratsi Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy (ONAHT) – Odessa: 2016 – Vip. 1. – Tom 80. – P. 113–117.

11. Babak T.G., Bikanov S.M., Gorbunov K.O., Ponomarenko E.D., Solovey L.V. / Teplova integratsiya potokiv protsesu rozdilennya geteroazeotropnoyi sumishi furfuro-l-voda na dvoh vidginnih kolonah. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya / Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv : NTU «HPI», 2023. – # 1. – P. 3–13.

12. Chernishov I.S., Babak T.G., Fesenko E.O., Topunova T.V. Energoefektivna integratsiya teplovoyi shemi pri rektifikatsiyi sumishi benzol-toluol. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya / Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv : NTU «HPI», 2009. – # 1. – P. 9–18.

13. Aynshteyn V.G., Zaharov M.K., Nosov G.A. Kompensuyuchiy teploviy nasos v protsesah himichnoyi tehnologiyi. Himichna promislovist. – 2000. – #9. – p. 454.

УДК 66.045.53

І. М. Рищенко, д. техн. н., професор, С. М. Биканов, к. техн. н., доцент,
К. О. Горбунов, к. техн. н., доцент, А. М. Миронов, к. техн. н., доцент,
М. В. Ільченко, к. техн. н., доцент

КОМПЛЕКСНА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Здійснено комплексну теплову інтеграцію процесу ректифікації суміші бензол-толуол. Теплова інтеграція проводилась за допомогою методів пінч-аналізу та із застосуванням термокомпресії. За основу взята принципова технологічна схема ректифікації

суміші бензол-толуол продуктивністю 11 т/год. Для даної продуктивності на основі матеріального та теплового балансу розраховано витрати потоків, їх температури, теплове навантаження, потокові теплоємності. На основі розрахованих даних сформовано поточкову таблицю. Для інтеграції обрано три гарячих потоки: дистиллят, кубовий залишок та пар з верху колони, та два холодних потоки: початкова суміш та куб колони. Для здійснення термокомпресії розраховано необхідний ступень стиску парів. Для визначеного ступеня стискання розраховано температуру пара після стиску та температуру його конденсації. На основі техніко-економічних міркувань для даної технологічної схеми процесу ректифікації визначено мінімальну різницю температур $\Delta T_{\min}=12$ °С. Для обраної ΔT_{\min} побудовано складові криві потоків. За допомогою метода табличного алгоритму визначено температуру пінча для гарячих і холодних потоків, які становлять $T_{\text{Нпінч}}=82$ °С, $T_{\text{Спінч}}=70$ °С. Визначено мінімальну кількість гарячих і холодних утиліт: $Q_{\text{Нмін}}$ та $Q_{\text{Смін}}$. Для обраного ΔT_{\min} отримано рекуперацію тепла у кількості $Q_{\text{рек}}=2186,82$ кВт. Побудовано сіткову діаграму, розташовано теплообмінники у відповідності із CP та N правилами. Запропоновано технологічну схему процесу ректифікації після реконструкції із використанням термокомпресії. Модернізована схема включає використання чотирьох рекуперативних теплообмінників, одного підігрівача та двох холодильників для досягнення цільових температур потоків. Для здійснення термокомпресії пропонується встановити компресор. В якості теплообмінного обладнання запропоновано використання пластинчатих теплообмінників фірми Alfa Laval. Строк окупності запропонованого рішення складає приблизно два–два з половиною роки.

Ключові слова: тепла інтеграція, пінч-аналіз, гарячі та холодні утиліти, складові криві, сіткова діаграма, рекуперація, ректифікація, бензол, толуол, термокомпресія.

И. М. Рыщенко, д. техн. н., профессор, С. Н. Быканов, к. техн. н., доцент,
К. А. Горбунов, к. техн. н., доцент, А. Н. Миронов, к. техн. н., доцент,
М. В. Ильченко, к. техн. н., доцент

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Осуществлена комплексная тепловая интеграция процесса ректификации смеси бензол-толуол. Тепловая интеграция проводилась с помощью методов пинч-анализа и с применением термокомпрессии. За основу взята принципиальная технологическая схема ректификации смеси бензол-толуол производительностью 11 т/ч. Для данной производительности на основе материального и теплового баланса рассчитаны расходы потоков, их температуры, тепловая нагрузка, поточные теплоемкости. На основе рассчитанных данных сформирована поточная таблица. Для интеграции выбрано три горячих потока: дистиллят, кубовый остаток и пар из верхней части колонны, и два холодных потока: начальная смесь и куб колонны. Для осуществления термокомпрессии рассчитана необходимая степень сжатия паров. Для определенной степени сжатия рассчитана температура пара после сжатия и температура его конденсации. На основе технико-экономических соображений для данной технологической схемы процесса ректификации определена минимальная разница температур $\Delta T_{\min}=12$ °С. Для выбранной ΔT_{\min} построены составляющие кривые потоков. С помощью метода табличного алгоритма определена температура печная для горячих и холодных потоков, составляющих $T_{\text{Нпінч}}=82$ °С, $T_{\text{Спінч}}=70$ °С. Определено минимальное количество горячих и холодных утилит: $Q_{\text{Нмін}}$ и $Q_{\text{Смін}}$. Для выбранного ΔT_{\min} получена рекуперация тепла в количестве $Q_{\text{рек}}=2186,82$ кВт.

Построена сетевая диаграмма, расположены теплообменники в соответствии с *CP* и *N* правилами. Предложена технологическая схема процесса ректификации после реконструкции с использованием термокомпрессии. Модернизированная схема включает в себя использование четырех рекуперативных теплообменников, одного подогревателя и двух холодильников для достижения целевых температур потоков. Для осуществления термокомпрессии предлагается установить компрессор. В качестве теплообменного оборудования предложено использование пластинчатых теплообменников фирмы Alfa Laval.

Срок окупаемости предлагаемого решения составляет примерно два-два с половиной года.

Ключевые слова: тепловая интеграция, пинч-анализ, горячие и холодные утилиты, составные кривые, сетевая диаграмма, рекуперация, ректификация, бензол, толуол, термокомпрессия.

I. M. Ryshchenko, S. M. Vykanov, K. O. Gorbunov, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko

COMPLEX THERMAL INTEGRATION OF THE RECTIFICATION PROCESS OF THE BENZENE-TOLUENE MIXTURE

Comprehensive thermal integration of the benzene-toluene mixture rectification process was carried out. Thermal integration was carried out using pinch analysis methods with using thermocompression. The principle technological scheme of rectification of the benzene-toluene mixture with a productivity of 11 t/h is taken as a basis. For this performance, the consumption of flows, their temperatures, heat load, and flow heat capacities are calculated on the basis of the material and heat balance. Based on the calculated data, a flow table was created. Three hot streams are selected for integration: the distillate, the tailings, and the vapor from the top of the column, and two cold streams: the initial mixture and the column cube. The necessary degree of vapor compression is calculated for thermocompression. For a given degree of compression, the temperature of the steam after compression and the temperature of its condensation were calculated. Based on the technical and economic considerations, the minimum temperature difference $\Delta T_{\min}=12$ °C was determined for this technological scheme of the rectification process. For the selected ΔT_{\min} , the component curves of the flows are constructed. Using the table algorithm method, the temperatures of the furnace for hot and cold flows were determined, which are $T_{H\text{pinh}}=82$ °C, $T_{C\text{pinh}}=70$ °C. The minimum number of hot and cold utilities is determined: $Q_{H\min}$ and $Q_{C\min}$. For the selected ΔT_{\min} , heat recovery was obtained in the amount of $Q_{\text{rek}}=2186,82$ kW. A grid diagram is constructed, heat exchangers are located in accordance with *CP* and *N* rules. A technological scheme of the rectification process after reconstruction using thermocompression is proposed. The upgraded scheme includes the use of four recuperative heat exchangers, one heater and two coolers to achieve target flow temperatures. It is recommended to install a compressor for thermocompression. The use of Alfa Laval plate heat exchangers is proposed as heat exchange equipment. The payback period of the proposed solution is approximately two to two and a half years.

Keywords: heat integration, pinch analysis, hot and cold utilities, composite curves, net diagram, recuperation, rectification, benzene, toluene, thermocompression.

О. М. Дзевочко, к. техн. н., доцент, М. О. Подустов, д. техн. н., професор,
А. І. Дзевочко, к. техн. н., В. О. Панасенко, д. техн. н., професор, А. І. Пашко, аспірант

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ВІД ДІОКСИДУ СІРКИ У ВИРОБНИЦТВІ ПАР

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: поверхнево активна речовина, математична модель, газоповітряний потік, діоксид сірки, процес очищення, насадковий абсорбер.

Вступ. Виробництво поверхнево-активних речовин (ПАР) складається з наступних стадій: стадія отримання сульфатуючого агенту, стадія сульфатування, стадія нейтралізації проміжних продуктів, стадія очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки [1]. Сульфатуючий агент отримують шляхом каталітичного окислення діоксиду сірки до триоксиду сірки. Ступінь окислення діоксиду сірки досягає на сучасних підприємствах до 98–99 %. Непрореагований SO_2 перед викидом в атмосферу необхідно довести до показників які дозволяють викид в атмосферу.

Процес очищення проводять в насадкових абсорберах. В якості насадки можна використати рекомендації наведені в роботах [2, 3]. Для проведення досліджень та розрахунку насадкового абсорбера необхідно мати математичну модель процесу очищення.

Аналіз літературних даних. Одним з найбільш масштабних забруднень атмосферного повітря є діоксид сірки: щорічно в Україні викидається в атмосферу близько 1 млн.т діоксиду сірки [4]. Незважаючи на вживані заходи, об'єм викидів діоксиду сірки за останні роки практично не змінюється. Діоксид сірки є основним джерелом шкідливих викидів в атмосферу у виробництві ПАР. Очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки проводиться за допомогою розчину гідроксиду натрію в насадковому абсорбері. Газорідинні операції широко використовуються в різних галузях промисловості для передачі маси, тепла та імпульсу між фазами [5]. Серед найбільш важливих газорідинних систем, що використовується в даний час є абсорбція, яка визначається як операція масообміну, під час якої один з компонентів, що міститься у газовій суміші розчинюється в рідинному розчиннику [6]. Ефективність видалення будь-якого процесу хімічної абсорбції буде залежати від фізико-хімічних властивостей фаз (густина, в'язкість) коефіцієнта дифузії, швидкості потоку газу та рідини, типу контактних пристроїв, температури та тиску, співвідношенню газ-рідина, часу контакту між фазами, концентрації шкідливого компонента в газоповітряній суміші, концентрація рідини, швидкості взаємодії між газом та рідиною.

Науково-технічний прогрес базується на тісному взаємозв'язку теорії й експерименту. Чим швидше розвивається теорія, тим швидше повинні розвиватися експериментальні методи. Роль експерименту підсилюється ще й тим, що він допомагає знайти найкращий підхід до аналітичного розв'язання. Основою для проведення експериментальних досліджень є процес моделювання [7]. Процес моделювання створює передумови для найбільш доцільного поєднання теорії й експерименту в наукових дослідженнях [8].

В літературі наведена значна кількість математичних моделей та проведено математичне моделювання в різних варіантах. Зокрема автори [9] провели математичне моделювання газоабсорбційної насадкової колони для системи вуглекислий газ – розчин

гідроксиду натрію. В роботі наведено, що конструкція хімічних реакторів базується на моделюванні реакторів і реакцій, які в них відбуваються. Математичне моделювання настільки важливе, що зараз воно використовується в комп'ютерному моделюванні.

Більшість реакцій, які використовуються в хімічній промисловості, включають речовини, які існують в різних фазах. Газорідинна абсорбція є гетерогенним процесом, який включає перенесення розчинного компонента газової фази у рідкий абсорбент. В роботі розроблена математична модель газорідинної абсорбції насадкової колони, що працює в безперервному режимі.

Автори [10] провели математичне моделювання процесу поглинання діоксиду сірки перекисом водню. Рівняння моделі розроблено з урахування матеріального балансу в колоні. Швидкість поглинання визначалася за допомогою різної концентрації діоксиду сірки. Наведено, що діоксид сірки є відповідальним за утворення кислотних дощів, які є однією з поширених форм забруднення в усьому світі, що завдає шкоди людині та навколишньому середовищу.

В дослідженні [11] наводяться дані процесу поглинання газу NO_x за допомогою розчину перекису водню. Математичне моделювання проводили для абсорбера з насадковим матеріалом Intalox. Наведено, що поглинання з хімічною реакцією передбачає видалення домішок з газової фази та розчинення їх у рідкій фазі шляхом проведення хімічної реакції між ними. Процес абсорбції описується математичною моделлю, заснованою на двофазовій теорії газорідинної абсорбції.

Автори [12] провели математичне моделювання процесу поглинання етанолу з газоподібної суміші з використанням води як розчинника. Наведено, що підхід до проектування насадкового абсорбера зазвичай включає визначення геометричних параметрів, таких як діаметр абсорбера, висота насадки, а також коефіцієнти масообміну для газу та потоку рідини, сухі і загальні перепади тиску, загальний коефіцієнт масопередачі. В роботі звернена увага, що використання методів імітації та математичного моделювання для проектування або оптимізації абсорберів досягло за останні роки безпрецедентного рівня. Серед найбільш розроблених і поширених комп'ютерних програм, які використовуються сьогодні, є програмне забезпечення MATLAB. В роботі з використанням програмного забезпечення MATLAB проведені широкі дослідження для чотирьох різних насадок.

В літературі за останні роки мало наведено результатів математичного моделювання процесу очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки. Тому є необхідність розробити математичну модель даного процесу, провести дослідження процесу з використанням математичної моделі та навести розрахунки промислового насадкового абсорбера для очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки. Це дасть можливість довести концентрацію SO_2 у газоповітряному потоці на виході абсорбера до гранично-допустимої концентрації.

Основна частина. Типовий насадковий абсорбер складається з вертикальної циліндричної оболонки, що містить опорну пластину для насадкового матеріалу, пристрій для розподілу рідини, призначений для забезпечення ефективного зрошення насадки. Рідина подається у верхній частині абсорбера та стікає вниз через насадку, відкриваючи велику поверхню для контакту з газоповітряним потоком, який подається в нижній частині абсорбера.

На рис. 1 неведена принципова схема насадкового абсорбера.

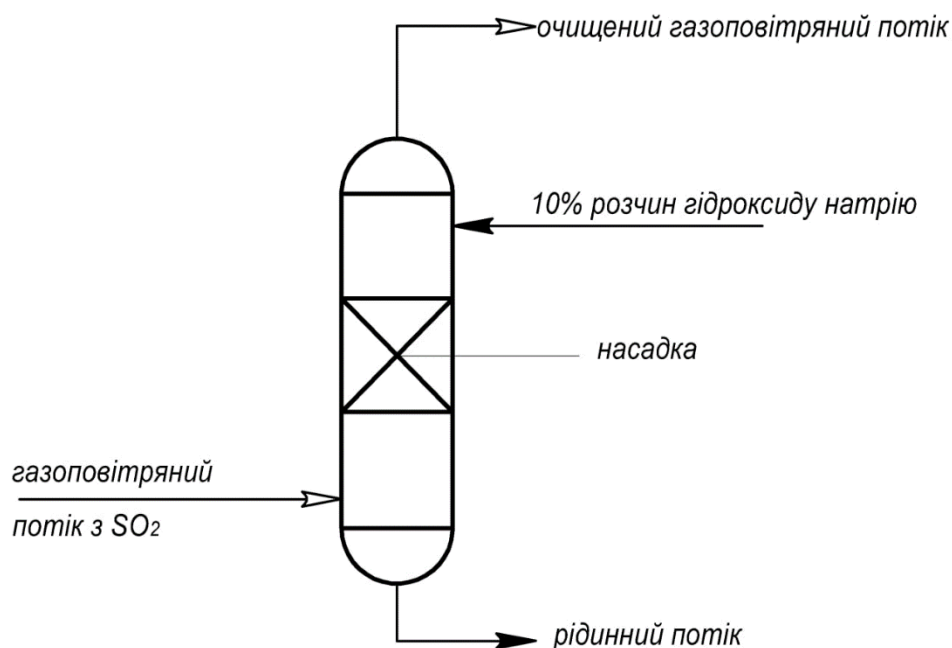
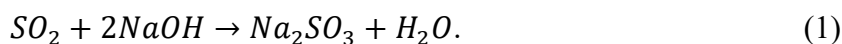


Рисунок 1 – Принципова схема насадкового абсорбера

З рис. 1 видно, що газоповітряний потік з вмістом SO_2 подається знизу абсорбера, а абсорбент у вигляді розчину гідроксиду натрію подається зверху абсорбера.

В процесі абсорбції діоксиду сірки розчином гідроксиду натрію крім фізичної абсорбції проходить хімічна реакція



Взаємодія SO_2 з $NaOH$ можна віднести до швидких реакцій.

Загальна схема розрахунку насадкового абсорбера наведено на рис. 2.

Математичний аналіз процесу завжди базується на матеріальному балансі.

З урахуванням хемосорбційного характеру абсорбції рівняння матеріального балансу має вид:

$$G(y_1 - y_2) = L(C_{HA} - C_{KA}) + L/u(x_1 - x_2), \quad (2)$$

де G – мольна витрата газоповітряного потоку, кмоль/с; L – мольна витрата розчину гідроксиду натрію, кмоль/с; y_1 – концентрація діоксиду сірки в газоповітряному потоці на вході в абсорбер, мольні доли; y_2 – концентрація діоксиду сірки в газоповітряному потоці на виході з абсорбера, мольні доли; x_1 – концентрація діоксиду сірки в розчині гідроксиду натрію на вході в абсорбер, мольні доли; x_2 – концентрація діоксиду сірки в розчині гідроксиду натрію на виході з абсорбера, мольні доли; C_{KA} – кінцева концентрація гідроксиду натрію в абсорбенті, мольні доли; C_{HA} – початкова концентрація гідроксиду натрію в абсорбенті, мольні доли; u – число кмолей гідроксиду натрію на 1 кмоль розчиненого діоксиду сірки.



Рисунок 2 – Схема розрахунку насадкового абсорбера

Загальна витрата розчину гідроксиду натрію:

$$L = G \frac{y_1 - y_2}{(C_{HA} - C_{KA}) + \frac{1}{u}(x_1 - x_2)} \quad (3)$$

Розрахунок швидкості газоповітряного потоку та діаметра абсорберу розраховуються з рівняння

$$Re_{\Gamma} = \frac{4\omega \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma} \cdot f}, \quad (4)$$

де ω – швидкість газоповітряного потоку, м/с; ρ_{Γ} – щільність газоповітряного потоку, кг/м³; μ_{Γ} – в'язкість газоповітряного потоку, Па/с; f – питома поверхня насадки, м²/м³.

Звідси

$$\omega_{\Gamma} = \frac{Re_{\Gamma} \cdot \mu_{\Gamma} \cdot f}{4\rho_{\Gamma}} \quad (5)$$

Значення критерію Рейнольдса визначаємо

$$Re_{\Gamma} = 0,045 \cdot Ar^{0,57} \cdot \left(\frac{G}{L}\right)^{0,43}, \quad (6)$$

де Ar – критерій Архімеда.
Критерій Архімеда

$$Ar = d_{\text{э}} \cdot \rho_{\Gamma} (\rho_{\text{р}} - \rho_{\Gamma}) / \mu_{\Gamma}^2, \quad (7)$$

де $d_{\text{э}}$ – еквівалентний діаметр насадки, м; $\rho_{\text{р}}$ – густина рідинної фази, кг/м³.

$$d_{\text{э}} = 4V_{\Gamma} / f, \quad (8)$$

де V_{Γ} – об'ємна витрата газоповітряного потоку, м³/с.

Розрахунок діаметра абсорбера.

Діаметр абсорбера D_a визначається в залежності від швидкості і витрати газоповітряного потоку в абсорбері [13]

$$D_a = \sqrt{4V_{\Gamma} / \pi \cdot \omega_{\Gamma}}. \quad (9)$$

За стандартом приймається діаметр абсорбера і коректується швидкість газоповітряного потоку. Щільність зрошування визначаємо

$$U = \frac{L}{(0,758 \cdot D_a^2 \cdot \rho_{\text{р}})}. \quad (10)$$

Розрахунок висоти насадки

Розрахунок висоти насадки потрібно проводити з урахуванням проходження хімічної реакції [14].

Вплив хімічної реакції на процес абсорбції будемо враховувати введенням коефіцієнта прискорення ζ

$$\zeta = \sqrt{1 + M_y^2}. \quad (11)$$

Враховуючи велику концентрацію активної частини розчину гідроксиду натрію і низьку концентрацію діоксиду сірки в газоповітряному потоці можна вважати, що реакція відбувається за псевдопершим порядком і тоді

$$M_y = \frac{1}{\beta_{\text{р}}} \cdot \sqrt{D_{\Gamma} \cdot K}, \quad (12)$$

де $\beta_{\text{р}}$ – коефіцієнт масовіддачі в рідинній фазі, м/с; D_{Γ} – коефіцієнт дифузії діоксиду сірки у повітрі, м²/с; K – константа швидкості реакції, с⁻¹.

Величину $\beta_{\text{р}}$ визначають з критеріального рівняння

$$Nu_{\text{р}} = 0,002 \cdot Re_{\text{р}}^{0,75} \cdot Pr_{\text{р}}^{0,5}, \quad (13)$$

де Nu_p – критерій Нуссельта для рідинної фази; Re_p – критерій Рейнольдса для рідинної фази; Pr_p – критерій Прандтля для рідинної фази.

Коефіцієнт дифузії визначаємо з рівняння

$$D_r = \frac{4,35 \cdot 10^{-2} \cdot T^{3/2}}{P(V_{SO_2}^{1/3} + V_{нов}^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_{SO_2}} + \frac{1}{M_{нов}}}, \quad (14)$$

де T – абсолютна температура, К; P – загальний тиск, Па; V_{SO_2} – мольний об'єм SO_2 , $см^3/моль$; $V_{нов}$ – мольний об'єм повітря, $м^3/моль$; M_{SO_2} – молекулярна маса діоксиду сірки; $M_{нов}$ – молекулярна маса повітря.

$V_{SO_2} = 44,8$; $V_{нов} = 29,9$.

Загальне число переносу визначають за рівнянням

$$N_{ог} = \frac{1}{1 - \frac{1}{A_\phi}} \cdot \ln \frac{1 - \frac{\zeta}{A_\phi}}{1 - \zeta}, \quad (15)$$

де A_ϕ – абсорбційний фактор.

$$A_\phi = \frac{L}{m}, \quad (16)$$

де m – коефіцієнт Генрі.

Висоту насадки абсорбера визначають за рівнянням

$$h = N_{ог} \cdot H_{ог}, \quad (17)$$

де $H_{ог}$ – висота одиниці переносу, м.

$$H_{ог} = \frac{G}{K'_V \cdot F}, \quad (18)$$

де K'_V – об'ємний коефіцієнт масопередачі з урахуванням хемосорбції, $кг/м^3 \cdot с \cdot Па$; F – площа перерізу абсорбера, м.

Об'ємний коефіцієнт масопередачі знаходять з рівняння

$$1/K'_V = 1/\beta_{ГV} + m/\beta'_{PV}, \quad (19)$$

де $\beta_{ГV}$ – об'ємний коефіцієнт масовіддачі в газоповітряному потоці, $кг/м^3 \cdot с \cdot Па$; β'_{PV} – об'ємний коефіцієнт масовіддачі в рідинній фазі з урахуванням хемосорбції, $кг/м^3 \cdot с \cdot Па$.

$$\beta'_{PV} = \zeta \cdot \beta_{PV}, \quad (20)$$

де β_{PV} – об'ємний коефіцієнт масовіддачі в рідинній фазі, $кг/м^3 \cdot с \cdot Па$.

Об'ємний коефіцієнт масовіддачі в газоповітряному потоці знаходимо з рівняння

$$\beta_{\Gamma V} = 1,305 \cdot 10^{-4} \cdot W_{\Gamma}^{-0,7} \cdot W_P^{-0,75}, \quad (21)$$

де W_{Γ} – масова швидкість газоповітряного потоку, кг/(м²·с); W_P – масова швидкість рідинної фази, кг/(м²·с).

Об’ємний коефіцієнт масовіддачі з рідинної фази знаходимо з рівняння

$$\beta_{PV} = 0,143 \cdot W_P^{-0,82}. \quad (22)$$

Гідравлічний опір насадкового абсорбера.

Гідравлічний опір сухої насадки знаходимо з рівняння

$$\Delta P_{\text{сух}} = \left(\frac{\lambda \cdot h}{d_{\text{э}}} \right) \cdot \left(\frac{W_{\Gamma}^2 \cdot \rho_{\Gamma}}{2} \right), \quad (23)$$

де λ – коефіцієнт опору.

$$\lambda = \frac{9,21}{Re_{\Gamma}^{0,375}}. \quad (24)$$

Гідравлічний опір зрошуваної насадки ΔP знаходимо з рівняння

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сух}} (1 + 0,04 \cdot U). \quad (25)$$

де U – щільність зрошування, м/с.

В подальшому планується з використанням забезпечення MATLAB виконати розрахунки для створення промислового насадкового абсорбера для очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки у виробництві ПАР.

Висновки

1. Наведено, що виробництво поверхнево-активних речовин складається з наступних стадій: отримання сульфатуючого агенту, сульфатування, нейтралізація, очищення газоповітряного потоку.

2. Наведено, що сульфатуючий агент отримують шляхом каталітичного окислення діоксиду сірки. Ступінь окислення 98–99 %.

3. Показано, що нейтралізуючий SO_2 необхідно подавати на стадію очищення.

4. Наведено, що діоксид сірки є одним з найбільш забруднювачем атмосферного повітря.

5. Показано, що очищення газоповітряного потоку від SO_2 проводиться розчином гідроксиду натрію.

6. Наведено, що газорідинні операції широко використовуються в різних галузях промисловості.

7. Показано, що серед найбільш важливих газорідинних систем є абсорбція, яка визначається як процес масообміну.

8. Наведено, що концентрація хімічних реакторів базується на моделюванні реакторів і реакцій.

9. Наведено математичну модель процесу очищення газоповітряного потоку від діоксиду сірки.

10. Проведення досліджень по математичній моделі дадуть можливість знайти оптимальні технологічні та конструктивні параметри насадкового абсорберу.

Література

1. Дзевочко О.М., Подустов М.О., Дзевочко А.І. Системний аналіз процесу сульфатування у виробництві поверхнево-активних речовин. Інтегровані технології та енергозбереження. Х. 2022. № 4. С. 23–38.

2. Дзевочко О.М., Подустов М.О. Нові гофровані насадкові елементи для використання в абсорбційних системах. Інтегровані технології та енергозбереження. Х. НТУ «ХП». 2018. № 3. С. 8–17.

3. Дзевочко О.М., Подустов М.О. Дослідження гофрованих насадочних елементів в процесах абсорбції відхідних газів виробництва ПАР. Інтегровані технології та енергозбереження. Х. НТУ «ХП». 2019. № 1. С. 33–41.

4. Подустов М.А., Тошинский В.И. Очистка газовоздушного потока от диоксида серы в производстве поверхностно-активных веществ. Інтегровані технології та енергозбереження. Х. НТУ «ХП». 2006. № 4. С. 64–68.

5. Бучинський А.К., Коваленко В.С. Основи технології та техніки абсорбційних процесів : Навч. посібн. Дніпропетровськ. УДХТУ. 2004. 155 с.

6. Топильницький П.І., Гринишин О.Б. Колонні апарати в нафтопереробці та нафтохімії : Навч. посібн. Львів : НУ «ЛП». 2004. 144 с.

7. Місюра Т.Г., Попова Н.В. Математичне моделювання та оптимізація об'єктів хімічної технології [Електронний ресурс] : Курс лекцій. К. : НУХТ. 2020. 234 с.

8. Кветний Р.Н, Богач І.В., Бойко О.Р., Софіна О.Ю., Шушура О.М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів : навч. посібн. Вінниця : ВНТУ. 2013. 191 с.

9. M.A. Olutoye and A. Mohammed. (2006). Modelling of a gas absorption packed column for carbon Dioxide-Sodium Hydroxide system. AU J.T.10(2): 132–140.

10. Priya V., Maheswari C., Krishnamyrthy K., Parameshwaran R. (2012). Modelling And Simulation of Gas Liquid Absorption Column for SO₂ Emission Control. Proceedings of National Conference on Frontiers in Applied Sciences and Computer Technology. Vol.2. PP. 10–15.

11. Maheswari C., Vinoth R., Kanimozhi I., Meenakshipriya B. (2015). Mathematical Modeling of Packed Column for NO_x Gas Removal using Hydrogen Peroxide Solution. International Science Prese. 8(3). PP. 915–921.

12. Perez Sanches A., Perez Sanches E., Segura Silva R. (2016). Design of a Packed-Bed Absorption Column Considering four Packing Types and Applying Matlab. Nexo Revista Cientifica. Vol. 29. No 2. PP. 83–104.

13. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ГОТЛІНСЬКА О.П., ЛЕЩЕНКО В.О. Процеси і апарати хімічної технології : Навч. посібн. Х. : НТУ «ХП». 2007. 540 с.

14. Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Ломейко О.П., Олексієнко В.О., Петриченко С.В., Пупинін А.А., Гавдида Г.І. Конструкції і розрахунки машин та апаратів переробних виробництв: Підручник. Мелітополь. 2021. 308 с.

Bibliography (transliterated)

1. Dzevochko O.M., Podustov M.O., Dzevochko A.I. Systemnyi analiz protsesu sulfatuvannia u vyrobnytstvi poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. Kh. 2022. № 4. P. 23–38.

2. Dzevochko O.M., Podustov M.O. Novi hofrovani nasadkovi elementy dlia vykorystannia v absorbttsiinykh systemakh. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. Kh. NTU «KhPI». 2018. № 3. P. 8–17.

3. Dzevochko O.M., Podustov M.O. Doslidzhennia hofrovanykh nasadochnykh elementiv v protsesakh absorbttsii vidkhidnykh haziv vyrobnytstva PAR. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. Kh. NTU «KhPI». 2019. № 1. P. 33–41.

4. Podustov M.A., Toshynskiy V.Y. Ochystka hazovozdushnoho potoka ot dyoksyda seru v proyzvodstve poverkhnostno-aktyvnykh veshchestv. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. Kh. NTU «KhPI». 2006. № 4. P. 64–68.

5. Buchynskiy A.K., Kovalenko V.S. Osnovy tekhnolohii ta tekhniky absorbttsiinykh protsesiv : Navch. posibn. Dnipropetrovsk. UDKhTU. 2004. 155 p.

6. Topylnytskyi P.I., Hrynyshyn O.B. Kolonni aparaty v naftererobtsi ta naftokhimiі : Navch. posibn. Lviv : NU «LP». 2004. 144 p.

7. Misiura T.H., Popova N.V. Matematychno modeliuвання ta optymizatsiia obektiv khimichnoi tekhnolohii [Elektronnyi resurs] : Kurs lektsii. K. : NUKhT. 2020. 234 p.

8. Kvietnyi R.N., Bohach I.V., Boiko O.R., Sofyna O.Iu., Shushura O.M. Kompiuterne modeliuвання system ta protsesiv : Navch.posibn. Vinnytsia : VNTU. 2013. 191 p.

9. M.A. Olutoye and A. Mohammed. (2006). Modelling of a gas absorption packed column for carbon Dioxide-Sodium Hydroxide system. AU J.T.10(2): 132–140.

10. Priya V., Maheswari C., Krishnamurthy K., Parameshwaran R. (2012). Modelling And Simulation of Gas Liquid Absorption Column for SO₂ Emission Control. Proceedings of National Conference on Frantiers in Applied Sciences and Computer Technology. Vol.2. PP. 10–15.

11. Maheswari C., Vinoth R., Kanimozhi I., Meenakshipriya B. (2015). Mathematical Modeling of Packed Column for NO_x Gas Removal using Hydrogen Peroxide Solution. International Science Prese. 8(3). PP. 915–921.

12. Perez Sanches A., Perez Sanches E., Segura Silva R. (2016). Design of a Packed-Bed Absorption Column Considering four Packing Types and Applying Matlab. Nexa Revista Cientifica. Vol. 29. No 2. PP. 83–104.

13. Tovazhnyansky L.L., Hotlinska O.P., Leshchenko V.O. Protsey i aparaty khimichnoi tekhnolohii : Navch. posibnyk. Kh. : NTU «KhPI». 2007. 540 p.

14. Boiko V.S., Samoichuk K.O., Tarasenko V.H., Lomeiko O.P., Oleksiienko V.O., Petrychenko S.V., Pupynin A.A., Havdyda H.I. Konstruktsii i rozrakhunky mashyn ta aparativ prerobnykh vyrobnytstv: Pidruchnyk. Melitopol. 2021. 308 p.

УДК 661.185 : 66.02

О. М. Дзевочко, к. техн. н., доцент, М. О. Подустов, д. техн. н., професор,
А. І. Дзевочко, к. техн. н., В. О. Панасенко, д. техн. н., професор, А. І. Пашко, аспірант

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ВІД ДІОКСИДУ СІРКИ У ВИРОБНИЦТВІ ПАР

Наведено стадії виробництва поверхнево-активних речовин: отримання сульфатуючого агенту, сульфатування, нейтралізація, очищення газоповітряного потоку.

Показано отримання сульфатуючого агенту шляхом каталітичного окислення двооксиду сірки. Ступінь окислення 98–99 %. Непрореагований SO₂ необхідно подати на стадію очищення.

Наведено дані найбільшого забруднювача атмосферного повітря, це двооксид сірки.

Показано використання газорідних операцій в різних галузях промисловості. Серед найбільш важливих газорідних систем є абсорбція, яка визначається як операція масообміну, під час якої один із компонентів, що міститься в газоповітряній суміші розчиняється в рідинному розчиннику.

Показано базування науково-технічного прогресу на тісному взаємозв'язку теорії й експерименту. Основою для проведення наукових досліджень є процес моделювання. Процес моделювання створює передумови для найбільш доцільного поєднання теорії й експерименту в наукових дослідженнях.

Наведено опис даних з літератури з математичним моделюванням насадкових абсорберів для різних систем газ – рідина.

Показано важливість математичного моделювання та його використання в комп'ютерному моделюванні.

Наведено дані про більшість реакцій в хімічній промисловості містять речовини, які існують в різних фазах.

Показано про відповідальність двооксиду сірки за утворення кислотних дощів, які є однією з поширених форм забруднення в усьому світі, що завдає шкоди людині та навколишньому середовищу.

Наведено, що підхід до проектування насадкового абсорберу зазвичай включає визначення геометричних параметрів, таких як діаметр абсорберу, висота насадки, а також коефіцієнт масообміну для газу і потоку рідини, сухі і загальні перепади тиску, загальний коефіцієнт масопередачі.

Показано, що використання методів імітації та математичного моделювання для проектування або оптимізації абсорберів постійно розвивається. Найбільш розроблених і поширених комп'ютерних програм є програмне забезпечення MATLAB.

Наведено опис типового насадкового абсорберу, який складається з вертикальної циліндричної оболонки, що містить опорну пластину для насадкового матеріалу, пристрій для розподілу рідини. Рідина подається у верхній частині абсорберу та стікає через насадку. Газоповітряний потік подається в нижній частині абсорберу.

Приведена принципова схема насадкового абсорберу.

Наведена математична модель процесу очищення газоповітряного потоку від SO_2 в насадковому абсорбері.

Приведені рівняння матеріального балансу, розрахунку швидкості газоповітряного потоку та діаметру абсорбера, розрахунку висоти насадки, рівняння розрахунку коефіцієнтів масовіддачі та масопередачі, рівняння гідравлічного опору сухої насадки та загального опору зрошеної насадки.

Ключові слова: поверхнево-активна речовина, математична модель, газоповітряний потік, двооксид сірки, процес очищення, насадковий абсорбер.

А. М. Дзевочко, М. А. Подустов, А. И. Дзевочко, В. А. Панасенко, А. И. Пашко

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОЧИЩЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ОТ ДИОКСИДА СЕРЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПАВ

Приведены стадии производства поверхностно-активных веществ: получение сульфурющего агента, сульфатирование, нейтрализация, очистка газозвдушного потока.

Показано получение сульфурющего агента путем каталитического окисления диоксида серы. Степень окисления 98–99 %. Непрореагировавший SO_2 необходимо подать на стадию очистки.

Приведены данные большего загрязнителя атмосферного воздуха, это диоксид серы.

Показано использование газожидкостных операций в разных отраслях промышленности. Среди наиболее важных газожидкостных систем является абсорбция, которая определяется как операция массообмена, во время которой один из компонентов, содержащихся в газовой смеси, растворяется в жидком растворителе.

Показано базирование научно-технического прогресса на тесной взаимосвязи теории и эксперимента. Основой для проведения научных исследований является процесс моделирования. Процесс моделирования создает предпосылки для более целесообразного сочетания теории и опыта в научных исследованиях.

Представлено описание данных литературы с математическим моделированием насадочных абсорберов для различных систем газ – жидкость.

Показана значимость математического моделирования и его использование в компьютерном моделировании.

Приведенные данные о большинстве реакций в химической промышленности включают вещества, существующие в разных фазах.

Показано об ответственности дифоксида серы за образование кислотных дождей, которые являются одной из распространенных форм загрязнения во всем мире, что наносит вред человеку и окружающей среде.

Приведено, что подход к проектированию насадочного абсорбера обычно включает в себя определение геометрических параметров, таких как диаметр абсорбера, высота насадки, а также коэффициент массообмена для газа и потока жидкости, сухие и общие перепады давления, общий коэффициент массопередачи.

Показано, что использование методов имитации и математического моделирования для проектирования и оптимизации абсорберов постоянно развивается. Наиболее разработанными и распространенными компьютерными программами являются программное обеспечение MATLAB.

Приведено описание типичного насадочного абсорбера, состоящего из вертикальной цилиндрической оболочки, содержащей опорную пластину для насадочного материала, устройство для распределения жидкости. Жидкость подается в верхней части абсорбера и стекает через насадку. Газовоздушный поток подается в нижней части абсорбера.

Приведена принципиальная схема насадочного абсорбера.

Представлена математическая модель процесса очистки газовоздушного потока от SO₂ в насадочном абсорбере.

Приведены уравнения материального баланса, расчета скорости газовоздушного потока и диаметра абсорбера, расчета высоты насадки, уравнение расчета коэффициентов массоотдачи и массопередачи, уравнение гидравлического сопротивления сухой насадки и общего сопротивления орошаемой насадки.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, математическая модель, газовоздушный поток, двуоксид серы, процесс очистки, насадочный абсорбер.

O. M. Dzevochko, M. O. Podustov, A. I. Dzevochko, V. O. Panasenko, A. I. Pashko

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF CLEARING A GAS-AIR FLOW FROM SULFUR DIOXIDE IN THE PRODUCTION OF SURFACTANTS

The stages of production of surfactants are given: obtaining a sulphating agent, sulphation, neutralization, purification of the gas-air flow.

The production of a sulphurizing agent by catalytic oxidation of sulfur dioxide has been shown. The degree of oxidation is 98–99 %. The unreacted SO₂ must be fed to the purification stage.

Data are given for a larger air pollutant, sulfur dioxide.

The use of gas-liquid operations in various industries is shown. Among the most important gas-liquid systems is absorption, which is defined as a mass transfer operation during which one of the components contained in the gas-air mixture is dissolved in a liquid solvent.

The basis of scientific and technological progress is shown on the close relationship between theory and experiment. The basis for scientific research is the modeling process. The modeling process creates the prerequisites for a more appropriate combination of theory and experience in scientific research.

A description of literature data with mathematical modeling of packed absorbers for various gas-liquid systems is presented.

The importance of mathematical modeling and its use in computer modeling is shown.

The data given for most reactions in the chemical industry include substances that exist in different phases.

It is shown that sulfur dioxide is responsible for the formation of acid rain, which is one of the most common forms of pollution throughout the world, which is harmful to humans and the environment.

It is shown that the approach to designing a packed absorber usually includes the determination of geometric parameters, such as the absorber diameter, the height of the packing, as well as the mass transfer coefficient for gas and liquid flow, dry and total pressure drops, and the total mass transfer coefficient.

It is shown that the use of simulation methods and mathematical modeling for the design and optimization of absorbers is constantly evolving. The most developed and widespread computer programs are the MATLAB software.

A description is given of a typical packed absorber, consisting of a vertical cylindrical shell containing a support plate for packing material, a device for distributing liquid. The liquid is supplied at the top of the absorber and flows down through the nozzle. The gas-air stream is supplied at the bottom of the absorber.

A schematic diagram of a packed absorber is given.

A mathematical model of the process of cleaning the gas-air flow from SO₂ in a packed absorber is presented.

Equations are given for the material balance, calculation of the gas-air flow velocity and absorber diameter, calculation of the packing height, the equation for calculating the mass transfer and mass transfer coefficients, the equation for the hydraulic resistance of a dry packing and the total resistance of an irrigated packing.

Keywords: surfactant, mathematical model, gas-air flow, sulfur dioxide, purification process, packed absorber.

О. Б. Аніпко¹, д. техн. н., професор, Д. С. Баулін², к. техн. н., с. н. с.

МОДЕЛЬ МАСОПЕРЕНОСУ, ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ АПАРАТУ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ НІТРОЦЕЛЮЛОЗНИХ ПОРОХІВ

¹Харківський Національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

²Національна академія Національної гвардії України, Харків

Ключові слова: нітроцелюлоза, перекис водню, модель масоперенесення, модель молекулярної дифузії, коефіцієнт використання реагенту, автокаталітична реакція, порохований елемент, апарат регенерації.

Постановка проблеми та аналіз публікацій.

Відомо, що нітроцелюлоза є нестійкою хімічною сполукою [1]. Зміна вмісту компонентів нітроцелюлози супроводжується суттєвою зміною її властивостей. За зміни вмісту летких речовин на 1 % швидкість горіння змінюється на 10–12 %. Цим обумовлено, що стабільність її обмежена через автокаталітичну реакцію, швидкість якої може суттєво змінюватися під впливом вологості та температури. Стабільність відіграє вирішальну роль при встановленні терміну експлуатації похідних нітроцелюлози [2, 3].

Відразу після вичинки починаються фізико-хімічні процеси взаємодії азоту та його сполук з хімічними елементами та сполуками, що знаходяться у навколишньому середовищі. В результаті одержують азотну та азотисту кислоти та інші сполуки, які негативно впливають на саму нітроцелюлозу. Ці реакції йдуть автокаталітичним процесом. Цим обумовлено виснаження нітроцелюлози азотом, і оскільки азот є горючим компонентом нітроцелюлози, то енергетична цінність її падає.

Велика кількість публікацій, особливо останні 20 років, присвячена саме цьому процесу [4–7]. Однак, практичний інтерес викликає не лише відслідковувати стан нітроцелюлози, а й, оскільки вона вже вироблена, знайти метод її регенерації.

У [8–10] показана можливість відновлення властивостей порохових зарядів шляхом обробки перекисом водню. Однак не показано процес проведення регенерації порохових зарядів для отримання найкращого ефекту.

Існує суперечність між кількістю вироблених порохових зарядів на основі нітроцелюлози з тим, що вони безперервно змінюють свої властивості та на певному етапі зберігання досягають стану, непридатного для практичного застосування. Звідси виникає наукова та прикладна проблема щодо пошуку методу регенерації та визначення доцільних термінів її проведення.

У зв'язку з цим **метою статті** є визначення розрахункового коефіцієнта масоперенесення, отриманого на основі моделі молекулярної дифузії масоперенесення водню з перекису в нітроцелюлозу для визначення основних параметрів реактора (апарату) з урахуванням особливостей технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу.

Оскільки хімічна реакція, що протікає при обробці нітроцелюлози не може бути з достатнім ступенем точності для практичних застосувань через відсутність задовільної

хімічної формули, для кількісного опису процесу скористаємося рівнянням матеріального балансу і моделлю масоперенесення молекулярної дифузії.

1. Матеріальний баланс.

Початкова концентрація перекису водню – $\rho_n^H = 57\%$.

Кінцева концентрація перекису водню – $\rho_n^K = 28\%$.

Початкова маса НЦП – m_n .

Маса НЦП після регенерації – m_{np} .

Зміна маси НЦП – $\Delta m_{HЦ} = m_{np} - m_n$.

Вважаємо, що Δm – це кількість водню, приєднаного в процесі обробки.

Кількість речовини, перенесеної з перекису водню

$$\Delta m_{пер} = (\rho_n^H - \rho_n^K) \cdot V_n,$$

де V_n – обсяг перекису, що бере участь у реакції.

Оскільки в процесі реакції не вся кількість речовини з перекису водню ($\Delta m_{пер}$) приєдналася до нітроцелюлози, то $\Delta m_{пер} \neq \Delta m_{HЦ}$; $\Delta m_{пер} > \Delta m_{HЦ}$.

Це пов'язано з тим, що частина водню та кисню, а також можливо, і їх сполук, що утворилися в процесі реакції, приєдналися до нітроцелюлози. Для оцінки ступеня сорбції водню нітроцелюлозою введемо показник – коефіцієнт використання реагенту

$$\eta_c = \frac{\Delta m_{HЦ}}{\Delta m_{пер}}.$$

Він показує, яка частка речовини з перекису для цієї концентрації приєдналася до нітроцелюлози.

2. Модель масоперенесення.

Фізико-хімічна стабільність порохових зарядів визначається низкою факторів, найважливішими з яких є термін зберігання, температура і умови зберігання боєприпасів.

В процесі тривалого зберігання змінюється щільність пороху і, відповідно, його міцність, а при великих термінах зберігання відбувається розкладання пороху з повною втратою балістичних властивостей.

Таким чином, враховуючи якомога більше факторів (рис. 1), що впливають на енергетичні характеристики нітроцелюлози, можна отримати більш точні методи оцінки і прогнозування стану боєприпасів при тривалих термінах експлуатації [11–13].

Будь-які зразки високоенергетичних матеріалів на основі нітроцелюлози проходять низку етапів життєвого циклу. Але найбільш тривалий етап – зберігання, протягом якого незалежно від умов зберігання, нітроцелюлоза змінюють свої властивості. Відбувається це в результаті випаровування спирто-ефірного розчинника і розкладання під впливом азотної і азотистої кислот, що утворюються в результаті автокаталітичної реакції при масоперенесенні азоту з пороху в навколишнє середовище. Тому основними факторами, що визначають здатність порохів до тривалого зберігання, є: їх склад, якість вихідних матеріалів, спосіб виробництва, домішки в пороху, умови зберігання [14, 15].

Всі змінення, що відбуваються з нітроцелюлозою, є наслідком її термічного розкладання або гідролітичного розпаду.

Дослідженнями ряду вчених (Горст А.Г., Зеленський В.П., Шагов Ю.В., Бертолле К.Л., Вюрц Ш.А.) [16-18] показано, що термічний розпад основних компонентів порохів (нітроефірів) протікає за ланцюговим радикальним механізмом. Як і всякий ланцюговий процес, розкладання пороху починається з утворення в системі вільних радикалів. Процес утворення вільних радикалів йде вже в період виготовлення НЦП. Вільні радикали можуть утворюватися при технологічному отриманні нітратів целюлози. Крім того, нітрати целюлози на стадії стабілізації піддаються інтенсивному механічному впливу (подрібнення в дискових млинах), що також може призводити до утворення різних радикалів за рахунок механічного руйнування макромолекул.

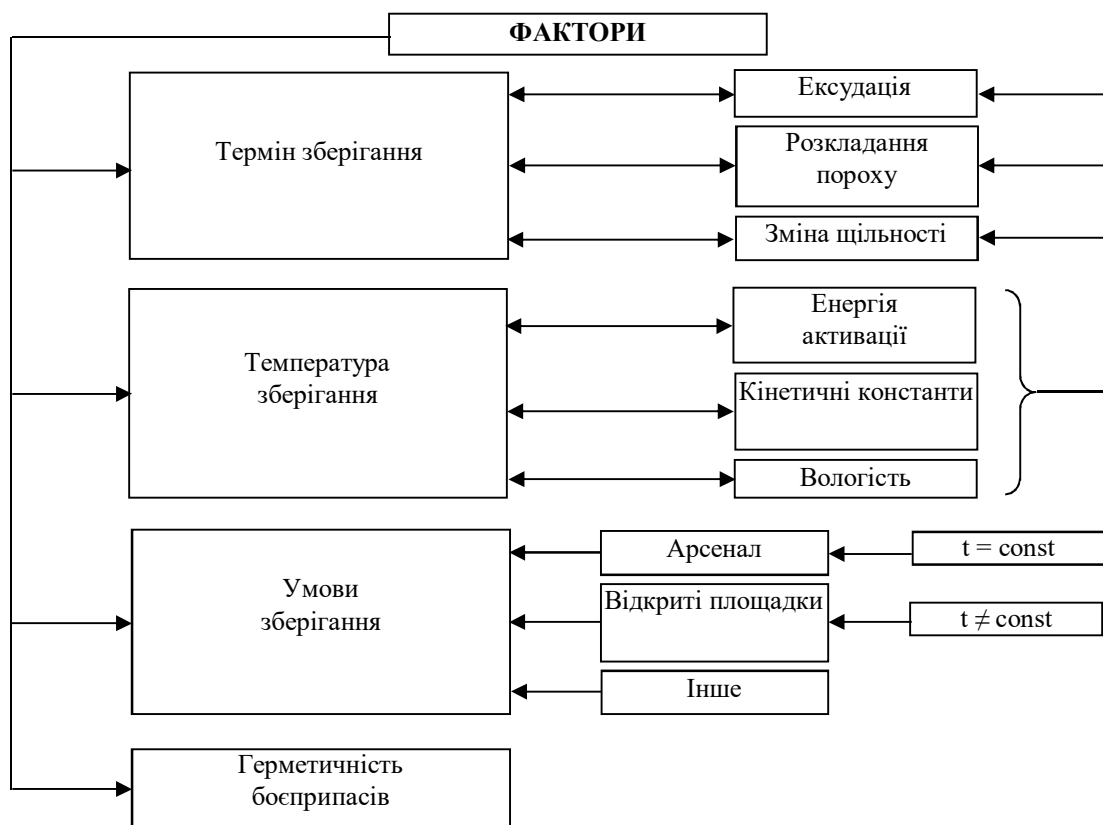


Рисунок 1 – Фактори, що впливають на енергетичні характеристики нітроцелюлози

Нітроцелюлоза відноситься до крихких матеріалів, тому ефект впливу на неї температури і вологи буде визначатися температурою і вологістю навколишнього середовища. Усередині будуть виникати механічні (температурні) напруження внаслідок нерівномірного розподілу температури через постійні теплозміни (цикли підвищення і зниження температури).

Таким чином, для збереження фізико-хімічних, а відтак і енергетичних характеристик нітроцелюлози, необхідно підтримувати її постійний склад.

У нітроцелюлозі відбуваються змінення відносного опору руйнуванню під впливом різних чинників (удари, тертя, дія високого тиску) в умовах їх зберігання та застосування [16-18]. Утворюються тріщини, злами, відколи, змінюється внутрішня структура укладання

порохових елементів, порушується щільність заводського пресування всього порохового заряду. У нітроцелюлозі відбуваються змінення її складу або у всій масі, або перерозподілом деяких компонентів у шарах порохових елементів, так:

– щільність (нормативна – від 1,54 до 1,62 г/см³) знижується, бо при постійному його об'ємі відбувається випаровування розчинника, ексудація, викристалізування деяких компонентів на поверхню порохових елементів і змінюється вологовміст;

– швидкість горіння при цьому через збільшення поверхневих площ суттєво зростає, що веде до небажаного збільшення p_{max} [3, 12]

– змінюється закон швидкості горіння, згідно з яким величина тиску порохових газів в каналі ствола при пострілі прямо пропорційна швидкості його горіння і виражається формулою:

$$u = u_1 \cdot p,$$

де u – швидкість горіння пороху; u_1 – коефіцієнт швидкості горіння пороху; p – тиск.

Це відбувається тому, що коефіцієнт швидкості його горіння (швидкість горіння пороху при $p = 1$ кгс/см²) залежить від вмісту азоту в піроксиліні, вмісту летючих та інших речовин.

У нітроцелюлозі є малостійкі хімічні речовини, які і сприяють її хімічному розкладанню. Після того, як весь стабілізатор хімічної стійкості переходить в зв'язаний стан, починається прогресивне прискорення цього процесу:

– азот, який міститься в поросі (не більше 14,14 %), реагуючи з воднем повітря, утворює азотну і азотисту кислоти;

– розкладання нітратів целюлози і багатоатомних спиртів пороху фактично визначає сам процес його термічного розкладання, а кислоти, луги, які знаходяться в пороху, не тільки їх гідролізують, а й прискорюють процес розкладання. Так, наприклад, міцна азотна кислота при нагріванні повністю руйнує порох і перетворює всі органічні речовини в СО₂. Таким чином, продукти розкладання прискорюють самий процес розкладання (явище автокаталізу);

– в результаті випаровування розчинника (1–2 %), знижується щільність пороху, під впливом азотної і азотистої кислот на поверхні порохових елементів з'являються раковини, відколи, тріщини, в порожнечі, що утворилися, просідають пухкі частинки порохових елементів;

– підвищення температури навколишнього середовища при зберіганні порохів також прискорює його термічний розклад і гідролітичний розпад, наприклад, при підвищенні температури на 5 °С швидкість процесу розкладання збільшується в 1,5–2 рази;

– при постійно мінливій відносній вологості повітря спостерігається прискорення розкладання пороху, а тривалість його “життя” знижується в 1,5–2 рази;

– шляхом молекулярної дифузії здійснюється масоперенесення азоту з глибинних шарів порохового елемента до його поверхні, а в подальшому – в навколишній простір (повітря).

Процес утворення кислот та їх взаємодія з порохом йде у відносно тонкому шарі біля поверхні порохових елементів. При цьому вміст азоту в шарі біля поверхні порохового елемента знижується, що відповідно призводить до зниження його локальної концентрації. Виникає, таким чином, градієнт концентрацій, який призводить до масоперенесення азоту з глибинних шарів елемента до його поверхні шляхом молекулярної дифузії (рис. 2) [14].

Розглянемо заряд, що складається з порошу, який включає $N\%$ летючих компонентів і $N\%$ азоту. У процесі зберігання за рахунок хімічних реакцій, які протікають на поверхні порохового елемента, створюється градієнт концентрації компонентів водню і азоту, що призводить до виникнення потоку речовини з глибинних шарів матеріалу до його поверхні.

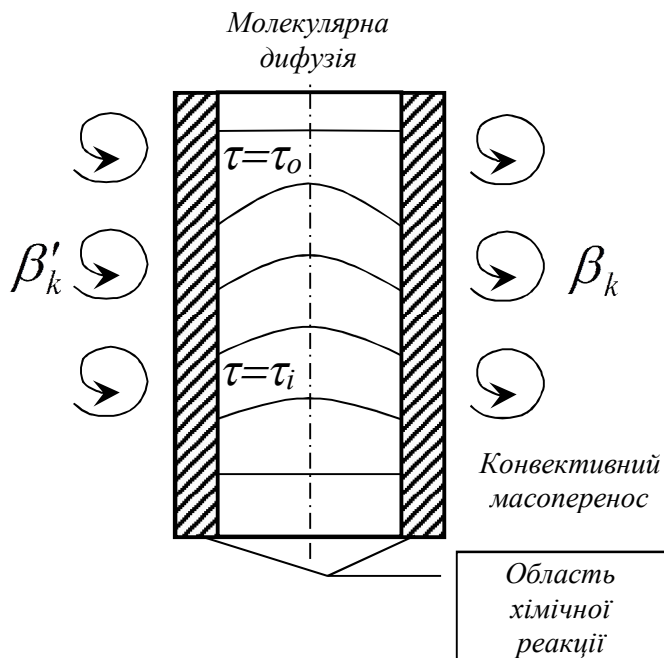


Рисунок 2 – Схема масоперенесення у пороховому елементі

Розглянемо одновимірне завдання масоперенесення в половині товщини палаючого зводу порохового елемента, враховуючи симетрію та протікання реакцій на внутрішніх (Н1) і зовнішніх (Н2) поверхнях порохового елемента (рис. 3) [14].

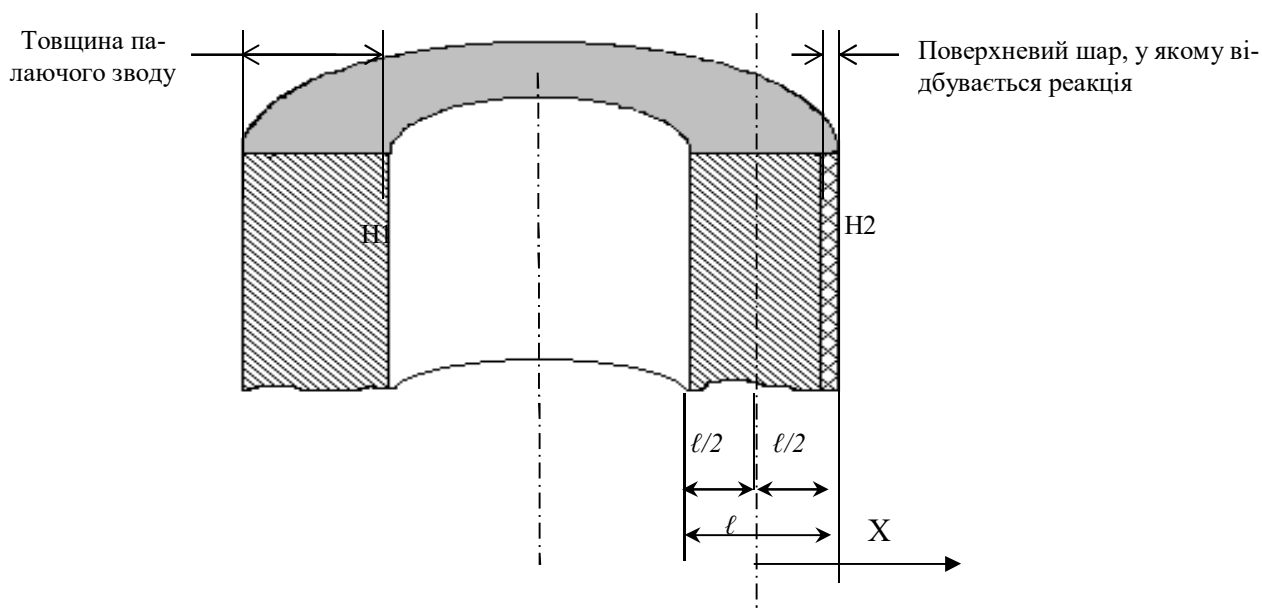


Рисунок 3 – Протікання реакцій на поверхнях порохового елемента

В цілому, розглядаючи процеси автокаталітичної реакції компонентів порошу, молекулярної дифузії в ньому і конвективного масоперенесення в навколишнє середовище, можна зробити висновок, що процесами, які визначають швидкість розкладання порошу є два перших з зазначених. Причому величини швидкості цих процесів взаємопов'язані, оскільки виснаження азоту в поверхневому шарі створює градієнт його концентрації – рушійну силу дифузійного масоперенесення.

На різних етапах зберігання порохового заряду співвідношення між величинами швидкості цих процесів різні. Нітроклітковина, що представляє собою основу піроксилінових порохів, характеризується неплавкістю, внаслідок чого вона розкладається при всіх температурах у твердому стані. Крім цього, нітроклітковина має фізично складну структуру з розвиненою поверхнею і хімічно неоднорідна. Швидкість газоутворення і її зміна суттєво залежать від того, чи видаляються продукти розпаду або залишаються над клітковиною. Це відповідає абсолютній зміні константи швидкості на величину до 75 %, значення якої визначають за виразом

$$k = 1018,0 \exp(-43000/RT).$$

Таким чином, для оцінки тривалості експлуатації зарядів необхідно розв'язати низку конкретних задач щодо молекулярної дифузії азоту і летючих компонентів з глибинних шарів порошу до його поверхні з урахуванням впливу коливань температури навколишнього середовища на коефіцієнт перенесення.

Разом з цим необхідно вирішувати завдання хімічної кінетики з метою оцінки кількості реагуючої речовини на поверхні порохового елемента, що дозволить визначити градієнт концентрації на кожному етапі часу. Але це завдання уявляється достатньо складним, оскільки хімічна формула нітроцелюлози носить умовний характер [4, 5, 9]. Тому таке завдання можна вирішити емпіричним шляхом, та воно виходить за межі цього дослідження.

Доки потік речовини, що переноситься молекулярною дифузією (M_D), буде більшим, ніж кількість реагуючої речовини в одиницю часу (M_k), швидкість розкладання визначатиметься кінетичною константою, а при $M_D \leq M_k$ – коефіцієнтом молекулярної дифузії D . Тому хімічні зміни порохових зарядів, що зазнають термічного розкладання, неминуче призводять до зміни їх фізичних властивостей, та, як наслідок, енергетичної цінності.

У цілому розкладання порохових зарядів у процесі їх експлуатації є комплексною проблемою, яка крім завдання оцінки термінів експлуатації, включає завдання визначення балістичних характеристик наявних металевих зарядів та зміни властивостей порохів.

Тому виникло завдання математичного моделювання масопереносу в порохових елементах для визначення вмісту азоту в залежності від часу та з урахуванням впливу температури зберігання.

В даний час є дійсним інтересом проведення такого дослідження (моделі), за допомогою якого можна прогнозувати, як змінюється щільність порошу з урахуванням впливу зміни температури навколишнього середовища. Слід підкреслити, що у ряді фундаментальних робіт з внутрішньої балістики зазначається, що щільність порошу є його основною характеристикою, отже, зміна її значення свідчить про зміну інших фізико-хімічних властивостей. Наприклад, таких як теплота горіння, швидкість горіння, які визначають балістичні властивості пострілу.

Розглянемо пороховий елемент товщиною l (рис. 4), в якому його межі H_1 та H_2

контактують з навколишнім середовищем, при цьому вважаємо, що умови процесу перенесення на межах Н1 та Н2 однакові [14].

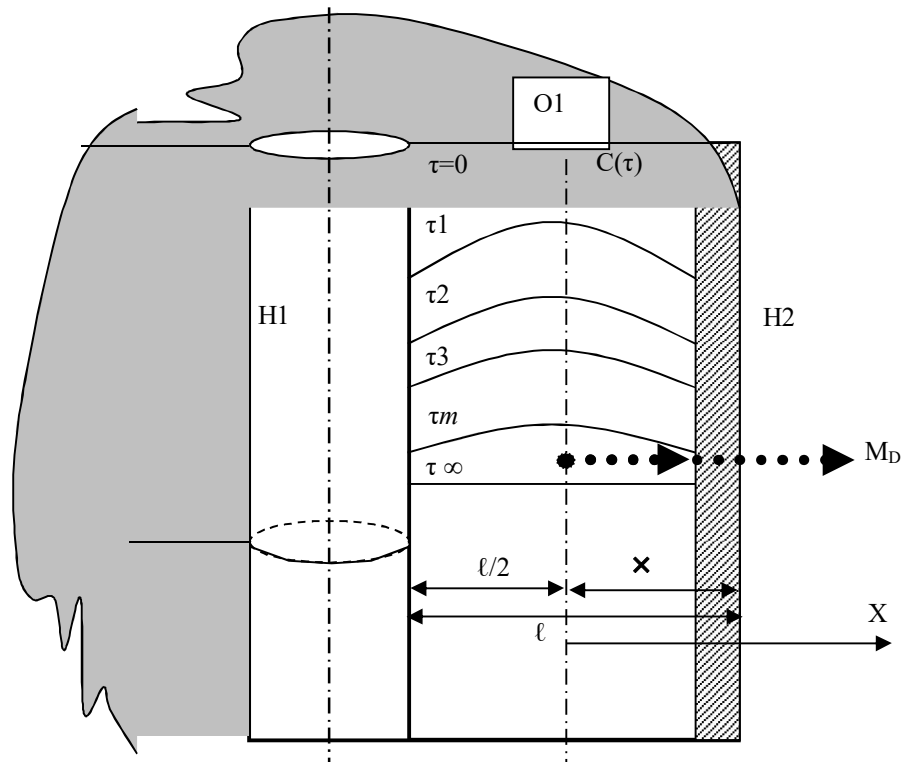


Рисунок 4 – Пороховий елемент НЦП

Тому надалі розглядаємо математичну модель дифузійного масоперенесення половини елемента від осі симетрії O1 до зовнішньої поверхні Н2.

Зміна розподілу вмісту дифузних компонентів у часі описуватиметься диференціальними рівняннями молекулярної дифузії

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[D(\tau) \frac{\partial c}{\partial x} \right] = \frac{\partial c}{\partial \tau} \cdot \rho_c \quad (1)$$

Крайові умови, що включають:

– початкові умови:

$$\tau = 0; \quad c(x;0) = \text{const},$$

тобто азот рівномірно розподілений у всьому пороховому елементі та відповідає початковій концентрації 15%;

– граничні умови для межі Г1 – умова симетрії

$$O1: \quad \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{\Gamma 1} = 0,$$

а для межі Н2 – потік речовини – граничні умови II роду

$$D(T) \frac{\partial c}{\partial x} = m(T), \quad (2)$$

де

$$T = f(\tau), \quad (3)$$

функція, що описує зміну температури у часі.

Система рівнянь (1) – (3) вирішується для умови повного видалення азоту, що визначаються на основі поправочних формул внутрішньої балістики, приймаючи наперед мінімально допустиме зниження початкової швидкості V_0 або інших балістичних характеристик.

Таке завдання дозволяє оцінити допустимий експлуатаційний термін зарядів з урахуванням впливу зміни температури, а також провести дослідження щодо оцінки цього впливу протягом доби, сезону та року, задаючи відповідні функції $T = f(\tau)$ використовуючи гідрометеорологічні дані. Крім цього, взявши ці дані для різних кліматичних поясів, можна оцінити зміну термінів зберігання від умов навколишнього середовища.

Таким чином, у зв'язку з тим, що температура навколишнього середовища визначає температуру порохового елемента, то для вирішення другого модельного завдання – оцінки впливу температури навколишнього середовища на інтенсивність масопереносу – необхідно розробити модель зміни температури навколишнього середовища для територіальних умов України.

Критично оцінюючи отриманий результат часу дифузії азоту слід підкреслити, що у реальних процесах повне видалення азоту немає, причини чого лежать у сфері виду зв'язку молекул у поєднанні й у науковому аспекті виходять за рамки цього дослідження. У той же час, приймаючи гарантійний термін зберігання в 10 років і отримавши згадане рішення задачі, можна оцінити максимальний термін зберігання порохових зарядів на основі нітроцелюлози в 27 років, що загалом збігається з даними практичних спостережень.

У представлений моделі показаний процес виснаження азоту з нітроцелюлози. Однак, практичний інтерес представляє модель перенесення маси в процесі обробки нітроцелюлози перекисом водню для створення промислового апарату та визначення його основних конструктивних розмірів та продуктивності [19-21].

Як було анонсовано вище, для цього використано модель молекулярної дифузії [14].

З огляду на ізотропність нітроцелюлози завдання вирішується в одновимірній постановці.

Є нітроцелюлоза у вигляді елемента циліндричної форми з довжиною l і діаметром d (рис. 6).

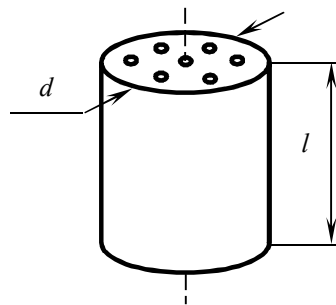


Рисунок 6 – Елемент семиканального нітроцелюлозного пороха

Площу поверхні масоперенесення одного елемента при цьому вважаємо

$$S_e = \pi d \cdot l + \frac{\pi d^2}{2} = \frac{\pi d(2l + d)}{2},$$

де d – діаметр порохового зерна; l – довжина порохового зерна.

Причому поверхню каналів не включаємо в цю величину, оскільки експериментально, шляхом продування стисненим повітрям каналів після занурення їх у перекис водню було встановлено, що вони залишаються порожніми. Очевидно, це пов'язано із співвідношенням діаметрів каналів і поверхневим натягом перекису водню.

Тоді кількість речовини, перенесеної в процесі обробки нітроцелюлози перекисом водню, становитиме

$$\frac{dm}{d\tau} = \beta \frac{d^2 m}{dx^2} \cdot S_{\text{нц}}$$

або

$$dm = \beta \frac{d^2 m}{dx^2} \cdot S_{\text{нц}} \cdot d\tau,$$

де β – коефіцієнт масоперенесення у цьому процесі.

$$[\beta_i] = \frac{\Delta m_i}{S_i \cdot \tau}$$

Чисельне значення β визначали за експериментальними даними (табл. 1).

Час витримки нітроцелюлози в перекисі водню для всіх елементів становить $\tau = 7200$ сек.

Таблиця 1 – Експериментальні дані та коефіцієнт масоперенесення

№ з/п	Площа порохового елемента ($S_{\text{нц}}$), м ²	Зміна маси порохового елемента (Δm), кг	Коефіцієнт масоперенесення (β), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$
1	0,00043	+ 0,003	0,000993
2	0,00043	+ 0,004	0,001217
3	0,00043	+ 0,003	0,000929
4	0,00043	+ 0,003	0,000961
5	0,00043	+ 0,003	0,000897
6	0,00043	+ 0,004	0,001121
7	0,00043	+ 0,002	0,000865
8	0,00043	+ 0,003	0,000993
9	0,00043	+ 0,002	0,000897
10	0,00043	+ 0,003	0,000961

В результаті отримали середнє значення коефіцієнта масоперенесення $\beta = 9,83 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$, при $t_{\text{нц}} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$. Зауважено, що зниження температури елементів будуть зменшувати коефіцієнт масоперенесення зворотно пропорційно енергії активації Арреніуса $\left(\approx \frac{1}{E_A} \right)$.

У наведеному дослідженні розглядається процес після вилучення нітроцелюлозного пороху з картуза або гільзи. Сам процес розпатронювання зарядів не розглядається.

Особливістю є те, що кількість речовини (НЦП), яка подається у процес, кратна масі заряду (m_3).

Для визначення площі поверхні взаємодії в процесі регенерації, кількість елементів (n_e^1) в одному заряді визначається як

$$n_e^1 = \frac{m_3}{\rho_n V_e} = \frac{4m_3}{\rho_n \cdot \pi \cdot d_e^2 \cdot l_e},$$

де ρ_n – щільність нітроцелюлозного пороху; V_e – об’єм елемента, який визначається як $\frac{\pi d_e^2}{4} \cdot l_e$.

Площа поверхні, що бере участь у процесі

$$S = n_e^1 \cdot S_e = \frac{4m_3}{\rho_n \cdot \pi \cdot d_e^2 \cdot l_e} \cdot \frac{\pi d_e (2l_e + d_e)}{2} = \frac{2m_3 (2l_e + d_e)}{\rho_n \cdot d_e \cdot l_e}.$$

Основними операціями технологічного процесу є нагрівання елементів до 65°C і занурення нагрітих елементів у перекис водню. Для здійснення обох процесів доцільно розмістити елементи в багатошарових альтанках-контейнерах з решітчастими поверхнями, на яких порохіві елементи розміщуються у один шар (рис. 7).

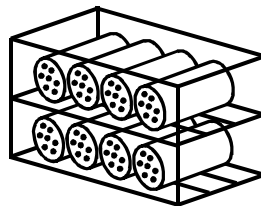


Рисунок 7 – Схема розміщення порохіві елементів в багатошарових контейнерах

Для автоматизації процесу, нагрівання та обробку перекисом водню доцільно здійснювати в русі, з витримкою відповідної швидкості для досягнення часу технологічного процесу (рис. 8).

На початку процесу відбирається контрольна партія з 30 елементів і визначається маса кожного до регенерації. Після обробки вимірюється маса кожного контрольного елемента для технологічного контролю якості обробки. У нормі приріст маси 90 % елементів має становити щонайменше 3 %.

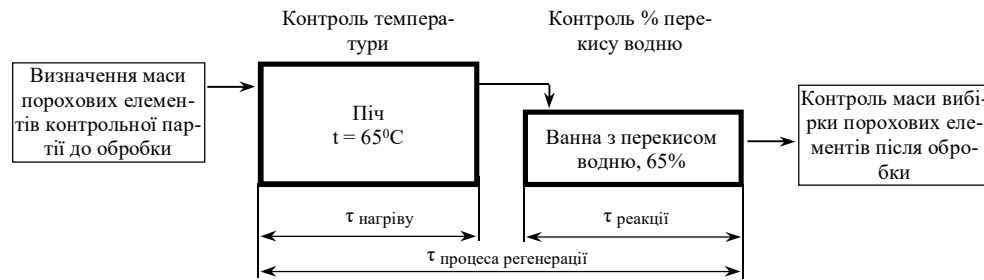


Рисунок 8 – Схема процесу регенерації нітроцелюлозних порохових зарядів

Слід особливо наголосити, що нітроцелюлозні порохи не гігроскопічні і в процесі не змочуються перекисом водню, тому їх сушіння або видалення вологи з поверхні в процесі (після ванни) не передбачається.

Організація взаємного руху інтенсифікує цей процес, проте на скільки, незрозуміло, тому що організація руху вимагатиме нових енерговитрат і чи буде це виправдано. Остаточна відповідь на це питання не може дати теорія масоперенесення, а лише повне техніко-економічне обґрунтування запропонованого процесу.

Об'єм апарату доцільно виражати кількістю об'ємів одного заряду. Тоді обсяг апарату

$$V_a = n_z \cdot V_z \cdot 1,1 \dots 1,15,$$

де 1,1 ... 1,15 – запас об'єму апарату на допуск та зазори (конструктивний запас).

Продуктивність апарату визначається часом процесу ($\tau_{пр}$)

$$Q_a = \frac{V_z}{\tau_{пр}} \cdot \rho_{п}.$$

Апарат може бути періодичної або безперервної дії.

Для апарату періодичної дії циркуляція перекису водню навколо поверхні елементів може скоротити час перебігу процесу. Однак при цьому необхідно створити деякий надлишковий тиск над поверхнею рідини, оскільки перемішування сприятиме і підвищенню швидкості насичення пари і таким чином концентрація перекису водню знижуватиметься непродуктивно.

Висновки

1. Визначено коефіцієнт масоперенесення β для моделі масоперенесення водню при обробці нітроцелюлози перекисом водню.

2. Розроблено основні співвідношення, що визначають конструктивний об'єм та пристрій реактора.

У перспективі практичний інтерес представляє кількісна оцінка впливу взаємного руху фаз із повним техніко-економічним аналізом з метою оцінки доцільності. Необхідно практично визначити час процесу для різних температур.

Література

1. Роговин З.А. Химия нитроцеллюлозы. М.: Химия, 1972. 520 с.
2. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Горелишев С.А. Геронтологічні властивості порохових зарядів боеприпасів та їх вплив на показники живучості стрілецької зброї: Монографія. Х.: НА НГУ, 2019. 119 с.
3. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. Монография. Х.: АБВ МВД Украины, 2010. 128 с.
4. Oleg Anipko, Dmitro Baulin, Stanislav Horielyshev, Igor Boikov, Yurii Babkov, Oleksandr Oleksenko, Halyna Misiuk, Volodymyr Kutsenko, Mykhailo Ivanets, Valerii Voinov Study Of The Nitrocellulose Gunpowder Regeneration Process Using Hydrogen Peroxide. EUREKA: Physics and Engineering, 2023, № 5(43), С. 3–13.
5. Баулін Д.С. Нитроцелюлозні порохові заряди тривалих термінів експлуатації: проблемні задачі та їх можливі рішення // Інтегровані технології та енергозбереження. 2021. №4. С. 33–45.
6. Вертелецкий В.Ф. Прогнозирование изменения физико-химических свойств порохового заряда и начальной скорости 30 мм артиллерийских боеприпасов морской номенклатуры // Інтегровані технології та енергозбереження. 2012. №2. С. 24–31.
7. Анипко О.Б., Хайков В.Л. Анализ методов оценки состояния пороховых зарядов как элемент системы мониторинга артиллерийских боеприпасов // Інтегровані технології та енергозбереження. 2012. №3. С. 60–71.
8. Аніпко О.Б., Баулін Д.С. Аналітична гіпотеза для обґрунтування принципової можливості регенерації нітроцелюлозних порохів після тривалого зберігання перекисом водню // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №4. С. 65–72.
9. Анипко О.Б. Результаты экспериментального исследования воздействия перекиси водорода на нитроцеллюлозные высокомолекулярные соединения // Інтегровані технології та енергозбереження. 2014. № 2. С. 50–55.
10. Баулін Д.С. Методика проведення експериментального дослідження щодо відновлення характеристик піроксилінових порохів // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №3. С. 30–41.
11. Анипко О.Б., Хайков В.Л. Цветометрия пороховых элементов метательных зарядов артиллерийских боеприпасов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2011. №1. С. 28–35.
12. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Бірюков І.Ю., Гунько О.О. Прогнозування змін балістичних характеристик пострілів роздільно-гільзового заряджання із зарядами тривалих термінів експлуатації // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №1. С. 52–62.
13. Гончаренко П.Д. Интегральная поправка в начальную скорость на износ ствола и геронтологические изменения порохового заряда // Збірник наукових праць Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова. 2011. №1 (5). С. 11–14.
14. Анипко О.Б., Бірюков І.Ю., Баулін Д.С. Модель массопереноса при хранении пороховых зарядов с учетом изменения температуры окружающей среды // Збірник наукових праць ХУПС ім. І Кожедуба. 2006. №2 (8). С. 50–54.
15. Анипко О.Б., Хайков В.Л. Экспресс-метод оценки состояния пороховых метательных зарядов для аналитического модуля системы мониторинга боеприпасов // Збірник наукових праць Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова. 2012. №2 (10). С. 6–18.
16. Горст А.Г. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Машиностроение. 1972. 208 с.

17. Зеленский В.П. Эксплуатационные свойства порохов и зарядов. Пенза: ПВАИУ. 1975. 358 с.
18. Шагов Ю.В. Взрывчатые вещества и пороха. М.: Воениздат. 1976. 120 с.
19. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. 10-е изд., стереотипное, доработанное. М.: ООО ТИД “Альянс”, 2004. 753 с.
20. Основи енерготехнології промисловості : підручник / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, О.Б. АНІПКО, В.А. МАЛЯРЕНКО і др. Х.: Видавничий центр НТУ “ХПІ”, 2002. 436 с.
21. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Климов В.Ф. Техническая термодинамика и теплопередача в компактных теплообменниках транспортных машин : Монография. Х.: НТУ “ХПИ”, 2006. 243 с.

Bibliography (transliterated)

1. Rohovyn Z.A. Khymyya nytrotsellyulozy. M.: Khymyya, 1972. 520 p.
2. Anipko O.B., Baulin D.S., Horyelyshev S.A. Herontolohichni vlastyvoli porokhovyykh zaryadiv boeprypasiv ta yikh vplyv na pokaznyky zhyvuchosti strilets'koyi zbroyi: Monohrafiya. Kharkiv: NA NHU, 2019. 119 p.
3. Anypko O.B., Busyak Yu.M. Vnutrennyaya ballistyka stvol'nykh system pry pryimenenyy boeprypasov dlytel'nykh srokov khranenyaya. Monohrafiya. KH.: AVV MVD Ukrayny, 2010. 128 p.
4. Oleg Anipko, Dmitro Baulin, Stanislav Horielyshev, Igor Boikov, Yurii Babkov, Oleksandr Oleksenko, Halyna Misiuk, Volodymyr Kutsenko, Mykhailo Ivanets, Valerii Voinov Study Of The Nitrocellulose Gunpowder Regeneration Process Using Hydrogen Peroxide. EUREKA: Physics and Engineering, 2023, № 5(43), P. 3–13.
5. Baulin D.S. Nytrotselyulozni porokhovi zaryady tryvalykh terminiv ekspluatatsiyi: problemni zadachi ta yikh mozhlyvi rishennya // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2021. №4. P. 33–45.
6. Verteletskyy V.F. Prohnozyrovanye yzmenenyaya fyzyko-khymycheskykh svoystv porokhovoho zaryada y nachal'noy skorosty 30 mm artylleryyskykh boeprypasov morskoy nomenklatury // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2012. №2. P. 24–31.
7. Anypko O.B., Khaykov V.L. Analyz metodov otsenky sostoyannya porokhovyykh zaryadov kak élement systemy monytorynha artylleryyskykh boeprypasov // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2012. №3. P. 60–71.
8. Anipko O.B., Baulin D.S. Analitychna hipoteza dlya obgruntuvannya pryntsypovoyi mozhlyvosti reheneratsiyi nitrotselyuloznykh porokhiv pislya tryvaloho zberihannya perekysom vodnyu // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2022. №4. P. 65–72.
9. Anypko O.B. Rezul'taty éksperymental'noho yssledovannya vozdeystviya perekysy vodoroda na nytrotsellyuloznye vysokomolekulyarnye soedynenyaya // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2014. № 2. P. 50–55.
10. Baulin D.S. Metodyka provedennya éksperymental'noho doslidzhennya shchodo vidnovlennya kharakterystyk piroksylinovykh porokhiv // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2022. №3. P. 30–41.
11. Anypko O.B., Khaykov V.L. Tsvetometryya porokhovyykh élementov metatel'nykh zaryadov artylleryyskykh boeprypasov // Artylleryyskoe y strelkovoé vooruzhenye. 2011. №1. P. 28–35.
12. Anipko O.B., Baulin D.S., Biryukov I.YU., Hun'ko O.O. Prohnozuvannya zmin balistychnykh kharakterystyk postriliv rozdil'no-hil'zovoho zaryadzhannya iz zaryadamy

tryvalykh terminiv ekspluatatsiyi // *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya*. 2022. №1. P. 52–62.

13. Honcharenko P.D. Yntehral'naya popravka v nachal'nyuyu skorost' na yznos stvola y herontolohycheskye yzmenenyua porokhovooho zaryada // *Zbirnyk naukovykh prats' Akademiyi viys'kovo-mors'kykh syl im. P.S. Nakhimova*. 2011. №1 (5). P. 11–14.

14. Anytko O.B., Byryukov Y.YU., Baulyn D.S. Model' massoperenosa pry khranenny porokhovykh zaryadov s uchetom yzmenenyua temperatury okruzhayushchey sredy // *Zbirnyk naukovykh prats' KHUPS im. I Kozheduba*. 2006. №2 (8). P. 50–54.

15. Anytko O.B., Khaykov V.L. Ékspress-metod otsenky sostoyannya porokhovykh metatel'nykh zaryadov dlya analytycheskoho modulya systemy monytorynha boeprypasov // *Zbirnyk naukovykh prats' Akademiyi viys'kovo-mors'kykh syl im. P.S. Nakhimova*. 2012. №2 (10). P. 6–18.

16. Horst A.H. Porokha y vzryvchatye veshchestva. M.: Mashynostroenye. 1972. 208 p.

17. Zelenskyy V.P. Éksplyuatatsyonnye svoystva porokhov y zaryadov. Penza: PVAYU. 1975. 358 p.

18. Shahov YU.V. Vzryvchatye veshchestva y porokha. M.: Voennydat. 1976. 120 p.

19. Kasatkyn A.H. Osnovnye protsessy y apparaty khymycheskoy tekhnolohy. Uchebnyk dlya vuzov. 10-e yzd., stereotypnoe, dorabotannoe. M.: OOO TYD "Al'yans", 2004. 753 p.

20. Osnovy enerhotekhnolohiyi promyslovosti : pidruchnyk / L.L. Tovazhnyans'kyu, O.B. Anipko, V.A. Malyarenko i dr. KH.: Vydavnychy tsestr NTU "KHPI", 2002. 436 p.

21. Anytko O.B., Boryyusk M.D., Klymov V.F. Tekhnycheskaya termodynamyka y teploperedacha v kompaktnykh teploobmennykakh transportnykh mashyn : Monohrafiya. KH.: NTU "KHPI", 2006. 243 p.

УДК 355.014: 623.522

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, Д. С. Баулін, к. техн. н., с. н. с.

МОДЕЛЬ МАСОПЕРЕНОСУ, ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ АПАРАТУ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ НІТРОЦЕЛЮЛОЗНИХ ПОРОХІВ

Стабільність нітроцелюлози відіграє вирішальну роль при встановленні терміну її експлуатації. В результаті фізико-хімічних процесів взаємодії азоту та його сполук з хімічними елементами та сполуками, що знаходяться у навколишньому середовищі, азотна та азотиста кислоти негативно впливають на нітроцелюлозу. Цим обумовлено падіння її енергетичної цінності.

Аналіз досліджень показав можливість відновлення властивостей порохових зарядів на основі нітроцелюлози шляхом обробки перекисом водню. Однак не наведено процес проведення регенерації порохових зарядів у промисловому масштабі для отримання найкращого ефекту.

Приведено рівняння матеріального балансу і модель масоперенесення молекулярної дифузії. Для оцінки ступеня сорбції водню нітроцелюлозою введений показник – коефіцієнт використання реагенту. Він показує, яка частка речовини з перекису для цієї концентрації приєдналася до нітроцелюлози.

Представлені фактори, що впливають на енергетичні характеристики нітроцелюлози. Визначено, що на найбільш тривалому етапі життєвого циклу нітроцелюлозних порохів – етапі зберігання, основними факторами, які визначають стійкість порохів, є: їх склад, якість вихідних матеріалів, спосіб виробництва, домішки в пороху, умови зберігання. Вказано, які зміни і процеси відбуваються у шарах нітроцелюлозних порохових елементів.

Розглянуто процес масоперенесення азоту з глибинних шарів порохового елемента до його поверхні шляхом молекулярної дифузії.

У складі комплексної проблеми експлуатації порохових зарядів розглядається математична модель дифузійного масоперенесення для визначення вмісту азоту в залежності від часу та з урахуванням впливу температури зберігання. Ця модель представляє практичний інтерес для створення промислового апарату та визначення його основних конструктивних розмірів та продуктивності.

За результатами експериментального дослідження визначений коефіцієнт масоперенесення та площа поверхні, що бере участь у процесі регенерації.

Представлена схема технологічного процесу регенерації нітроцелюлозних порохових зарядів та елементи конструкції апарату.

Ключові слова: нітроцелюлоза, перекис водню, модель масоперенесення, модель молекулярної дифузії, коефіцієнт використання реагенту, автокаталітична реакція, пороховий елемент, апарат регенерації

О. Б. Анипко, д. техн. н., професор, Д. С. Баулин, к. техн. н., с. н. с.

МОДЕЛЬ МАССОПЕРЕНОСА, НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АППАРАТА ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПОРОХОВ

Стабильность нитроцеллюлозы играет решающую роль в установлении срока ее эксплуатации. В результате физико-химических процессов взаимодействия азота и его соединений с химическими элементами и соединениями, находящимися в окружающей среде, азотная и азотистая кислоты оказывают негативное влияние на нитроцеллюлозу. Этим обусловлено падение ее энергетической ценности.

Анализ исследований показал возможность восстановления свойств пороховых зарядов на основе нитроцеллюлозы путем обработки перекисью водорода. Однако не приведен процесс регенерации пороховых зарядов в промышленном масштабе для получения наилучшего эффекта.

Приведены уравнения материального баланса и модель массопереноса молекулярной диффузии. Для оценки степени сорбции водорода нитроцеллюлозой введен показатель – коэффициент использования реагента. Он показывает, какая часть перекиси вещества для этой концентрации присоединилась к нитроцеллюлозе.

Представлены факторы, влияющие на энергетические характеристики нитроцеллюлозы. Определено, что на наиболее продолжительном этапе жизненного цикла нитроцеллюлозных порохов – этапе хранения, основными факторами, определяющими стойкость порохов, являются: их состав, качество исходных материалов, способ производства, примеси в порохе, условия хранения. Указано, какие изменения и процессы происходят в нитроцеллюлозных слоях пороховых элементов.

Рассмотрен процесс массопереноса азота из глубинных слоев порохового элемента к его поверхности путем молекулярной диффузии.

В составе комплексной проблемы эксплуатации пороховых зарядов рассматривается математическая модель диффузионного массопереноса для определения содержания азота в зависимости от времени и с учетом воздействия температуры хранения. Эта модель представляет практический интерес для создания промышленного аппарата и определения его основных конструктивных размеров и производительности.

По результатам экспериментального исследования определен коэффициент массопереноса и площадь поверхности, участвующей в процессе регенерации.

Представлена схема технологического процесса регенерации нитроцеллюлозных пороховых зарядов и элементы конструкции аппарата.

Ключевые слова: нитроцеллюлоза, перекись водорода, модель массопереноса, модель молекулярной диффузии, коэффициент использования реагента, автокаталитическая реакция, пороховой элемент, аппарат регенерации

O. B. Anipko, D. S. Baulin

MASS TRANSFER MODEL, SOME FEATURES OF THE TECHNOLOGY AND THE MAIN PARAMETERS OF THE APPARATUS FOR THE REGENERATION OF NITROCELLULOSE POWDERS

The stability of nitrocellulose plays a decisive role in determining its service life. As a result of physicochemical processes of interaction of nitrogen and its compounds with chemical elements and compounds found in the environment, nitric and nitrous acids have a negative effect on nitrocellulose. This is due to the drop in its energy value.

An analysis of the studies showed the possibility of restoring the properties of nitrocellulose-based powder charges by treating them with hydrogen peroxide. However, the process of regenerating powder charges on an industrial scale to obtain the best effect is not given.

Material balance equations and a molecular diffusion mass transfer model are presented. To assess the degree of hydrogen sorption by nitrocellulose, an indicator has been introduced - the reagent utilization factor. It shows what part of the peroxide of the substance for this concentration has joined the nitrocellulose.

Factors influencing the energy characteristics of nitrocellulose are presented. It has been determined that at the longest stage of the life cycle of nitrocellulose powders - the storage stage, the main factors determining the resistance of gunpowders are: their composition, the quality of the starting materials, the production method, impurities in the gunpowder, storage conditions. It is indicated what changes and processes occur in the nitrocellulose layers of powder elements.

The process of nitrogen mass transfer from the deep layers of the powder element to its surface by molecular diffusion is considered.

As part of the complex problem of operating powder charges, a mathematical model of diffusion mass transfer is considered to determine the nitrogen content depending on time and taking into account the influence of storage temperature. This model is of practical interest for creating an industrial apparatus and determining its main design dimensions and performance.

Based on the results of the experimental study, the mass transfer coefficient and the surface area involved in the regeneration process were determined.

A diagram of the technological process for regenerating nitrocellulose powder charges and the design elements of the apparatus are presented.

Keywords: nitrocellulose, hydrogen peroxide, mass transfer model, molecular diffusion model, reagent utilization coefficient, autocatalytic reaction, powder element, regeneration apparatus.

В. Г. Павлова¹, к. техн. н., ст. викладач, О. В. Кошельнік^{1,2}, к. техн. н., доцент,
Т. М. Пугачова¹, к. техн. н., професор, О. В. Круглякова¹, к. техн. н., доцент

РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ПАРО- І КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ ПРИ ТЕПЛООБМІНІ В ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

²Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, м. Харків

Ключові слова: випарні апарати, упарювання кристалічних розчинів, плівкова течія багатофазної речовини, підвищення ефективності.

Вступ. В різних галузях промисловості використовують для технічних цілей розчини і суспензії, які можуть містити компоненти, що кристалізується. Такі компоненти під час термічного оброблення спричиняють інкрустацію поверхонь нагріву, погіршуючи тим самим умови теплопередачі та забруднення поверхонь теплообміну. Одним із поширених методів термічної обробки є випарювання. Його використовують як елемент у технологічному процесі при виробництві багатьох продуктів, а також, як кінцевий процес для збереження і транспортування готового продукту.

Сьогодні існують різні типи випарних установок: з природною циркуляцією; співвісно розташованою та винесеною гріючою камерою; з кипінням розчину в трубках; винесеною зоною кипіння; плівкові випарні установки, а також випарні апарати з пластинчастою поверхнею нагріву. Кожен з них має свої переваги та недоліки, що визначає можливість та особливості їх застосування. З такого різноманіття випарного обладнання особливий інтерес викликають дослідження щодо розробки апаратів інтенсивної дії, в яких процес випарювання відбувається за рахунок багаторазового використання теплоносія, що дасть змогу збільшити їх енергоефективність. Більшість таких конструкцій працює саме в плівковому режимі випарювання [1–2, 6–9].

Серед переваг процесу випарювання в падаючій плівці можна виділити швидке відокремлення легко-киплячих компонентів, що забезпечує швидку обробку продукту; невелику товщину плівок, що сприяє інтенсивному теплообміну за умови оптимального змочування труби, і малу депресію, що дає змогу збільшити кількість ступенів установки та використовувати відносно невеликі перепади температур. Однак плівкові апарати також мають і ряд недоліків – потребують хімічного та механічного очищення поверхонь нагріву, що накладає обмеження щодо чистоти розчину, оголення поверхні нагріву веде до переходу від плівкового руху розчину до струменевого зі зменшенням поверхні теплообміну. Перераховані переваги плівкових випарних апаратів викликають значний практичний інтерес для пошуку методів реалізації процесу випарювання солевмісних розчинів, що дало б можливість розширити сферу їх застосування.

Виділення невирішеної частини загальної проблеми

Одним із способів зниження швидкості інкрустації поверхонь нагріву є додавання до початкового неупареного розчину різноманітних домішок, зокрема й готової твердої фази. Проведені дослідження в цій галузі показали, що введення домішок на початку

процесу випарювання призводить до значного зменшення обсягів відкладень на поверхнях нагрівання, що дає можливість збільшити час безпримивної роботи апарату. Як готову фазу, що вводиться, залежно від речовини, що випаровується, провідними фірмами-виробниками пропонувалися різні варіанти таких речовин-домішок, причому результати їх промислового тестування показали непогані результати зі зниження інкрустації та збільшення часу роботи апаратів.

Можна зазначити, що стосовно плівкових випарних апаратів у літературі практично відсутні дослідження процесів плівкової течії розчинів, що кристалізуються, які б урахували особливості спільного протікання теплообміну, пароутворення і кристалізації для трифазних рідин [1–5].

Під час дослідження тепло- і масообмінних процесів, що протікають у випарному апараті з плівкою, що стікає, доцільним буде використання методів математичного моделювання. Застосування таких методів дає змогу з набагато меншими витратами і в стислі терміни провести комплекс дослідницьких робіт, що дозволить розробити нові удосконалені конструкції випарних апаратів. Значною мірою ускладнює математичний опис процесів тепломасообміну в випарному апараті зміна фізичних властивостей розчину під час його випарювання. Незважаючи на широке коло досліджень у сфері кипіння, застосування різних типів апаратів, знання в цій області в даний час ще недостатні для створення розрахункових методик, що мають універсальне застосування.

Викладення основної частини дослідження

Для розв'язання поставленого завдання розглядався процес теплообміну в плівці трифазної рідинної суспензії зі змінним вмістом фаз. Математична модель теплообміну в суцільному середовищі плівкової течії рідинної суспензії містить у собі рівняння руху, нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз і теплообміну [10–12].

Під час складання математичної моделі розглядалися процеси перенесення тепла і енергії під час плівкового руху суспензії, а також теплообміну на межі «поверхня нагрівання-рідина». При цьому враховувалося, що течія плівки, яка стікає, є турбулентною завдяки хвилеутворенню, так і природній та штучній турбулізації. Тому можна припустити, що температуру t та концентрацію в конкретному поперечному перерізі плівки можна вважати постійною, але вони будуть змінюватимуться за шляхом її руху. Ще одним припущенням є сталість у поперечному перерізі теплофізичних властивостей суспензії.

Рівняння нерозривності плівки рідинної багатofазної суспензії, що стікає, матимуть такий вигляд:

– при пароутворенні на поверхні нагріву

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho' \left[1 + \beta_{\tau} \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} \right) + \beta'' \left(1 - \frac{\rho'}{\rho''} \right) \right] + \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \left[\rho' \left(1 - \beta_{\tau} \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} - \beta'' \frac{\rho'}{\rho''} \right) \bar{\omega}' + \beta_{\tau} \bar{\omega}_{\tau} + \beta'' \bar{\omega}'' \right] = 0;$$

– при пароутворенні на поверхні плівки

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho' \left[1 + \beta_{\tau} \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} \right) \right] + \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right) \left[\rho' \left(1 - \beta_{\tau} \frac{\rho'}{\rho_{\tau}} \right) \bar{\omega}' + \beta_{\tau} \bar{\omega}_{\tau} \right] = 0.$$

Рівняння енергії, що описує процеси перенесення тепла і енергії в плівці суспензії:

$$\beta_p \rho_p c_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_p \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}_p \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta_n \rho_n c_n \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_n \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}_n \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \beta_t \rho_t c_t \times \\ \times \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_t \frac{\partial t}{\partial x} + \bar{\omega}_t \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{(r_{кр} \rho_n + r_p \rho_t) dt}{\tau^2} = (\beta_p \lambda_p + \beta_n \lambda_n + \beta_t \lambda_t) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right),$$

де $\lambda_p, \lambda_n, \lambda_t$ – коефіцієнти теплопровідності рідкої, парової та твердої фаз відповідно, ρ_p, ρ_n, ρ_t – густина рідкої, парової та твердої фаз відповідно; $\beta_p, \beta_n, \beta_t$ – масові частки парової, твердої і рідкої фази, що виділяється в плівці суспензії, c_p, c_n, c_t – теплоємність рідкої, парової та твердої фази, відповідно.

В процесі стікання плівки по поверхні теплообміну випарного апарату важливими факторами є гідростатична стійкість режиму плівкової течії і повне змочування поверхні теплообміну. При нестійкому режиму течії можливі розриви плівки, при цьому характер режиму течії стає струменевим із утворенням сухих ділянок. При цьому спостерігається різке зниження інтенсивності теплопередачі, оскільки поверхня теплообміну буде зменшуватись. Цей процес регулюється зміною щільності зрошення. Зміни густини зрошення і концентрації рідкої фази описуються системою диференціальних рівнянь.

Зміна щільності зрошення m у часі в процесі стікання плівки описується рівнянням

$$\frac{dm}{d\tau} = m_0 \left(\frac{\partial \beta_t}{\partial \tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial \beta_t}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial \beta_t}{\partial y} \right),$$

де m_0 – початкова щільність зрошення.

Зміна концентрації рідкої фази:

$$\frac{dR_p}{d\tau} = \frac{\partial R_p}{\partial \tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial R_p}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial R_p}{\partial y}.$$

Рівняння збереження маси рідкої фази:

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_p \bar{\omega}_p) = - \int_{l_{кр3}}^{l_{кр}} \rho_m f \bar{\omega}_{кр} dl_{кр} - \rho_m l_{кр3} \bar{\omega}_3.$$

де $l_{кр}, l_{кр3}$ – розміри кристалічної фази та зародків кристалів.

Під час випарювання розчину суспензії процеси кристалізації солей можна описати системою рівнянь, що описують збереження мас твердої фази та балансом кількості твердих частинок у суспензії.

Передумови, що лежать в основі цієї моделі кристалізації, такі:

– ріст кристалів у плівці протікає в присутності готових кристалів, об'єм новоутвореної твердої кристалічної фази значно менший ніж об'єм загальної маси кристалів, що перебувають у суспензії. Також припускається сталість джерел руйнування кристалів під час їхнього перебування в плівці рідини;

– залежність часу зняття пересичення від середньозваженого розміру кристалів і від ступеня пересичення, властивостей розчинних солей і розчину, кількості твердої фази в суспензії, інтенсивності процесу кипіння;

– температура рідкої і твердої фаз та теплофізичні параметри твердих частинок однакові, постійними є швидкість течії плівки. Відносною швидкістю руху твердих частинок в плівці, що стікає, можна знехтувати внаслідок їх хаотичного переміщення;

– із зовнішніх сил діють сили тяжіння і поверхневого натягу, сила тертя на межі «пар-суспензія». Тиск у поперечному перерізі плівки можна вважати постійним.

Таким чином зміна вмісту твердої фази суспензії має такий вигляд:

$$\frac{d\beta_{\tau}}{d\tau} = \frac{\partial(b \cdot R_m)}{\partial\tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial(b \cdot R_m)}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial(b \cdot R_m)}{\partial y}.$$

Зміна концентрації насичення твердої фази:

$$\frac{dR_m}{d\tau} = \frac{\partial R_m}{\partial\tau} + \bar{\omega}_x \frac{\partial R_m}{\partial x} + \bar{\omega}_y \frac{\partial R_m}{\partial y},$$

де R_p , R_{τ} – параметри розчинності рідкої та твердої фаз, що визначаються як

$$R_p = \frac{b_m}{b_p}, \quad R_m = \frac{b_m}{b_{\text{роз}}},$$

де b_p , b_{τ} , $b_{\text{роз}}$ – концентрація рідкої, твердої фаз та розчину.

Рівняння теплообміну в прикордонному шару рідини має такий вигляд

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t} [q - \lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y \rightarrow 0}],$$

де λ – умовна теплопровідність прикордонного шару (визначається за методом адитивності).

Таким чином, представлено математичну модель плівкової течії багатофазної рідини зі зміною вмісту фаз і процесами випаровування та кристалізації. Дана модель відображає реальні процеси, що протікають у плівці, яка стікає, і дає можливість для подальшого аналізу метою отримання критеріального рівняння, що описує ці складні тепломасообмінні процеси.

Висновок. Однією з найбільш енергоефективних конструкцій випарних апаратів є плівкові випарні апарати. Однак їх застосування, як правило, обмежується чистотою розчину, тому їх не використовують для теплової обробки розчинів з компонентами, які кристалізуються, через підвищену інкрустацію поверхонь нагріву. Як показали проведені дослідження, при додаванні в початковий розчин невеликої кількості готової твердої фази, швидкість інкрустації поверхонь нагріву істотно зменшується, основна кристалізація відбувається на внесеній приманці твердої фази, що дає можливість розширити сферу застосування плівкових випарних апаратів для розчинів в яких відбувається процес кристалізації.

Тому актуальним залишається питання дослідження процесів теплообміну в плівці багатофазної рідини при спільному перебігу процесів течії, теплообміну, пароутво-

рення та кристалізації. Для розв'язання цієї проблеми розглядається теплообмінний процес турбулентного плівкового руху по внутрішній поверхні трубки рідинної суспензії зі змінним вмістом фаз. Представлена математична модель плівкової течії рідинної суспензії з урахуванням змінності вмісту різних фаз розчину. Ця модель описує фізичну сутність процесу випаровування в плівці багатофазної суспензії, що стікає, і містить рівняння руху, нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз і теплообміну, що дозволить в подальшому проводити дослідження процесів плівкової течії багатокомпонентної суміші зі зміною вмісту фаз з метою отримання практичного рішення, а саме критеріального рівняння для розрахунку процесів теплообміну у плівці, що стікає.

Література

1. Гавриличенко И.Г. Экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов выпаривания при плёночном течении жидкости / И.Г. Гавриличенко, Ю.Б. Данилов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 16 (1059). – С. 12–21.
2. Данилов Ю.Б. Теоретические и экспериментальные исследования теплопередачи и кипения в выпарных аппаратах со стекающей плёнкой / Ю.Б. Данилов, Л.М. Ульев // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2012. – № 3. – С. 84–96.
3. Lienhard, John H. A heat transfer textbook / John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V – 5th ed. — Cambridge, MA :Phlogiston Press, 2019 – 784 с.
4. W. K. Lewis. The evaporation of a liquid into a gas. / W. K. Lewis. //Mech. Engr., 44(7):445–446, 1922.
5. Гимбутис Г. Теплообмен в гравитационном течении плёнки жидкости / Г. Гимбутис. – Вильнюс : Моксла, 1988. – 232 с.
6. Павлова В.Г. Особливості процесів кипіння розчинів у стікаючій плівці в камерах випарних апаратів / В.Г. Павлова, О.В. Кошельнік, О.В. Долобовська // Збірник наукових праць за матеріалами Всеукр. науково-технічної онлайн-конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (29-30 вересня 2020 р., м. Одеса). – Одеса: ОНАХТ, 2020. – С. 31–32.
7. Фокин В.С. К расчету коэффициента теплоотдачи в ширококанальных пластинчатых греющих камерах/ В.С. Фокин, В.Г. Павлова, И.В. Иванова // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011. – № 1. – С. 14–17.
8. Фокин В.С. Основы переноса тепла при пленочном движении жидкостной суспензии / В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». Темат. вып. «Новые решения в современных технологиях» – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002 – № 6, Т.1. – С. 94–97.
9. Analysis of heat transfer intensity in evaporators with a plate heat exchanger / Pavlova V.G., Krugliakova O.V. // Тези доп. Міжнародної науково–практичної конференції "Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ «ХПІ», 2019– Ч.1.– 227.
10. The mathematical model for studying the processes of heat and mass transfer of crystallizing solutions / Pavlova V.G., Koshelnik O.V., Pugacheva T.M, Krugliakova O.V. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. – Харків : НТУ «ХПІ». – С. 7.

11. Фокин В.С. Тепломассообмен при пленочном течении многокомпонентной жидкости суспензии / В.С. Фокин, В.Г. Павлова // Вестник национального технического университета «ХПИ». Тем. выпуск «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – Вып. 12. – С. 123–126.

12. Вплив процесів паро- та кристалоутворення на теплообмін в плівкових випарних апаратах / Павлова В.Г., Кошельник О.В., Пугачова Т.М., Круглякова О.В., Долобовська О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2021. – № 1. – С. 32–40.

Bibliography (transliterated)

1. Gavrilichenko I.G. Eksperimental'nye issledovaniya teplogidrodinamicheskikh processov vyparivaniya pri plyonochnom techenii zhidkosti / I.G. Gavrilichenko, Yu.B. Danilov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universyteta «KhPI». Ser. Innovacijni doslidzhennya u naukovih robotah studentiv. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 16 (1059). – P. 12–21.

2/ Danilov Yu.B Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya teploperedachi i kipeniya v vyparnykh apparatah so stekayushchej plyonkoj/ YU.B Danilov, L.M. Ul'ev // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2012. – № 3. – P. 84–96.

3. Lienhard, John H. A heat transfer textbook / John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V – 5th ed. — Cambridge, MA :Phlogiston Press, 2019 – 784 p.

4. W. K. Lewis. The evaporation of a liquid into a gas. / W. K. Lewis. //Mech. Engr., 44(7):445–446, 1922.

5. Gimbutis G. Teploobmen v gravitacionnom techenii plyonki zhidkosti / G. Gimbutis. – Vil'nus : Moksla, 1988. – 232 p.

6. Pavlova V.G. Osoblyvosti protsesiv kypinnia rozchyniv u stikaiuchii plivtsi v kamerakh vyparnykh aparativ / V.G. Pavlova, O.V. Koshelnik, O.V. Dolobovska // Zbirnyk naukovykh prats za materialamy Vseukr. naukovo-tekhnichnoi onlain-konferentsii «Aktualni problemy enerhetyky ta ekolohii» (29-30 veresnia 2020 r., m. Odesa). – Odesa: ONAKhT, 2020. – P. 31–32.

7. Fokin V.S. K raschetu koeffitsienta teplootdachi v shirokokanalnyih plastinchatyih greyuschih kamerah/ V. S. Fokin, V. G. Pavlova, I. V. Ivanova// Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2011. – № 1. – P. 14–17.

8. Fokin V.S. Osnovy perenosa tepla pri plenochnom dvizhenii zhidkostnoj suspenzii/ V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «KhPI». – Kharkov: NTU «KhPI», 2002. – № 6, T. 1, – P. 94–97.

9. Analysis of heat transfer intensity in evaporators with a plate heat exchanger / Pavlova V.G., Krugliakova O.V. // Tezi dop. Mizhnarodnoyi naukovo–praktichnoyi konferentsiyi "Informatsiyi tehnologiyi : nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya". – Harkiv: NTU «HPI», 2019– Ch.1.– 227.

10. The mathematical model for studying the processes of heat and mass transfer of crystallizing solutions / Pavlova V.G., Koshelnik O.V., Pugacheva T.M, Krugliakova O.V. // Informatsiyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: tezi dopovidey HXHI mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi MicroCAD-2023, 17–20 travnya 2023 r. – Harkiv : NTU «HPI». – С. 7.

11. Fokin V.S. Tepломассообмен при пленочном течении многокомпонентной жидкости суспензии / V.S. Fokin, V.G. Pavlova // Vestnik natsionalnogo tehničeskogo universiteta «HPI». Тем. vyipusk «Energeticheskie i teplotehnicheskie protsessyi i oborudovanie». – Harkov: NTU «HPI», 2004. – Vyip. 12. – P. 123–126.

12. Vpliv protsesiv paro- ta kristaloutvorennya na teploobmin v plivkovih viparnih aparatah / Pavlova V.G., Koshelnik O.V., Pugachova T.M., Kruglyakova O.V., Dolobovska O.V. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. – 2021. – # 1. – P. 32–40.

УДК 66.048.5

В. Г. Павлова, к. техн. н., ст. викладач, О. В. Кошельнік, к. техн. н., доцент,
Т. М. Пугачова, к. техн. н., професор, О. В. Круглякова, к. техн. н., доцент

РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСІВ ПАРО- І КРИСТАЛОУТВОРЕННЯ ПРИ ТЕПЛООБМІНІ В ПЛІВКОВИХ ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

У різних галузях промисловості знаходять широке застосування процеси кипіння розчинів з виділенням розчинних у них солей. Нині існують різні типи випарних установок, застосування яких залежить від технологічних особливостей процесу випарювання і вимог до оброблюваного продукту. Найефективнішими як з економічної точки зору, так і з точки зору отримання якісного готового продукту, є плівкові випарні апарати, теплообмінні процеси в яких протікають у турбулентній плівці, що стікає. Застосування плівкових випарних апаратів зазвичай обмежують чистотою оброблюваного розчину. Однак за наявності в початковому розчині невеликої кількості готових частинок цих солей (рідинна суспензія) можливе розширення сфери застосування даного типу апарату. У зв'язку зі сказаним дослідження процесів тепломасообміну в турбулентній плівці багатофазної рідинної суспензії, що стікає та розробка їх математичного опису представляє теоретичний і практичний інтерес.

У роботі представлена математична модель плівкової течії 3-х фазної суспензії. При цьому виходили з наступного: рідина суспензія складається з рідкої та твердої фаз. Рідинна суспензія складається з рідкої та твердої фаз. Рідка фаза являє собою багатокомпонентну систему, що містить розчинник, компоненти, які кристалізуються і не кристалізуються. Течія плівки рідинної суспензії, що стікає, відбувається під дією гравітаційних сил і сил поверхневого натягу на межі суспензія-пара (рух пари збігається з рухом плівки). Відносно швидкістю руху твердих частинок у плівці суцільного середовища, що стікає, можна знехтувати внаслідок їхнього хаотичного переміщення, швидкість течії плівки можна вважати постійною. Турбулентність плівки, що стікає, має місце по всій довжині і спричинена хаотичним переміщенням дисперсної фази, що призводить до однакової температури рідкої та твердої фази та теплофізичних параметрів у поперечному перерізі плівки. Під час стікання рідинної суспензії вздовж поверхні, що обігрівається, завдяки видаленню розчинника під час кипіння на поверхні плівки відбувається зміна концентрацій рідкої фази і кількості твердої фази. Кількість новоутвореної твердої фази значно менша від об'єму загальної маси кристалів, що перебувають у суспензії. Представлена в роботі модель відображає фізичну сутність процесу випарювання в плівці багатофазної суспензії, що стікає, і містить рівняння руху, нерозривності, енергії, рівняння зміни концентрацій фаз і теплообміну.

Ключові слова: випарні апарати, упарювання кристалічних розчинів, плівкова течія багатофазної речовини, підвищення ефективності.

В. Г. Павлова, А. В. Кошельник, Т. М. Пугачева, О. В. Круглякова

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ПАРО- И КРИСТАЛЛООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ В ПЛЕНОЧНЫХ ВЫПАРНЫХ АППАРАТАХ

В различных отраслях промышленности находят широкое применение процессы кипения растворов с выделением растворимых в них солей. В настоящее время существуют различные типы выпарных установок, применение которых зависит от технологических особенностей процесса выпаривания и требований к обрабатываемому продукту. Наиболее эффективными как с экономической точки зрения, так и с точки зрения получения качественного готового продукта являются пленочные выпарные аппараты, теплообменные процессы в которых протекают в турбулентной стекающей пленке. Применение пленочных выпарных аппаратов обычно ограничивают чистотой обрабатываемого раствора. Однако при наличии в исходном растворе небольшого количества готовых частиц этих солей (жидкостная суспензия) возможно расширение сферы применения данного типа аппарата. В связи со сказанным исследование процессов теплообмена в турбулентной пленке многофазной стекающей жидкостной суспензии и разработка их математического описания представляет теоретический и практический интерес.

В работе представлена математическая модель пленочного течения 3-х фазной суспензии. При этом исходили из следующего: жидкая суспензия состоит из жидкой и твердой фаз. Жидкостная суспензия состоит из жидкой и твердой фаз. Жидкая фаза представляет собой многокомпонентную систему, содержащую растворитель, компоненты, которые кристаллизуются и не кристаллизуются. Течение пленки стекающей жидкостной суспензии происходит под действием гравитационных сил и сил поверхностного натяжения на границе суспензия-пар (движение пара совпадает с движением пленки). Относительной скоростью движения твердых частиц в пленке сплошной стекающей среды можно пренебречь вследствие их хаотического перемещения, скорость течения пленки можно считать постоянной. Турбулентность стекающей пленки имеет место по всей длине и вызвана хаотическим перемещением дисперсной фазы, что приводит к одинаковой температуре жидкой и твердой фазы и теплофизических параметров в поперечном сечении пленки. При стекании жидкостной суспензии вдоль обогреваемой поверхности, благодаря удалению растворителя во время кипения на поверхности пленки происходит изменение концентраций жидкой фазы и количества твердой фазы. Количество новообразованной твердой фазы значительно меньше объема общей массы кристаллов, находящихся в суспензии. Представленная в работе модель отражает физическую сущность процесса испарения в стекающей пленке многофазной суспензии и содержит уравнения движения, неразрывности, энергии, уравнения изменения концентраций фаз и теплообмена.

Ключевые слова: испарительные аппараты, упаривание кристаллических растворов, пленочное течение многофазного вещества, повышение эффективности.

V. G. Pavlova, O. V. Koshelnik, T. M. Pugacheva, O. V. Kruglyakova

CALCULATION OF STEAM AND CRYSTAL FORMATION PROCESSES FOR HEAT EXCHANGE IN FILM EVAPORATORS

The processes of boiling solutions with soluble salts release are widely used in various industries. The technological features of the evaporation process and the requirements for the product being processed determine the choice of a specific type of evaporation unit. Film evaporators, in which heat exchange processes take place in a turbulent flowing film, are the most effective both from an economic reason and finished product quality. The use of film evaporators is usually limited by the purity of the solution being processed. However, expanding the scope of application of this type of apparatus is possible if the initial solution contains a small number of particles of salts (liquid suspension). Thus, the study of heat and mass transfer processes in a turbulent film of a multiphase flowing liquid suspension and the development of their mathematical description is of theoretical and practical interest.

A mathematical model of film flow of a three-phase suspension is presented in this work. The initial assumptions were as follows. A liquid suspension consists of liquid and solid phases. The liquid phase is a multicomponent system that contains a solvent and components that crystallize and do not crystallize. The flow of a film of a flowing liquid suspension occurs under the influence of gravitational forces and surface tension forces at the suspension-vapor boundary (the movement of the vapor coincides with the movement of the film). The relative speed of movement of solid particles in a film of a continuous flowing medium can be neglected due to their chaotic movement, while the flow rate of the film can be considered constant. The flowing film is turbulent along its entire length, which is caused by the chaotic movement of the dispersed phase. Thus, the temperatures of the liquid and solid phases, as well as the thermophysical parameters in the cross section of the film, are the same. When a liquid suspension flows along a heated surface, a change in the concentrations of the liquid phase and the amount of the solid phase occurs on the surface of the film due to the removal of the solvent during boiling. The amount of the newly formed solid phase is significantly less than the total mass of crystals in suspension. The model presented in the work reflects the physical essence of the evaporation process in a flowing film of a multiphase suspension and contains equations of motion, continuity, energy, equations for changes in phase concentrations and heat transfer.

Keywords: evaporators, evaporation of crystalline solutions, film flow of a multiphase substance, increasing efficiency.

О. Г. Шутинський, к. техн. н., доцент, Д. В. Снурніков, аспірант

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: математична модель, перехідна характеристика, крива розгону, апроксимація.

Система газоочищення (СГ) – технологічний комплекс котел-утилізатор – газоочищення – димосос, що складається з ряду взаємопов'язаних підсистем, які містять численні елементи управління. Очищення димових газів перед викидом їх димососом в атмосферу є складними технологічним процесом [1].

Відділення тепла в системах газоочищення є основною задачею. У зв'язку з цим до її роботи пред'являються жорсткі вимоги, що визначаються якістю газу, що очищується і продуктивністю відділення. Завдання цеху очищення газу – витягувати з забрудненого газу пил при стабільній роботі устаткування. Від стабільної роботи всієї системи залежить якість газу, що очищується, економічна ефективність встановленого устаткування, витрати на ремонт і обслуговування, та витрати за викид в атмосферу. Для оптимального режиму роботи системи необхідно забезпечити плавність управління технологічним процесом.

Газопровід відноситься до одно ємкісних об'єктів і його передавальна функція має вигляд [2]:

$$W_0(p) = \frac{k_0 \cdot e^{-p\tau}}{T_1 p + 1}, \quad (1)$$

де $k_0 = \frac{\Delta(B_{\text{вх}})}{\Delta(B_x)} \cdot \frac{x_{B_x}^H}{x_{B_{\text{вх}}}^H}$ коефіцієнт посилення об'єкту в безрозмірному вигляді; T_1 – постійна часу [3].

У результаті проведення експерименту по зняттю тимчасової характеристики в газопроводі було нанесено збурюючу дію – ступінчаста зміна витрати оборотної води щодо номінального на 8 %, з 170 м³/год. до 185 м³/год. Для визначення цих величин була отримана експериментальна крива розгону об'єкту по каналу «витрата оборотної води – температура забрудненого газу на вході до труб Вентурі», яка представлена в таблиці 1.1

При дослідженні промислових об'єктів не вдається повністю виключити випадкові збурення. У результаті проведення експерименту реєструють деяку функцію $Z(t)$, що складається з корисного сигналу $h(t)$ і випадкового сигналу $f(t)$:

$$Z(t) = h(t) + f(t). \quad (2)$$

Для виділення дійсної перехідної характеристики застосовують різні методи згладжування. Для згладжування значень у даному випадку застосовується метод ковзаючого усереднювання, суть якого полягає в наступному: на деякому інтервалі $L \Delta t$, де L – будь-яке ціле число, здійснюється послідовне визначення ординат Z_i (де $i=0,1,2,..,n$) по

формулі[4]:

$$h_{i+L/2}^* = \frac{1}{L+1} \sum_{\beta=0}^L z_{i+\beta} \cdot \quad (3)$$

Таблиця 1.1 – Експериментальні данні

Час t , сек.	Температура T , °C	Час t , сек.	Температура T , °C
0	135	26	126,8
2	135	28	126,3
4	135	30	126
6	133,2	32	125,8
8	132,5	34	125,5
10	131	36	125,3
12	130,5	38	125,1
14	129,7	40	125
16	129	42	125
18	128,2	44	125
20	127,8	46	125
22	127,2	48	125
24	127		

Візуально оцінивши перехідну характеристику $h^*(t)$ при $l=2$ і $l=4$, вибираємо лінійне згладжування по 3-х точках ($l=2$) [3,4].

$$\begin{aligned} h_0^* &= (5Z_0 + 2Z_1 - Z_2)/6 \\ h_i^* &= (Z_{i-1} + Z_i + Z_{i+1})/3; 1 = i = N - 1. \\ h_N^* &= (5Z_N + 2Z_{N-1} - Z_{N-2})/6 \end{aligned} \quad (4)$$

Отримані дані згладжені по методу «трьох точок» і результати згладжування перехідної характеристики приведені в таблиці 1.2, графік перехідної характеристики представлено на рисунку 1.1

Таблиця 1.2 – Лінійне згладжування по трьох точках

Час t , сек.	Температура T , °C	Час t , сек.	Температура T , °C
0	135	26	126,7
2	135	28	126,37
4	134,4	30	126,03
6	133,567	32	125,77
8	132,233	34	125,53
10	131,333	36	125,3
12	130,4	38	125,13
14	129,733	40	125,03
16	128,967	42	125
18	128,333	44	125
20	127,73	46	125
22	127,33	48	125
24	127	50	125

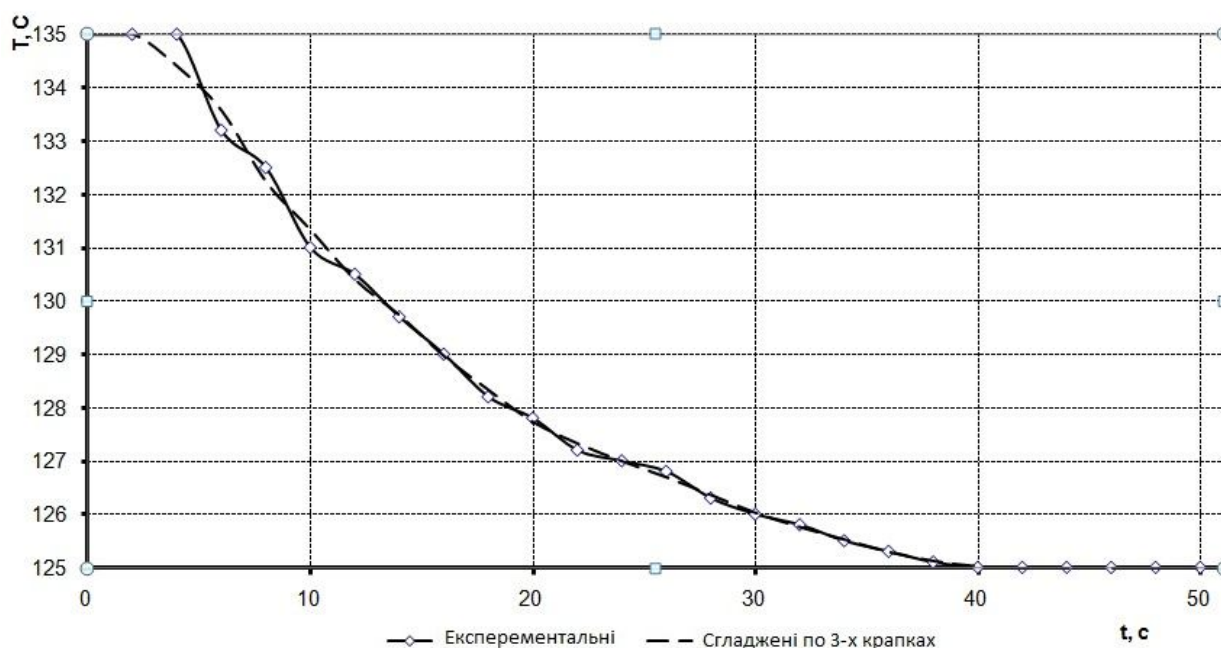


Рисунок 1.1 – Перехідна характеристика згладжена по 3-м точкам

Згладжені дані необхідно:

- привести до одного знаку;
- нормувати;
- усереднити;
- апроксимувати.

Нормування перехідної характеристики, тобто уявлення в безрозмірному вигляді необхідно проводити по формулі:

$$h(t) = \frac{\Delta Y_{вих}(t)}{\Delta Y_{вих}(\infty)}. \quad (5)$$

У незалежності від методу апроксимації, визначення коефіцієнтів починають з розрахунку коефіцієнта передачі об'єкта. Коефіцієнт передачі погоджує розмірність вихідної і вхідної величин об'єкта і розраховується по формулі:

$$K = \frac{\Delta Y(\infty)}{\Delta X(\infty)}, \quad (6)$$

де $\Delta Y(\infty)$, $\Delta X(\infty)$ – максимальне відхилення вихідної і вхідної величини об'єкту[3,5].

Значення коефіцієнта K можна визначити з графіка перехідної характеристики об'єкту з самовирівнюванням. За визначенням коефіцієнт передачі K є розмірною величиною. Це не дає можливості порівнювати коефіцієнти передачі по різних каналах збурення. Тому цей коефіцієнт часто приводять до безрозмірного вигляду. Для цього значення максимальних відхилень величини ділять на їх номінальні значення [6].

$$K = \frac{Y(\infty) - Y(0)}{Y(0)} \cdot \frac{X(0)}{X(\infty) - X(0)}; \quad (7)$$

$$K = \frac{125 - 135}{135} \cdot \frac{100}{8} = 0,93.$$

Апроксимація – заміна графіка математичними виразами. Динамічні властивості об'єкту регулювання характеризуються диференціальними виразами, перехідними і передавальними функціями, частотними характеристиками, між якими існує однозначна залежність. При розрахунку автоматичних систем регулювання, математичну модель зручно представити у вигляді передавальної характеристики. Отримати її можна в результаті апроксимації тимчасової характеристики. Розроблена велика кількість методів аналізу перехідної характеристики з метою отримання передавальної функції лінійного об'єкту регулювання [5].

Суть методів полягає у визначенні коефіцієнтів передавальної функції, заздалегідь вибраного методу, підстановка яких зводиться до отримання розрахункової характеристики найкращим чином співпадаючою з експериментальною.

Існує декілька методів апроксимації: графічно-логарифмічний, метод площ, метод вирішення диференціальних рівнянь, і ін.

Розрахунок здійснюється за допомогою ЕОМ. Початковими даними для розрахунку є експериментальна перехідна характеристика об'єкту, задана у вигляді рівновіддалених за годину ординат і величина вхідного сигналу.

Для апроксимації перехідної характеристики даного об'єкту використовуємо метод Сімою.

Метод Сімою є універсальним методом апроксимації, що дозволяє отримати апроксимуючі вирази будь-якого порядку. Цей метод дуже зручний для обробки на ЕОМ, він легко алгоритмізується та відрізняється великою точністю[1].

Апроксимуючою залежністю є дрібно-раціональна передаточна функція виду:

$$W(P) = \frac{b_m P^m + b_{m-1} P^{m-1} + \dots + b_1 P + 1}{a_n P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + 1}. \quad (8)$$

Невідомі коефіцієнти a_i і b_i визначають з наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 = F_1 + b_1 \\ a_2 = F_2 + b_2 + F_1 b_1 \\ \dots \\ a_i = F_i + b_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_j F_{i-j} \end{cases}. \quad (9)$$

Коефіцієнти F_i в системі рівнянь (9) розраховуються по формулах:

$$\begin{cases} F_1 = \int_0^{\infty} (1-h) dt \\ F_2 = F_1^2 \int_0^{\infty} (1-h)(1-\theta) d\theta \\ F_3 = F_1^3 \int_0^{\infty} (1-h) \left[1 - 2\theta + \frac{\theta^2}{2!} \right] d\theta \\ \dots \\ F_i = F_1^i \int_0^{\infty} (1-h) \left[\frac{(-\theta)^{i-1}}{(i-1)!} + \frac{(-\theta)^{i-2}}{(i-2)!} + \sum_{j=0}^{i-3} \frac{F_{i-j-1}(-\theta)^j}{F_1^{i-j-1}} \right] d\theta \\ \theta = \frac{t}{F_1} \end{cases} \quad (10)$$

Коефіцієнт F_i пов'язаний з перехідною характеристикою інтегральними залежностями (див. рис. 1.2) [3,2].

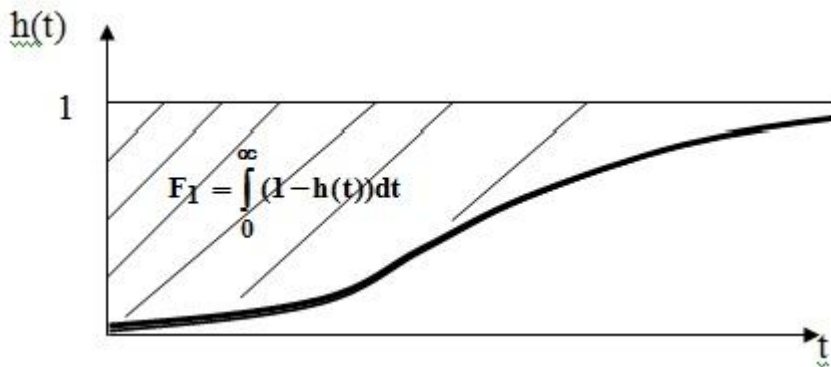


Рисунок 1.2 – Зв'язок коефіцієнта з перехідною характеристикою

У результаті проведення апроксимації отримана передавальна функція об'єкту, тобто математична модель:

$$W_0 p = \frac{-0.93e^{-2p}}{13.4p + 1}.$$

Коефіцієнти передавальної функції $T_I = 13,4$ сек.; $k=0,93$. З графіка визначаємо час запізнювання, яке дорівнює $\tau = 2$ сек., $\delta_{max} = 8,7$ %.

Література

1. Бойченко Б.М., Охотський В. Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Під-к.- Дніпро: РВА «Дніпро-Вал».- 2004. 454 с.
2. Александров Є.Є., Голуб О.П., Костенко Ю.Т., Кузнецов Б.І., Соляник В.П. Теорія автоматичного управління. – Харків, НТУ "ХПІ", 2001. 460 с.
3. Математичне моделювання об'єктів керування хімічних і фармацевтичних виробництв: навч. посібник / Красніков І.Л., Бабіченко А.К., Вельма В.І., Подустов М.О., Зайцев О.І., Бабіченко Ю.А.; за ред. А.К. Бабіченко Харків.: Вид-во ТОВ "С.А.М.", 2015

р. 224 с.

4. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Математичні методи оптимізації" [Електронний ресурс] : для студентів спец. 174 "Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та робототехніка" / уклад.: І.Л. Красніков [та ін.]; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків, 2023. – 38 с.

5. Глушик М. М., Копич І. М., Сороковський В.М. Математичне програмування: підручник. ISBN 978-966-418- 103-4 - Львів: Новий Світ, 2014. 280 с.

6. Ладанюк, А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. 274 с.

7. Мовчан В.П., Бережной М.М. Основи металургії: Монографія. – Дніпропетровськ: Пороги, 2001. 335 с.

8. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. – К.: Задрука, 2002р. – 424 с.

9. Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. 280 с.

10. Нестеров А. Л. Проектування АСУТП. Книга 1. Методичний посібник. – Видавництво: ДЕАН, 2006 р.

11. MATLAB Global Optimization Toolbox User's Guide R2020a. The MathWorks, Inc., 2020. 878 p.

12. Жученко А. І, Ладієва Л. Р., Дубік Р. М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK. Монографія. – Київ: НТУУ "КПІ", 2010. – 209 с.

Bibliography (transliterated)

1. Boichenko V.M., Okhotskyi V. B., Kharlashyn P.S. Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriia, tekhnolohiia, yakist stali, konstruksii ahrehativ, retsyrkuliatsiia materialiv i ekolohiia: Pid-k.- Dnipro: RVA «Dnipro-Val». – 2004. 454 p.

2. Aleksandrov Ye.Ye., Holub O.P., Kostenko Yu.T., Kuznetsov B.I., Solianyk V.P. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. – Kharkiv, NTU "KhPI", 2001. 460 p.

3. Matematychnе modeliuвання ob'ektiv keruvannya khimichnykh i farmatsevychnykh vy-robnytstv: navch. posibnyk / Krasnikov I.L., Babichenko A.K., Velma V.I., Podustov M.O., Zaitsev O.I., Babichenko Yu.A.; za red. A.K. Babichenko Kharkiv.: Vydvo TOB "S.A.M.", 2015 r. 224 p.

4. Metodychni vказivky do vykonannya laboratornykh robіt z dystsypliny "Matematychni metody optymizatsii" [Elektronnyi resurs] : dlia studentiv spets. 174 "Avtomatyzatsiia, kompiuternointehrovani tekhnolohii ta robototekhnika" / uklad.: I. L. Krasnikov [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Elektron. tekst. dani. – Kharkiv, 2023. 38 p.

5. Hlushyk M. M., Kopych I. M., Sorokovskyi V.M. Matematychnе prohramuvannya: pidruchnyk. ISBN 978-966-418- 103-4 – Lviv: Novyi Svit, 2014. 280 p.

6. Ladaniuk, A. P. Teoriia avtomatychnoho keruvannya tekhnolohichnymy ob'ektamy : navch. posib. / A.P. Ladaniuk, K.S. Arkhanhelska , L.O. Vlasenko – K.: NUKhT, 2014. 274 p.

7. Movchan V.P., Berezhnoi M.M. Osnovy metalurhii: Monohrafiia. – Dnipropetrovsk: Porohy, 2001. – 335 p.

8. Ostapenko Yu.O. Identyfikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh ob'iektiv keruvannia. – K.: Zadruka, 2002r. 424 p.

9. Hoholiuk P.F., Hrechyn T.M. Teoriia avtomatychnoho keruvannia: Navch. posibnyk.– Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho univer sytetu «Lvivska politekhnika», 2009. 280 p.

10. Nesterov A.L. Proektuvannia ASUTP. Knyha 1. Methodychnyi posibnyk Vydavnytstvo: DEAN, 2006 r.

11. MATLAB GlobalOptimizationToolboxUsersGuide R2020a. TheMathWorks, Inc., 2020. 878 p.

12. Zhuchenko A.I, Ladiieva L.R., Dubik R.M. Dynamichna optymizatsiia z vykorystanniam MATLAB ta SIMULINK. Monohrafiia. – Kyiv: NTUU “KPI”, 2010. 209 p.

УДК 681.5

О. Г. Шутинський, к. техн. н., доцент, Д. В. Снурніков, аспірант

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ СИСТЕМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

Система газоочищення (СГ) – технологічний комплекс котел-утилізатор – газоочищення – димосос, що складається з ряду взаємопов'язаних підсистем, які містять численні елементи управління. Очищення димових газів перед викидом їх димососом в атмосферу є складними технологічним процесом [1].

Відділення тепла в системах газоочищення є основною задачею. У зв'язку з цим до її роботи пред'являються жорсткі вимоги, що визначаються якістю газу, що очищується і продуктивністю відділення. Завдання цеху очищення газу – витягувати з забрудненого газу пил при стабільній роботі устаткування. Від стабільної роботи всієї системи залежить якість газу, що очищується, економічна ефективність встановленого устаткування, витрати на ремонт і обслуговування, та витрати за викид в атмосферу [7].

. Для оптимального режиму роботи системи необхідно забезпечити плавність управління технологічним процесом.

У результаті проведення експерименту по зняттю тимчасової характеристики в газопроводі було нанесено збурюючу дію – ступінчаста зміна витрати оборотної води щодо номінального на 8 %, з 170 м³/год. до 185 м³/год. Для визначення цих величин була отримана експериментальна крива розгону об'єкту по каналу «витрата оборотної води – температура забрудненого газу на вході до труб Вентурі».

Для виділення дійсної перехідної характеристики застосовують різні методи згладжування. Для згладжування значень у даному випадку застосовується метод ковзаючого усереднювання [8].

Апроксимація – заміна графіка математичними виразами. Динамічні властивості об'єкту регулювання характеризуються диференціальними виразами, перехідними і передавальними функціями, частотними характеристиками, між якими існує однозначна залежність. При розрахунку автоматичних систем регулювання, математичну модель

зручно представити у вигляді передавальної характеристики. Отримати її можна в результаті апроксимації тимчасової характеристики. Розроблена велика кількість методів аналізу перехідної характеристики з метою отримання передавальної функції лінійного об'єкту регулювання [3].

Суть методів полягає у визначенні коефіцієнтів передавальної функції, заздалегідь вибраного методу, підстановка яких зводиться до отримання розрахункової характеристики найкращим чином співпадаючою з експериментальною.

Існує декілька методів апроксимації: графічно-логарифмічний, метод площ, метод вирішення диференціальних рівнянь, і ін.

Розрахунок здійснюється за допомогою ЕОМ. Початковими даними для розрахунку є експериментальна перехідна характеристика об'єкту, задана у вигляді рівновіддалених за годинною ординат і величина вхідного сигналу.

Для апроксимації перехідної характеристики даного об'єкту використовуємо метод Сімою [6,9].

Метод Сімою є універсальним методом апроксимації, що дозволяє отримати апроксимуючі вирази будь-якого порядку. Цей метод дуже зручний для обробки на ЕОМ, він легко алгоритмізується та відрізняється великою точністю.

У результаті проведення апроксимації отримана передавальна функція об'єкту, тобто його математична модель.

Ключові слова: математична модель, перехідна характеристика, крива розгону, апроксимація.

А. Г. Шутинский, Д. В. Снурников

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОПРОВОДА СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТАЛИ

Система газоочистки (СГ) – технологический комплекс котел-утилизатор – газоочистка - дымосос, что состоит из ряда взаимосвязанных подсистем, которые содержат многочисленные элементы управления. Очистка дымовых газов перед выбросами их дымососом в атмосферу является сложным технологическим процессом [1].

Отделение тепла в системах газоочистки является основной задачей. В связи с этим к ее работе предъявляются жесткие требования, которые определяются качеством очищаемого газа и производительностью отделения. Задание цеха очистки газа – вытягивать из загрязненного газа пыль при стабильной работе оборудования. От стабильной работы всей системы зависит качество очищаемого газа, экономическая эффективность установленного оборудования, затраты на ремонт и обслуживание, и расходы за выбросы в атмосферу [7].

Для оптимального режима работы системы необходимо обеспечить плавность управления технологическим процессом.

В результате проведения эксперимента по снятию временной характеристики в газопроводе было нанесено возмущающее действие – ступенчатое изменение расхода оборотной воды относительно номинального на 8 % с 170 м³/в год до 185 м³/год. Для определения этих величин была получена экспериментальная кривая разгона объекта по

каналу "расход оборотной воды – температура загрязненного газа на входе к трубам Вентури".

Для выделения действительной переходной характеристики применяют разные методы сглаживания. Для сглаживания значений в данном случае применяется метод скользящего усреднения [8]

Аппроксимация – замена графика математическими выражениями. Динамические свойства объекта регулирования характеризуются дифференциальными выражениями, переходными и передаточными функциями, частотными характеристиками, между которыми существует однозначная зависимость. При расчете автоматических систем регулирования, математическую модель удобно представить в виде передаточной характеристики. Получить ее можно в результате аппроксимации временной характеристики. Разработано большое количество методов анализа переходной характеристики с целью получения передаточной функции линейного объекта регулирования [3].

Суть методов заключается в определении коэффициентов передаточной функции, заранее выбранного вида, подстановка которых сводится к получению расчетной характеристики, наилучшим образом совпадающей с экспериментальной

Существует несколько методов аппроксимации: графически-логарифмический, метод площадей, метод решения дифференциальных уравнений, и др.

Расчет осуществляется с помощью ЭВМ. Начальными данными для расчета является экспериментальная переходная характеристика объекта, заданная в виде равноудаленных по времени ординат и величина входного сигнала.

Для аппроксимации переходной характеристики данного объекта используем метод Симою [6,9].

Метод Симою является универсальным методом аппроксимации, что позволяет получить аппроксимирующие выражения любого порядка. Этот метод очень удобен для обработки на ЭВМ, он легко алгоритмизуется и отличается большой точностью.

В результате проведения аппроксимации получена передаточная функция объекта, то есть его математическая модель.

Ключевые слова: математическая модель, переходная характеристика, кривая разгона, аппроксимация.

O. G. Shutynskyi, D. V. Snurnikov

MATHEMATICAL MODELING OF THE GAS PIPELINE OF A GAS CLEANING SYSTEM IN STEEL PRODUCTION

A gas cleaning system (GCS) is a technological complex boiler-utilizer-gas cleaning-smoke exhauster consisting of a number of interconnected subsystems containing numerous controls. Flue gas purification before its emission by a smoke exhauster into the atmosphere is a complex technological process [1].

Heat separation in gas purification systems is a key task. In this regard, strict requirements are imposed on its operation, which are recognized by the quality of the gas to be cleaned and the performance of the separation unit. The task of the gas purification shop is to remove

dust from contaminated gas while ensuring stable operation of the equipment. The stable operation of the entire system affects the quality of the gas being cleaned, the economic efficiency of the installed equipment, repair and maintenance costs, and the cost of air emissions [7].

For optimal system operation, it is necessary to ensure smooth process control. For optimal system operation, it is necessary to ensure smooth process control.

As a result of the experiment on removing the temporary characteristic, a disturbing effect was applied to the gas pipeline - a stepwise change in the recycled water flow rate relative to the nominal one by 8 %, from 170 m³/h to 185 m³/h. To determine these values, an experimental curve of the object acceleration through the channel “circulating water flow - temperature of contaminated gas at the inlet to the venturi pipes” was obtained.

Different smoothing methods are used to extract the actual transient response. For smoothing of values in this case the method of moving averaging is used [8]

Approximation - replacing the graph with mathematical expressions. Dynamic properties of the control object are characterized by differential expressions, transition and transfer functions, frequency characteristics, between which there is an unambiguous dependence. When calculating automatic control systems, it is convenient to represent the mathematical model as a transfer characteristic. It can be obtained as a result of approximation of the time characteristic. A large number of methods have been developed to analyze the transient response in order to obtain the transfer function of a linear control object [3].

The essence of the methods is to determine the coefficients of the transfer function of a pre-selected form, the basis of which is to obtain the calculated characteristic that best matches the experimental one.

There are several approximation methods: graphical and logarithmic, area method, method of solving differential equations, etc.

The calculation is carried out using a computer. The initial data for the calculation are the experimental transient response of the object, given in the form of equidistant ordinates in time, and the input signal value.

To approximate the transient response of this object, we use the Simoy method [6, 9].

The Simoy method is a universal approximation method that allows obtaining approximating expressions of any order. This method is very convenient for computer processing, it is easily algorithmized and has great accuracy.

As a result of the approximation, the transfer function of the object, i.e. its mathematical model, is obtained.

Keywords: mathematical model, transient response, acceleration curve, approximation.

І. В. Шульга, к. техн. н., доцент, В. В. Владимиренко, аспірант,
І. О. Лаврова, к. техн. н., доцент

РАЦІОНАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОТРИМАННЯ КОКСУ ІЗ ЗАДАНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
ДП «УХІН»*

Ключові слова: кокс доменний, кокс феросплавний, питомий електричний опір, вихід летких речовин, спікливість, ступінь подрібнення, відбивна здатність вітриніту.

Вступ. Як показано в попередніх роботах [1, 2], в сучасних умовах практично важливим є отримання коксу з двома рівнями питомого електричного опору: з питомим електричним опором не більше 0,1 Ом·см – для потреб доменного виробництва; з більшими значеннями питомого електричного опору – для використання в електропечах феросплавного виробництва. Нижче наведені головні технологічні принципи отримання коксу з двома рівнями заданого питомого електричного опору.

Доменний кокс. Відомо, що забезпечення низького питомого електричного опору доменного коксу відбувається одночасно з поліпшенням всього комплексу властивостей доменного коксу. Згідно з цим на підставі вимог до властивостей коксу поліпшеної якості була теоретично обґрунтована та сформульована концепція виробництва високоякісного коксу [3], що складається з наступних основних напрямків:

1. Формування раціональної сировинної бази коксування за рахунок забезпечення потрібних властивостей вугільної шихти, перш за все по зольності, сірчистості, ступеню метаморфізму. Підвищення глибини збагачення та зменшення зольності вугільних концентратів, підвищення ступеня однорідності вугільних шихт за петрографічним складом, зменшення кількості концентратів, які використовують для складання шихти на конкретному підприємстві та використання в шихтах переважно малосірчистого вугілля зі сприятливим хімічним складом мінеральної частини.

2. Раціональна технологія коксування, яку забезпечує спрямований вплив на фізико-хімічні процеси термічної деструкції та синтезу для отримання коксу з найбільшою часткою ділянок анізотропної структури (підвищення ступеня впорядкованості вуглецю коксу); зниження швидкостей коксування до рівня не більше 24 мм/годину; а також коригування температурного режиму за змін умов коксування.

3. Післяпічна обробка коксу, а саме: забезпечення стабільної вологості; раціональний рівень механічних навантажень на кокс за його сортування та додаткова механічна обробка коксу для реалізації наявних центрів механічних навантажень та утворення тріщин; обробка поверхні коксу з метою закриття пор і тріщин, а також уповільнення процесів газифікації.

Більшість дослідників серед властивостей вугілля та шихт, що найбільше впливають на якість отриманого коксу, виділяють [3, 4]: вихід летких речовин, спікливість шихти, петрографічну характеристику, зольність, сірчистість, технологічний режим вуглепідготовки.

Показник виходу летких речовин – одна з головних характеристик, яку застосовують як при постачанні вугілля для коксування, так і при розробці складів вугільних шихт. Численними дослідженнями показаний взаємозв'язок цього показника з виходом коксу та хімічних продуктів [4–6]. В той же час зв'язок виходу летких речовин з якістю коксу не такий однозначний через те, що вихід летких речовин може бути близьким та навіть практично однаковим у вугілля та їх сумішей, які мають вельми різні технологічні властивості. Тому визначальним для міцності коксу є не вихід летких речовин, а інші показники.

Співкливість вугілля найчастіше характеризують за даними пластометричного аналізу, перш за все по товщині пластичного шару Y (мм), яку визначають за ДСТУ 7722:2019 [7]. Відомо [8], що індивідуальне вугілля марок Ж та К, яке має найбільшу товщину пластичного шару, дає найміцніший кокс, тобто і товщина пластичного шару, і міцність отриманого коксу, в залежності від ступеня метаморфізму індивідуального вугілля змінюються по кривій з максимумом.

Важливим для характеристики властивостей вугілля та шихт є також показник середньої відбивної здатності вітриніту за даними петрографічного аналізу [9], який виконують за методикою стандарту ISO 7404 [10, 11]. Є певний взаємозв'язок цього показника з виходом летких речовин (вугілля та шихти з меншим виходом летких речовин у більшості випадків мають більший показник відбивної здатності). Але порівняно з виходом летких речовин відбивна здатність вугілля та шихт тісніше пов'язана з міцністю отриманого з них коксу, тому що петрографічні показники за своєю сутністю характеризують природу вугілля з точки зору як характеристик вихідного вуглеутворюючого матеріалу, так і глибини здійснення геологічних процесів вуглеутворення. Зокрема, найміцніший кокс отримують, як правило, з вугілля Донбасу та шихт на їх основі із середніми значеннями відбивної здатності (близько 1,0–1,2 %) [12]. Таким чином, величина відбивної здатності також значущо впливає на міцність коксу.

З метою характеристики технологічної цінності для коксування вугілля та шихт в сучасних умовах в ДП «УХІН» на базі петрографічних характеристик розроблені два комплексних показники [13]. Перший з них ($C_{ш}$ - співкливість шихти) характеризує вміст складових органічної маси вугілля, що утворюють при термічній деструкції значні кількості термостійких рідкорухливих продуктів, здатних міцно спікатися з твердофазним матеріалом:

$$C_{ш} = \frac{\Sigma(0,9 - 1,39)Vt}{100} \%,$$

де $\Sigma(0,9-1,39)$ – вміст у вітриніті у відсотках складових з відбивною здатністю від 0,9 до 1,39 %; Vt – вміст в органічній масі вугілля мацералів групи вітриніту, %.

Другий показник ($K_{ш}$ – коксуємість шихти, яку виражають у відносних одиницях) являє собою відношення у складі органічної маси вугілля сумарного вмісту добре спікливих мацералів групи ліптиніту та складових вітриніту з показником відбитку від 0,9 до 1,39 %, що можуть приймати опіснювальні присадки, до кількості таких присадок – суми опіснювальних мацералів та інертних складових вітриніту з показником відбитку більше 1,7 %:

$$K_{ш} = \frac{C_{ш} + L}{\Sigma OK + \frac{\Sigma(\geq 1,7)Vt'}{100}}$$

де L – вміст мацералів групи ліптініту, %; $\sum OK$ – сума опіснюючих компонентів (інертініту та двох третин семівітрініту), %.

Отже, показниками, які характеризують властивості шихти та найсуттєвіше впливають на міцність отриманого коксу, є товщина пластичного шару та петрографічні характеристики.

Відомо, що на технологічні властивості вугільної шихти помітно впливає *рівень її подрібнення*. Найціннішими з цієї точки зору у вугіллі Донбасу є класи крупності 3–0,5 мм. Крупніші зерна мають меншу питому поверхню, що не дозволяє їм брати активну участь у поверхневій взаємодії з іншими елементами вугільної засипки на стадіях спікання та утворення коксу. Навпаки, надмірне подрібнення вугільних зерен призводить до так званого явища «самоопіснення», внаслідок чого ускладнюється реалізація притаманного вугіллю та шихтам потенціалу спіклivosti – питома поверхня стає занадто великою для ефективного змочування її утворюваними внаслідок термохімічної деградації рідкорухливими продуктами. Крім того, надмірне подрібнення вугілля призводить до збільшення виходу фусів та погіршення якості смоли за показниками густини і вмісту нерозчинних речовин. Вугілля різних марок та різних басейнів має різні вихідну крупність, механічну міцність та подрібнюваність. Тому для кожного підприємства потрібна розробка раціональних схем підготовки шихти до коксування з урахуванням конкретних умов цього підприємства [14].

Головними факторами технології коксування та післяпечної обробки, що впливають на властивості отриманого коксу, є: період коксування; рівень температур в контрольних вертикалах; рівномірність прогріву засипки, що коксується, перш за все по висоті, а також по довжині, особливо в зонах навпроти крайніх вертикалів; кінцева температура коксового пирога; режим гасіння; технологія сортування коксу.

Система обігріву печей ПВР, застосована на всіх коксових батареях України, є найпоширенішою в сучасних конструкціях ДП «Гіпрококс» [15]. Для неї характерні дві ознаки: об'єднання вертикалів в пари та рециркуляція продуктів горіння (рис. 1).

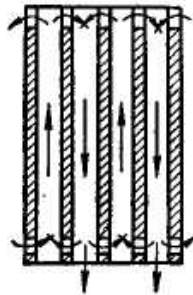


Рисунок 1 – Схема рециркуляції в печах системи ПВР

Простінок розбитий на пари вертикалів, поєднаних згори перевальними вікнами. Горіння відбувається в одному з вертикалів пари, а іншим поєднаним вертикалом в цей же час до регенераторів відводяться продукти горіння.

В нижній частині вертикали, що працюють на висхідному та низхідному потоках, поєднані вікнами для рециркуляції. Крізь ці вікна частина продуктів спалювання з вертикалу, що працює на низхідному потоці, під впливом різниці тисків всмоктується до вертикалу, що працює на висхідному потоці, тобто відбувається рециркуляція продуктів горіння. Ступінь рециркуляції становить 30–40 %.

Переваги такої системи обігріву зумовлені перш за все розбавленням газу та повітря, що надходять на спалювання у вертикали висхідного потоку, продуктами спалювання, які рециркулюють з низхідного потоку на висхідний. Це призводить до зниження концентрацій газу та повітря в газоповітряній суміші у вертикалах висхідного потоку та зменшення швидкості горіння у відповідності із законом діючих мас:

$$v = -\frac{dc_r}{dt} = kc_r c_n,$$

де v – швидкість хімічної реакції горіння; c_r – концентрація газу в газоповітряній суміші; t – час реакції; k – константа швидкості реакції; c_n – концентрація повітря в газоповітряній суміші.

Як видно із записаної формули, зменшення концентрації газу та повітря призводить до зменшення швидкості горіння, а, отже, і збільшення часу t , необхідного для спалювання газу. Другим важливим позитивним наслідком рециркуляції є повернення частини ентальпії (тепловмісту) продуктів спалювання з низхідного потоку на висхідний, що сприяє зниженню витрати тепла на обігрів коксових печей.

При розробці технологічних параметрів коксування виходили з того, що загальна швидкість процесу коксування має забезпечувати достатню глибину здійснення термохімічних процесів поліконденсації на стадії утворення коксу і в той же час давати можливість технічно та економічно ефективно використовувати наявний пічний фонд. Дослідно-промисловими коксуваннями показано, що умови отримання високоякісного коксу виконуються при швидкості коксування 24–27 мм/годину.

У відповідності з цим раціональні періоди коксування для отримання коксу заданої якості складають:

- для коксових печей із середньою шириною камери 410 мм – не менше 17 годин;
- для коксових печей із середньою шириною камери 450 мм – не менше 19 годин.

Кінцева температура коксування, виміряна термopарами за 15 хвилин до видачі, має складати в осьовій площині коксового пирога 1050–1100 °С. За менших температур не досягається необхідна глибина здійснення процесів термічного синтезу. За більших температур виникає небезпека перегріву масиву вогнетривкої кладки з погіршенням умов її експлуатації та розтріскування коксового пирога безпосередньо в камері, ускладненню умов видачі коксу з печей та зменшенню виходу доменного коксу.

Рівень температур в опалювальній системі у відповідності з вимогами ПТЕ [16] має забезпечувати потрібний рівень температур коксування в коксі наприкінці заданого періоду коксування. У відповідності з рівнем температур в опалювальній системі встановлюють решту значущих технологічних параметрів обігріву печей (витрати опалювального газу загальні та по боках батареї, коефіцієнт надлишку повітря, розташування та вільні перерізи сталей і змінних регулювальних засобів тощо).

За зміни властивостей шихти та умов коксування рівень температур в опалювальній системі має коригуватись. Слід зазначити, що досягнення заданого рівня кінцевих температур коксування за різних періодів та за переробки шихти різної якості, природно, вимагає і різної витрати тепла. Нижче поданий аналіз впливу властивостей шихти та тривалості коксування на рівень температур в опалювальній системі.

Ступінь подрібнення шихти визначає її насипну густину. При цьому максимум насипної густини досягається за ступеня подрібнення 75–77 %. Відхилення в обидві боки призводять до зменшення насипної густини. З одного боку, підвищення насипної густини шихти є позитивним фактором, що збільшує продуктивність коксової батареї. Але

в той же час через необхідність підведення більшої кількості тепла до засипки того ж об'єму, але більшої маси, потрібне збільшення рівня температур в контрольних вертикалах.

З іншого боку, збільшення ступеня подрібнення дозволяє повніше реалізувати спіктивність шихти, але знижує її насипну густину. Витрата тепла на коксування знижується, але одночасно зменшується і продуктивність коксових печей. Більше того, за надмірного подрібнення шихти та зростання кількості в ній пиловидних (менше 0,5 мм) класів відбувається т.зв. «самоопіснення» шихти і виникають ускладнення в експлуатації, зокрема, на стадії завантаження шихти до камер коксування. Таким чином, потрібний підбір оптимального ступеня подрібнення шихти з використанням прогресивних методів її підготовки, зокрема, диференційоване або групове подрібнення компонентів за схемами ДПК або ГПК. Ступень подрібнення найбільш твердого газового та петрографічно неоднорідного вугілля після попереднього подрібнення має становити 68–70 %, кінцевий ступень подрібнення шихти після остаточного подрібнення – 75–77 %, в т.ч. вміст пиловидних класів (менше 0,5 мм) в підготовленій до коксування шихті не повинен перевищувати 30 %.

Період коксування. Серед факторів, що характеризують технологічний режим коксування, найбільший вплив на витрату тепла в одиницю часу справляє саме тривалість періоду коксування. Так, практикою роботи встановлено, що збільшення тривалості коксування на 1 годину дозволяє знизити рівень температур в контрольних вертикалах на 15–30 °С, та навпаки – зниження періоду коксування вимагає відповідного збільшення рівня температур в контрольних вертикалах. Зміна рівня температур, в свою чергу, визначає рівень витрати опалювального газу на обігрів коксової батареї, тобто, з точки зору рівня температур в контрольних вертикалах підвищення періоду коксування дозволяє дещо знизити витрату тепла.

Однак, через те, що кінцева та середня за весь період коксування температури в коксівній засипці за правильно встановленого температурного режиму не залежать від тривалості процесу коксування, інтенсивність теплових втрат батареї крізь тепловіддавальні поверхні в докілья та ґрунт є величиною сталою. Тому за збільшення тривалості коксування понад проектний період кількість теплових втрат також збільшується. За даними роботи підприємств України, витрата тепла збільшується в середньому на 1,5 % (близько 10 ккал або 41,9 кДж на 1 кг сухої шихти) за збільшення тривалості коксування понад проектний період на 1 годину.

Вологість шихти також сильно впливає на завантаження та обігрів коксових печей. За збільшення вологості змінюється насипна густина шихти. Так, за послідовної зміни вологості шихти від 11,7 % до 2,1 % насипна густина шихти (в перерахунку на суху масу) змінюється від 0,623 т/м³ до 0,824 т/м³ відповідно. Це, як показано вище, закономірно призводить до зміни витрати тепла на коксування та вимагає зміни температури в контрольних вертикалах.

Вихід летких речовин. За коксування шихт з підвищеним виходом летких речовин утворюється велика кількість парогазових продуктів, що залишають камеру коксування крізь стояки до газозбірника. Середня за весь період коксування температура цих продуктів складає близько 750 °С, що помітно менше кінцевої температури коксу. Однак у порівнянні з коксом парогазові продукти мають більшу ентальпію, до якої входить величина питомої теплоти випаровування. Тому зростає кількість тепла, що виноситься з матеріальними потоками до газозбірника. Крім того, шихти з підвищеним виходом летких речовин мають, як правило, більший вміст найтвердішого газового вугілля. Внаслідок цього знижується ступінь подрібнення шихти, підвищується його насипна густина, а це,

як показано вище, також вимагає додаткового підведення теплової енергії. Це призводить до відповідного зростання витрати тепла – в цілому приблизно на 1 % на кожен відсоток збільшення виходу летких речовин. Тому температура в контрольних вертикалах також має бути збільшена приблизно на 4–6 °С на кожен відсоток збільшення виходу летких речовин.

Співкисливість шихти. Рівень співкисливості шихти, як і обсяги вугілля, що надходить на коксування, справляють помітний вплив перш за все на період коксування. Співкисливість визначає кількість рідкорухливих продуктів, утворюваних за термічної деструкції органічної маси вугілля. Для завершення термохімічних перетворень цих продуктів, зокрема, процесів поліконденсації на стадіях спікання та утворення коксу, потрібен певний час. Крім того, за збільшення співкисливості шихти зростає кількість не лише рідкорухливих, але і парогазових продуктів, особливо за коксування жирного вугілля з достатньо високим виходом летких речовин. Це, як показано вище, вимагає додаткової кількості тепла.

Речовинний склад вугілля. Різні компоненти речовинного складу вугілля та продукти їх термохімічних перетворень мають різні теплоємності. Тому різниця в речовинному складі вугілля зумовлює необхідність зміни режимних показників. Найбільший вплив на режимні показники справляє петрографічний склад вугілля. Зокрема, шихта з петрографічно неоднорідного вугілля вимагає за інших рівних умов помітно вищого (на 30–40 °С) рівня температур в контрольних вертикалах у порівнянні з шихтою з петрографічно однорідного вугілля. Це пов'язане з тим, що термохімічні перетворення інертніту вимагають більшої витрати тепла в порівнянні з вітринітом.

Багаторічні дослідження технології коксування, виконані фахівцями ДП «УХІН» на коксохімічних підприємствах України [17], свідчать, що при зміні періоду коксування слід відповідним чином змінювати (зменшувати при подовженні та збільшувати при скороченні) рівень заданих температур в контрольних вертикалах. Тому за зміни властивостей шихти та умов коксування рівень температур в опалювальній системі має коригуватись з урахуванням наступних правил:

- за подовження періоду коксування на 1 годину температуру в контрольних вертикалах необхідно зменшувати на 15–20 °С та навпаки;
- за збільшення вологості шихти на 1 % температура має підвищуватись на 5–7 °С та навпаки;
- за зростання насипної густини шихти на 10 кг/м³ температуру в контрольних вертикалах підвищують на 2–4 °С, та навпаки;
- за переробки петрографічно неоднорідного вугілля підвищення температури в контрольних вертикалах на 1 °С на кожен відсоток вмісту інертніту більше 10 %. До отримання результатів петрографічного аналізу за збільшення вмісту в шихті на 10 % петрографічно неоднорідного вугілля, що потребує для своїх термохімічних перетворень більшої кількості тепла, температуру в вертикалах слід підвищити на 3–4 °С, та навпаки.

При коксуванні внаслідок термічної деструкції вугілля та виділення парогазових продуктів в пічній камері виникає надлишковий тиск, величина якого визначається кількістю утворених парогазових продуктів. Ці продукти евакууються із засипки у підсклепінний простір печі, а потім крізь стояки до газозбірника. В той же час пластична маса спричинює гідравлічний опір руху парогазових продуктів крізь засипку. У камері коксування два розташованих паралельно стінкам пластичних шари (рис. 2) сполучуються у верхній частині горизонтальним пластичним шаром та разом з подом утворюють призму (мішок), що ускладнює рух парогазових продуктів до підсклепінного простору.

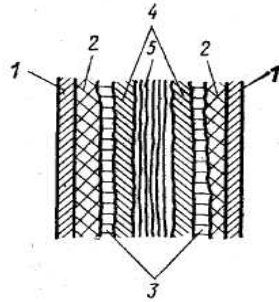


Рисунок 2 – Схема розташування шарів запуску в камері коксування через 6-8 годин після завантаження: 1 – кокс; 2 – напівкокс; 3 – пластичний шар; 4 – суха шихта; 5 – волога шихта

Внаслідок цього всередині призми зростає тиск, створюваний виділеними парогазовими продуктами. Частина цього тиску передається на стінки камери і є тиском розпору [18]. Виконані в ДП «УХІН» експериментальні дослідження дозволили визначити тиск розпору для шихт різного складу і визначити такі склади шихт, які дозволяють отримувати високоякісний кокс при дотриманні безпечних умов експлуатації кладки опалювальних простінок коксових печей. Для переробки шихт з великими значеннями тиску розпору потрібна конструкція коксових печей із опалювальним простінком підвищеної міцності [19]. Таким чином, небезпечним з точки зору підвищеного тиску розпору є петрографічно однорідне вугілля середнього та високого ступенів метаморфізму марок К і ПС та шихти, що містять більше 50 % такого вугілля. Таке вугілля та шихти слід перевірити експериментально на величину тиску розпору в умовах лабораторної установки ДП «УХІН» за ДСТУ 8724:2017 [20].

Гасіння коксу може здійснюватися сухим або мокрим способом. Обидва ці способи за умови правильної експлуатації дозволяють забезпечити стабільну вологість коксу. При цьому сухе гасіння дає можливість поліпшити механічну міцність і практично весь комплекс показників якості та утилізувати тепло розпеченого коксу. Однак більш розповсюдженим за сучасним умов є мокре гасіння, яке характеризується значно меншими капітальними вкладеннями. Сучасні технології мокрого гасіння мають забезпечувати його стабільну вологість на рівні 3,0–4,0 %. Слід зазначити, що обов'язковою умовою отримання коксу зі стабільною вологістю є забезпечення рівномірного приймання коксу в гасильний вагон.

Механічна обробка коксу для формування його ситового складу здійснюється під час сортування коксу. Завданням технології сортування є отримання товарних класів крупності коксу. За сортування валовий кокс розділяють на товарні класи за крупністю.

Стабільний технологічний режим сортування дозволяє забезпечити стабільність механічної міцності коксу. Крім того, існує також можливість диференційованого накладання механічних зусиль на кокс під час його сортування з метою зміцнення коксу [21].

Феросплавний кокс. Фахівцями Слов'янського державного педагогічного університету та УНПА «Укркокс» [22] сформульовані головні вимоги феросплавного виробництва до якості коксу як вуглецевого відновника, серед яких слід зазначити:

- високий питомий електричний опір – не менше 0,6 Ом·см;
- висока реакційна здатність;
- CRI за ДСТУ 4703:2006 [23] не менше 20 %;
- константа швидкості реакції $C+CO_2 \rightarrow 2CO$ за ДСТУ 7664:2014 [24] не менше $0,5 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{с})$;
- зольність сухої маси A^d - не вище 18 %;

- загальна сірчистість сухої маси S_t^d – не більше 1,4 %;
- вихід летких речовин з горючої маси V^{daf} – не вище 3,0 %.

Тому, як вже зазначалось, в цьому випадку опір коксу, на відміну від доменного процесу, має бути якомога більшим. Готовність в цьому випадку повинна лише забезпечувати міцність коксу, достатню для мінімізації втрат за його транспортування та завантаження у феросплавні печі. Згідно із цим особливостями виробництва феросплавного коксу мають бути менші спікливість та коксівність шихти, що дає можливість використовувати шихти на основі газового вугілля, та менші кінцеві температури коксування (900–950 °С). Готовність коксу при цьому має забезпечувати лише відхід коксового пирога від стінок камери коксування для забезпечення можливості його видачі. Через менші кінцеві температури можлива інтенсифікація роботи коксових печей за їх роботи на зменшених періодах або, навпаки, робота на зменшених температурах в опалювальній системі, що дає можливість зекономити опалювальний газ.

Порівняльна характеристика особливостей отримання коксу з різними рівнями питомого електричного опору наведена в табл. 1. Як бачимо, технологічні особливості отримання коксу з різними рівнями питомого електричного опору мають суттєві відмінності. Так, шихта для отримання високоякісного доменного коксу з низькими значеннями питомого електричного опору повинна мати високі спікливість та коксівність, а це зумовлює її складання на основі добре спікливого вугілля марок Ж та К, в т.ч. найкращого коксового вугілля – не менше 25 %. В той же час для забезпечення прийнятних значень тиску розпору шихта не має містити більше 50 % сумарного вмісту вугілля тих марок, що розвивають найбільший тиск розпору – коксового та піснувато-спікливого.

Для отримання високоякісного коксу з низьким питомим електричним опором швидкість коксування не повинна перевищувати 24 мм/годину, а кінцева температура коксування має знаходитись в межах 1050–1100 °С. При цьому максимальний рівень температур в опалювальній системі для збереження вогнетривкої кладки повинен згідно з п. 10.186 ПТЕ-2017 не перевищувати 1410 °С. За таких умов перспективними прогресивними технологіями отримання високоякісного коксу можуть бути – трамбування вугільної шихти (для шихт с меншою спікливістю) та коксування в печах без уловлювання хімічних продуктів (для шихт з меншою спікливістю).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика особливостей отримання коксу з різними рівнями питомого електричного опору

Показники	Одиниці виміру	Числові значення за отримання коксу:	
		Доменного	Феросплавного
Вміст в шихті основних марок коксівного вугілля	%	Ж+К≥50; К≥25; К+ПС≤50	Г≥50
Швидкість коксування	мм/год	≤24	27–29
Кінцева температура коксування	°С	1075±25	930±30
Максимальний рівень температур в опалювальній системі	°С	≤1410	1360–1380
Можливості застосування прогресивних технологій		Трамбування; печі без уловлювання	Термічна підготовка, безперервні методи

На відміну від доменного коксу, для отримання феросплавного коксу з підвищеними значеннями питомого електричного опору вугільна шихта має складатися на основі відносно менш дефіцитного та більш дешевого газового вугілля. Можливе форсування роботи коксових печей шляхом збільшення швидкості коксування та зменшення обороту печей, що дає можливість збільшити продуктивність та поліпшити техніко-економічні показники. Для отримання феросплавного коксу достатньо значно менших кінцевої температури коксування (900–960 °С) та максимальних температур в опалювальній системі – 1360–1380 °С. Тому організація виробництва феросплавного коксу можлива на коксових печах з гіршим технічним станом вогнетривкої кладки.

Згідно з вимогами феросплавного виробництва до властивостей коксу та технологічними особливостями його отримання серед перспективних прогресивних процесів виробництва варто зазначити технології, що дозволяють отримувати кокс із шихт на основі газового вугілля або взагалі з індивідуального газового вугілля – термічну підготовку шихти та безперервні процеси коксування (отримання формованого коксу та безперервне шарове коксування).

Висновки. Аналіз технологічних вимог споживачів до коксу з різними рівнями питомого електричного опору дозволив розробити раціональні технологічні параметри виробництва коксу із заданими значеннями ПЕО, зокрема доменного коксу з низьким опором та феросплавного коксу з високим опором.

Для виробництва високоякісного доменного коксу з низькими значеннями ПЕО необхідні:

- високі спікливість та коксівність шихти на основі добре спікливого вугілля марок Ж та К;
- тиск розпору вугільної шихти за коксування не більше 7 кПа;
- швидкості коксування не більше 24 мм/годину;
- кінцева температура коксування – 1050–1100 °С;
- максимальний рівень температур в опалювальній системі – не вище 1410 °С;
- можливе застосування прогресивних технологій – трамбування вугільної шихти та коксування в печах без уловлювання хімічних продуктів.

Технологічними особливостями отримання феросплавного коксу з високими значеннями питомого електричного опору мають бути:

- використання вугільних шихт на основі газового вугілля;
- підвищення швидкості коксування до рівня 27–29 мм/годину з відповідним зменшенням оборотів печей;
- кінцева температура коксування – 930±30 °С;
- максимальний рівень температур в опалювальній системі – 1360–1380 °С;
- можливе застосування прогресивних технологій – термічної підготовки шихти та безперервних процесів коксування (отримання формованого коксу та безперервного шарового коксування).

Література

1. Шульга І.В. Використання показника питомого електричного опору для оцінки готовності коксу / І.В. Шульга, В.В. Владимиренко // ВуглеХімічний журнал. 2023. № 3. С. 3–10.

2. Vladymyrenko, V., Shulga, I. The Relationship Between Specific Electrical Resistance and the Readiness of Coal Coke (2023) Materials Science Forum, 1096, pp. 103–108.
3. Филатов Ю. В. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества / Ю. В. Филатов, Е. Т. Ковалев, И. В. Шульга и др. – Київ: Наукова думка, 2011. – 128 с.
4. Мениович Б. И. Повышение эффективности процесса слоевого коксования / Б. И. Мениович, С. И. Пинчук, А. Г. Дюканов. – Київ: Техніка, 1985. – 229 с.
5. Вирозуб И. В. Расчеты коксовых печей и процессов коксования / И. В. Вирозуб, Р. Е. Лейбович. – Київ: Вища школа, 1970. – 270 с.
6. Телешев Ю. В. Исследование и разработка способов управления выходом и качеством продуктов коксохимического производства. Дисс. ... канд. техн. наук 05.17.07 / Ю. В. Телешев. – Харьков: УХИН, 1998. – 150 с.
7. ДСТУ 7722:2015 Вугілля кам'яне. Метод визначення пластометричних показників. – Київ: УкрНДНЦ, 2016. – 16 с.
8. Саранчук В. І. Основи фізики і хімії горючих копалин / В. І. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.
9. Маценко Г. П. Короткий словник з петрографії вугілля / Г. П. Маценко, В. С. Білецький, Т. Г. Шендрик. – Донецьк : Східний видавничий дім. – 2011. – 74 с.
10. ISO 7404-1:2016 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 1. Vocabulary. – Geneva, ISO: 2016. – 6 p.
11. ISO 7404-2:2009 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 2. Methods of preparing coal samples. Geneva, ISO: 2009. – 12 p.
12. Ковалев Е. Т. Формирование свойств кокса. Реакционная способность / Е. Т. Ковалев, В. М. Шмалько, И. В. Шульга, А. И. Рыщенко // Углекимический журнал. 2006. № 5–6. С. 13–20.
13. Кафтан Ю. С. Взаимосвязь органической и минеральной частей угольной шихты с «холодной» и «горячей» прочностью кокса / Ю. С. Кафтан, И. Д. Дроздник, Д. В. Мирошниченко и др. // Углекимический журнал, 2007. № 3 – 4. С. 3–13.
14. Коваль В. В. Оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування. Дис. на здобуття вченого ступеня доктора філософії. – Харків: НТУ ХПІ, 2023. – 166 с.
15. Шульга І. В. Устаткування підприємств з переробки твердих горючих копалин [Електронний ресурс] / І. В. Шульга, Д. В. Мірошниченко. – Харків – Тернопіль: НТУ «ХПІ» – Видавництво «Крок», 2022. – 209 с.
16. ПТЕ-2017 Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств. – Харків: ДП «Гипрококс», 2018. – 283 с.
17. Васильев Ю. С. Разработки УХИНа по совершенствованию промышленной техники коксования / Ю. С. Васильев, И. В. Шульга, Э. И. Торяник // Углекимический журнал. 2010. № 3 – 4. С. 38–48.
18. Кузніченко В. М. Тиск розпирання вугілля та шихт в процесі коксування. / В. М. Кузніченко, І. В. Шульга, О. В. Ситник – Харків: Планета-Прінт, 2021. – 210 с.
19. Патент України на винахід № 27068. Горизонтальна коксова піч / М. С. Шептовицький, Ю. С. Васильев, С. І. Кауфман, В. С. Кононенко, О. М. Мінасов, З. В. Островський, В. І. Рудика, А. Г. Старовойт, Л. М. Фідчунов, І. В. Шульга. – 2000. Бюл. № 1.
20. ДСТУ 8724:2017. Вугілля кам'яне та шихти на його основі. Метод визначення тиску розпирання, який виникає під час коксування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 16 с.

21. Shulga I. V. Moisture Content of Wet-Quenched Coke / I. V. Shulga, I. V. Miroshnichenko, I. M. Ryschenko, D. V. Miroshnichenko // *Coke and Chemistry*. – 2019. – V. 62. – N 9. – P. 402–407.

22. Лазаренко А. Я. Производство и использование высокорреакционного кокса в ферросплавной промышленности / А. Я. Лазаренко, А. Н. Лихенко // *УглеХимический журнал*. 2006. № 3 – 4. С. 17–22.

23. ДСТУ 4703:2006 (ISO 18894:2006, MOD) Кокс. Метод визначення індексу реакційної здатності (CRI) та міцності залишку коксу після реакції (CSR). Київ: УкрНДНЦ, 2006. – 27 с.

24. ДСТУ 7664:2014 Кокс кам'яновугільний. Метод визначення реакційної здатності. – К.: УкрНДНЦ, 2014. – 15 с.

Bibliography (transliterated)

1. Shulga I.V. Viktoristannya pokaznika pitomogo elektrichnogo oporu dlya ocinki gotovnosti koksu / I.V. Shulga, V.V. Vladymyrenko // *VugleHimichnij zhurnal*. 2023. № 3. P. 3–10.

2. Vladymyrenko, V., Shulga, I. The Relationship Between Specific Electrical Resistance and the Readiness of Coal Coke (2023) *Materials Science Forum*, 1096, pp. 103–108.

3. Filatov Yu. V. Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya domennogo koksa uluchshennogo kachestva / Yu. V. Filatov, E. T. Kovalev, I. V. Shulga i dr. – Kiyiv: Naukova dumka, 2011. – 128 p.

4. Meniovich B. I. Povyshenie effektivnosti processa sloevogo koksovaniya / B. I. Meniovich, S. I. Pinchuk, A. G. Dyukanov. – Kiyiv: Tehnika, 1985. – 229 p.

5. Virozub I. V. Raschety koksovyh pechej i processov koksovaniya / I. V. Virozub, R. E. Lejbovich. – Kiyiv: Visha shkola, 1970. – 270 p.

6. Teleshev Yu. V. Issledovanie i razrabotka sposobov upravleniya vyhodom i kachestvom produktov koksohimicheskogo proizvodstva. Diss. ... kand. tehn. nauk 05.17.07 / Yu. V. Teleshev. – Harkov: UHIN, 1998. – 150 p.

7. DSTU 7722:2015 Vugillya kam'yane. Metod viznachennya plastometrichnih pokaznikiv. – Kiyiv: UkrNDNC, 2016. – 16 p.

8. Saranchuk V. I. Osnovi fiziki i himiyi goryuchih kopalyn / V. I. Saranchuk, M. O. Plyashov, V. V. Oshovskij, V. S. Bileckij. – Doneck: Shidnij vidavnychij dim, 2008. – 640 p.

9. Macenko G. P. Korotkij slovnik z petrografiyi vugillya / G. P. Macenko, V. S. Bileckij, T. G. Shendrik. – Doneck : Shidnij vidavnychij dim. – 2011. – 74 p.

10. ISO 7404-1:2016 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 1. Vocabulary. – Geneva, ISO: 2016. – 6 p.

11. ISO 7404-2:2009 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 2. Methods of preparing coal samples. Geneva, ISO: 2009. – 12 p.

12. Kovalev E. T. Formirovanie svojstv koksa. Reakcionnaya sposobnost / E. T. Kovalev, V. M. Shmalko, I. V. Shulga, A. I. Ryshenko // *Uglehimicheskij zhurnal*. 2006. № 5 – 6. P. 13–20.

13. Kaftan Yu. S. Vzaimosvyaz organicheskoy i mineralnoj chastej ugolnoj shihty s «holodnoj» i «goryachej» prochnostyu koksa / Yu. S. Kaftan, I. D. Drozdnyk, D. V. Miroshnichenko i dr. // *Uglehimicheskij zhurnal*, 2007. № 3 – 4. P. 3–13.

14. Koval V. V. Optimizaciya shemi pidgotovki vugillya do koksovannya. Dis. na zdobuttya vchenogo stupenya doktora filosofiyi. – Harkiv: NTU HPI, 2023. – 166 p.

15. Shulga I. V. Ustatkuvannya pidpriyemstv z pererobki tverdih goryuchih kopolin [Elektronnij resurs] / I. V. Shulga, D. V. Miroshnichenko. – Harkiv – Ternopil: NTU «HPI» – Vidavnicтво «Krok», 2022. – 209 p.
16. PTE-2017 Pravila tehnicnoyi ekspluatatsiyi koksohimichnih pidpriyemstv. – Harkiv: DP «Giprokok», 2018. – 283 p.
17. Vasilev Yu. S. Razrabotki UHINa po sovershenstvovaniyu promyshlennoj tehniki koksovaniya / Yu. S. Vasilev, I. V. Shulga, E. I. Toryanik // Uglehimicheskij zhurnal. 2010. № 3–4. P. 38–48.
18. Kuznichenko V. M. Tisk rozpirannya vugillya ta shiht v procesi koksovannya. / V. M. Kuznichenko, I. V. Shulga, O. V. Sitnik – Harkiv: Planeta-Print, 2021. – 210 p.
19. Patent Ukraini na vinahid № 27068. Gorizontalna koksova pich / M. S. Sheptovickij, Yu. S. Vasilyev, S. I. Kaufman, V. S. Kononenko, O. M. Minasov, Z. V. Ostrovskij, V. I. Rudika, A. G. Starovojt, L. M. Fidchunov, I. V. Shulga. – 2000. Byul. № 1.
20. DSTU 8724:2017. Vugillya kam'yanе ta shiht na jogo osnovi. Metod viznachennya tisku rozpirannya, yakij vinikaye pid chas koksovannya.–Kiyiv: DP «UkrNDNC»,2018.– 16 p.
21. Shulga I. V. Moisture Content of Wet-Quenched Coke / I. V. Shulga, I. V. Miroshnichenko, I. M. Ryschenko, D. V. Miroshnichenko // Coke and Chemistry. – 2019. – V. 62. – N 9. – P. 402–407.
22. Lazarenko A. Ya. Proizvodstvo i ispolzovanie vysokoreakcionnogo koksa v ferrosplavnoj promyshlennosti / A. Ya. Lazarenko, A. N. Lihenko // UgleHimicheskij zhurnal. 2006. № 3 – 4. P. 17–22.
23. DSTU 4703:2006 (ISO 18894:2006, MOD) Koks. Metod viznachennya indeksu reakcijnoyi zdatnosti (CRI) ta micnosti zalishku koksu pislya reakcii (CSR). Kiyiv: UkrNDNC, 2006. – 27 p.
24. DSTU 7664:2014 Koks kam'yanovugilnij. Metod viznachennya reakcijnoyi zdatnosti. – K.: UkrNDNC, 2014. – 15 p.

УДК 662.7

I. В. Шульга, к. техн. н., доцент, В. В. Владимиренко, аспірант,
I. О. Лаврова, к. техн. н., доцент

РАЦІОНАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОТРИМАННЯ КОКСУ ІЗ ЗАДАНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

В роботі наведені головні технологічні принципи отримання коксу з двома рівнями заданого питомого електричного опору (ПЕО) для доменного і феросплавного виробництва відповідно. ПЕО є важливою характеристикою коксу, що тісно пов'язаний з його готовністю та всім комплексом металургійних властивостей. Зі зростанням готовності електричний опір коксу зменшується одночасно з поліпшенням його споживацьких властивостей. Тому визначений за стандартних умов питомий електричний опір є об'єктивною характеристикою готовності коксу.

На підставі вимог до властивостей коксу поліпшеної якості була теоретично обґрунтована та сформульована концепція виробництва високоякісного коксу. Проаналізовані технологічні і фізико-хімічні фактори виробництва, що значуще впливають на показники питомого електричного опору, такі як сировинна база коксування (марочний склад шихти), режимно-технологічні фактори (температурний режим коксування,

об'єм підклепінневого простору, швидкість коксування), вихід летких речовин, вологість, спікливість та ступінь подрібнення шихти, середня відбивна здатність вітриніту. Також значуще впливає на якісні показники отриманого коксу апаратурно-конструктивні особливості коксових печей, наявність чи відсутність термічної підготовки шихти та технологія коксування (трамбування, безперервне шарове коксування).

Аналіз технологічних вимог споживачів до коксу з різними рівнями питомого електричного опору дозволив розробити раціональні рівні технологічних параметрів виробництва коксу із заданими значеннями ПЕО, зокрема доменного коксу з низьким опором та феросплавного коксу з високим опором і раціональний комплекс прийомів післяпечної підготовки коксу для різних напрямків його використання у відповідності з вимогами конкретних споживачів. Зокрема, подрібнюючи найкрупніші (та найменш готові) класи доменного коксу, можна поліпшити його характеристики. За допомогою яких оцінюються готовність та весь комплекс споживацьких властивостей доменного коксу. В той же час таку операцію для феросплавного коксу робити не варто, оскільки це зменшує питомий електричний опір коксу та ефективність роботи феросплавних електропечей.

Ключові слова: кокс доменний, кокс феросплавний, питомий електричний опір, вихід летких речовин, спікливість, ступінь подрібнення, відбивна здатність вітриніту.

И. В. Шульга, В. В. Владимиренко, И. О. Лаврова

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОКСА С ЗАДАНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В работе представлены главные технологические принципы получения кокса с двумя уровнями заданного удельного электрического сопротивления (УЭС) для доменного и ферросплавного производства соответственно. УЭС является важной характеристикой кокса, которая тесно связана с его готовностью и всем комплексом металлургических свойств. С ростом готовности электрическое сопротивление кокса уменьшается одновременно с улучшением его потребительских свойств. Поэтому определенное в стандартных условиях удельное электрическое сопротивление является объективной характеристикой готовности кокса.

На основании требований к свойствам кокса улучшенного качества теоретически обоснована и сформулирована концепция производства высококачественного кокса. Проанализированы технологические и физико-химические факторы производства, значимо влияющие на показатели удельного электрического сопротивления, такие как сырьевая база коксования (марочный состав шихты), режимно-технологические факторы (температурный режим коксования, объем подводного пространства, скорость коксования), выход летучих веществ, влажность, спекаемость и степень измельчения шихты, средняя отражательная способность витринита. Также значимо влияют на качественные показатели полученного кокса апаратурно-конструктивные особенности коксовых печей, наличие или отсутствие термической подготовки шихты и технология коксования (трамбувание, непрерывное слоевое коксование).

Анализ технологических требований потребителей к коксу с разными уровнями удельного электрического сопротивления позволил разработать рациональные уровни технологических параметров производства кокса с заданными значениями УЭС, в том

числе доменного кокса с низким сопротивлением и ферросплавного кокса с высоким сопротивлением и рациональный комплекс приемов послепечной подготовки кокса для разных направлений в соответствии с требованиями конкретных потребителей. В частности, измельчая самые крупные (и менее готовые) классы доменного кокса, можно улучшить его характеристики, посредством которых оцениваются готовность и весь комплекс потребительских свойств доменного кокса. В то же время, такую операцию для ферросплавного кокса делать не стоит, поскольку это уменьшает удельное электрическое сопротивление кокса и эффективность работы ферросплавных электропечей.

Ключевые слова: кокс доменный, кокс ферросплавный, удельное электрическое сопротивление, выход летучих веществ, спекаемость, степень измельчения, отражательная способность витринита.

I. V. Shulga, V. V. Vladymyrenko, I. O. Lavrova

RATIONAL TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF RECEIVING COKE WITH SPECIFIC INDICATORS OF SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE

The paper presents the main technological principles of obtaining coke with two levels of given specific electrical resistance (PEO) for blast furnace and ferroalloy production, respectively. PEO is an important characteristic of coke, which is closely related to its readiness and the whole complex of metallurgical properties. As readiness increases, the electrical resistance of coke decreases simultaneously with the improvement of its consumer properties. Therefore, the specific electrical resistance determined under standard conditions is an objective characteristic of coke readiness.

On the basis of the requirements for the properties of coke of improved quality, the concept of production of high-quality coke was theoretically justified and formulated. The technological and physico-chemical factors of production that significantly affect the indicators of specific electrical resistance are analyzed, such as the raw material base of coking (grade composition of the charge), regime and technological factors (temperature regime of coking, volume of the sub-vault space, speed of coking), yield of volatile substances, humidity, cohesiveness and the degree of grinding of the charge, the average reflectivity of vitrinite. Also, the quality indicators of the obtained coke are significantly influenced by the hardware and design features of coke ovens, the presence or absence of thermal preparation of the charge and coking technology (tamping, continuous layer coking).

The analysis of the technological requirements of consumers for coke with different levels of specific electrical resistance made it possible to develop rational levels of technological parameters for the production of coke with given PEO values, in particular blast furnace coke with low resistance and ferroalloy coke with high resistance, and a rational set of techniques for post-furnace preparation of coke for various directions of its use in compliance with the requirements of specific consumers. In particular, by grinding the largest (and least ready) classes of blast furnace coke, its characteristics can be improved. With the help of which the readiness and the entire set of consumer properties of blast furnace coke are evaluated. At the same time, such an operation should not be performed for ferroalloy coke, as it reduces the specific electrical resistance of coke and the efficiency of ferroalloy electric furnaces.

Keywords: blast furnace coke, ferroalloy coke, specific electrical resistance, release of volatile substances, solubilization, degree of grinding, reflectivity of vitrinite.

А. К. Бабіченко¹, к. техн. н., професор, І. Л. Красніков¹, к. техн. н., професор,
Ю. А. Бабіченко², к. техн. н., доцент, Я. О. Кравченко¹, PhD, доцент,
І. Г. Лисаченко¹, к. техн. н., доцент, В. О. Панасенко³, д. техн. наук, професор

МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ У РОЗВ'ЯЗУВАННІ ТЕХНІЧНИХ ПРОТИРІЧ ХОЛОДИЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ВИРОБНИЦТВ АМІАКУ

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

² Український державний університет залізничного транспорту

³ Державна установа «Державний науково-дослідний і проектний інститут основної хімії»

Ключові слова: виробництво аміаку, абсорбційно-холодильний комплекс, системний аналіз, усунення технічних протиріч.

Вступ

Сучасні виробництва аміаку становлять собою складні енерготехнологічні комплекси. Вилучення продукційного аміаку у відділенні синтезу цих виробництв здійснюється за традиційно прийнятою майже в усіх країнах схемою двохступеневої конденсації, яка відбувається за рахунок охолодження циркуляційного газу [1]. Одним з проявів такої енерготехнологічності стало застосування на стадії вторинної конденсації двох абсорбційно-холодильних технологічних комплексів (АХТК), функціонування яких забезпечується за рахунок утилізації низькопотенціальної теплоти матеріальних потоків (гріюче середовище) конвертованого газу (КГ) з температурою 137 °С та парогазової суміші (ПГС) з температурою 125 °С відповідно відділень конверсії оксиду вуглецю та розгонки газового конденсату у кип'ятильниках генератора-ректифікатора [2]. АХТК є технічною системою з великою кількістю взаємодіючих елементів, що організовані для досягнення основної технологічної цілі, а саме охолодження циркуляційного газу (ЦГ).

Застосування апаратів повітряного охолодження як у складі АХТК, так і на стадії первинної конденсації призводить у зв'язку із сезонними та добовими коливаннями температури атмосферного повітря до порушення стабільності функціонування АХТК. За таких обставин температура охолодження ЦГ у випарниках АХТК змінюється у доволі широких межах від -8 °С до +5 °С, яка за регламентом не повинна перевищувати 0 °С [3]. Збільшення останньої навіть на 1 °С призводить до зниження енергоефективності виробництва аміаку внаслідок підвищення річної витрати природного газу на 307,3 тис.нм³ у додатковий паровий котел [4]. Все це обумовлює необхідність удосконалення АХТК як технічної системи для стабілізації температури охолодження ЦГ на рівні не більше 0 °С, особливо у весняно-літній період.

Мета досліджень

Дослідити АХТК як технічну систему з позиції системного аналізу та запропонувати основні напрямки удосконалення, що забезпечують стабілізацію температури охолодження ЦГ у випарниках на мінімально можливому рівні, а отже і підвищення енергоефективності виробництва аміаку.

Результати досліджень

АХТК як технічна система (ТС), схема якого наведена на рис. 1, містить такі основні елементи: генератор-ректифікатор 1, дефлегматор 2, повітряний конденсатор 3 з ресивером 4, переохолодник 5, випарник 6, абсорбер 7 з ресивером 8, насос міцного розчину 9, теплообмінник розчинів 10 та оператор (людина), що керує цим комплексом і одночасно також є її елементом.

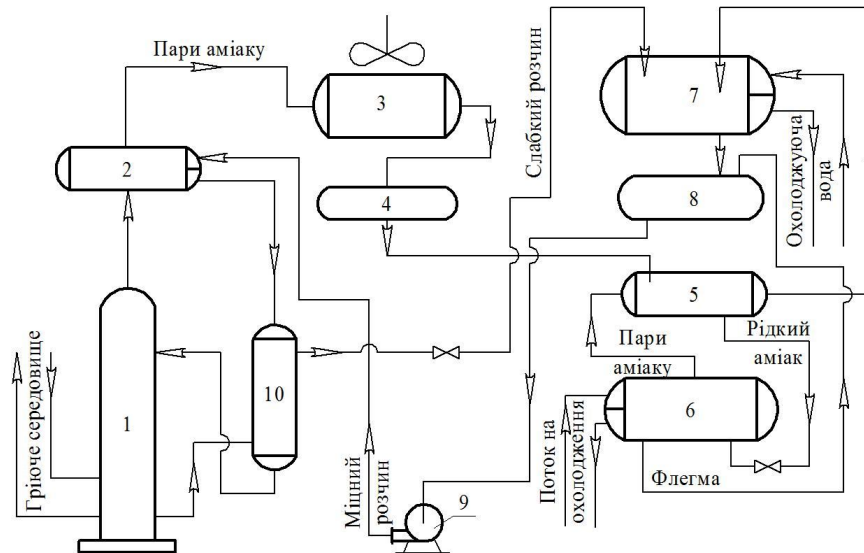


Рисунок 1 – Схема абсорбційно-холодильного технологічного комплексу

Слід зауважити, що з позицій системного аналізу сам по собі АХТК не є ТС. Він являє собою антропотехнічну систему [5]. Тобто усі технологічні апарати (елементи), що входять до складу АХТК і вважаються ТС, не є системами самі по собі до тих пір, поки за допомогою людини (оператора) не визначені їх функції – навіщо вони потрібні, які їх властивості є корисними функціями (КФ), а які шкідливими (ШФ). При цьому КФ мають підкреслювати таке відношення між елементами, за якого зміна в одному елементі сприяє зміні в іншому та відповідає головній корисній функції (ГКФ) АХТК, а саме забезпеченню температури охолодження ЦГ у випарнику на мінімальному рівні. Проте слід відзначити, що по суті ГКФ є похідною від потреб людини.

Досліджуючи АХТК поелементно, як вже відзначено вище, основна складність його експлуатації пов'язана з властивістю такого її елементу як повітряний конденсатор. КФ повітряного конденсатора – це максимально можлива конденсація водо-аміачної пари (холодоагенту), що надходить до випарника. Зв'язок між повітряним конденсатором і випарником – прямий та опосередкований через переохолодник. При цьому між випарником і переохолодником зв'язок є зворотнім позитивним, бо останній підсилює КФ випарника.

КФ випарника пов'язана із властивістю забезпечення кипіння рідкого холодоагенту на високому рівні його концентрації та на певному рівні тиску у міжтрубному просторі внаслідок теплообміну з потоком ЦГ, що проходить по трубному просторі. КФ випарника може змінюватись за рахунок дії такої сукупності елементів ТС як генератор-ректифікатор з дефлегматором. КФ сукупності цих елементів забезпечується властивістю максимальної подачі пари холодоагенту до повітряного конденсатора за рахунок утилізації низькопотенціальної теплоти конвертованого газу та парогазової суміші, зв'язок між якими є прямим. Проте внаслідок зміни температури атмосферного повітря, а

отже і температури та тиску конденсації виникає зворотній зв'язок поміж повітряним конденсатором та сукупністю вище перелічених елементів. При цьому у випадку підвищення тиску конденсації внаслідок збільшення температури атмосферного повітря цей зв'язок буде негативним, бо послаблює КФ генератора-ректифікатора. В протилежному випадку зворотній зв'язок буде позитивним. До того ж зміна тиску конденсації обумовлює і зміну концентрації холодоагенту: в першому випадку вона підвищується, а у другому зменшується. Отже застосування повітряного охолодження сприяє виникненню небажаних ефектів і технічних протиріч поміж елементами ТС, тобто коли корисна дія (збільшення концентрації холодоагенту) викликає одночасно і шкідливу дію (зниження витрати холодоагенту з конденсатора до випарника). За таких обставин відбувається зниження холодопродуктивності АХТК, а отже і підвищення температури охолодження ЦГ понад 0 °С, затвердженого технологічним регламентом. Виникає ситуація неузгодженості параметра цілі та властивостей ТС, що обумовлює адміністративне протиріччя (АП). При цьому, згідно проведеного аналізу до повітряного конденсатора ставляться взаємовиключні вимоги, а саме тиск конденсації має бути одночасно і високим і низьким. Ситуація з такими протилежними вимогами до одного елементу ТС, як відомо [6], обумовлює фізичне протиріччя (ФП).

Керуючись переліком стандартних операторів щодо розв'язання ФП [7] доцільно виділити наступний і загально відомий, а саме оператор розділу суперечливих властивостей у просторі. За такого оператора необхідно забезпечити конденсацію холодоагенту на високому рівні тиску, а кипіння водоаміачної пари (слабкого розчину) у генераторі-ректифікаторі на більш низькому рівні тиску. Оператор розподілу, у якості якого може бути застосований струменевий компресор, таким чином обумовить і усунення ТП поміж елементами ТС. Застосування цього оператора (Q-новація) забезпечить можливість переходу до R-новації, тобто встановлення «безкоштовних» ресурсів R на отримання робочої пари для цього компресора, на які раніше не зверталась увага. Аналіз технологічного оформлення агрегату синтезу аміаку свідчить, що таким ресурсом може бути потік відпрацьованої водяної пари турбіни компресора стиску природного газу. За рахунок такої утилізації низькопотенціальної теплоти відпрацьованої водяної пари з температурою до 90 °С і тиску 0,04 МПа з'являється можливість знизити споживання електроенергії, яка за існуючого регламенту безповоротно втрачається у кількості до 348 кВт·год на конденсацію 18 т/год цієї пари. Пошук існуючих енергозберігаючих технологій свідчить про можливість утилізації потоку з таким наднизьким температурним потенціалом у циклах пароежекторних технологічних систем (ПТС), працюючих на легкокиплячій речовині [8, 9]. У якості робочого агента ПТС в аміачному виробництві тим більше для таких АХТК доцільно застосувати аміак. Внаслідок такого розділу тисків поміж конденсатором і генератором-ректифікатором з'являється можливість вилучення зі схеми АХТК дефлегматора та отримання холодоагенту дуже високої концентрації шляхом ректифікації пари частиною рідкого холодоагенту з ресивера конденсатора без застосування додаткового насоса, що як правило має місце у загально прийнятому технологічному оформленні процесу [10].

Проведений системний аналіз існуючого технологічного оформлення АХТК з визначенням АП, ТП і ФП та застосування R- та Q-новацій щодо усунення наведених вище протиріч дозволили виконати синтез нової технічної системи [11], схема якої представлена на рис. 2.

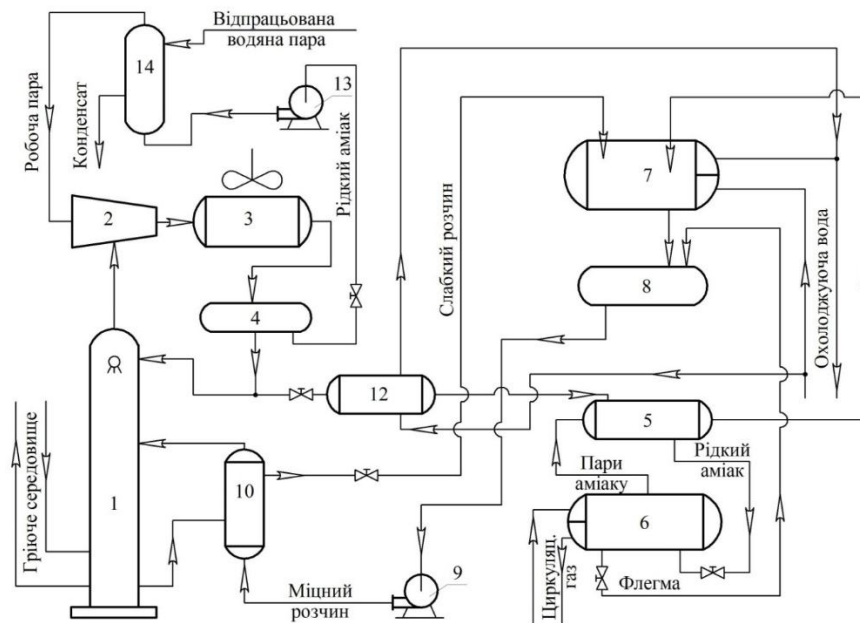


Рисунок 2 – Нове апаратурно-технологічне оформлення АХТК

Результати розрахунків основних параметрів вузлових точок для нової схеми АХТК, виконаних за загально відомим алгоритмом [2, 8], представлені у порівнянні з проектним варіантом схеми у табл. 1. При цьому кількість дренавної флегми з випарника, температура охолодження ЦГ у випарнику та холодопродуктивність визначались у відповідності з методикою викладеною в роботі [4].

Порівнювальний аналіз проектного та нового варіанту схеми свідчить, що включення трубопроводу подачі рідкого аміаку з повітряних конденсаторів забезпечує додаткову ректифікацію і збільшення концентрації холодоагенту майже до 100%-вої, а переохолодження його у водяному переохолоднику сприяє зменшенню температури на вході випарника з 33 °С до 27 °С. За таких умов збільшується питома холодопродуктивність з 1055,8 кДж/кг до 1122,6 кДж/кг. Крім того, зменшення температури пари холодоагенту на виході ректифікатора з 99 °С до 42,5 °С обумовлює і зниження питомої теплоти генератора-ректифікатора з 2434,7 кДж/кг до 2155,2 кДж/кг, що сприяє за постійності підводу теплоти з КГ і ПГС до генератора на рівні 7,1 МВт збільшенню кількості отриманого холодоагенту з 10,5 т/год до 11,86 т/год. Внаслідок такого збільшення у підсумку підвищується і загальна холодопродуктивність АХТК з 3,05 МВт до 3,68 МВт, що обумовлює зниження температури охолодження ЦГ з 3 °С до 0 °С, тобто до регламентної норми. Таке зниження температури зменшить навантаження на циркуляційний компресор стиску свіжої азотно-водневої суміші, а отже зменшить і витрату природного газу у додатковий паровий котел на 922 тис. нм³ на рік.

Підвищення тиску конденсації з 1,585 МПа до 1,7 МПа забезпечується струменевим компресором. За такої невеликої різниці стиску коефіцієнт інжекції буде достатньо високим і згідно розрахунків достатньо апробованим у практичних умовах алгоритмом [12] складе 1,8 одиниць. За такого коефіцієнту інжекція 15,51 т/год аміачної пари з генератора-ректифікатора робочою парою тиском 3 МПа може бути реалізована значно меншою кількістю до 8,6 т/год на кожну АХТК. Це обумовить збільшення навантаження на конденсатори і з урахуванням двох АХТК складе 17,2 т/год, конденсація яких вимагає встановлення додаткового повітряного конденсатора загальним енергоспоживанням до 300 кВт·год. Проте за рахунок утилізації відпрацьованої водяної пари компресора стиску

природного газу в циклі ПТС для отримання робочої пари для струменевих компресорів АХТК зменшиться навантаження на повітряні конденсатори з водяною парою, кількість якої визначиться за рівнянням:

$$M_{ВП} = M_{АП} \cdot r_A / r_{ВП}; \quad (1)$$

$$M_{ВП} = 17,2 \cdot 250 / 550 = 7,82 \text{ т/год},$$

де $M_{ВП}$ – кількість водяної пари, т/год; $M_{АП}$ – кількість аміачної пари, т/год; r_A – питома теплота пароутворення аміаку при температурі 65 °С і тиску 3 МПа, ккал/кг; $r_{ВП}$ – питома теплота конденсації відпрацьованої водяної пари турбін, ккал/кг.

Таблиця 1 – Параметри вузлових точок за проектним та новим варіантом схеми енерготехнологічного оформлення АХТК

Стан матеріального потоку	Проектний варіант схеми				Новий варіант схеми			
	Температура, °С	Тиск, МПа	Концентрація, кг/кг	Витрата, т/год	Температура, °С	Тиск, МПа	Концентрація, кг/кг	Витрата, т/год
Міцний розчин на вході генератора	93	1,585	0,42	74,85	93	1,585	0,42	85,27
Міцний розчин на виході абсорбера	35	0,29	0,42	74,85	35	0,29	0,42	85,27
Слабкий розчин на виході генератора	115	1,585	0,326	64,35	115	1,585	0,326	73,41
Слабкий розчин з теплообмінника розчину	67	1,585	0,326	64,35	45	1,585	0,326	73,41
Рідкий холодоагент з конденсатора	40	1,585	0,998	10,5	42,5	1,7	0,9997	11,86
Рідкий холодоагент з водяного переохолодника	-	-	-	-	33	1,7	0,9997	11,86
Рідкий холодоагент з парового переохолодника	33,5	1,585	0,998	10,5	27	1,7	0,9997	11,86
Пара на виході ректифікатора	99	1,585	0,952	10,5	42,5	1,585	0,9997	15,51
Флегма з конденсатора	-	-	-	-	42,5	1,7	0,9997	11,86
Пара на виході парового переохолодника	5	0,29	1	10,41	2	0,29	1	11,82
Пара на виході випарника	-10,5	0,29	1	10,41	-10,5	0,29	1	11,82
Флегма з випарника	-2	0,29	0,7617	0,09	-5,4	0,29	0,8361	0,04
Циркуляційний газ до випарника	16	23,49	0,8714*	168,512	16	23,49	0,8714*	168,512
Циркуляційний газ з випарника	3	23,49	0,1039*	168,512	0	23,49	0,1071*	168,512

Примітка: * концентрація аміачного конденсату

Внаслідок такої утилізації з'являється можливість відключення одного з трьох повітряних вентиляторів конденсаторів відпрацьованої водяної пари турбіни компресора

стиску природного газу із споживанням електроенергії 116 кВт·год. За такої умови загальне споживання електроенергії за новою схемою дещо збільшиться і визначиться за наступним рівнянням:

$$N = N_1 + N_2 - N_3 - N_4 - N_5, \quad (2)$$

де $N_1 = 348$ кВт·год – споживання електроенергії на привод трьох вентиляторів конденсаторів відпрацьованої водяної пари турбіни компресора стиску природного газу за проектним варіантом; $N_2 = 800$ кВт·год – витрата електроенергії на конденсацію пари холодоагенту двох АХТК за проектним варіантом; $N_3 = 232$ кВт·год – споживання електроенергії на привод вентиляторів конденсаторів відпрацьованої водяної пари турбіни компресора стиску природного газу за новим варіантом; $N_4 = 1100$ кВт·год – споживання електроенергії на конденсацію пари холодоагенту та робочої пари струменевого компресора у циклі ПТС; $N_5 = 40$ кВт·год – витрата електроенергії насосу подачі рідкого холодоагенту до парогенератора ПТС.

Підсумовуючи вище перелічені показники підвищення споживання електроенергії за новою схемою складе 224 кВт·год. За існуючої вартості електроенергії (в Україні) на 2023 рік 5 грн за 1 кВт·год, а природного газу біля 18 грн за 1 м³ загальне зниження річних експлуатаційних витрат у виробництві аміаку за новою схемою АХТК складе близько 8 млн.грн, що підтверджує ефективність запропонованого за результатами системного аналізу технологічного оформлення процесу охолодження ЦГ на стадії вторинної конденсації.

Висновки

Представлені результати досліджень абсорбційно-холодильного технологічного комплексу (АХТК) блоку вторинної конденсації виробництва аміаку як технічної системи з позицій системного аналізу з метою наочної ілюстрації можливостей його застосування в процесі розв'язання винахідницьких задач. Показано, що будь-яка технічна система являє собою підсистему по відношенню до антропометричної системи. Наведено поелементний аналіз АХТК з визначенням їх корисних функцій та зв'язків між ними. Це забезпечило можливість виявлення небажаних ефектів, а отже і адміністративних, технічних та фізичних протиріч у технічній системі відповідно з встановленою головною корисною функцією, а саме забезпеченню температури охолодження циркуляційного газу на мінімально можливому рівні. Визначено оператор покращення (Q-новація) технічної системи та «безкоштовні» ресурси (R-новація) для реалізації оператора цілі, що дозволило здійснити синтез нової технічної системи для АХТК, підвищення економічної ефективності якої забезпечується за рахунок зниження температури охолодження циркуляційного газу в середньому на 3 °С, що обумовлює і підвищення економічної ефективності внаслідок зниження річних експлуатаційних витрат по природному газу майже на 1 млн. м³.

Література

1. Liu H. Ammonia Synthesis Catalyst 100 Years: Practice, enlightenment and challenge, Chin. J. Catal. 2014. 35 (10). 1619–1640. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(14\)60118-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(14)60118-2).
2. Бабіченко, А.К., Бабіченко Ю,А., Кравченко, Я.О., Красніков, І.Л. (2021). Алгоритмічне забезпечення прийняття рішень щодо ефективності експлуатації абсорбційно-

холодильних установок виробництв. Інтегровані технології та енергозбереження, 4, 13–21. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2021.4.02>.

3. Бабіченко А. К., Тошинський В. І. (2009). Застосування математичного моделювання для діагностики показників ефективності процесів тепло- і масообміну в абсорберах тепловикористовуючих холодильних установок агрегатів синтезу аміаку. Вопросы химии и химической технологии, 6, 107 – 111.

4. Babichenko, A., Babichenko, J., Kravchenko, Y., Velma, S., Krasnikov, I., Ly-sachenko, I. (2018). Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (2(91)), 21–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>.

5. Основи наукових досліджень : навч. посібник / А. К. Бабіченко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т", Нац. фарм. ун-т. – Харків : Друкарня Мадрид, 2021. – 134 с.

6. Альтшуллер Г.С. Поиск новых идей: от озарения к технологии. - Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1989. – 381 с.

7. Теорія технічних систем / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМП-РИНТ”, 2017. – 291 с.

8. Babichenko, A., Krasnikov, I., Babichenko, J., Panasenko, V., Snurnikov, D., Shutyn-skiy, O. (2024). Designing energy-efficient hardware and technological structure of absorption refrigeration units for ammonia production. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (127), 74–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297717>.

9. Энергосберегающее технологическое оформление блока вторичной конденсации крупнотоннажных агрегатов синтеза аммиака / А. К. Бабіченко, В. И. Тошинский, И. Л. Красников и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. – № 4. – С. 3–6.

10. Лобойко, О. Я., Товажнянський, Л. Л., Слабун, І. О. Методи розрахунків у технології неорганічних виробництв. Харків: НТУ «ХП», 2001.

11. Пат. 42161 Україна, МПК F25B 15/00, F25B 49/00, C01 C 1/00. Установка для виробництва аміаку / Бабіченко А.К., Тошинський В.І., Красніков І.Л., Деменкова С.Д.; заявник та власник патенту НТУ «ХП». – No u200900599; заявл. 17.01.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. No 12.

12. Соколов, Е. Я., Зингер, Н. М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

Bibliography (transliterated)

1. Liu H. Ammonia Synthesis Catalyst 100 Years: Practice, enlightenment and challenge, Chin. J. Catal. 2014. 35 (10). 1619–1640. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(14\)60118-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(14)60118-2).

2. Babichenko, A.K., Babichenko Yu,A., Kravchenko, Ya.O., Krasnikov, I.L. (2021). Alhorytmichne zabezpechennia pryiniattia rishen shchodo efektyvnosti ekspluatatsii absorbttsiino-kholodynykh ustanovok vyrobnystv. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia, 4, 13-21. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2021.4.02>.

3. Babichenko A. K., Tshynskyi V. I. (2009). Zastosuvannia matematychnoho modeliuvannia dlia diahnostryky pokaznykiv efektyvnosti protsesiv teplo- i masoobminu v absorberakh teplovykorystovuiuchykh kholodynykh ustanovok ahrehativ syntezy amiaaku. Voprosy khymyy u khymycheskoi tekhnolohyy, 6, 107–111.

4. Babichenko, A., Babichenko, J., Kravchenko, Y., Velma, S., Krasnikov, I., Ly-sachenko, I. (2018). Identification of heat exchange process in the evaporators of absorption refrigerating units under conditions of uncertainty. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (2(91)), 21–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121711>.
5. *Osnovy naukovykh doslidzhen : navch. posibnyk / A. K. Babichenko [ta in.] ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t", Nats. farm. un-t. – Kharkiv : Drukarnia Madryd, 2021. – 134.*
6. Altshuller H.S. *Poysk novykh ydei: ot ozarenia k tekhnolohyy. - Kyshynev: Kartia Moldoveniaske, 1989. – 381 p.*
7. *Teoriia tekhnichnykh system / V.S. Loveikin, Yu.O. Romasevych. – K.: TsP „KOM-PRYNT”, 2017. – 291 p.*
8. Babichenko, A., Krasnikov, I., Babichenko, J., Panasenko, V., Snurnikov, D., Shutynskiy, O. (2024). Designing energy-efficient hardware and technological structure of absorption refrigeration units for ammonia production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(2 (127)), 74–81. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297717>.
9. *Enerhosberehaiushchee tekhnolohycheskoe oformlenye bloka vtorychnoi kondensatsyy krupnotonnazhnykh ahrehatov synteza ammyaka / A. K. Babychenko, V. Y. Toshynskiy, Y. L. Krasnykov y dr. // Yntehyrovannyye tekhnolohyy y enerhosberezhnyye. – 2007. – № 4. – P. 3–6.*
10. Loboiko, O. Ya., Tovazhnianskyi, L. L., Slabun, I. O. *Metody rozrakhunkiv u tekhnolohii neorhanichnykh vyrobnytstv. Kharkiv: NTU «KhPI, 2001.*
11. Pat. 42161 Ukraina, MPK F25B 15/00, F25B 49/00, S01 S 1/00. *Ustanovka dlia vyrobnytstva amiaku / Babichenko A.K., Toshynskiy V.I., Krasnikov I.L., Demenkova S.D.; zaiavnyk ta vlasnyk patentu NTU «KhPI». – No u200900599; zaiavl. 17.01.2009; opubl. 25.06.2009, Biul. No 12.*
12. Sokolov, E. Ya., Zynher, N. M. *Struinye apparaty. – M.: Enerhoatomyzdat, 1989. – 352 p.*

УДК 661.53:042.2

А. К. Бабіченко, к. техн. н., професор, І. Л. Красніков, к. техн. н., професор,
Ю. А. Бабіченко, к. техн. н., доцент, Я. О. Кравченко, PhD, доцент,
І. Г. Лисаченко, к. техн. н., доцент, В. О. Панасенко, д. техн. наук, професор

МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ У РОЗВ’ЯЗУВАННІ ТЕХНІЧНИХ ПРОТИРІЧ ХОЛОДИЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ВИРОБНИЦТВ АМІАКУ

Розглянуті особливості енерготехнологічного оформлення блоку вторинної конденсації виробництв аміаку, в яких для охолодження циркуляційного газу використовуються абсорбційно-холодильні технологічні комплекси (АХТК).

Встановлені недоліки функціонування АХТК, які обумовлюють порушення режиму охолодження циркуляційного газу в умовах зміни температури атмосферного повітря. Сформульовано напрямок дослідження АХТК як технічної системи з позицій системного аналізу та запропоновані основні напрямки удосконалення, що забезпечують стабілізацію температури охолодження циркуляційного газу у випарниках на мінімально можливому рівні, а отже і підвищення енергоефективності виробництва аміаку.

Наведено поелементний аналіз АХТК з визначенням їх корисних функцій та зв’язків поміж ними, що забезпечило можливість виявлення небажаних ефектів, встановлення

головної корисної функції, а отже і адміністративних, технічних та фізичних протиріч. Зосереджена основна увага на виникненні ситуації неузгодженості параметра цілі та властивостей технічної системи, а також чим обумовлені взаємовиключні вимоги до такого параметру як тиск конденсації. Показано, що головна корисна функція є по суті похідною від потреб людини-оператора, тобто АХТК це підсистема по відношенню до антропометричної системи.

Користуючись переліком стандартних операторів щодо розв'язання фізичних протиріч застосовано оператор покращення (Q-новація) технічної системи для розділу суперечливих властивостей у просторі та встановлені «безкоштовні» ресурси (R-новація) для реалізації оператора, що дозволило здійснити синтез нової технічної системи АХТК. Визначена економічна ефективність новоствореної системи, яка забезпечується за рахунок зниження температури охолодження циркуляційного газу в середньому на 3 °С. За рахунок такого зниження зменшуються експлуатаційні річні витрати по природному газу майже на 1 млн. м³.

Ключові слова: виробництво аміаку, абсорбційно-холодильний комплекс, системний аналіз, усунення технічних протиріч.

А. К. Бабиченко, И. Л. Красников, Ю. А. Бабиченко, Я. О. Кравченко, И. Г. Лисаченко,
В. О. Панасенко

МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА В РЕШЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОТИВОРЕЧИЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРОИЗВОДСТВ АММИАКА

Рассмотрены особенности энерготехнологического оформления блока вторичной конденсации производств аммиака, в которых для охлаждения циркуляционного газа используются абсорбционно-холодильные технологические комплексы (АХТК).

Выявлены недостатки функционирования АХТК, которые обуславливают нарушение режима охлаждения циркуляционного газа в условиях изменения температуры атмосферного воздуха. Сформулировано направление исследования АХТК как технической системы с позиций системного анализа и предложены основные направления совершенствования, обеспечивающие стабилизацию температуры охлаждения циркуляционного газа в испарителях на минимально возможном уровне, а следовательно, и повышение энергоэффективности производства аммиака.

Приведен поэлементный анализ АХТК с определением их полезных функций и связей между ними, что обеспечило возможность выявления нежелательных эффектов, установления главной полезной функции, а следовательно, и административных, технических и физических противоречий. Уделено основное внимание возникновению ситуации несогласованности параметра цели и свойств технической системы, а также чем обусловлены противоречивые требования к такому параметру как давление конденсации. Показано, что главная полезная функция является по сути производной от потребностей человека-оператора, то есть АХТК это подсистема по отношению к антропометрической системе.

Используя список стандартных операторов по разрешению физических противоречий применен оператор улучшения (Q-инновация) технической системы для разделения противоречивых свойств в пространстве и установлены "бесплатные" ресурсы (R-инновация) для реализации оператора, что позволило осуществить синтез новой техни-

ческой системы АХТК. Определена экономическая эффективность новосозданной системы, которая обеспечивается за счет снижения температуры охлаждения циркуляционного газа в среднем на 3 °С. За счет такого снижения уменьшаются эксплуатационные годовые расходы по природному газу почти на 1 млн. м³.

Ключевые слова: производство аммиака, абсорбционно-холодильный комплекс, системный анализ, устранение технических противоречий.

A. K. Babichenko, I. L. Krasnikov, Ju. A. Babichenko, Ya. O. Kravchenko,
I. G. Lysachenko, V. O. Panasenko

METHODOLOGY OF SYSTEM ANALYSIS IN SOLVING TECHNICAL CONTRADICTIONS OF REFRIGERATION COMPLEXES OF AMMONIA PRODUCTION

The features of the energy technological design of the secondary condensation unit of ammonia production are considered, in which absorption and refrigeration technological complexes (АХТК) are used for cooling circulating gas.

Defects in the functioning of АХТК have been identified, which cause violation of the cooling regime of the circulating gas under conditions of change of temperature of the atmospheric air. The article formulates the direction of research of АХТК as a technical system from the standpoint of system analysis and offers main directions of improvement, which ensure stabilization of temperature of cooling of circulating gas in evaporators at the minimum possible level, and hence, improving the energy efficiency of ammonia production.

The article provides element-by-element analysis of АХТК with definition of their useful functions and connections between them, which provided possibility of detection of undesirable effects, establishment of the main useful function and, consequently, administrative, technical and physical contradictions. The main attention is paid to the occurrence of a situation of inconsistency of the target parameter and the properties of the technical system, as well as why there are contradictory requirements to such parameter as condensation pressure. It is shown that the main useful function is essentially derived from the needs of the human operator, that is, АХТК is a subsystem relative to the anthropometric system.

Using the list of standard operators for the resolution of physical contradictions applied the operator of improvement (Q-innovation) of the technical system for the separation of contradictory properties in space and established "free" resources (R-innovation) for the implementation of the operator, which allowed for the synthesis of the new technical system АХТК. The economic efficiency of the newly built system has been determined, which is ensured by reducing the cooling temperature of the circulating gas by an average of 3 °С. Due to this decrease, the annual operating costs of natural gas by almost 1 million. м³.

Keywords: ammonia production, absorption-refrigeration complex, system analysis, elimination of technical contradictions.

А. В. Кривобок, аспірант

РОЗРОБКА СКЛАДІВ НІКЕЛЬ-ЦИНКОВОГО ФЕРИТУ З ВИСОКОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ ДЛЯ РАДІОПОГЛИНАЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: нікель-цинковий ферит, радіопоглинаючі матеріали, діелектрична проникність, магнітна проникність, модифікуючі добавки, бар'єрний механізм ємності Окадзакі.

Вступ. З розвитком науково-технічного прогресу пов'язано зростає негативний вплив небажаного електромагнітного випромінювання, захист від якого в Україні зустрічається рідко і фактично не регламентується [1]. В багатьох країнах прийняті вимоги і норми до електромагнітної сумісності, що поширені на технічні засоби схильні до впливу всіх видів електромагнітних перешкод і які є їх джерелом. До технічних джерел електромагнітного випромінювання відносяться радіостанції та радары, високовольтні лінії електропередачі, індукційні та мікрохвильові печі, високочастотні сушильні установки, люмінесцентної лампи, двигуни, установки для дугового зварювання, цифрові прилади, силова електроніка, електронно обчислювальні машини та інше. У зв'язку з зростаючими темпами впровадження у всі сфери життя суспільства і галузі економіки мікроелектроніки, обладнання інформаційних технологій і засобів радіозв'язку, що мають підвищену чутливість до електромагнітних перешкод, необхідний їх захист [2, 3]. Небажане електромагнітне випромінювання також є шкідливим для здоров'я людини, в деяких клінічних дослідженнях зазначалося, що даний тип впливу може стати причиною онкологічних захворювань [4–6].

Від захисту від небажаного електромагнітного випромінювання, або для маскування використовують радіопоглинаючі матеріали, як правило, це однорідні діелектричні або композиційні матеріали, структура та властивості яких визначають ефективність зниження потужності електромагнітної енергії, що падає на матеріал, в заданому діапазоні довжин хвиль. За принципом дії, конструкцією та використанням матеріалам радіопоглинаючі матеріали мають розгалужену класифікацію [7]. Зараз актуальною є розробка матеріалів та покриттів, здатних поглинати електромагнітне випромінювання в інтервалі від 10 кГц до 100 ГГц [8].

Феритові матеріали досить ефективно поглинають електромагнітне випромінювання, якщо при малих діелектричних втратах в частотному діапазоні випромінювання між природним феромагнітним резонансом і резонансом доменних границь є необхідна різниця дійсної і уявної частини магнітної проникності. Кожен з цих резонансів має місце у певній, характерній для нього області частот, що визначає смугу робочих довжин хвиль радіопоглинаючого феритового матеріалу. Зазвичай резонанс доменних границь у феритах спостерігається на частотах менше 500 МГц на верхній межі частотного діапазону і часто перекривається областю існування феромагнітного резонансу. Тому головним завданням при розробці складів феритів є забезпечення зниження частоти резонансу доменних границь в діапазон частот менше 100 МГц [9, 10].

Серед феритів найбільше застосування отримали Ni-Zn ферити, що ефективно поглинають випромінювання в діапазоні від 50 МГц до 1 ГГц. Для ефективного ослаблення потужності відбитого випромінювання в діапазоні частот електромагнітних хвиль у межах від 1 кГц до 50 МГц перспективними є матеріали, що поєднують високі значення магнітної (до 10 тисяч) та діелектричної проникності (до 50 тисяч). Досягнуті на сьогодні величини магнітної проникності феритів близькі до граничних значень, але існують технологічні можливості збільшення на кілька порядків діелектричної проникності. Як показали дослідження К. Окадзакі, діелектрична проникність феритів може бути підвищена за рахунок збільшення бар'єрної ємності, обумовленої вищим електроопором границь зерен [11].

Мета та постановка задачі дослідження. Метою роботи є дослідження впливу модифікуючих добавок та технологічних режимів на підвищення діелектричної проникності нікель-цинкового фериту в інтервалі частот до 100 МГц.

Задачею дослідження є оцінка впливу щільності, легуючих добавок та мікроструктури базового складу феритів на діелектричну проникність та радіопоглинаючі властивості.

Експериментальна частина. При проведенні досліджень для отримання нікель-цинкового фериту були використані реактивно чисті вихідні оксидні компоненти з вмістом основної речовини понад 99,6 мас. Fe₂O₃ (ГОСТ 4173-77) «чда», ZnO (ГОСТ 202-84) «чда», NiO (ГОСТ 17607-72) «чда». Приготування експериментальних зразків здійснювали за допомогою напівсухого пресування, що передбачає:

- змішування сировинних компонентів проводили шляхом сухого помелу у планетарному млині;
- шихту брикетували за допомогою пресування на лабораторному гідравлічному пресі ПРГ-10 під тиском 20 МПа, попередньо гранулюючи шляхом протирання через сито № 05;
- за необхідності сушку брикетів здійснювали у сушильній шафі до залишкової вологості не більше 1 %;
- з отриманої суміші синтезували феритову шихту в муфельній печі при температурі 900–1000 °С;
- синтезовану феритову шихту подрібнювали в шаровому млині сухим помелом, також на цьому етапі додавали модифікуючі добавки;
- з шихти, отриманої після основного помелу, виготовляли прес-порошки методом протирання через сітки з розміром комірки 1,0 мм;
- для виготовлення зразків пластин та циліндрів використовували лабораторні гідравлічні преси;
- випал феритових заготовок в муфельній печі при швидкості набору температури 10 град/хв, в інтервалі температур 1250...1350 °С; найтриваліша витримка при максимальній температурі становила 6 годин;
- підготовка зразків для дослідження основних фізико-механічних та електромагнітних властивостей зразків.

Для дослідження було обрано склад шихти для синтезу нікель-цинкового фериту, що відповідає формулі Ni_{10,3}Zn_{0,7}Fe₂O₄, а саме: оксид заліза (III) – 67,0 мас. %, оксид нікелю – 9,37 мас. % та цинкові білила – 23,81 мас. %.

Результати та їх обговорення. Рентгено-фазовий аналіз синтезованого при температурі 1000 °С порошку феритової шихти підтвердив повне протікання реакцій утворення твердих розчинів нікель-цинкового фериту. Зовнішній вигляд синтезованого фериту приведено на рисунку 1 а, а результати РФА, проведені на установці «Дрон-3», приведені на рисунку 1 б. Дослідні зразки синтезованого фериту досить легко піддавалися подрібненню, а в складі спостерігалися більш міцні агрегати розміром 2-3 мм, але це типово для синтезу феритів, та вирішується на етапі основної диспергації.

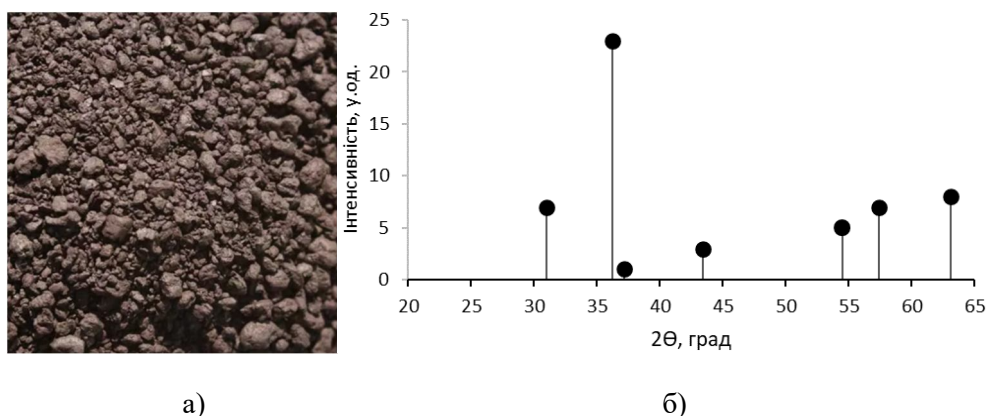


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд нікель-цинкового фериту (а), штрих-рентгенограма дослідного зразку (б) ● – твердий розчин $Ni_{0,3}Zn_{0,7}Fe_2O_4$

Ефективність дезагрегації шихти залежить від міцності агрегатів і, як правило, має бути забезпечено у процесі подрібнення вихідних компонентів та синтезованого феритового порошку. При цьому розміри первинних частинок практично не змінюються, а розміри агрегатів помітно знижуються, що призводить до підвищення насипної густини порошків і густини спечених заготовок [12]. Повноту дезагрегації при помелі порошків у цій роботі оцінювали по кінетиці збільшення насипної щільності $\rho_{нас}$ (рисунок 2). З рисунка видно, що збільшення кількості обертів сухого подрібнення шихти у планетарному млині до з 400 об./хв дозволяє скоротити тривалість подрібнення в 1,7–2,2 рази.

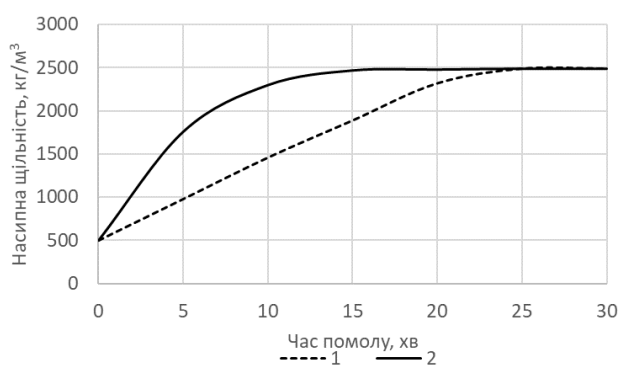
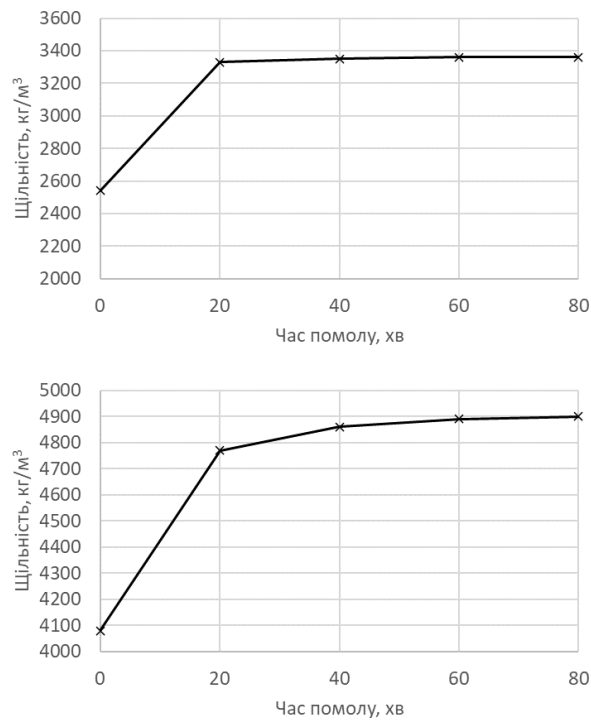


Рисунок 2 – Збільшення насипної щільності порошків Ni-Zn фериту в процесі обробки у планетарному млині: 1 – 200 об./хв; 2 – 400 об./хв

Дослідження підтвердили, що дезагрегація шихти дозволяє підвищити щільність сирих прес-заготовок та спечених виробів (рис. 3 а та б), тиск пресування складав 140 МПа.



а)

б)

Рисунок 3 – Вплив часу подрібнення Ni-Zn феритового порошку у планетарному млині при 400 об./хв на щільність: а) – до випалу, б) – після спікання при температурі 1260 °C

Дослідження показали, що збільшення частоти обертів планетарного млина з 200 об/хв до 400 об/хв, а відповідно й кінцевої щільності зразків, покращило радіопоглинаючі властивості феритів – збільшуючи магнітну та діелектричну проникність феритових зразків. Це також можна пояснити більш ефективним руйнуванням агрегатів і формуванням у феритах крупнозернистої мікроструктури з малою пористістю (рис. 4), густину змінювали змішуванням різних пропорцій шихти змеленої при 200 об/хв та 400 об/хв.

Ферити системи $\text{NiFe}_2\text{O}_4 - \text{ZnFe}_2\text{O}_4$ найбільш часто використовуються в якості радіопоглинаючого матеріалу досить високих значень їх магнітної та діелектричної проникності у поєднанні з високим питомим електроопором (до $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Однак для розширення діапазону радіопоглинання у бік низьких частот необхідне підвищення магнітної та діелектричної проникності.

Загальна діелектрична проникність Ni-Zn феритів визначається середнім розміром зерен, товщиною міжзерених границь і діелектричною проникністю зернограничних шарів, при цьому великі значення відношення розміра зерна та зернограничного шару визначають аномально високі значення уявної діелектричної проникності феритів. Отже, для збільшення діелектричної проникності необхідно збільшити середній розмір зерен, і зменшити товщину зернограничних шарів, а також збільшити діелектричну проникність, власне зернограничного шару.

Дослідження показали, що невеликий надлишок Fe_2O_3 позитивно позначається на збільшенні діелектричної проникності Ni-Zn феритів. При цьому діелектрична проникність максимально збільшується при частоті 1 МГц, що сприятиме отриманню фериту з хорошими поглинаючими властивостями в цьому діапазоні, результати приведено на рисунку 5.

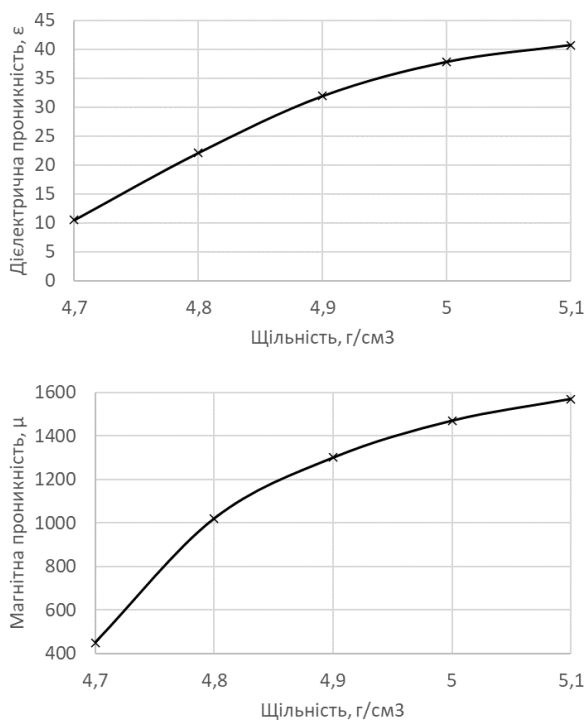


Рисунок 4 – Вплив густини дослідного фериту на магнітну (а) та діелектричну (б) проникність, при частоті $f = 1 \text{ кГц}$

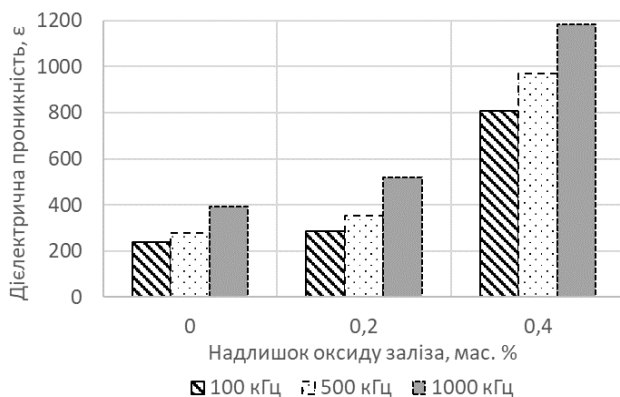


Рисунок 5 – Залежність діелектричної проникності дослідного складу фериту від надлишкової кількості Fe_2O_3 та частоти

Модифікування нікель-цинкового фериту оксидами титану і кальцію дало змогу підвищити діелектричну проникність зернограничних прошарків (рис. 6). Дослідження показало, на ймовірне виникнення напівпровідникової провідності зерен, що сприяє збільшенню рівня поглинання електромагнітного випромінювання при частотах менше 100 МГц. Це пояснюється збільшенням електричної ємності зернограничних шарів внаслідок дії описаного вище бар'єрного механізму Окадзакі.

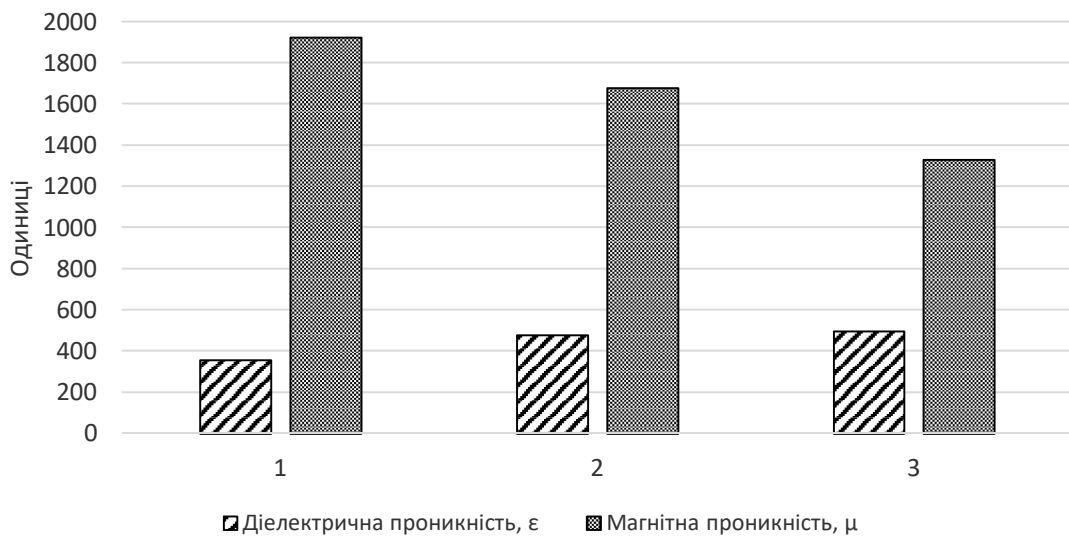


Рисунок 6 – Вплив добавок на значення діелектричної та магнітної проникностей дослідного фериту при частоті 100 кГц. 1 – без добавок, 2 – 0,5 мас % TiO_2 , 3 – 0,2 мас % CaO та 0,5 мас % TiO_2

Висновки. В роботі досліджено вплив модифікуючих добавок та технологічних параметрів виготовлення нікель-цинкового фериту $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ для радіопоглинаючих матеріалів. Оптимальним параметром змішування та подрібнення матеріалу на першій та другій стадіях є помел в планетарному млині при 400 об/хв тривалістю 20 хвилин. Що дає змогу отримати шихту оптимальної фракції та досягнути максимальної щільності сирцю та випаленого зразка 3370 та 4900 $\text{кг}/\text{м}^3$ відповідно.

Для пояснення отриманих властивостей феритів під впливом модифікуючих добавок, досліджено модель Окадзакі, згідно з якою різниця електропровідності зерен і зернограничного шару в області високих частот формує бар'єрну сміть. Дана модель пояснює зв'язок між параметрами мікроструктури та діелектричною проникністю, що на практиці виражено аномально високими значеннями діелектричної проникності феритів за рахунок збільшення різниці розміру зерен та товщини зернограничної фази.

Встановлено, що збільшення вмісту Fe_2O_3 в базовому складі понад стехіометрію забезпечує збільшення діелектричну проникність в 3–4 рази, що сприяє отриманню феритів з високим рівнем поглинання.

Модифікування нікель-цинкового фериту $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ оксидами кальцію та титану дало змогу підвищити на 70% діелектричну проникність, що сприятиме здвигу області поглинання в діапазон менших частот.

Література

1. Drobakhin, O.O. (2019, September). Microwave Methods for Monitoring Parameters of Dielectrics Developed in Ukraine: Overview. In 2019 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED) (pp. 6–10). IEEE.
2. Wanasinghe, D., & Aslani, F. (2019). A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107207.

3. E. F. Vance, "Electromagnetic-Interference Control," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-22, no. 4, pp. 319-328, Nov. 1980, doi: 10.1109/TEMC.1980.8732948.
4. Zamanian, A., & Hardiman, C. J. H. F. E. (2005). Electromagnetic radiation and human health: A review of sources and effects. *High Frequency Electronics*, 4(3), 16–26.
5. Ansal, K. A., Jose, D. S., & Rajan, R. K. (2018, December). Review on biological effect of electromagnetic radiation. In *2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)* (pp. 1–5). IEEE.
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
7. Rouhi, M., Hajizadeh, Z., Taheri-Ledari, R., Maleki, A., & Babamoradi, M. (2022). A review of mechanistic principles of microwave absorption by pure and composite nanomaterials. *Materials Science and Engineering: B*, 286, 116021.
8. Yavuz, Ö., Ram, M. K., & Aldissi, M. (2008). Electromagnetic applications of conducting and nanocomposite materials. *The New Frontiers of Organic and Composite Nanotechnology*, 435–475.
9. Ранкис Г.Ж. Динамика намагничивания поликристаллических ферритов. Рига: Зинатне, 1981. – 186 с.
10. Liu, J., Zhang, L., & Wu, H. (2021). Electromagnetic wave-absorbing performance of carbons, carbides, oxides, ferrites and sulfides: review and perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(20), 203001.
11. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков М. «энергия» 1976. – 336 с.
12. В.Г. Андреев, И.И. Канева, С.В. Подгорная, А.Н. Тихонов // Исследование влияния длительности измельчения порошков гексаферрита стронция на микроструктуру и свойства магнитов на их основе // Известия высших учебных заведений Материалы электронной техники // Москва МИСиС 2010. – вып.2. – С. 43–46.

Bibliography (transliterated)

1. Drobakhin, O.O. (2019, September). Microwave Methods for Monitoring Parameters of Dielectrics Developed in Ukraine: Overview. In *2019 XXIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)* (pp. 6–10). IEEE.
2. Wanasinghe, D., & Aslani, F. (2019). A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107207.
3. E. F. Vance, "Electromagnetic-Interference Control," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-22, no. 4, pp. 319-328, Nov. 1980, doi: 10.1109/TEMC.1980.8732948.
4. Zamanian, A., & Hardiman, C. J. H. F. E. (2005). Electromagnetic radiation and human health: A review of sources and effects. *High Frequency Electronics*, 4(3), 16–26.
5. Ansal, K. A., Jose, D. S., & Rajan, R. K. (2018, December). Review on biological effect of electromagnetic radiation. In *2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)* (pp. 1–5). IEEE.
6. Mikhailin Yu.A. Voloknistie polimernie kompozitsionnie materialy v tekhnike. SPb.: Nauchnie osnovy i tekhnologii, 2013. 720 p.

7. Rouhi, M., Hajizadeh, Z., Taheri-Ledari, R., Maleki, A., & Babamoradi, M. (2022). A review of mechanistic principles of microwave absorption by pure and composite nanomaterials. *Materials Science and Engineering: B*, 286, 116021.
8. Yavuz, Ö., Ram, M. K., & Aldissi, M. (2008). Electromagnetic applications of conducting and nanocomposite materials. *The New Frontiers of Organic and Composite Nanotechnology*, 435–475.
9. Rankis G.Zh. *Dinamika namagnichivaniya polikristallicheskich ferritov*. Riga: Zinatne, 1981. – 186 p.
10. Liu, J., Zhang, L., & Wu, H. (2021). Electromagnetic wave-absorbing performance of carbons, carbides, oxides, ferrites and sulfides: review and perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(20), 203001.
11. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov M. «Energiya» 1976. – 336 p.*
12. V.G. Andreev, I.I. Kaneva, S.V. Podgornaya, A.N. Tikhonov // *Issledovanie vliyaniya dlitelnosti izmelcheniya poroshkov geksaferrita strontsiya na mikrostrukturu i svoystva magnetov ni ikh osnove*// *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedenii Materiali elektronnoi tekhniki* // Moskva MISiS 2010. – vip.2. – P. 43–46.

УДК 661:537.226.86

А. В. Кривобок, аспірант

РОЗРОБКА СКЛАДІВ НІКЕЛЬ-ЦИНКОВОГО ФЕРИТУ З ВИСОКОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ ДЛЯ РАДІОПОГЛИНАЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Розвиток електронного та електро-технічного обладнання відкладає слід у вигляді негативного впливу небажаного електромагнітного випромінювання, від якого захист в Україні рідко зустрічається і фактично не регламентується. В багатьох країнах існують вимоги до електромагнітної сумісності, що поширюються на технічні засоби, схильні до впливу електромагнітних перешкод та є їх джерелом. Зростаюча кількість технічних засобів, таких як радіостанції, радари, високовольтні лінії електропередачі та інші, потребує ефективного захисту від електромагнітного випромінювання. Це особливо важливо в умовах розвитку мікроелектроніки та інформаційних технологій, які мають підвищену чутливість до таких перешкод. Крім того, небажане електромагнітне випромінювання може бути шкідливим для здоров'я людини, сприяючи розвитку онкологічних захворювань. Від захисту від небажаного випромінювання використовуються радіопоглинаючі матеріали, серед яких ефективними є феритові матеріали. Зокрема, Ni-Zn ферити показують хороші результати в поглинанні випромінювання в діапазоні від 50 МГц до 1 ГГц. Зараз зростає затребуваність матеріалів з високою магнітною та діелектричною проникністю для зниження потужності відбитого випромінювання в діапазоні частот від 1 кГц до 50 МГц. Аналіз закордонних наукових публікацій показав, що діелектрична проникність феритів може бути підвищена за рахунок збільшення бар'єрної ємності, обумовленої підвищенням електроопору границь зерен.

В роботі досліджено вплив модифікуючих добавок та технологічних параметрів виготовлення нікель-цинкового фериту $\text{Ni}_{0,3}\text{Zn}_{0,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ для радіопоглинаючих матеріалів. Встановлено оптимальні параметри змішування та подрібнення матеріалу на першій та

другій стадіях, що забезпечує отримання випалених зразків з густиною близькою до теоретичної.

Для пояснення отриманих властивостей феритів під впливом модифікуючих добавок, приведено модель Окадзаки, згідно з якою різниця електропровідності зерен і зернограничного шару в області високих частот формує бар'єрну ємність.

Експериментально встановлено, що збільшення вмісту Fe_2O_3 в базовому складі понад стехіометрію, а також модифікування досліджуваного складу фериту оксидами кальцію та титану забезпечує збільшення діелектричну проникність, що сприяє отриманню феритів з високим рівнем поглинання в діапазон частот до 50 МГц.

Ключові слова: нікель-цинковий ферит, радіопоглинаючі матеріали, діелектрична проникність, магнітна проникність, модифікуючі добавки, бар'єрний механізм ємності Окадзаки.

А. В. Кривобок, аспірант

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ НИКЕЛЬ-ЦИНКОВОГО ФЕРРИТА С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ ДЛЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Развитию электронного и электротехнического оборудования сопутствует нежелательное электромагнитного излучения, защита от которого в Украине редко встречается и фактически не регламентируется. Во многих странах существуют требования к электромагнитной совместимости, распространяющиеся на технические средства, подверженные воздействию электромагнитных помех и являющиеся их источником. Растущее количество технических средств, таких как радиостанции, радары, высоковольтные линии электропередачи и другие, требует эффективной защиты от электромагнитного излучения. Это особенно важно в условиях развития микроэлектроники и информационных технологий, которые имеют повышенную чувствительность к таким помехам. Кроме того, нежелательное электромагнитное излучение может быть вредным для здоровья человека, способствуя развитию онкологических заболеваний. Для защиты от нежелательного излучения используются радиопоглощающие материалы, среди которых эффективными являются ферритовые материалы. В частности, Ni-Zn ферриты показывают хорошие результаты в поглощении излучения в диапазоне от 50 МГц до 1 ГГц. Анализ зарубежных научных публикаций показал, что диэлектрическая проницаемость ферритов может быть повышена за счет увеличения барьерной емкости, обусловленной повышением электросопротивления границ зерен.

В работе исследовано влияние модифицирующих добавок и технологических параметров изготовления никель-цинкового феррита $Ni_{0,3}Zn_{0,7}Fe_2O_4$ для радиопоглощающих материалов. Установлены оптимальные параметры смешивания и измельчения материала на первой и второй стадиях, что обеспечивает получение обожженных образцов с плотностью близкой к теоретической.

Для объяснения полученных свойств ферритов под влиянием модифицирующих добавок, приведена модель Окадзаки, согласно которой разница электропроводности зерен и зернограничного слоя в области высоких частот формирует барьерную емкость.

Експериментально встановлено, що збільшення вмісту Fe_2O_3 в базовому складі сверж стехіометрії, а також модифікування досліджуваного складу феррита оксидами кальцію та титану забезпечує збільшення діелектричної проникності, що сприяє отриманню феритів з високим рівнем поглинання в діапазон частот до 50 МГц.

способствует получению ферритов с высоким уровнем поглощения в диапазон частот до 50 МГц.

Ключевые слова: никель-цинковый феррит, радиопоглощающие материалы, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, модифицирующие добавки, барьерный механизм емкости Окадзаки.

A. V. Kryvobok, postgraduate student

DEVELOPMENT OF NICKEL-ZINC FERRITE COMPOSITIONS WITH HIGH DIELECTRIC CONSTANT FOR RADIO-ABSORBING MATERIALS

The development of electronic and electrical equipment leaves a trace in the form of negative effects of unwanted electromagnetic radiation, from which protection in Ukraine is rare and is not actually regulated. In many countries, there are requirements for electromagnetic compatibility that apply to technical equipment that is exposed to and a source of electromagnetic interference. A growing number of technical devices, such as radios, radars, high-voltage power lines, and others, require effective protection against electromagnetic radiation. This is especially important in the context of the development of microelectronics and information technology, which are highly sensitive to such interference. In addition, unwanted electromagnetic radiation can be harmful to human health, contributing to the development of cancer. To protect against unwanted radiation, radio-absorbing materials are used, among which ferrite materials are effective. In particular, Ni-Zn ferrites show good results in absorbing radiation in the range from 50 MHz to 1 GHz. Nowadays, there is a growing demand for materials with high magnetic and dielectric constant to reduce the power of reflected radiation in the frequency range from 1 kHz to 50 MHz. An analysis of foreign scientific publications has shown that the dielectric constant of ferrites can be increased by increasing the barrier capacity due to an increase in the electrical resistance of grain boundaries.

In this work, the influence of modifying additives and technological parameters of manufacturing nickel-zinc ferrite $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ for radio-absorbing materials was investigated. The optimal parameters of mixing and grinding of the material at the first and second stages have been established, which ensures the production of fired samples with a density close to the theoretical one.

To explain the obtained properties of ferrites under the influence of modifying additives, the Okazaki model is presented, according to which the difference in the electrical conductivity of grains and the grain boundary layer in the high frequency region forms the barrier capacity.

It has been experimentally established that an increase in the Fe_2O_3 content in the basic composition beyond the stoichiometry, as well as modification of the studied ferrite composition with calcium and titanium oxides, provides an increase in the dielectric constant, which contributes to the production of ferrites with a high absorption level in the frequency range up to 50 MHz.

Keywords: nickel-zinc ferrite, radio-absorbing materials, dielectric constant, magnetic permeability, modifying additives, Okazaki barrier mechanism of capacitance.

І. В. Гурін¹, к. техн. н., І. Ш. Невлюдов², д. техн. н., професор,
В. Є. Овчаренко², д. техн. н., професор, О. В. Токарева², к. техн. н., професор

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВВКМ

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: система управління, регулятор, якість, технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка.

Виробництво вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ) зазвичай передбачає використання вуглецевих складових, таких як вуглецеві волокна. Вуглецеві волокна, які містять у собі від 90 до 99 % вуглецю. Ці матеріали характеризуються високою міцністю, стійкістю до термічних впливів та іншими унікальними властивостями, що робить їх корисними у різних галузях, таких як авіаційна, автомобільна, ядерна енергетика та інші [1].

Враховуючи високі вимоги до виробів з просторово-армованих вуглець-вуглецевих композитних матеріалів, особливу актуальність набувають питання контролю якості заготовок. Фізико-механічні та експлуатаційні характеристики виробів мають бути підтверджені результатами об'єктивного контролю. Для підтвердження відповідності характеристик виробів з композитних матеріалів вимогам технічної документації використовують методи неруйнівного контролю на готових виробах. Головними з них є методи ультразвукового виявлення дефектів, які виявляють наявність на поверхні або у самому матеріалі некоректних ділянок, які явно відрізняються від решти матеріалу та складаються з іншого матеріалу, а також інструментальні методи, що реалізують контроль механічних властивостей просторово-армованої структури ВВКМ [2].

Варто зазначити, що в реальних умовах технічні характеристики виробів у різних партіях можуть відрізнятися від заданих. Сучасні концепції якості продукції викладені в міжнародних стандартах ДСТУ ISO 9000-20015, ДСТУ ISO 10012-2005 [3, 4]. Основними рекомендаціями цих стандартів щодо забезпечення якості продукції є твердження, що якість - це результат якісних технологічних процесів, а не усунення вже виниклої вади (втрат якості продукції). Це, в свою чергу, неможливо без розробки стабільних технологічних процесів з урахуванням накопиченого досвіду та потенційних ризиків.

Досягнення заданих рівнів якості процесу виготовлення виробів значною мірою залежить від етапів технології виробництва ВВКМ, починаючи з вибору та підготовки сировини та закінчуючи графітизацією та обробкою поверхні для покращення необхідних спеціальних властивостей. Зміст та обсяг проекту робіт з розробки технологічного процесу виготовлення виробу з ВВКМ визначається технічним завданням та комплексною оцінкою майбутніх умов експлуатації. При оцінці умов експлуатації зазвичай враховують відповідні технічні вимоги на виріб. Показники якості вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів включають різні параметри, що залежать від конкретного застосування та властивостей матеріалу [5]. Основні характеристики, за якими можуть бути оцінені ВВКМ, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики композиційних матеріалів

№	Основні характеристики	Параметри
1	Механічні властивості	Міцність матеріалу; модуль пружності; твердість; стійкість до зношування; втомна міцність.
2	Термічні властивості	Температурна стабільність; теплопровідність; коефіцієнт теплового розширення.
3	Електричні властивості	Електропровідність; питомий опір; діелектрична міцність.
4	Структура та мікроструктура	Ступінь кристалічності; розмір та форма вуглецевих нанотрубок чи графену (якщо застосовуються); орієнтація вуглецевих волокон.
5	Хімічна стійкість	Стійкість до агресивних середовищ; стійкість до хімічних впливів.
6	Вагові та об'ємні характеристики	Щільність матеріалу; специфічна маса.
7	Виробничі параметри	Складність виробництва; вартість виробництва.
8	Екологічні аспекти	Можливість переробки; екологічна безпека.

Досягнення високої якості виробів з ВВКМ включає в себе ряд ключових етапів та заходів, спрямованих на забезпечення відповідності продукції встановленим стандартам і вимогам. Основні організаційні аспекти, які важливі для забезпечення якості у виробництві заготовок вуглець-вуглецевих композитів, та їх параметри наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Ключові фактори забезпечення якості при виробництві ВВКМ

№	Основні аспекти	Параметри
	2	3
1	Вибір якісних матеріалів	Вибір високоякісних вихідних матеріалів, таких як вуглецеві волокна, які повинні відповідати встановленим стандартам і технічним вимогам.
2	Контроль виробничого процесу	Строгий контроль кожного етапу виробничого процесу, починаючи від підготовки сировини та закінчуючи отриманням матриці, контроль технологічних режимів (температури, тиску, часу) на кожній фазі виробництва.
3	Тестування матеріалів	Проведення різних видів тестування матеріалів, таких як механічні випробування, термічна стійкість, електропровідність та інші, щоб впевнитись в їх відповідності стандартам і вимогам.
4	Контроль якості виробів	Регулярне тестування виготовлених виробів на відповідність вимогам. Це може включати в себе перевірку розмірів, ваги, механічних властивостей та інших характеристик.

1	2	3
5	Система управління якістю	Впровадження ефективної системи управління якістю, яка включає процедури контролю, навчання персоналу, аналіз невідповідностей та їх причин.
6	Сертифікація	Отримання відповідних сертифікатів для ВВКМ.

Виробництво ВВКМ проводять за різними технологічними схемами. Для термонавантажених конструкцій використовують ВВКМ, у якому отримання вуглецевої матриці забезпечують осадженням з газу піролітичного вуглецю (ПУ) у пористий об'єм вуглецеволокнистої каркаса з застосуванням термоградієнтного методу в спеціальній термовакуумній печі. В якості вуглецевмісного газу зазвичай використовують мережевий газ [6], що містить не менше 95 % CH_4 . Вуглецева матриця являє собою монолітне тверде тіло, яке повторює геометричну форму тієї поверхні, на якій вона утворюється. Цей метод характеризується значною тривалістю проведення процесу ущільнення (до кількох діб) залежно від габаритних розмірів заготовки. Підтримка стабільності технологічних режимів на цьому етапі забезпечить якість майбутньої продукції.

Процес формування заготовок ВВКМ шляхом ущільнення пористого каркаса газозфазним методом можна віднести до типу «дифузних» систем. У таких систем не завжди можна чітко виділити вплив окремих факторів процесу на кінцевий результат. Дослідження «дифузних» систем за допомогою багатофакторного експерименту є складним завданням. Для побудови математичної моделі таких процесів використовують евристичні методи багатовимірної статистики та аналізу, які базуються на генерації рішень за принципами теорії кореляції, що потребує використання сучасних інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем управління.

Актуальність використання інтелектуальних систем управління обумовлюється рядом причин: традиційні автоматизовані технології вже не забезпечують необхідної якості управління через недостатнє врахування всіх факторів невизначеності, що впливають на систему. Спроби вдосконалити відомі алгоритми адаптивного управління не завжди приносять очікуваний результат. Це пояснюється як складністю самих алгоритмів, так і складністю їх реалізації на цифровій техніці з урахуванням умов забезпечення стійкості дискретної системи управління [7].

В цьому контексті виникає необхідність використання інтелектуальних систем управління, які здатні обробляти певний обсяг інформації у конкретній сфері знань. Це також викликає потребу у спеціальному дослідженні багатьох питань, таких як визначення основних параметрів якості, ідентифікація основних змінних та параметрів, що впливають на якість процесу, формування функції якості, яка відображає ступінь відповідності вихідних параметрів процесу встановленим стандартам або вимогам, оптимальні обсяги знань, вибір форми їх представлення, способів формування тощо [8].

Установки, які використовуються для виготовлення заготовок з ВВКМ, включають різноманітні виконавчі механізми з різними принципами керування - пневмомеханічні, електромеханічні, керовані децентралізованими автоматизованими системами контролю та управління, а також у деяких випадках виконавчими елементами з ручним керуванням [9].

Для застосування термоградієнтних газозфазних технологій виробництва вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів потрібна спеціальна установка з можливістю її

використання як для виробництва невеликих, так і середніх виробів з вуглецевих композиційних матеріалів, а також для вирішення актуальних науково-технологічних завдань [10]. Структурна схема установки для газофазного термоградієнтного методу ущільнення піроуглеродом представлено на рис. 1.

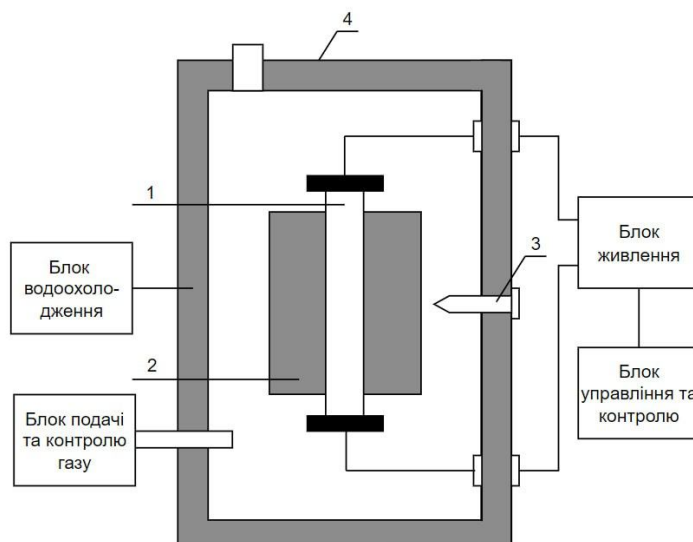


Рисунок 1 – Структурна схема установки для газофазного термоградієнтного методу ущільнення піроуглеродом:
1-нагрівач, 2-вуглецевий каркас, 3-термопари, 4- реактор

Основним елементом установки є вакуумний водоохолоджуваний циліндричний реактор з мідними водоохолоджуваними вісьово-симетричними токопроводами, розташованими у верхній та нижній кришках. Токопроводи виконані рухомими для компенсації термічного розширення виробів під час процесу. Крім цього, рухомість токопроводів полегшує завантаження установки. Установка має окремий блок живлення для нагріву виробів, включаючи регулятор напруги, трансформатори відповідної потужності.

Реактор обладнаний вакуумною системою та системою подачі природного газу. Під час проведення процесів ущільнення установка працює за атмосферного тиску CH_4 або за низького тиску, який може регулюватися від 5–10 мм рт.ст. до атмосферного. Установка оснащена системою водоохолодження та системою автоматичного управління та контролю параметрів процесу. Система управління забезпечує автоматичне підтримування заданої температури під час процесу з необхідною точністю (зазвичай з точністю 1–2 °C), програмоване збільшення та зниження температури установки та виробу, контроль температури охолоджувальної води, систему сигналізації при відхиленні параметрів.

Система управління побудована на регуляторах із запрограмованими законами управління, які, хоча і мають широкі можливості, але все ж таки обмежені в можливостях оптимізації, що звужує варіанти пошуку оптимальних керуючих впливів. Крім того, такі регулятори не здатні проводити багатопараметричне управління і слабо піддаються адаптації, оскільки налаштування кожного регулятора проводиться окремо від інших, тобто при коригуванні керуючих впливів не враховуються нелінійні взаємозв'язки між ними.

Існуючу систему управління необхідно постійно адаптувати до тих змін, які відбуваються в зовнішньому середовищі, шляхом модифікації та розвитку своїх внутрішніх

ієрархій управління. Проте це часто неможливо через наявність різноманітних факторів невизначеності в системі. У табл. 3 систематизовані такі фактори невизначеності, що характерні для технологічного процесу виготовлення заготовок з ВВКМ і можуть бути враховані при формуванні керуючих впливів.

Таблиця 3 – Типові фактори невизначеності

Фактори невизначеності	Характерні приклади
Зміни параметрів об'єкта в реакторі	Концентрація водню в газоподібних продуктах піролізу на виході з реактора
	Характер дифузійних потоків газового реагента
	Пористість каркасу
Температурні зміни	Дрейф нуля
	Зміна номіналів датчиків
	Вимірювання реальної температури поверхні заготовки
	Нерівномірність температурного поля вздовж заготовки
Зміни конструктивно-технологічних факторів виробів	Складність безпосереднього вимірювання будь-яких характеристик матриці в процесі виробництва
Невідповідність реальних умов виготовлення	Зміна вхідної електричної напруги, тиску газу
	Зміна концентрації зовнішньо подаваного реакційного газу

Одним з ключових технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є процес формування вуглецевих заготовок, під час якого формуються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на хід технологічних процесів виробництва, так і на якість готової продукції. Тому для забезпечення якості заготовок із ВВКМ доцільно додати до структури існуючої системи управління та контролю установки «Агат» нові функції на основі інтелектуального управління, які б враховували невизначеності, що впливають на відповідний технологічний процес.

Головна архітектурна особливість, яка відрізнятиме інтелектуальну систему управління від існуючої, – це механізм отримання, зберігання та обробки знань, включення в модель факторів невизначеності, елементів несумісності реальних умов виробництва, відмов, шумів та інших чинників, які можуть вплинути на функціонування системи.

З практичної точки зору це потребуватиме ще одного рівня управління виконавчими та керуючими блоками. Як правило, це бази знань та механізми виводу знань, інтелектуальний класифікатор. Ці блоки можуть виконуватися як надбудови над існуючими регуляторами. Пропорційно-інтегро-диференційні (ПІД) регулятори можуть використовуватися для регулювання параметрів процесу, налаштовуючи належним чином його параметри, або безпосередньо включатися в замкнутий контур керування за допомогою використовуваного в системі інтерфейсу RS-485, що забезпечує шляхом програмного керування виконавчими пристроями реалізацію всіх існуючих і створених нових режимів, їх коригування та заміну за реакцією на показники спеціальних знань і виробничого досвіду за допомогою закладених у систему керування функцій.

У цьому контексті виникає необхідність вивчення багатьох питань, таких як оптимальний обсяг та склад знань, способи представлення інформації, методи формування даних, що є самостійним напрямком досліджень. Складність, а в деяких випадках і неможливість формалізації задач управління обумовлюють необхідність їх вирішення з використанням методів та технологій нейромережових адаптивних систем. Зрештою, такий підхід передбачає класичну багаторівневу організацію системи управління, яка має інтелектуальні можливості для аналізу ситуації, формування стратегії доцільної поведінки, планування послідовності дій, а також синтезу виконавчих законів, що відповідають заданим показникам якості [11–14].

В роботі розглянуто питання щодо забезпечення якості виробів з вуглецевого композитного матеріалу, яку можна підвищити завдяки застосуванню інтелектуальної системи управління технологічним процесом отримання заготовок з ВВКМ термоградієнтним методом з використанням радіально рухомої зони піролізу.

Удосконалено існуючу систему управління за допомогою введення додаткового блоку нейромережового адаптивного регулятора на базі ПД-регулятора. У такому регуляторі постійна частина виконується у вигляді налаштовуваної багатошарової нейронної мережі, з можливістю підключення та перебудови під конкретний канал управління системи вхідних значень шляхом ідентифікації параметрів, які можуть впливати на поведінку кожного компонента.

Це можуть бути параметри, пов'язані з температурою, тиском, швидкістю потоку тощо. Додавання інтелектуальних елементів допоможе зафіксувати та сформулювати детерміновані показники якості для кожного компонента або для всієї системи, які відображають необхідні характеристики якості [12].

У розробленій системі управління керуючий вплив формується з урахуванням реальної ситуації за допомогою закладених у систему управління спеціальних знань, статистичних даних і виробничого досвіду.

Запропонована інтелектуальна система автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів із ВВКМ з застосуванням нейромережових алгоритмів дозволить підвищити якість управління за рахунок підвищення адаптаційних можливостей системи. На рис. 2 представлена розроблена структурна схема інтелектуальної системи автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів із ВВКМ.

Структурна схема інтелектуальної системи автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів з ВВКМ є складною технічною системою для оптимізації та забезпечення високої якості виробництва продукції і складається з ряду основних компонентів:

- 1 – реакційна камера печі;
- 2 – реєстратор фізичних величин, який являє собою електронний пристрій з кольоровим TFT дисплеєм та клавіатурою для вимірювання, відображення та запису різних фізичних величин: температури, тиску, концентрації газів, витрати;
- 3 – інтелектуальний класифікатор розпізнавання, формування масивів і передачі даних;
- 4 – блок моделювання та управління, який здійснює оцінку стану об'єкта управління з точки зору зміни тактики та стратегії поведінки;
- 5 – блок формування робочих команд відповідно до масивів даних;
- 6 – блок регулювання та подачі води для охолодження печі, призначений для контролю та реєстрації параметрів води в контурах системи;
- 7 – електропривід запірно-регулюючого клапана подачі води;

8 – блок регулювання та подачі газу, який забезпечує управління виконавчими механізмами, передачу інформації через інтерфейс RS-485, перекриття трубопроводу подачі газу клапаном у випадку аварійної ситуації та інше;

9 – електропривід запірно-регулюючого клапана подачі газу;

10 – блок вибору режимів роботи;

11 – блок аварійної сигналізації, призначений для виявлення аварійної ситуації в контурі регулювання: контролює швидкість регульованої величини та видає сигнал, якщо при подачі максимального керуючого впливу вимірюване значення регульованої величини не змінюється протягом певного часу;

12 – блок реалізації алгоритмів ПІД-регулювання, основне завдання якого полягає у збереженні установки в допустимих межах, забезпечуючи енергоефективність системи управління потрібним технологічним режимом;

13 – сильноточне джерело живлення;

14 – контролер крокового приводу регулятора сильноточного джерела живлення;

15 – світлова і звукова сигналізація про відхилення від номінальних значень параметрів робочих середовищ основних і допоміжних систем;

16 – блок регулювання, контролю та реєстрації температури робочого середовища при проведенні експериментальних технологічних процесів піролітичного ущільнення деталей з ВВКМ;

17 – пульт управління установкою;

18 – блок нейромережевої адаптивної системи, який будується на основі типових ПІД-регуляторів: незмінна частина виконується у вигляді налаштовуваної багат шарової нейронної мережі, з можливістю підключення та перебудови під конкретний канал управління існуючої системи. Такі мережі створюються за моделлю «некерованого навчання» для навчання породжувальних моделей даних;

19 – програмне забезпечення Simatic WinCC для створення людино-машинного інтерфейсу;

20 – комп'ютерні шини і інтерфейси виконані в стандарті EIA/TIA-485 (RS-485). Прийом і передача відбуваються по двом окремим парам провідників. Інформація з приладу на комп'ютер або мобільній пристрій передається за протоколом ModbusRTU/ASCII. Це дозволяє організувати взаємодію між різними підсистемами обладнання для проведення автоматизованого оперативного контролю та управління.

21 – блок формування масивів робочих команд;

22 – блок датчиків: температури, тиску, розходу тощо.

В режимі навчання система адаптує параметри всіх блоків у відповідності з вимогами до вихідної інформації. По завершенні процедури навчання блоком вводу/виводу даних можна встановити режим процедури обробки даних (автоматичний або ручний). В автоматичному режимі система, використовуючи інтелектуальний класифікатор, визначає оптимальну стратегію управління або здійснює зміну режиму на основі коефіцієнта ефективності та параметрів якості роботи. В ручному режимі оператор приймає рішення про налаштування стратегії управління або зміну режиму, аналізуючи коефіцієнт ефективності, параметри якості роботи системи та інші показники.

Розроблена інтелектуальна система управління передбачає внесення в алгоритм управління додаткового ряду умов, що змінюють швидкість навчання нейрона, який формує коефіцієнт пропорційної складової нейромережевого регулятора, для впливу на якість перехідного процесу (унікнення перерегулювання та коливань). Цей тип регулятора поєднує методи нейронних мереж з адаптивними методами управління з метою забезпечення ефективного регулювання в змінних динамічних умовах.

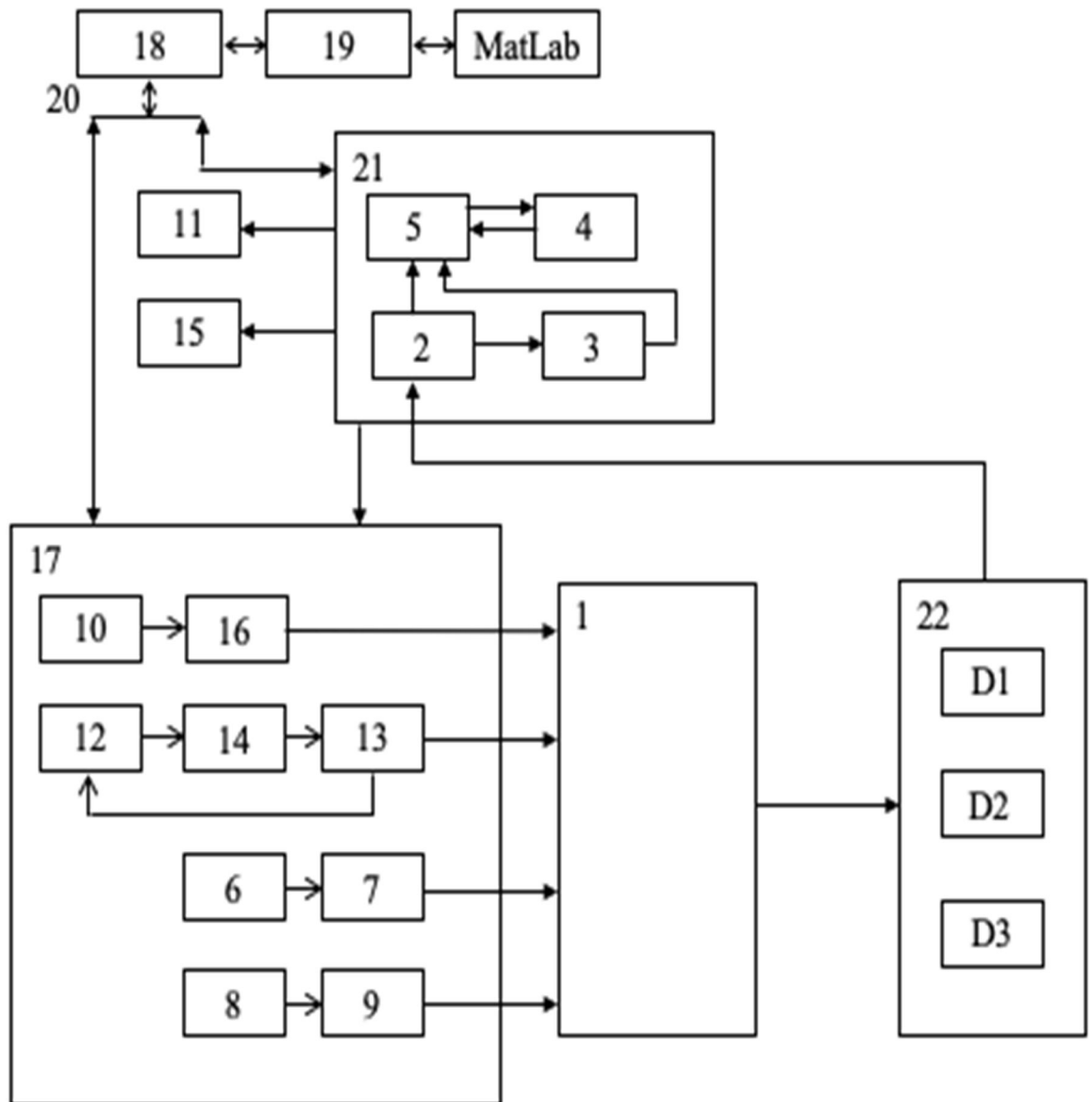


Рисунок 2 – Структурна схема інтелектуальної системи автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів з ВВКМ

Запропоновані покращення дозволять забезпечити стабільну роботу мережі, її здатність до навчання в контурі управління в реальному часі, що дозволить провести валідацію моделі на основі експериментальних даних та калібрування параметрів для більш точної відповідності моделі реальному процесу, підвищити якість продукції за рахунок здатності до навчання та зменшення факторів невизначеності

Таким чином, у роботі розглянуті основні організаційні аспекти, які відіграють ключову роль у забезпеченні якості виробництва вуглець-вуглецевих композитів. У рамках дослідження були виявлені та класифіковані фактори невизначеності інформації, що є характерними для технологічного процесу виготовлення заготовок з ВВКМ. Ці фактори включають, наприклад, зміни у властивостях початкових матеріалів, коливання в

навколишньому середовищі, а також варіації у процесах обробки та виготовлення. Розуміння та систематизація цих факторів відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності та якості виробництва ВВКМ.

Запропонована структурна схема інтелектуальної системи управління реакційною піччю, що дозволить підвищити якість заготовок ВВКМ за рахунок застосування нейромережових алгоритмів та адаптаційних можливостей системи, що ґрунтуються на використанні макроінформації про динамічний стан процесу, спрямованого на гарантовану якість формування матриці ВВКМ. Представлений матеріал розширює уявлення про процес та дозволяє з більшою надійністю моделювати нові технології отримання заготовок з ВВКМ.

Література

1. Дослідження особливостей термоградієнтного газофазного ущільнення піровуглецем пористих середовищ з використанням скраплених вуглеводневих газів / І.В. Гурін, В.В. Гуйда, О.Г. Капленко, В.В. Колосенко / Питання атомної науки та техніки, 2004, №3 (85), с. 124–127.
2. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133–137.
3. ДСТУ ISO 9000:2015 Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів.
4. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання.
5. ДСТУ EN 1159-3:2010 Кераміка технічна спеціальна. Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Частина 3. Визначення питомої теплоємності.
6. ДСТУ ГОСТ 27577:2005 Газ природний паливний компримований для двигунів внутрішнього згорання. Технічні умови.
7. Нефедов Л.И., Овчаренко В.Е., Биньковская А.Б. Модели параметрического синтеза компьютерной сети и условиях нечеткой информации // Технология приборостроения. – Харьков, 2019, №2 с. 47–50.
8. Adaptive Control / Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, 2nd Edition. Dover publications, inc., 2008, 574 p.
9. Митропольський І.Є., Грицак Р.В. Вакуумна техніка: Навчальний посібник. - Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2018. – 138 с.
10. О деяких можливостях газофазних методів для виготовлення вуглець-вуглецевих теплових вузлів для вирощування монокристалів / В.А. Гурін, І.В. Гурин, Ю.Е. Мурин, С.Г. Фурсов, В.В. Колосенко, А.А. Корнеев, А.В. Григорьев, А.Н. Буколов // Питання атомної науки і техніки, 1999, №4 (76), с. 46–55.
11. PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha, G. Lloyds Raja. Publisher: Intechopen. 2023, 118 p.
12. Lloyds Raja G, Ali A. New PI-PD controller design strategy for industrial unstable and integrating processes with dead time and inverse response. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2021; 32(2): 266–280.

13. PID Control for Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha. Publisher: Intechopen. 2018, 218 p. ISBN: 978-1-78923-700-9.

14. Ortega R., Astolfi A., Barabanov N.E. Nonlinear PI control of uncertain systems: an alternative to parameter adaptation // Systems & Control Letters. 2002. Vol. 47. Issue 3. P. 259–278.

Bibliography (transliterated)

1. Doslidzhennya osoblyvostey termohradiyentnoho hazofaznoho ushchilnennya pirovuhletsyem porystykh seredovyshch z vykorystannyam skraplenykh vuhlevodnevykh haziv / I.V. Hurin, V.V. Huyda, O.G. Kaplenko, V.V. Kolosenko / Pytannya atomnoyi nauky ta tekhniki, 2004, №3 (85), p. 124–127.

2. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133–137.

3. DSTU ISO 9000:2015 Systemy upravlinnya yakystyu. Osnovni polozhennya ta slovnyk terminiv.

4. DSTU ISO 10012:2005 Systemy keruvannya vymiryuvanniam. Vymohy do protsesiv vymiryuvannya ta vymiryuvalnoho obladnannya.

5. DSTU EN 1159-3:2010 Keramika tekhnichna spetsialna. Teplofizychni kharakterystyky keramichnykh kompozytsiynykh materialiv. Chastyna 3. Vyznachennya pytomoji teplojemnosti.

6. DSTU HOST 27577:2005 Haz pryrodni palyvnyy komprimovanny dlya dyhuniv vnutrishnoho zhorjannya. Tekhnichni umovy.

7. Nefedov L.I., Ovcharenko V.E., Byn'kovskaia A.B. Modeli parametrychnoho syntezy kompiuternoї merezhi i umovakh nechitkoї informatsii // Tekhnolohiia prystroistva. – Kharkiv, 2019, №2 p. 47–50.

8. Adaptive Control / Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, 2nd Edition. Dover publications, inc., 2008, 574 p.

9. Mytropolskyi I.Ye., Hrytsak R.V. Vakuamna tekhnika: Navchalnyi posibnyk. - Uzhhorod: Vyd-vo UzhNU "Hoverla", 2018. – 138 p.

10. O deiakykh mozhlyvostyakh hazofaznykh metody dlya vyhotovlennya vuhlets'-vuhletsevykh teplovykh vuzliv dlya vyroshchuvannya monokrystaliv / V.A. Hurin, I.V. Huryn, Yu.E. Muryn, S.G. Fursov, V.V. Kolosenko, A.A. Korneev, A.V. Hryhoryev, A.N. Bukolov // Pytannia atomnoi nauky i tekhniki, 1999, №4 (76), p. 46–55.

11. PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha, G. Lloyds Raja. Publisher: Intechopen. 2023, 118 p.

12. Lloyds Raja G, Ali A. New PI-PD controller design strategy for industrial unstable and integrating processes with dead time and inverse response. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2021; 32(2): 266–280.

13. PID Control for Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha. Publisher: Intechopen. 2018, 218 p. ISBN: 978-1-78923-700-9.

14. Ortega R., Astolfi A., Barabanov N.E. Nonlinear PI control of uncertain systems: an alternative to parameter adaptation // Systems & Control Letters. 2002. Vol. 47. Issue 3. P. 259–278.

УДК 621.365.4

І. В. Гурін, к. техн. н., І. Ш. Невлюдов, д. техн. н., професор,
В. Є. Овчаренко, д. техн. н., професор, О. В. Токарева, к. техн. н., професор

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВВКМ

В статті розглянуті питання забезпечення якості заготовок з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів на етапі їх виробництва. Підкреслено, що досягнення заданих рівнів якості процесу виготовлення виробів значною мірою залежить від етапів технології виробництва ВВКМ, починаючи з вибору та підготовки сировини та закінчуючи графітизацією та обробкою поверхні для покращення необхідних спеціальних властивостей. Наведено основні характеристики композиційних матеріалів, за якими можуть бути оцінені ВВКМ, та ключові фактори забезпечення якості при їх виробництві.

Розглянуто основні організаційні аспекти, які відіграють ключову роль у забезпеченні якості виробництва вуглець-вуглецевих композитів. У рамках дослідження були виявлені та класифіковані фактори невизначеності інформації, що є характерними для технологічного процесу виготовлення заготовок з ВВКМ. Ці фактори включають зміни у властивостях початкових матеріалів, коливання в навколишньому середовищі, а також варіації у процесах обробки та виготовлення. Розглянуті питання щодо забезпечення якості виробів з вуглецевого композитного матеріалу, яку можна підвищити завдяки застосуванню запропонованої інтелектуальної системи управління технологічним процесом отримання заготовок з ВВКМ термоградієнтним методом з використанням радіально рухомої зони піролізу.

Удосконалено систему управління за допомогою введення додаткового блоку нейромережевого адаптивного регулятора на базі ПД-регулятора, в якому постійна частина виконується у вигляді налаштовуваної багатошарової нейронної мережі, з можливістю підключення та перебудови під конкретний канал управління системи вхідних значень шляхом ідентифікації параметрів, які можуть впливати на поведінку кожного компонента. Додавання інтелектуальних елементів допоможе зафіксувати та сформулювати детерміновані показники якості для кожного компонента або для всієї системи, які відображають необхідні характеристики якості.

Запропонована інтелектуальна система автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів із ВВКМ з застосуванням нейромережевих алгоритмів дозволить підвищити якість управління за рахунок підвищення адаптаційних можливостей системи, що ґрунтуються на використанні макроінформації про динамічний стан процесу, спрямованого на гарантовану якість формування матриці ВВКМ.

Запропоновані покращення дозволять забезпечити стабільну роботу мережі, її здатність до навчання в контурі управління в реальному часі, що дозволить провести валідацію моделі на основі експериментальних даних та калібрування параметрів для більш точної відповідності моделі реальному процесу, підвищити якість продукції за рахунок здатності до навчання та зменшення факторів невизначеності.

Ключові слова: система управління, регулятор, якість, технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка.

И. В. Гурин, И. Ш. Невлюдов, В. Е. Овчаренко, Е. В. Токарева

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С НЕЙРОСЕТЕВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УУКМ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения качества заготовок из углерод-углеродных композиционных материалов на этапе их производства. Подчеркнуто, что достижение заданных уровней качества процесса изготовления изделий в значительной мере зависит от этапов технологии производства УУКМ, начиная с выбора и подготовки сырья и заканчивая графитизацией и обработкой поверхности для улучшения необходимых специальных свойств. Приведены основные характеристики композиционных материалов, по которым можно оценить УУКМ, и ключевые факторы обеспечения качества при их производстве.

Рассмотрены основные организационные аспекты, играющие ключевую роль в обеспечении качества производства углерод-углеродных композитов. В рамках исследования были выявлены и классифицированы факторы неопределенности информации, которые характерны для технологического процесса изготовления заготовок из УУКМ. Эти факторы включают изменения в свойствах исходных материалов, колебания в окружающей среде, а также вариации в процессах обработки и изготовления. Рассмотрены вопросы обеспечения качества продукции из углеродного композитного материала, которое можно повысить за счет применения предложенной интеллектуальной системы управления технологическим процессом получения заготовок из УУКМ термоградиентным методом с использованием радиально подвижной зоны пиролиза.

Усовершенствована система управления путем введения дополнительного блока нейросетевого адаптивного регулятора на основе ПИД-регулятора, в котором постоянная часть выполняется в виде настраиваемой многослойной нейронной сети с возможностью подключения и перестройки под конкретный канал управления системы входных значений путем идентификации параметров, которые могут влиять на поведение каждого компонента. Добавление интеллектуальных элементов поможет зафиксировать и сформулировать детерминированные показатели качества для каждого компонента или для всей системы, отражающие необходимые характеристики качества.

Предложенная интеллектуальная система автоматического управления и контроля параметров технологического процесса производства изделий из УУКМ с использованием нейросетевых алгоритмов позволит повысить качество управления за счет увеличения адаптационных возможностей системы, основанных на использовании макроинформации о динамическом состоянии процесса, направленного на гарантированное качество формирования матрицы УУКМ.

Предложенные улучшения позволят обеспечить стабильную работу сети, ее способность к обучению в контуре управления в реальном времени, что позволит провести валидацию модели на основе экспериментальных данных и калибровку параметров для более точного соответствия модели реальному процессу, повысить качество продукции за счет способности к обучению и уменьшения факторов неопределенности.

Ключевые слова: система управления, регулятор, качество, технологический процесс, углеродно-углеродный композитный материал, заготовка.

I. V. Hurin, I. Sh. Nevlyudov, V. E. Ovcharenko, O. V. Tokarieva

**AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH NEURAL NETWORK CONTROLLERS
FOR IMPROVING THE QUALITY OF CCCM**

The article discusses quality assurance issues of carbon-carbon composite materials during their production stage. It emphasizes that achieving the desired quality levels of the manufacturing process depends significantly on the stages of CCCM production technology, starting from the selection and preparation of raw materials and ending with graphitization and surface treatment to improve the necessary special properties. The main characteristics of composite materials, by which CCCM can be evaluated, and key factors ensuring quality in their production are provided.

The main organizational aspects playing a key role in ensuring the quality of carbon-carbon composites production are considered. Within the scope of the study, factors of uncertainty typical for the technological process of manufacturing blanks from CCCM were identified and classified. These factors include changes in the properties of initial materials, fluctuations in the surrounding environment, as well as variations in processing and manufacturing processes. The issues regarding the quality assurance of products made from carbon composite material are discussed, which can be improved through the application of the proposed intelligent management system for the technological process of obtaining blanks from CCCM using the thermogradient method with the use of a radially movable pyrolysis zone.

The control system has been improved by introducing an additional block of a neural network adaptive controller based on a PID controller, in which the integral part is implemented as a tunable multilayer neural network, with the ability to connect and reconfigure for specific control channel inputs through parameter identification that may affect the behavior of each component.

Adding intelligent elements will help capture and formulate deterministic quality indicators for each component or for the entire system, reflecting the necessary quality characteristics.

The proposed intelligent system for automatic control and monitoring of parameters in the technological process of manufacturing products from CCCM using neural network algorithms will improve control quality by increasing the system's adaptive capabilities based on the use of macro-information about the dynamic state of the process, aimed at guaranteed quality formation of the CCCM.

Keywords: control system, controller, quality, technological process, carbon-carbon composite material, workpiece.

І. П. Петік¹, к. техн. н., А. М. Діхтярь², к. техн. н., доцент,
С. С. Андреева², к. техн. н., доцент, Д. О. Шаповаленко³, к. економ. н., А. О. Карюк³,
Н. Ю. Кібенко²

РОЗРОБКА АРОМАТИЗОВАНОЇ ОЛІЙНОЇ КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ КОНОПЛЯНОЇ ОЛІЇ, СТАБІЛІЗОВАНОЇ ВІД ОКИСНЕННЯ

¹Український науково-дослідний інститут олій та жирів НААН

²Державний біотехнологічний університет,

³Харківський національний університет міського господарства ім.О.М. Бекетова

Ключові слова: конопляна олія, кукурудзяна олія, антиоксиданти, ефірні олії, період індукції прискореного окиснення.

Вступ

Однією з основних проблем у структурі харчування є незбалансованість складу жиромісних продуктів [1, 2]. Населення в достатній кількості споживає жири, в яких превалюють поліненасичені жирні кислоти групи $\omega-6$ (соняшникова, кукурудзяна, соєва олії) або мононенасичені групи $\omega-9$ (оливкова олія). Водночас спостерігається гострий дефіцит у раціоні поліненасичених жирних кислот групи $\omega-3$ [3].

Перспективним джерелом $\omega-3$ поліненасичених жирних кислот є олія з насіння коноплі (*Cannabis ruderalis*). Конопляна олія виготовляється з посівної коноплі, в якій відсутні канабіноїди. Така олія використовується в медичній практиці, у фармацевтиці та косметології. Застосування конопляної олії у харчових цілях порівняно обмежено через невеликий обсяг виробництва, хоча рядом досліджень обґрунтовано позитивний вплив цієї олії на здоров'я, і доведена потреба у харчуванні [4, 5].

Разом з тим, високий вміст поліненасичених жирних кислот є обмеженням для використання конопляної олії при термічній обробці та довгостроковому зберіганні. Суттєвим недоліком рослинних олій з високим вмістом поліненасичених жирних кислот $\omega-3$ при виробництві та зберіганні є висока схильність до окисного псування. Власне на процес окиснення рослинних олій впливає велика кількість умов, серед яких, окрім жирнокислотного і триацилгліцерольного складу, присутність вологи та продуктів окиснення, ензиматичні, фото- та термопроцеси, присутність прооксидантів, зокрема металів змінної валентності тощо [6]. Окисне псування жиромісних продуктів є проблемою з фізіологічної та технологічної точок зору [7, 8]. Для подолання окисної лабільності окремим олій доцільним є розробка купажів на засадах харчової комбінаторики [9] і використання антиоксидантів [10–12]. Тому є актуальним пошук шляхів стабілізації процесу окиснення конопляної олії через створення олійної композиції (купажу) зі стабільною до окиснення олією, зокрема кукурудзяною (є джерелом природного токоферолу). Отже, дослідження, направлені на створення олійної композиції на основі конопляної олії з підвищеною стійкістю до окиснення за рахунок природних ароматичних речовин є актуальними, бо дозволять:

– виявити сумісний вплив обраних олій на стабільність до окисного псування та жирнокислотний склад олійної композиції;

– прогнозувати термін зберігання даної продукції;

– розширити асортимент олійних композицій харчового призначення на основі конопляної олії.

Результати наукових досліджень необхідні для розширення асортименту конкурентноспроможних олійних композицій харчового призначення на основі біологічно цінної конопляної олії.

Дослідження існуючих рішень проблеми

В роботі [5] відмічено, що конопляна олія є надзвичайно сприйнятливою до окисної деструкції, що можна пояснити високим вмістом поліненасичених жирних кислот в олії. Зазначено, що більш висока температура та довший час технологічного процесу обсмажування негативно впливають на окисну стабільність олії. Таким чином, доцільним є пошук шляхів стабілізації окисних процесів в конопляній олії. Такий підхід використано в роботах [13, 14], де досліджено загальний вміст фенольних сполук в нерафінованій олії насіння конопель і розторопші холодного віджиму. Доведено, що хлорогенова кислота пригнічує процес пероксидного окислення ліпідів в оліях насіння коноплі та розторопші. Можна відзначити, що доцільним є дослідження окисної стабільності олій після рафінації, бо застосування очистки від супутніх речовин для нетрадиційних олій розширюється.

Авторами робіт [15, 16] проаналізовано вміст фенольних сполук і антиоксидантну активність нерафінованих рослинних олій холодного віджиму, включаючи олії кукурудзяну, соєву, насіння конопель, насіння льону, насіння гарбуза, каноли, виноградних кісточок та рисових висівок. Серед досліджуваних олій кукурудзяна олія виявила найвищу антиоксидантну активність. Невизначеним питанням залишається окисна стабільність олійних композицій на основі стабільних і лабільних олій, зокрема кукурудзяної і конопляної.

Наявною є необхідність розширення наукових даних щодо розробки олійних композицій на основі цінної конопляної олії, а також її стабілізації природними фізіологічно активними антиоксидантами, зокрема ефірними оліями. Антиоксидантні властивості екстрактів з рослинної сировини та ефірних олій зумовлені наявністю в їх складі значної кількості фенольних сполук. Для стабілізації олій доцільно використовувати саме ефірні олії, а не водні екстракти, за рахунок їх ароматичних властивостей. Окрім вирішення питання підвищення опірності жирів окисному псуванню, ефірні олії дозволяють регулювати смако-ароматичні властивості салатних олій, розширюючи таким чином їх асортимент. Зажаючи на це, доцільним слід вважати дослідження, присвячене виявленню сумісного впливу ефірних олій (зокрема коріандру, базилику, чебрецю) на період індукції прискореного окиснення олійної композиції на основі конопляної олії. Це дозволить підвищити її стабільність до окисного псування для подовження строків придатності і одночасного збереження фізіологічно активних складових, зокрема α -ліноленової жирної кислоти.

Мета та основні задачі дослідження

Метою роботи є розробка складу олійної композиції на основі конопляної олії з підвищеною стійкістю до окиснення за рахунок природних ароматичних речовин з антиоксидантними властивостями. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити споживчі властивості обраних олій для купажування – конопляної та кукурудзяної;

- дослідити сумісний вплив вмісту обраних олій в модельних зразках олійної композиції на її період індукції прискореного окиснення і вміст поліненасичених жирних кислот ω -3 групи.

Матеріали та методи досліджень

Вміст вологи та летких речовин визначено гравіметричним методом згідно ДСТУ 4603. Кислотне та пероксидне числа олій визначено титриметричним методом згідно ДСТУ ISO 660 і ДСТУ ISO 3960 відповідно. Анізидинове число олій визначено фотометричним методом згідно ДСТУ EN ISO 6885. Вміст ізомерів токоферолу в зразках досліджуваних олій визначено методом високоефективної рідинної хроматографії згідно ДСТУ EN ISO 9936. Склад і вміст жирних кислот зразків олій визначено згідно ДСТУ ISO 5508 на хроматографі *Shimadzu* (Японія).

Період індукції прискореного окиснення олій та олійних композицій проведено прискореним методом «активного кисню» згідно з ДСТУ ISO 6886. Принцип методу полягає в витримці зразків матеріалу, що досліджується, за постійної підвищеної температури (80 ± 2 °C) і вільному доступі кисню, перемішуванні та періодичному визначенні пероксидного числа проб ліпідів, вилучених зі зразків. Величина пероксидного числа ліпідів характеризує ступінь накопичення первинних продуктів окиснення. Період індукції визначено графічно як проміжок часу, після якого відбувалось значне підвищення пероксидного числа, тобто концентрації первинних продуктів окиснення (пероксидів та гідрпероксидів).

Для визначення залежностей періоду індукції прискореного окиснення ароматизованої олійної композиції від співвідношення ефірних олій обрано метод багатофакторної регресії з побудовою поверхні відгуку методом повного факторного експерименту. Для обробки даних застосовано математичні методи з використанням програмного пакету *Stat Soft Statistica v 6.0* (США). Статистичну модель залежності визначено шляхом апроксимації результатів експериментів за допомогою побудови лінії тренду. Дослідження проведено в трикратному повторенні. Перевірку значущості коефіцієнтів рівняння апроксимаційної залежності (1) визначено методом найменших квадратів. Якість рівняння апроксимаційної залежності (1) та повноту впливу співвідношення ефірних олій на період індукції прискореного окиснення ароматизованої олійної композиції оцінено за допомогою коефіцієнту детермінації R^2 . Значущість рівняння залежності (1) встановлено за допомогою розрахунку критерію Фішера (F), виходячи з припущення (нульова гіпотеза), що рівняння є статистично незначимим.

Результати дослідження

Як складову для олійної композиції на основі рафінованої конопляної олії обрано рафіновану кукурудзяну олію. Досліджено вміст вологи та летких речовин, аналітичних чисел, що характеризують інтенсивність перетікання процесів окисної деструкції в оліях для олійної композиції, а також їхні періоди індукції прискореного окиснення (табл. 1).

Визначено склад ізомерної фракції токоферолів та їхній вміст в зразках олій для олійної композиції (табл. 2).

Визначено склад і вміст жирних кислот зразків олій, які обрано для дослідження (табл. 3).

Результати досліджень (табл. 1–3) доводять, що зразки сировини для олійної композиції за показниками, що обумовлюють процеси окисної деструкції: вміст вологи, аналітичні числа, жирнокислотний склад, відповідають вимогам, встановленим у відповідній нормативній документації – CAS 89958-21-4; CAS 8001-30-7.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники зразків досліджуваних олій

Показники	Досліджувані зразки олій	
	олія конопляна	олія кукурудзяна
Масова частка вологи та летких речовин, %	0,04500±0,0020	0,0120±0,0005
Кислотне число, мг КОН/г	0,130±0,005	1,040±0,050
Пероксидне число, ммоль ½О/кг	0,210±0,010	0,160±0,006
Анізидинове число, у. о.	1,45±0,06	0,85±0,03
Період індукції прискореного окиснення, год.	2,6±0,1	5,2±0,2

Таблиця 2 – Вміст ізомерів токоферолу в зразках досліджуваних олій

Ізомери токоферолу	Вміст в досліджуваних зразках олій, мг/л	
	олія конопляна	олія кукурудзяна
α-токоферол	245,0±9,0	3180,0±116,0
β-токоферол	176,0±7,2	2680,0±110,0
γ-токоферол	238,0±9,6	459,0±171
δ-токоферол	24,7±1,0	73,5±2,4
Сума	665±27,5	6515±255,63

Таблиця 3 – Жирнокислотний склад зразків досліджуваних олій

Вид жирних кислот	Вміст досліджуваних зразках, % від загальної суми	
	олія конопляна	олія кукурудзяна
Насичені жирні кислоти	10,5	14,95
Мононенасичені жирні кислоти	16,9	32,25
Поліненасичені жирні кислоти ω-6	55,8	51,6
Поліненасичені жирні кислоти ω-3	16,8	1,2

Визначено вплив співвідношення конопляної та кукурудзяної олій в олійній композиції на період індукції прискореного окиснення, а також вміст поліненасичених жирних кислот ω-3 групи в олійній композиції. Вміст конопляної та кукурудзяної олій в олійній композиції варіювали в інтервалі 0,0...100,0 % з кроком 10,0 %. Отримані значення періоду індукції прискореного окиснення олійної композиції знаходилися в межах 2,8...5,5 год.; вмісту поліненасичених жирних кислот ω-3 групи – в межах 1,2...16,8 % від загальної суми жирних кислот. Діаграми отриманих залежностей представлено на рис. 1, 2.

Базуючись на отриманих результатах експериментів запропоновано раціональний вміст конопляної та кукурудзяної олій в олійній композиції задовільної стабільності до окиснювального псування і фізіологічно значимого вмісту поліненасичених жирних кислот ω-3 групи, а саме:

- вмісту конопляної олії в композиції – 60±3 %;
- вмісту кукурудзяної олії в композиції – 40±2 %;

за яких споживчі властивості олійної композиції становлять:

- період індукції прискореного окиснення – 4,0 год., тобто на 70 % більше від такого у конопляної олії;
- вміст поліненасичених жирних кислот ω -3 групи – 10,6 % від загальної суми жирних кислот.

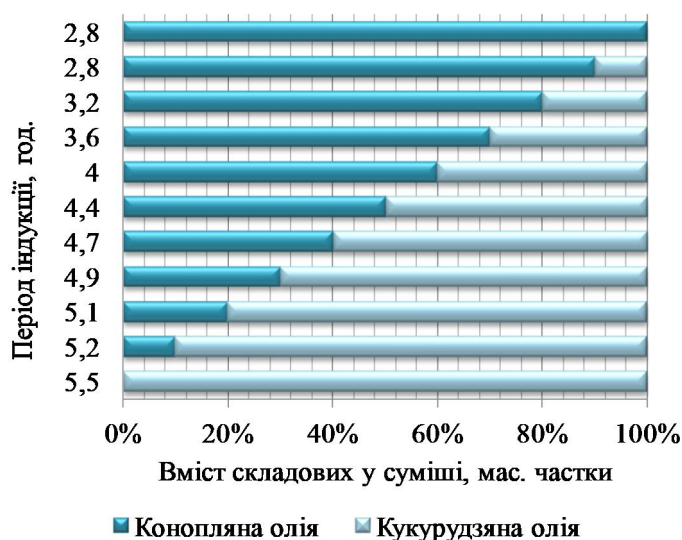


Рисунок 1 – Залежність періоду індукції прискореного окиснення олійної композиції від вмісту конопляної та кукурудзяної олій

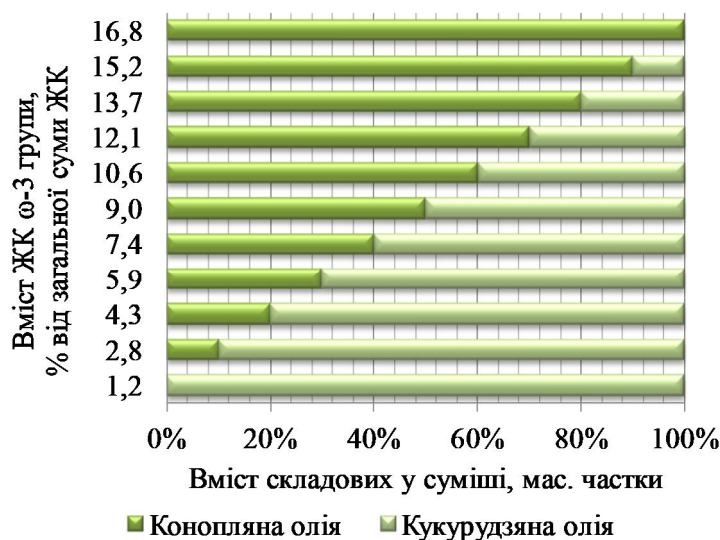


Рисунок 2 – Залежність вмісту поліненасичених жирних кислот ω -3 групи олійної композиції від вмісту конопляної та кукурудзяної олій

Варто відзначити, що підвищення вмісту кукурудзяної олії більше, ніж на 40 ± 2 % призводить до зниження вмісту поліненасичених жирних кислот ω -3 групи в олійній

композиції. Це, в свою чергу, знижує харчову цінність суміші, що є недоцільним з фізіологічної точки зору, так як співвідношення $\omega-3:\omega-6$ буде нижчим за 1:5, яке характеризує олійну композицію як продукт оздоровчого харчування [9].

Під час зниження вмісту кукурудзяної олії нижче, ніж на $40\pm 2\%$, в свою чергу, погіршується стабільність до окисного псування олійної композиції, що негативно відображається на споживчих характеристиках готового продукту.

Висновки

1. Встановлено, що зразки обраних олій (конопляної та кукурудзяної) за дослідженими фізико-хімічними показниками та жирнокислотному складу відповідають вимогам нормативної документації (CAS 89958-21-4; CAS 8001-30-7 відповідно). Період індукції прискореного окиснення за $80\text{ }^\circ\text{C}$ для конопляної олії становив $2,8\pm 0,1$ год., а для кукурудзяної – $5,5\pm 0,2$ год. Сума ізомерів токоферолу в конопляній олії становить $688\pm 27,5$ мг/л, для кукурудзяної олії – $6509\pm 260,36$ мг/л.

2. Запропоновано раціональне співвідношення конопляної та кукурудзяної олій в олійній композиції 6 : 4 відповідно. Споживчі властивості такої суміші становлять: період індукції прискореного окиснення – 4,0 год., вміст α -ліноленової жирної кислоти – 10,6 % від загальної суми жирних кислот.

Література

1. Papchenko, V., Matveeva, T., Bochkarev, S., Kunitsia, E., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Polkovnychenko, D., Shcherbak, S. (2020). Development of amino acid balanced food systems based on wheat flour and oilseed meal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/11 (105), 66-76. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203664.

2. Lakshmayya, N. S. V., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K. (2023). Essential oils-based nano-emulsion system for food safety and preservation: Current status and future prospects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102897. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102897>.

3. Sytnik, N., Kunitsa, E., Mazaeva, V., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Beliuchenko, D., Maksymov, A., Popov, M., & Novik, I. (2020). Determination of the influence of natural antioxidant concentrations on the shelf life of sunflower oil. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (11–106), 55–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209000>.

4. Coniglio, S., Shumskaya, M., Vassiliou, E. (2023). Unsaturated Fatty Acids and Their Immunomodulatory Properties. *Biology*, 12 (2) : 279. DOI: 10.3390/biology12020279.

5. Serra, Juan & Mura, Jessica & Fagoaga, Carmen & Castellano, Gloria. (2023). Oxidative Stability of Margarine is Improved by Adding Natural Antioxidants from Herbs and Spices. 10.20944/preprints202305.1445.v1.

6. Belinska, A., Bochkarev, S., Varankina, O. Rudniev, V. et al. (2019). Research on oxidative stability of protein-fat mixture based on sesame and flax seeds for use in halva technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/11 (101), 6–14. doi: 10.15587/1729-4061.2019.178908.

7. Kovaliova, O., Tchoursinov, Y., Kalyna, V., Koshulko, V., Kunitsia, E., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Polkovnychenko, D., & Grigorenko, N. (2020). Identification of patterns in the production of a biologically-active component for food products. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies, 2/11 (104), 61–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200026>.

8. Bai, Z., Yu, R., Li, J., Wang N. et al. (2018). Application of several novel natural antioxidants to inhibit oxidation of tree peony seed oil. *CyTA – Journal of Food*, 16, 1, 1071–1078. DOI:10.1080/19476337.2018.1529061.

9. Pérez-Jiménez J., Neveu V., Vos F., Scalbert A. (2010). Identification of the 100 richest dietary sources of polyphenols: an application of the Phenol-Explorer database. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64. P. 112–120. DOI: 10.1038/ejcn.2010.221.

10. Hashempour, F., Torbati, M., Azadmard-Damirchi, S., Savage, G. P. (2016). Vegetable Oil Blending: A Review of Physicochemical, Nutritional and Health Effects. *Trends in Food Science & Technology*, 57. DOI:10.1016/j.tifs.2016.09.007.

11. Kalyna, V.S., Lutsenko, M.V., Tchoursinov, Y.O., Kunitsa, K.V. et al. (2020). Approbation and biomedical research of “coriander petrozeline”. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 21(2), 155–162. <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/2846>.

12. Kalinowska, M., Płońska, A., Trusiak, M. et al. (2022). Comparing the extraction methods, chemical composition, phenolic contents and antioxidant activity of edible oils from *Cannabis sativa* and *Silybum marianum* seeds. *Scientific Reports*, 12, 20609. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25030-7>.

13. Demydova A., Aksonova O., Yevlash V., Tkachenko O., Kameneva, N. (2022). Antioxidant activity of plants extracts of Ukrainian origin and their effect on the oxidative stability of sunflower oil. *Food Science and Technology*, 16(3), 55-64. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i3.2514>.

14. Siger, A., Nogala-Kalucka, M. & Lampart-Szczapa, E. (2008). The content and antioxidant activity of phenolic compounds in cold-presses plant oils. *Journal of Food Lipids*, 15, 137–149. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2007.00107.x>.

15. Olszowy, M., Dawidowicz, A.L. (2016). Essential oils as antioxidants: their evaluation by DPPH, ABTS, FRAP, CUPRAC, and β -carotene bleaching methods. *Monatshefte für Chemie*, 147, 2083–2091 <https://doi.org/10.1007/s00706-016-1837-0>.

16. Mikołajczak, N., Tańska, M., Ogrodowska, D. (2021). Phenolic compounds in plant oils: A review of composition, analytical methods, and effect on oxidative stability. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 110-138. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.046>.

Bibliography (transliterated)

1. Papchenko, V., Matveeva, T., Bochkarev, Kunitsia, E., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Polkovnychenko, D., Shcherbak, S. (2020). Development of amino acid balanced food systems based on wheat flour and oilseed meal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/11 (105), 66-76. doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203664.

2. Lakshmayya, N. S. V., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K. (2023). Essential oils-based nano-emulsion system for food safety and preservation: Current status and future prospects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102897. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102897>.

3. Sytnik, N., Kunitsa, E., Mazaeva, V., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Beliuchenko, D., Maksymov, A., Popov, M., & Novik, I. (2020). Determination of the influence of natural antioxidant concentrations on the shelf life of sunflower oil. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies, 4 (11–106), 55–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209000>.

4. Coniglio, S., Shumskaya, M., Vassiliou, E. (2023). Unsaturated Fatty Acids and Their Immunomodulatory Properties. *Biology*, 12 (2) : 279. DOI: 10.3390/biology12020279.

5. Serra, Juan & Mura, Jessica & Fagoaga, Carmen & Castellano, Gloria. (2023). Oxidative Stability of Margarine is Improved by Adding Natural Antioxidants from Herbs and Spices. 10.20944/preprints202305.1445.v1.

6. Belinska, A., Bochkarev, S., Varankina, O. Rudniev, V. et al. (2019). Research on oxidative stability of protein-fat mixture based on sesame and flax seeds for use in halva technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/11 (101), 6–14. doi: 10.15587/1729-4061.2019.178908.

7. Kovaliova, O., Tchoursinov, Y., Kalyna, V., Koshulko, V., Kunitsia, E., Chernukha, A., Bezuglov, O., Bogatov, O., Polkovnychenko, D., & Grigorenko, N. (2020). Identification of patterns in the production of a biologically-active component for food products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/11 (104), 61–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200026>.

8. Bai, Z., Yu, R., Li, J., Wang N. et al. (2018). Application of several novel natural antioxidants to inhibit oxidation of tree peony seed oil. *CyTA – Journal of Food*, 16, 1, 1071–1078. DOI:10.1080/19476337.2018.1529061.

9. Pérez-Jiménez J., Neveu V., Vos F., Scalbert A. (2010). Identification of the 100 richest dietary sources of polyphenols: an application of the Phenol-Explorer database. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64. P. 112–120. DOI: 10.1038/ejcn.2010.221.

10. Hashempour, F., Torbati, M., Azadmard-Damirchi, S., Savage, G. P. (2016). Vegetable Oil Blending: A Review of Physicochemical, Nutritional and Health Effects. *Trends in Food Science & Technology*, 57. DOI:10.1016/j.tifs.2016.09.007.

11. Kalyna, V.S., Lutsenko, M.V., Tchoursinov, Y.O., Kunitsa, K.V. et al. (2020). Approbation and biomedical research of “coriander petrozeline”. *Scientific Study and Research: Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 21(2), 155–162. <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/2846>.

12. Kalinowska, M., Płońska, A., Trusiak, M. et al. (2022). Comparing the extraction methods, chemical composition, phenolic contents and antioxidant activity of edible oils from *Cannabis sativa* and *Silybum marianu* seeds. *Scientific Reports*, 12, 20609. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25030-7>.

13. Demydova A., Aksonova O., Yevlash V., Tkachenko O., Kameneva, N. (2022). Antioxidant activity of plants extracts of Ukrainian origin and their effect on the oxidative stability of sunflower oil. *Food Science and Technology*, 16(3), 55-64. <https://doi.org/10.15673/fst.v16i3.2514>.

14. Siger, A., Nogala-Kalucka, M. & Lampart-Szczapa, E. (2008). The content and antioxidant activity of phenolic compounds in cold-presses plant oils. *Journal of Food Lipids*, 15, 137–149. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4522.2007.00107.x>.

15. Olszowy, M., Dawidowicz, A.L. (2016). Essential oils as antioxidants: their evaluation by DPPH, ABTS, FRAP, CUPRAC, and β -carotene bleaching methods. *Monatshefte für Chemie*, 147, 2083–2091 <https://doi.org/10.1007/s00706-016-1837-0>.

16. Mikołajczak, N., Tańska, M., Ogrodowska, D. (2021). Phenolic compounds in plant oils: A review of composition, analytical methods, and effect on oxidative stability. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 110-138. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.046>.

УДК 664.36: 665.52

І. П. Петік, А. М. Діхтярь, С. С. Андрєєва, Д. О. Шаповаленко, А. О. Карюк,
Н. Ю. Кібенко

РОЗРОБКА АРОМАТИЗОВАНОЇ ОЛІЙНОЇ КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ КОНОПЛЯНОЇ ОЛІЇ, СТАБІЛІЗОВАНОЇ ВІД ОКИСНЕННЯ

Розглянуто шлях вирішення проблеми стабілізації конопляної олії від окисного псування з одночасним збереженням її харчової цінності. Особливість роботи полягає у розробці складу ароматизованої олійної композиції на основі конопляної олії, що має високу стійкість до окиснення. Об'єктом дослідження є показники складу і період індукції прискореного окиснення рафінованих конопляної та кукурудзяної олій в залежності від їхнього співвідношення в олійній композиції. Встановлено, що зразки обраних олій (конопляної та кукурудзяної) за дослідженими фізико-хімічними показниками та жирнокислотному складу відповідають вимогам нормативної документації (CAS 89958-21-4; CAS 8001-30-7 відповідно). Період індукції прискореного окиснення за 80 °С для конопляної олії становив $2,8 \pm 0,1$ год., а для кукурудзяної – $5,5 \pm 0,2$ год. Сума ізомерів токоферолу в конопляній олії становить $688 \pm 27,5$ мг/л, для кукурудзяної олії – $6509 \pm 260,36$ мг/л. Встановлено раціональне співвідношення конопляної та кукурудзяної олій в олійній композиції 6:4 відповідно. Споживчі властивості такої суміші становлять: період індукції прискореного окиснення – 4,0 год, вміст α -ліноленової жирної кислоти – 10,6 % від загальної суми жирних кислот. Особливістю отриманих результатів є можливість збільшення терміну придатності олійної композиції на основі конопляної олії, що дозволяє розширити діапазон її споживчих властивостей. З практичної точки зору розробка дозволяє збільшити термін зберігання та одержати додатковий дохід з реалізації нової високоякісної конкурентоспроможної продукції оздоровчого напрямку вживання. Прикладним аспектом використання наукового результату є можливість створення асортименту салатних олійних композицій на основі цінної конопляної олії в залежності від співвідношення складових.

Ключові слова: конопляна олія, кукурудзяна олія, антиоксиданти, ефірні олії, період індукції прискореного окиснення.

І. П. Петік, А. М. Дехтярь, С. С. Андрєєва, Д. О. Шаповаленко, А. О. Карюк,
Н. Ю. Кібенко

РАЗРАБОТКА АРОМАТИЗИРОВАННОЙ МАСЛЯНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ КОНОПЛЯНОГО МАСЛА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОТ ОКИСЛЕНИЯ

Рассмотрен путь решения проблемы стабилизации конопляного масла от окислительной порчи с сохранением его пищевой ценности. Особенность работы заключается в разработке состава ароматизированной масляной композиции на основе конопляного масла, обладающего высокой устойчивостью к окислению. Объектом исследования являются показатели состава и период индукции ускоренного окисления купажа рафинированных конопляных и кукурузных масел в зависимости от их соотношения в масляной композиции. Установлено, что образцы выбранных масел (конопляного и кукурузного) по исследованным физико-химическим показателям и жирнокислотному составу отве-

чают требованиям нормативной документации (CAS 89958-21-4; CAS 8001-30-7 соответственно). Период индукции ускоренного окисления при 80 °C для конопляного масла составлял $2,8 \pm 0,1$ часа, а для кукурузного – $5,5 \pm 0,2$ часа. Сумма изомеров токоферола в конопляном масле составляет $688 \pm 27,5$ мг/л, для кукурузного масла – $6509 \pm 260,36$ мг/л. Установлено рациональное соотношение конопляного и кукурузного масел в масляной композиции, что составило 6:4 соответственно. Потребительские свойства такой смеси составляют: период индукции ускоренного окисления – 4,0 ч, содержание α -линоленовой жирной кислоты – 10,6 % от общей суммы жирных кислот. Особенностью полученных результатов является возможность увеличения срока годности масляной композиции на основе конопляного масла, что позволяет расширить диапазон его потребительских свойств. С практической точки зрения разработка позволяет увеличить сроки хранения и получить дополнительный доход по реализации новой высококачественной конкурентоспособной продукции оздоровительного направления употребления. Прикладным аспектом использования научного результата является возможность создания ассортимента масляных салатных композиций на основе ценного конопляного масла в зависимости от соотношения составляющих.

Ключевые слова: конопляное масло, кукурузное масло, антиоксиданты, эфирные масла, период индукции ускоренного окисления.

I. P. Petik, A. M. Dikhtyar, S. S. Andrieieva, D. O. Shapovalenko, A. O. Kariyk,
N. Yu. Kibenko

DEVELOPMENT OF A FLAVORED OIL COMPOSITION BASED ON HEMP OIL STABILIZED AGAINST OXIDATION

A way to solve the problem of stabilizing hemp oil from oxidative spoilage while maintaining its nutritional value is considered. The peculiarity of the work lies in the development of a flavored oil composition based on hemp oil, which is highly resistant to oxidation. The object of the study is the composition indicators and the induction period of accelerated oxidation of a blend of refined hemp and corn oils, depending on their ratio in the oil composition. It was established that samples of selected oils (hemp and corn) meet the requirements of regulatory documentation according to the studied physicochemical parameters and fatty acid composition (CAS 89958-21-4; CAS 8001-30-7, respectively). The induction period of accelerated oxidation at 80 °C for hemp oil was 2.8 ± 0.1 hours, and for corn oil – 5.5 ± 0.2 hours. The sum of tocopherol isomers in hemp oil is 688 ± 27.5 mg/l, for corn oil – 6509 ± 260.36 mg/l. A rational ratio of hemp and corn oils in the oil composition was established, which was 6:4, respectively. The consumer properties of such a mixture are: the induction period of accelerated oxidation is 4.0 hours, the content of α -linolenic fatty acid is 10.6 % of the total amount of fatty acids. A feature of the results obtained is the possibility of increasing the shelf life of an oil composition based on hemp oil, which allows expanding the range of its consumer properties. From a practical point of view, the development makes it possible to increase shelf life and generate additional income from the sale of new high-quality competitive products for health purposes. An applied aspect of using the scientific result is the possibility of creating an assortment of oil salad compositions based on valuable hemp oil, depending on the ratio of the components.

Keywords: hemp oil, corn oil, antioxidants, essential oils, accelerated oxidation induction period.

О. Л. Ходаков, к. техн. н., доцент, Г. О. Саркісян, д. е. н., проф,
О. В. Василик, к. техн. н., доцент, О. М. Мирошніченко, к. техн. н., доцент,
В. Ю. Делі, ст. викладач, доктор філософії, Л. О. Ткаченко, ст. викладач,
Я. М. Ульман, магістр

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЯКІСТЬ РОЖЕВИХ ІГРИСТИХ ВИНОМАТЕРІАЛІВ ПІНО НУАР

Одеський національний технологічний університет, Одеса

Ключові слова: ігристі виноматеріали, рожеві ігристі вина, технологія, дріжджі, якість, Піно Нуар.

Сьогодні у всьому світі стрімко зростає популярність рожевих ігристих вин [1]. З маркетингової точки зору, інтерес споживача до цього благородного напою обумовлений насамперед естетичним аспектом [1, 2, 3]. Рожеве ігристе вино має привабливий зовнішній вигляд завдяки своєму ніжному відтінку, який асоціюється з романтикою та елегантністю. Це робить його популярним вибором для особливих подій, таких як весілля, ювілеї та романтичні зустрічі. Багато виробників активно працюють над створенням іміджу рожевого вина як модного та стильного напою. З професійної точки зору, технологічно обґрунтована і досить делікатна технологія його виробництва дозволяє створювати різноманітні ароматичні та смакові профілі, від свіжих, легких та фруктових до більш насичених та складних.

Найважливішим технологічним аспектом є вибір сорту винограду для рожевого ігристого вина. Перевага тому чи іншому сорту може залежати від безлічі факторів, включаючи регіон виробництва, бажаний стиль вина та переваги винороба [4, 5]. Сорт повинен дозволяти готувати з нього досить легкі, свіжі ігристі виноматеріали без надмірної танінності, які, проте, добре розвиватимуться в плящі і даватиме яскраві зрілі та складні ігристі вина ошатного рожевого кольору різних відтінків. Добре відомо, деякі сорти винограду особливо добре підходять до створення якісних рожевих ігристих вин. У всьому світі фаворитом для створення вишуканого елегантного троянд традиційно є сорт Піно Нуар. Рожеві ігристі вина з сорту Піно Нуар мають свої характерні особливості, які роблять їх унікальними та привабливими для споживачів [6]. Такі вина мають яскраві фруктові аромати, такі як полуниця, вишня, малина, червоні ягоди та квіткові ноти. Смак таких вин часто характеризується свіжістю, яскравістю та доброю кислотністю.

Вина, виготовлені з Піно Нуар, часто мають багату текстуру та щільне тіло, що надає їм гарну структуру та глибокий смак. Разом з тим, сорт характеризується невисоким вмістом фенольних та барвних речовин, що дозволяє отримувати дуже тонкі делікатні рожеві ігристі вина [7].

Таким чином, використання сорту Піно Нуар у виробництві ігристих вин додає складності, ароматичні та смакові якості, сприяє збереженню свіжості та жвавості вина, а також створює потенціал для розвитку комплексності та глибини у його смаковому профілі. У силу вищеприписаного, у Франції ось уже понад 300 років цей сорт є обов'язковим у виробництві якісних шампанських та ігристих вин пляшковим способом [6–7].

Один із ключових аспектів рожевого вина – його колір. Рожеві ігристі вина з Піно Нуар можуть мати різні відтінки рожевого, від блідо-тілесного рожевого до насиченого

ягідного. Безумовно, складність, інтенсивність в ароматі та смаку, загальна гармонія, специфічні ігристі та пінисті властивості, а також стилістка та колірна спрямованість рожевих ігристих вин Піно Нуар значною мірою також визначатиметься технологією.

Сьогодні добре відомо, що найважливішим потенціалом розкриття вина є вибір виду дріжджів. Багатьма енологами світу цьому питанню приділяється особлива увага. Так, недавніми дослідженнями групи італійських вчених (Institute of Sciences of Food Production (ISPA), Lecce, Italy) було проведено вивчення впливу чотирьох автохтонних штамів дріжджів та одного комерційного штаму *Saccharomyces cerevisiae* на леткі та хімічні профілі рожевих та ігристих вин []. Ці дослідження ініціювали винороби Південно-Західного регіону Італії з основною метою – пошук автохтонних стартових штамів *S. cerevisiae* з метою підвищення своєрідності регіональних вин з місцевих сортів винограду. У ході дослідження авторами було використано поєднання методів високоефективної рідинної хроматографії з мас-спектрометрією в режимі високої роздільної здатності. Такий аналіз дозволяє з високою точністю визначити склад вина, ідентифікувати окремі його компоненти та визначити їхню концентрацію.

Статистична обробка отриманих авторами даних дозволила припустити, що використання автохтонних штамів дріжджів суттєво вплинуло на склад ігристих вин з погляду летких і нелетких сполук. Кореляційний аналіз даних фізико-хімічних показників вин з використанням нативних та комерційних штамів дріжджів показав значний штамспецифічний вплив автохтонних штамів дріжджів на ароматику та склад регіональних ігристих вин порівняно з комерційним штамом. Результати досліджень можуть бути використані в галузі як потужний інструмент для впровадження інновацій у технології виробництва рожевих ігристих вин із сорту винограду Бомбіно італійського виробництва.

Таким чином, італійськими вченими було показано суттєвий вплив фактора вибору дріжджів під час проведення вторинного бродіння у технології виробництва рожевих ігристих вин. Не менше значення надає факт вибору дріжджів для отримання базових ігристих виноматеріалів. Так, у 2023 році енологами агроєкологічного центру та університету Тренто були представлені результати спільних досліджень, спрямованих на вивчення впливу різних видів дріжджів на якість виноматеріалів для ігристих вин Шардоне [9]. У цьому дослідженні авторами проводилася порівняльна характеристика показників якості виноматеріалів для ігристих вин, які були виготовлені з використанням різних видів дріжджів. При цьому приділялася особлива увага ферментації у змішаній культурі (*Hanseniaspora vineae* + *Saccharomyces cerevisiae*), яку зіставляли із традиційним контролем (*Saccharomyces cerevisiae*) для виробництва базового вина. Змішана культура дріжджів демонструвала кінетику ферментації, порівнянну з контролем, коли її потреби у поживних речовинах були задоволені. Летка кислотність у досвіді (*Hanseniaspora vineae* + *Saccharomyces cerevisiae*) з однієї партії була значно нижчою (–0,3 г/л) порівняно з контролем, тоді як у двох інших партіях рівні дорівнювали. Авторами також було відзначено цікаву особливість при бродінні досвідченої партії виноматеріалів - значну деградацію яблучної кислоти (у середньому –0,9 г/л) без змін величини рН. Незважаючи на те, що вибір раси дріжджів впливав на летючий склад, характерні особливості *Hanseniaspora vineae* залишилися незмінними: рівень 2-фенілетилацетату був у 24 рази вищим. Підвищеного виробництва 2-аміноацетофенону не спостерігалось, хоча триптофан (відомий як попередник 2-аміноацетофенону) є типовою амінокислотою для *H. vineae*. Таким чином, отримані авторами результати вказують на потенціал *H. vineae* для виробництва базового вина Шардоне для ігристих вин із багатим складним ароматом та гармонійним смаком.

Відомо, що невід'ємним етапом у виробництві витриманих ігристих вин класичним способом є витримка кюве на дріжджовому осаді. Протягом витримки на осаді дріжджів відбувається процес автолізу дріжджів, у якому дріжджові клітини синтезують різні речовини, такі як амінокислоти, ферменти та інших [10, 11]. Ці речовини сприяють розвитку багатства ароматів та смаків вина, надаючи йому складнішого та глибшого характеру. Витримка на осаді дріжджів також впливає текстуру і структуру вина. Тривала витримка може надавати провину більш гладку і кремову текстуру, тому що в процесі автолізу дріжджі можуть додавати щільність і м'якість вина [12, 13]. У процесі витримки на осаді дріжджів вино захищається від окислювальних процесів, що допомагає зберегти його свіжість та жвавність. Це особливо важливо для ігристих вин, тому що вони повинні зберігати свої освіжаючі якості та приємну кислотність.

Крім цього, для виготовлення якісних ігристих вин рекомендується також тривала витримка базових виноматеріалів на дріжджовому осаді (технологія сюрлі). Тривала витримка на осаді дріжджів може сприяти додатковому розвитку комплексності та глибини вина, додаючи складні ноти та відтінки до його смакового профілю базових виноматеріалів. Роботами багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених показано, що якість ігристих вин визначається, насамперед, якістю вихідної сировини, тобто винограду та отриманим з нього базового виноматеріалу [8–15]. Для рожевих ігристих вин це особливо важливо.

Таким чином, витримка на осаді дріжджів базового виноматеріалу може бути додатковим фактором формування типовості, характеру та якості майбутнього рожевого ігристого вина.

Разом з тим, в умовах південного регіону нашої країни робіт, спрямованих на вивчення впливу технології виробництва базових виноматеріалів на якість рожевих ігристих вин Піно Нуар не проводилося. У зв'язку з цим в Одеському національному технологічному університеті було проведено дослідження впливу технології виробництва виноматеріалів Піно Нуар (виноград було отримано з Миколаївського регіону, м. Очаків) для рожевих ігристих вин на їх фізико-хімічні та сенсорні показники.

Схема проведення досліджень представлено на рис. 1. У сезон 2023 року виноград сорту Піно Нуар піддався дробленню та гребневідділенню на ручній валковій дробарці Griffio. Отримана м'язга була сульфітована ($75 \text{ мл SO}_2/\text{дм}^3$) та спрямована на кошиковий прес для відділення самопливу та пресування. Далі сусло у кількості 60 дал з 1 т винограду відбиралося на освітлення, після чого освітлене сусло розділяли окремо на 4 рівні частини.

В перші дві ємності для бродіння сусла були внесені дріжджі енартис CHALLENGE AROMA WHITE (варіанти 1, 2), в другі дві ємності для бродіння, відповідно, внесли дріжджі енартис CHALLENGE RED FRUIT (варіанти 3, 4).

Таблиця 1 – Перелік окремих технологічних операцій

№	Технологічні операції	Використані дріжджі	Дозування, г/дал
1	Бродіння сусла та зняття с дріжджового осаду	CHALLENGE AROMA WHITE	3
2	Бродіння сусла та настоювання на дріжджовому осаді	CHALLENGE AROMA WHITE	3
3	Бродіння сусла та зняття с дріжджового осаду	CHALLENGE RED FRUIT	3
4	Бродіння сусла та настоювання на дріжджовому осаді	CHALLENGE RED FRUIT	3

Після закінчення бродіння молоді рожеві виноматеріали з першої та третьої ємностей були спрямовані на зняття з дріжджового осаду та освітлення; молоді виноматеріали з другої та четвертої ємностей було залишено на дріжджовому осаді протягом 3 місяців, після чого також знято з осаду та направлено на освітлення.

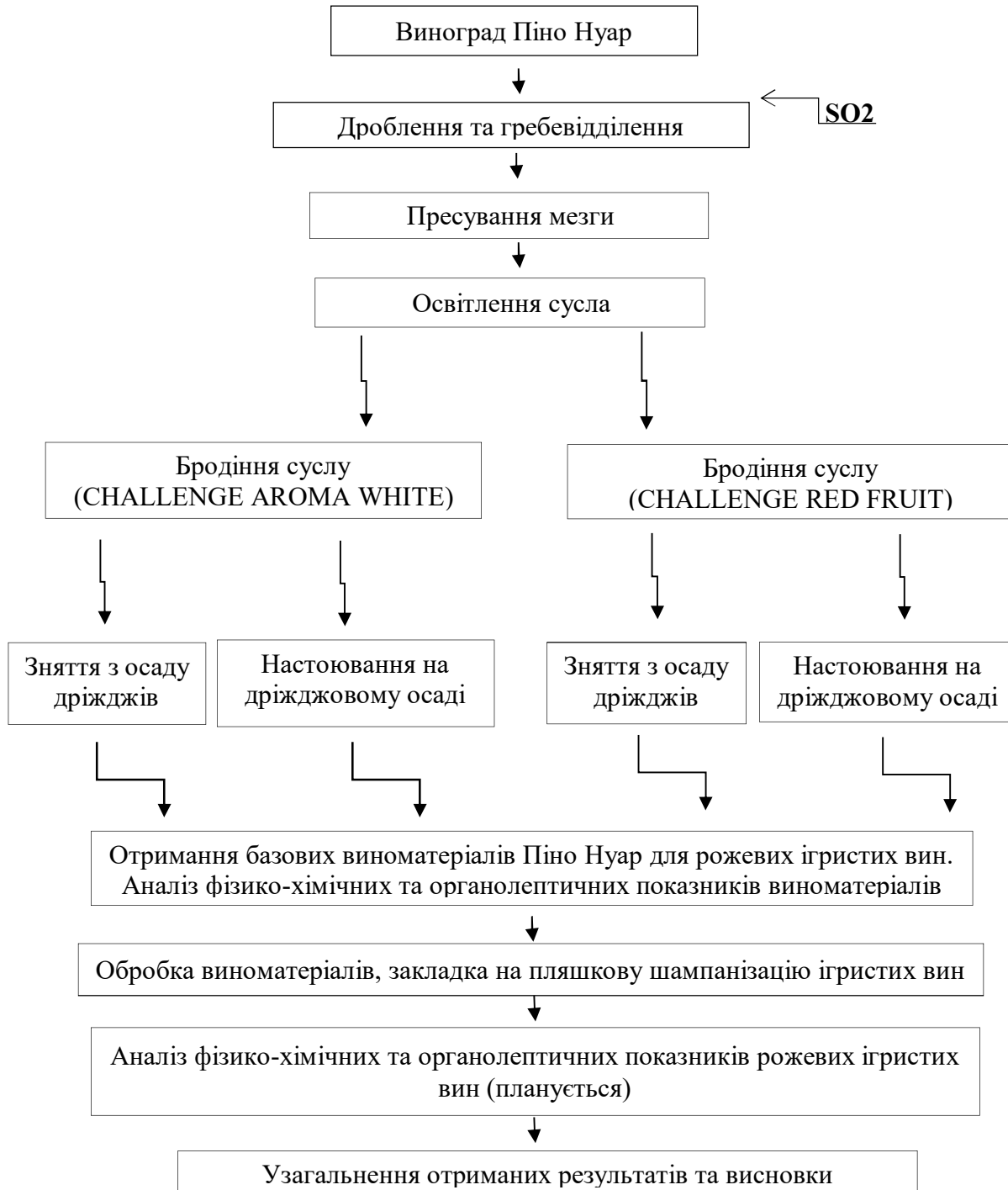


Рисунок 1 – Схема проведення досліджень

Всі варіанти молодих рожевих виноматеріалів були направлені на проведення фізико-хімічного та сенсорного аналізів та виробництво готових ігристих вин (обробку, отримання тиражної суміші, шампанізацію, післятиражну витримку).

Таким чином, виноматеріали для ігристих вин виготовлялися з використанням двох типів дріжджів: CHALLENGE AROMA WHITE та CHALLENGE RED FRUIT. Згідно зі схемою експерименту кожен тип дріжджів мав два варіанти використання: з і без настоювання на дріжджовому осаді протягом 3 місяців.

Технологія отримання ігристих вин (шампанізації) у всіх чотирьох варіантах була незмінною, що дозволить нам надалі вивчити вплив використання різних видів дріжджів та операції витримки на дріжджовому осаді базових виноматеріалів на якість готового продукту.

Оцінка якості передбачала аналіз фізико-хімічного складу та сенсорних властивостей виноматеріалів відповідно до чинної нормативної документації. Значення фізико-хімічних показників виноматеріалів представлені у таблиці 1.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні властивості базових виноматеріалів для рожевих ігристих вин

№	Назва виноматеріалів	Масова концентрація цукрів г/дм ³	Об'ємна частка спирту, %	Масова концентрація титрованих кислот, г/дм ³	Масова концентрація летких кислот, г/дм ³	Масова концентрація SO ₂ , мг/дм ³
1	Бродіння на CHALLENGE AROMA WHITE	До 2	11,8	6,8	0,44	12
2	Бродіння на CHALLENGE AROMA WHITE (+настоювання на осаді)	До 2	11,8	6,6	0,47	10
3	Бродіння на CHALLENGE RED FRUIT	До 2	11,8	6,7	0,49	10
4	Бродіння на CHALLENGE RED FRUIT (+настоювання на осаді)	До 2	11,8	6,4	0,39	13

Як видно з таблиці 1, значення всіх фізико-хімічних показників не перевищували допустимі норми відповідно до чинної нормативної документації. Масова концентрація залишкових цукрів дослідних та контрольних зразках знаходилася в межах не більше 2 г/дм³. Об'ємна частка етилового спирту у всіх зразках становила 11,8 % об. Масова концентрація титрованих кислот становила 6,6±0,2 г/дм³; при цьому можна відзначити деяку тенденцію до збільшення цього показника у разі застосування дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE (6,6-6,8 г/дм³) порівняно із зразками №3 та №4 виноматеріалів, бродіння яких здійснювалось на дріжджах CHALLENGE RED FRUIT. Вплив настоювання на дріжджовому осаді зводилося до зниження масової концентрації кислот що, можливо, було пов'язано з реакціями етерифікації.

Масова концентрація летких кислот становила – 0,45±0,04 г/дм³. Рівень вмісту діоксиду сірки у дослідженнях контролювався експрес методом змісту вільних її форм. Масова концентрація вільного діоксиду сірки у всіх зразках становила 11,2±1,5 мг/дм³.

Таким чином, усі значення фізико-хімічних показників знаходилися в межах норм згідно ТІ У 00011050-15.93.11-2:2009.

При дослідженні пінистих властивостей вин, виготовлених із базових виноматеріалів, технологія яких передбачала різні технологічні режими, було встановлено певні відмінності. Встановлено, що застосування технології настоювання на дріжджовому осаді завжди призводило до зростання показника максимального обсягу піни у молодих виноматеріалах у середньому на 10-12,3%.

Динаміка зміни специфічних показників пінистих властивостей у молодих виноматеріалах при використанні дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE (варіанти №1 та №2) представлена на рис. 2.

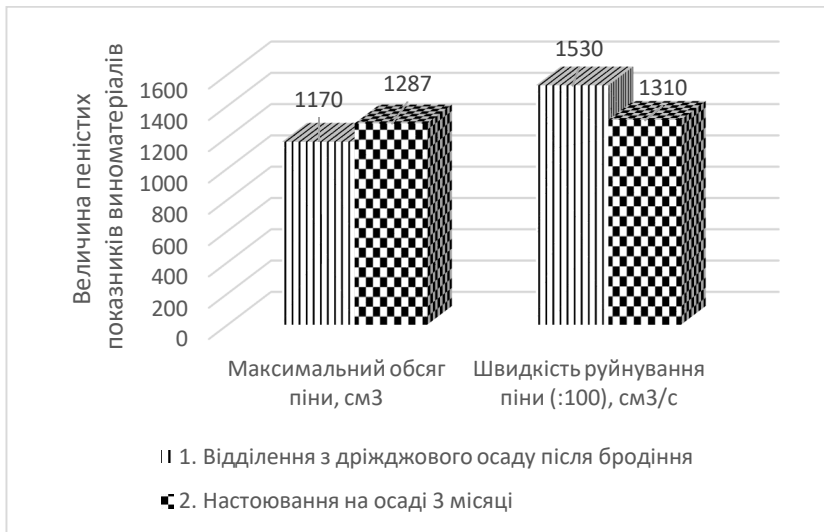


Рисунок 2 – Пеністі властивості виноматеріалів для рожевих вин (використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE)

Швидкість руйнування піни при цьому мала тенденцію до суттєвого уповільнення, що свідчило про покращення специфічних пінистих властивостей виноматеріалів.

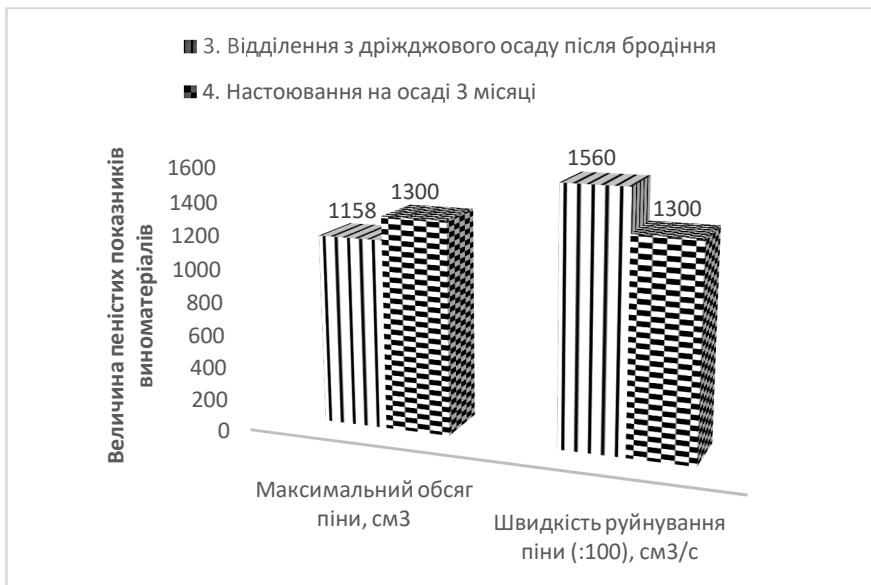


Рисунок 3 – Пеністі властивості виноматеріалів для рожевих вин (використання дріжджів CHALLENGE RED FRUIT)

Аналіз динаміки специфічних показників пінистих властивостей у молодих виноматеріалах в варіантах №3 та №4 (рис. 3) показав аналогічну тенденцію при використанні дріжджів CHALLENGE RED FRUIT.

Таким чином, проведені дослідження свідчать про те, що на пінисті властивості виноматеріалів і готових ігристих вин принципово не впливало використання різних видів дріжджів (CHALLENGE AROMA WHITE і CHALLENGE RED FRUIT), оскільки різниця величини показників максимального обсягу піни та швидкості її руйнування у варіантах 1–3 та 2–4 була несуттєвою. Однак застосування тривалого контакту молодих ігристих виноматеріалів у всіх варіантах дозволяє значно покращити ці показники, що бажано враховувати при виборі технології виробництва виноматеріалів для ігристих вин. Ймовірно, це може бути пов'язане з накопиченням ПАР внаслідок ферментативних процесів у продуктах автолізу дріжджів.

Дослідження оптичних показників виноматеріалів для рожевих ігристих вин включало вимірювання оптичної щільності виноматеріалів при двох різних довжинах хвилі: $\Lambda = 420$ нм і $\Lambda = 520$ нм. Також проводилося оцінка інтенсивності та відтінку виноматеріалів, значення яких визначалося застосовуваною технологією та, певною мірою, типом вибраних дріжджів.

Таблиця 3 – Оптичні показники виноматеріалів та ігристих вин

Технологічна схема отримання виноматеріалів	Значення величин оптичної густини		Значення величин інтенсивності та відтінку	
	$\Lambda = 420$ нм	$\Lambda = 520$ нм	Інтенсивність	Відтінок
Використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE				
1. Відділення з дріжджового осаду після бродіння	0,080	0,054	0,134	1,48
2. Настоювання на осаді 3 місяці	0,076	0,048	0,124	1,58
Використання дріжджів CHALLENGE RED FRUIT				
3. Відділення з дріжджового осаду після бродіння	0,094	0,068	0,150	1,38
4. Настоювання на осаді 3 місяці	0,085	0,063	0,137	1,35

Значення оптичної щільності при різних довжинах хвилі можуть дати інформацію про концентрацію різних речовин у виноматеріалах, насамперед - таких як фенольні та барвники. Загальний колір всіх зразків можна було оцінити як світло-тілесний різної інтенсивності. При цьому відомо, що інтенсивність червоних тонів відображається більшою мірою за величиною оптичної щільності промені світла з довжиною хвилі 520 нм; значення цих показників у всіх зразках виноматеріалів знаходилися в межах 0,048–0,068 і мали тенденцію до зменшення як при проведенні операції тривалого настоювання на дріжджових осадах (в середньому на 11,1–7,4 %), так і у разі застосування дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE (у середньому на 20,6–23,8 % порівняно з дріжджами CHALLENGE RED FRUIT).

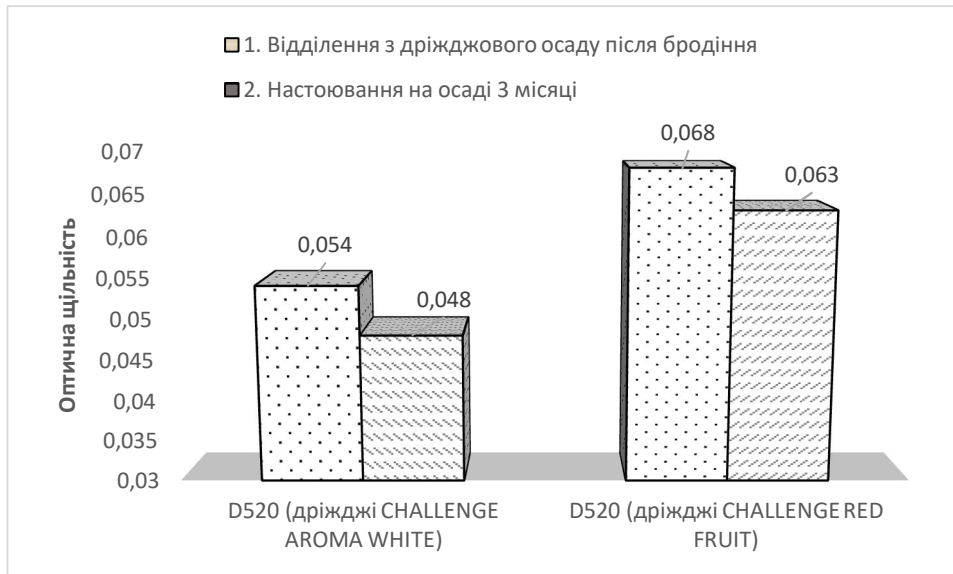


Рисунок 4 – Оптична щільність D520 виноматеріалів для рожевих вин (використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE та CHALLENGE RED FRUIT)

Значення оптичної щільності при різних довжинах хвилі можуть дати інформацію про концентрацію різних речовин у виноматеріалах, насамперед - таких як фенольні та барвники. Загальний колір усіх зразків можна було оцінити як світло-тілесний різної інтенсивності. При цьому відомо, що інтенсивність червоних тонів відображається більшою мірою за величиною оптичної щільності лучу світла з довжиною хвилі 520 нм; значення цих показників у всіх зразках виноматеріалів знаходилися в межах 0,048–0,068 і мали тенденцію до зменшення як при проведенні операції тривалого настоювання на дріжджових осадах (у середньому на 11,1–7,4 %), так і в разі застосування дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE (у середньому на 20,6–23,8 % порівняно з дріжджами CHALLENGE RED FRUIT).

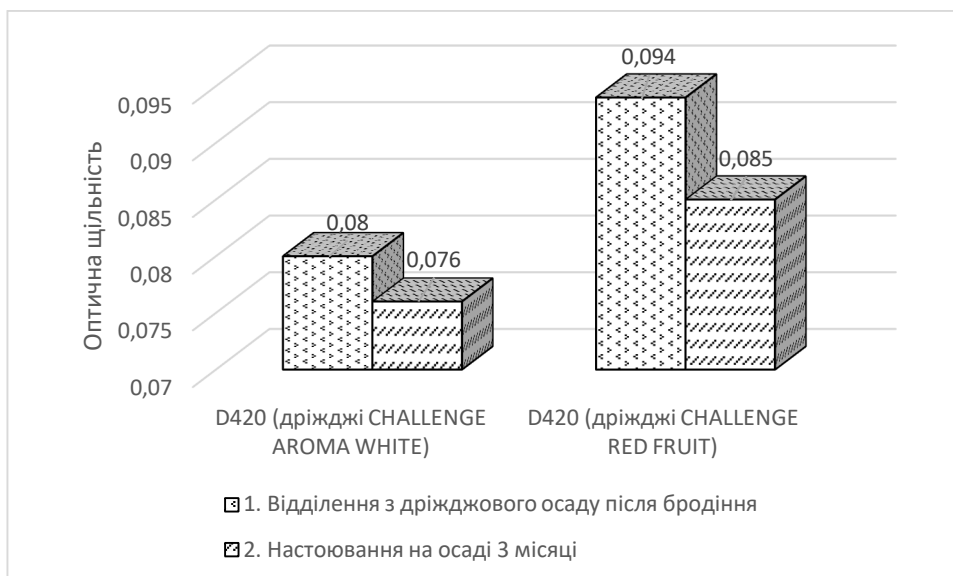


Рисунок 5 – Оптична щільність D420 виноматеріалів для рожевих вин (використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE та CHALLENGE RED FRUIT)

Загальне значення величини інтенсивності забарвлення у контрольних зразках виноматеріалів для рожевих ігристих вин визначалося сумою показників оптичної щільності при довжині хвилі 420 нм та 520 нм.

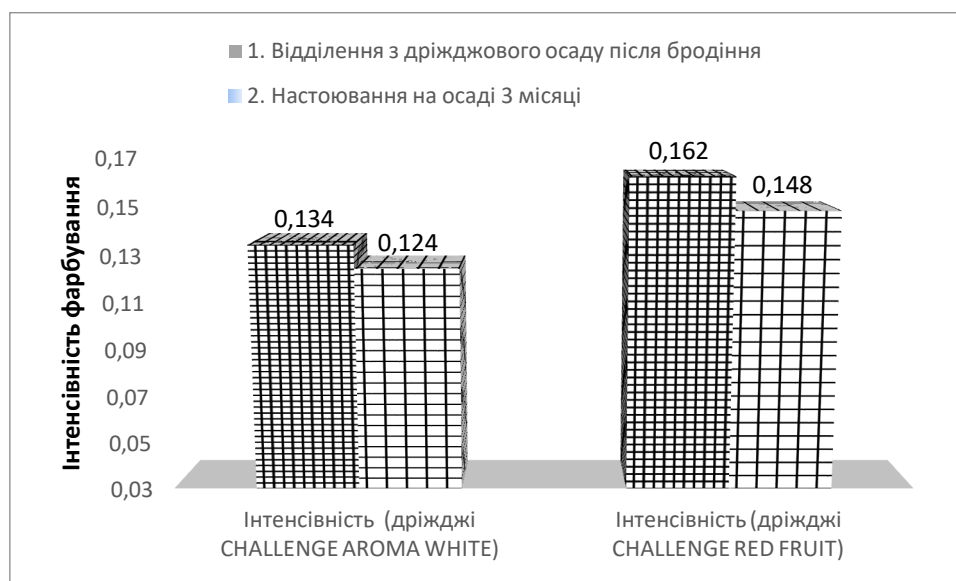


Рисунок 6 – Інтенсивність виноматеріалів для рожевих вин (використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE та CHALLENGE RED FRUIT)

Синхронний характер зміни показників D420 та D520 при різних варіантах ведення технологічного процесу виробництва виноматеріалів для рожевих ігристих вин визначив також подібну динаміку величини інтенсивності фарбування виноматеріалів. Як видно із графіка на рис. 6, у всіх варіантах інтенсивність фарбування виноматеріалів також знижувалася як у разі використання технології сюрлі (на 7,5–8,6 %), так і при застосуванні дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE (на 16,2–17,3 %),

Таким чином, можна констатувати, що на інтенсивність забарвлення впливали фактори вибору дріжджів, а також проведення тривалого настоювання на дріжджах, що важливо враховувати при виборі технології та формуванні стилю майбутнього рожевого ігристого вина.

Однозначного впливу процесу проведення тривалого настоювання на дріжджах на відтінок забарвлення не було встановлено. У разі застосування дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE величина цього показника у виноматеріалах зростала від 1,48 до 1,58, що свідчило про деяке зниження вкладу червоних тонів у загальну палітру кольорів рожевих виноматеріалів.

У разі використання дріжджів CHALLENGE RED FRUIT такої тенденції не було відзначено. Навпаки, застосування настоювання на дріжджовому осаді призвело до незначного зниження показника відтінку (від 1,38 до 1,35).

У той самий час, можна констатувати факт впливу цей показник вибору типу дріжджів для бродіння. Так, у всіх варіантах при використанні дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE величина відтінку фарбування виноматеріалів була вищою (1,48–1,58) у середньому на 12,1 % аналогічного показника виноматеріалів, для отримання яких застосовувалися дріжджі CHALLENGE RED FRUIT. Це свідчить про те, що при використанні дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE частка червоних відтінків у рожевих виноматеріалах для ігристих вин дещо знижується, а жовтих відповідно зростає.

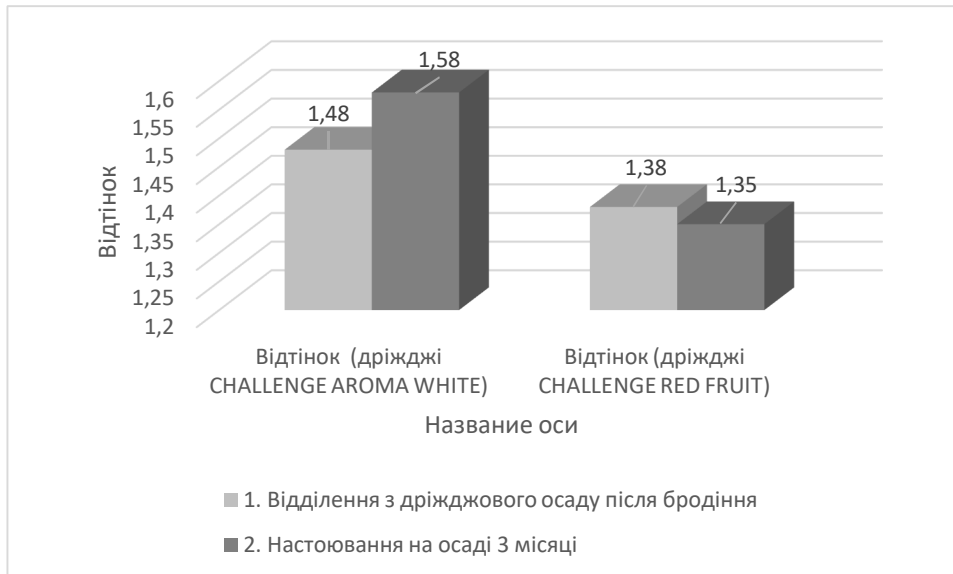


Рисунок 7 – Відтінок виноматеріалів для рожевих вин (використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE та CHALLENGE RED FRUIT)

Оцінку можливого впливу вищеописаних технологічних параметрів виробництва базових виноматеріалів для рожевих ігристих вин на величину масової концентрації загальних фенольних речовин представлено на рис. 8.

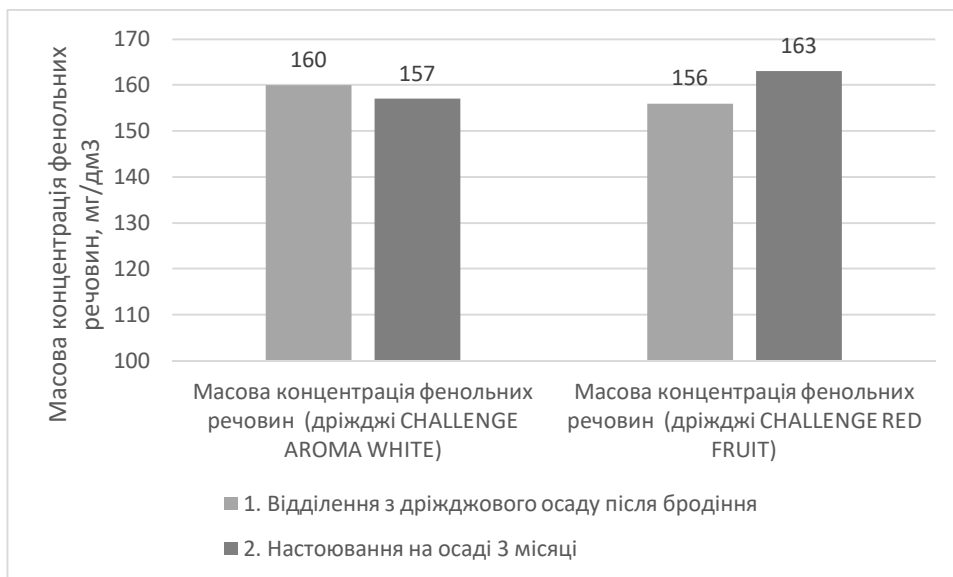


Рисунок 8 – Масова концентрація фенольних речовин (використання дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE та CHALLENGE RED FRUIT)

Як очевидно з графіка, значного впливу зміст фенольних речовин аналізовані технологічні аспекти виробництва виноматеріалів для рожевих ігристих вин не надавала. При цьому слід зазначити, що технологія виробництва рожевих виноматеріалів за білим способом сорту Піно Нуар сприяло тому, що величина цього показника мала дуже невисокі значення – в межах 156–163 мг/дм³.

Раніше нами було встановлено, що масова концентрація фенольних речовин у виноматеріалах істотно впливає на якість ігристих вин (моя стаття). Оскільки зайва масова

концентрація фенольних речовин надає вин терпкість та грубість, доцільно визначати значення цього показника у виноматеріалах перед їх використанням у виробництві ігристих вин. При цьому було встановлено допустиму межу значень показника – не більше 300 мг/дм³. Таким чином, аналіз усіх варіантів за цим показником дозволяє характеризувати їх як цілком типові для легких ігристих вин.

Результати сенсорного оцінювання виноматеріалів, приготовлених за різними технологічними схемами (з використанням настоювання на дріжджовому осаді та без нього, на різних видах дріжджів згідно схеми експерименту), представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати дегустаційної оцінки вин за 100-бальною шкалою

№ вар.	Дослідження	Дегустаційна оцінка
	Одиниця виміру	бал
CHALLENGE AROMA WHITE		
1	Відділення з дріжджового осадку після бродіння	79
2	Настоювання на осаді 3 місяці	76
CHALLENGE RED FRUIT		
3	Відділення з дріжджового осадку після бродіння	73
4	Настоювання на осаді 3 місяці	-

Всі зразки були прозорими, і характеризувалися красивим світло-рожевим (ближчим до тілесного) кольором, інтенсивність якого визначалася технологією – застосування дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE, а також використання технології настоювання на дріжджовому осаді (варіант №2) сприяли одержанню найменш пофарбованих виноматеріалів. Таким чином, найбільш інтенсивним рожевим забарвленням характеризувався варіант №3, який передбачав бродіння на дріжджах CHALLENGE RED FRUIT без настоювання на дріжджовому осаді. І, відповідно, легким світло-тілесним фарбуванням характеризувався варіант №2.

Варіант №1 (CHALLENGE AROMA WHITE без настоювання на дріжджах) в ароматі вирізнявся чистими дуже виразними тонами ягід – черешні (превалювала), вишні, кизилу і щонайменше червоної смородини. У смаку – свіжий, округлий, маслянистий, з добрим тілом, але при цьому досить легкий та гармонійний. У смаку експертами були відзначені тони стиглої рожевої черешні, хороший баланс кислотності, мінеральність. У тривалому післясмаку - приємна пікантна гіркуватість з нотками кісточки черешні. Таким чином, загальна оцінка зразка №1 була найвищою та становила 79 балів.

Варіант №2 (CHALLENGE AROMA WHITE з настоюванням на дріжджах) був такого ж ягідного спрямування (вишня, черешня), в якому на перший план виходили дюшесні та яблучні нотки, а також легкі цитрусові відтінки. Було відзначено прохідну задню (тону редукції), що трохи знизило загальне позитивне враження. Смак – повний, складний, злагоджений, з приємною цитрусовою гіркуватістю в післясмаку. Загальна оцінка становила 76 балів.

Застосування дріжджів CHALLENGE RED FRUIT також зумовлювало отримання виноматеріалів для рожевих ігристих вин з ягідним напрямком в ароматичі (варіанти №3 та №4). Однак він був менш інтенсивним, і на перший план виходили червона смородина, лепестки рози, недозрілий криховик та вишня. У смаку переважали відтінки червоних

ягід, недозрілого агрусу та аличі. Мінеральність була нижчою, ніж у разі проведення бро- діння на дріжджах CHALLENGE AROMA WHITE, більш виражена гіркуватість, що ха- рактеризувала в цілому зразки як менш гармонійні. Варіант №4 був найменш вдалий, оскільки на тлі ягідного аромату характеризувався відчутними тонами редуції. Загальна оцінка експертної комісії зразка №3 (CHALLENGE RED FRUIT без настоювання на дрі- жджах) становила 73 бали.



Рисунок 9 – Ароматичний профіль виноматеріалу для рожевого ігристого вина (варіант №1)



Рисунок 10 – Ароматичний профіль виноматеріалу для рожевого ігристого вина (варіант №2)



Рисунок 11 – Ароматичний профіль виноматеріалу для рожевого ігристого вина (варіант №3)



Рисунок 12 – Ароматичний профіль виноматеріалу для рожевого ігристого вина (варіант №4)

Усі варіанти виноматеріалів були піддані пляшковій шампанізації. На підставі проведеної роботи та отриманих нами даних за складом та сенсорною характеристикою виноматеріалів Піно Нуар для рожевих ігристих вин були зроблені наступні попередні висновки:

1. У різних країнах світу енологами приділяється велика увага таким технологічним аспектам, як вибір дріжджів для бродіння тихих і ігристих вин, і навіть операція витримки виноматеріалів на дріжджовому осаді (сюрлі). Багатьма вченими було показано, що ці фактори технології значною мірою спричиняють якість готового продукту.

2. Проведений огляд літератури не дозволив нам виявити наукових праць, які були б спрямовані на вдосконалення технології виробництва виноматеріалів для рожевих ігристих вин із сорту Піно Нуар в умовах півдня України (Миколаївська область) у наведених вище аспектах.

3. У наших дослідженнях було вивчено вплив технології виробництва виноматеріалів Піно Нуар для рожевих ігристих вин на ряд їх показників – оптичні характеристики, пінисті властивості. При цьому встановлено, що застосування дріжджів CHALLENGE AROMA WHITE, а також технології настоювання на дріжджовому осаді призводило до зниження оптичної щільності та інтенсивності фарбування виноматеріалів. Крім того, було відзначено позитивний вплив настоювання на дріжджовому осаді на пінисті властивості виноматеріалів, що може бути пов'язане з додатковим насиченням поверхнево-активними речовинами внаслідок ферментативних процесів автолізатів дріжджів.

3. Результати сенсорного аналізу показали, що найбільш оптимальною технологією, яка дозволяє отримувати якісні тонкі, але складні яскраві та типові виноматеріали для рожевих ігристих вин, є використання бродіння освітленого суслу Піно Нуар на дріжджах CHALLENGE AROMA WHITE без використання тривалого настоювання на дріжджовому осаді.

Таким чином, на даному етапі роботи можна рекомендувати технологію виноматеріалів для виробництва рожевих ігристих вин Піно Нуар по білому без застосування тривалого настоювання на дріжджовому осаді. Але роботу щодо впливу настоювання на дріжджовому осаді доцільно продовжити, приділивши більшу увагу технологічним режимам проведення цієї операції, що буде предметом наших подальших досліджень у цьому питанні. Зараз робота триває, і остаточні висновки за результатами впливу технології виробництва виноматеріалів на якість готового продукту можна буде зробити після

повного аналізу складу та якості готових рожевих ігристих вин.

Література

1. Reynolds A. *Managing Wine Quality. Viticulture and Wine Quality. Edition 1st* / A. Reynolds – Ontario: Woodhead Publishing, 2010. – 624 p.
2. Jackson R. *Wine Science. Principles and Applications. 5th Edition* / R. Jackson – Hardcover: Academic Press, 2020. – 1030 p.
3. Richard Juhlin. *A Scent of Champagne: 8,000 Champagnes Tasted and Rated* / Richard Juhlin – Skyhorse, 2023. – 400 p.
4. Costa J. M., Catarino S. and etc. *Improving Sustainable Viticulture and Winemaking Practices* / J. M. Costa, S. Catarino and etc. – Hardcover: Academic Press, 2022. – 1182 p.
5. Jancis Robinson, Julia Harding, José Vouillamoz. *Wine Grapes. A complete guide to 1,368 vine varieties, including their origins and flavours* / Jancis Robinson – Penguin Books, 2012. – 1280 p.
6. Regionality in Australian Pinot noir wines: A study on the use of NMR and ICP-MS on commercial wines // *Food Chemistry*. – 2021. – № 340. P. 1020–1065.
7. Keith Grainger, Hazel Tattersall. *Wine Production and Quality. 2th Edition* / K. Grainger – Wiley-Blackwell, 2015. – 476 p.
8. M. Tufariello, L Palombi, A. Rizzuti, B. Musio, V. Capozzi, V. Gallo, P. Mastrorilli, P. Mastrorilli, F. Grieco. *Volatile and chemical profiles of Bombino sparkling wines produced with autochthonous yeast strains* / *Food Control Volume* – 2023. – №109462.
9. A. Gallo, R. Larcher, N. Cappello, M. Paolini, S. Moser, F. Carrau, R. Schneider, T. Nardin, T. Roman. *Insights into the grape must composition effect on Hanseniaspora vineae performance and metabolic aroma compounds in Chardonnay base wine for sparkling wine production* / *Journal of Food Composition and Analysis. Volume 123*. – 2023, 105514.
10. Na Sun, Lili Zhao, Aiguo Liu, Long Su, Kan Shi, Hongyu Zhao, Shuwen Liu. *Role of amino acids in flavor profiles and foam characteristics of sparkling wines during aging* / *Journal of Food Composition and Analysis. Volume 126*. – 2024, 105903.
11. Violeta Ruipérez, José Manuel Rodríguez-Nogales, Encarnación Fernández-Fernández, Josefina Vila-Crespo. *Impact of β -glucanases and yeast derivatives on chemical and sensory composition of long-aged sparkling wines* / *Journal of Food Composition and Analysis. Volume 107*. – 2022, 104385.
12. Bruno Cisilotto, Fernando Joel Scariot, Luisa Vivian Schwarz, Ronaldo Kauê Mattos Rocha, Ana Paula Longaray Delamare, Sergio Echeverrigaray. *Differences in yeast behaviour during ageing of sparkling wines made with Charmat and Traditional methods* / *Food Microbiology. Volume 110*. – 2023, 104171.
13. Saionara Sartor, Vívian Maria Burin, Vinícius Caliari, Marilde T. Bordignon-Luiz. *Profiling of free amino acids in sparkling wines during over-lees aging and evaluation of sensory properties* / *LWT. Volume 140*. – 2021, 110847.
14. О.Л. Ходаков, О.С. Макаров, Н.І. Стівбурь, Т.П. Сташевська, Х.З. Гемаєв, А.І. Григоришен. С. Шум. Вплив ферментних препаратів на якісні показники виноматеріалів для ігристих вин / *Харчова наука і технологія: науково-виробничий журнал*. – 2012. – №3(20). – С. 35–38.
15. *Combination of two analytical techniques improves wine classification by Vineyard, Region, and vintage* // *Food Chemistry*. – 2021. – № 354. P. 134–146.
16. Roullier-Gall C., Boutegabet L., Gougeon R.D., Schmitt-Kopplin P. *A grape and*

wine chemodiversity comparison of different appellations in Burgundy: Vintage vs terroir effects / C. Roullier-Gall, L. Boutegrabet, R.D. Gougeon, P. Schmitt-Kopplin // *Food Chemistry*. – 2014. – № 152. P. 100–107.

Bibliography (transliterated)

1. Reynolds A. (2010) *Managing Wine Quality. Viticulture and Wine Quality*, 1st ed., On-tario, Woodhead Publishing.
2. Jackson R. (2020) *Wine Science. Principles and Applications*, 5th ed., Hardcover, Academic Press.
3. Richard Juhlin. (2023) *A Scent of Champagne: 8,000 Champagnes Tasted and Rated*, 2 ed., Skyhorse.
4. Costa J. M., Catarino S. and etc. (2022) *Improving Sustainable Viticulture and Wine-making Practices*, Hardcover, Academic Press, p 1182.
5. Jancis Robinson, Julia Harding, José Vouillamoz. *Wine Grapes* (2012) A complete guide to 1,368 vine varieties, including their origins and flavours, Penguin Books, 1280 p.
6. Regionality in Australian Pinot noir wines: A study on the use of NMR and ICP-MS on commercial wines (2021), *Food Chemistry*, № 340, pp. 1020–1065.
7. Keith Grainger, Hazel Tattersall. *Wine Production and Quality*. 2th Edition / K. Grainger – Wiley-Blackwell, 2015. – 476 p.
8. M. Tufariello, L Palombi, A. Rizzuti, B. Musio, V. Capozzi, V. Gallo, P. Mastrorilli, P. Mastrorilli, F. Grieco. Volatile and chemical profiles of Bombino sparkling wines produced with autochthonous yeast strains / *Food Control* Volume – 2023. – №109462.
9. A. Gallo, R. Larcher, N. Cappello, M. Paolini, S. Moser, F. Carrau, R. Schneider, T. Nardin, T. Roman. Insights into the grape must composition effect on *Hanseniaspora vineae* performance and metabolic aroma compounds in Chardonnay base wine for sparkling wine production / *Journal of Food Composition and Analysis*. Volume 123. – 2023, 105514.
10. Na Sun, Lili Zhao, Aiguo Liu, Long Su, Kan Shi, Hongyu Zhao, Shuwen Liu. Role of amino acids in flavor profiles and foam characteristics of sparkling wines during aging / *Journal of Food Composition and Analysis*. Volume 126. – 2024, 105903.
11. Violeta Ruipérez, José Manuel Rodríguez-Nogales, Encarnación Fernández-Fernández, Josefina Vila-Crespo. Impact of β -glucanases and yeast derivatives on chemical and sensory composition of long-aged sparkling wines / *Journal of Food Composition and Analysis*. Volume 107. – 2022, 104385.
12. Bruno Cisilotto, Fernando Joel Scariot, Luisa Vivian Schwarz, Ronaldo Kauê Matos Rocha, Ana Paula Longaray Delamare, Sergio Echeverrigaray. Differences in yeast behaviour during ageing of sparkling wines made with Charmat and Traditional methods / *Food Microbiology*. Volume 110. – 2023, 104171.
13. Saionara Sartor, Vívian Maria Burin, Vinícius Caliar, Marilde T. Bordignon-Luiz. Profiling of free amino acids in sparkling wines during over-lees aging and evaluation of sensory properties / *LWT*. Volume 140. – 2021, 110847.
14. O.L. Khodakov, O.S. Makarov, N.I. Stovbur, T.P. Stashevsk, Kh.Z. Hemaev, A.I. Hryhoryshen. S. Shum. Vplyv fermentnykh preparativ na yakisni pokaznyky vynomaterialiv dlia ihrystykh vyn // *Kharchova nauka i tekhnolohiia: naukovo-vyrobnychy zhurnal*. – 2012. – №3(20). – P. 35–38.
15. Combination of two analytical techniques improves wine classification by Vineyard, Region, and vintage // *Food Chemistry*. – 2021. – № 354. P. 134–146.

16. Roullier-Gall C., Boutegrabet L., Gougeon R.D., Schmitt-Kopplin P. A grape and wine chemodiversity comparison of different appellations in Burgundy: Vintage vs terroir effects / C. Roullier-Gall, L. Boutegrabet, R.D. Gougeon, P. Schmitt-Kopplin // Food Chemistry. – 2014. – № 152. P. 100–107.

УДК 663.223.2

О. Л. Ходаков, к. техн. н., доцент, Г. О. Саркісян, д. е. н., проф,
О. В. Василик, к. техн. н., доцент, О. М. Мирошніченко, к. техн. н., доцент,
В. Ю. Делі, ст. викладач, доктор філософії, Л. О. Ткаченко, ст. викладач,
Я. М. Ульман, магістр

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЯКІСТЬ РОЖЕВИХ ІГРИСТИХ ВИНОМАТЕРІАЛІВ ПІНО НУАР

Ця стаття розглядає вплив технології на якість рожевих ігристих виноматеріалів сорту Pinot Noir. Наведено короткий огляд наукових праць, спрямованих на дослідження впливу різних технологічних прийомів на якість виноматеріалів та ігристих вин Піно Нуар. В оглядовій частині статті наголошується на важливості вибору сорту винограду при виробництві ігристого рожевого вина та обґрунтовується вибір сорту Піно Нуар для проведення експерименту. Енологи виділяють сорт Піно Нуар як фаворит для створення вишуканих рожевих ігристих вин завдяки його характерним особливостям, включаючи яскраві, але вишукані тонкі фруктові аромати та хорошу кислотність. Низький вміст фенольних і барвників у цьому сорті дозволяє отримувати тонкі та делікатні ігристі вина. Обговорюється важливість кольору в рожевих ігристих виноматеріалах та винах, а також вплив технології на показники на фізико-хімічні, оптичні та органолептичні показники. Відзначено відсутність у літературі робіт, присвячених покращенню технології виробництва рожевих ігристих вин із Pinot Noir в умовах півдня України. В експериментальній частині досліджень використовувалися два види дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* селекції Enartis, кожен з яких застосовувався з і без наполягання на дріжджовому осаді протягом 3 місяців. Дослідження включало аналіз загальних фізико-хімічних показників, а також вмісту фенольних речовин, оптичних характеристик (оптичної щільності D420, D520, інтенсивності, відтінку фарбування). Окрема увага приділялася вивченню впливу вибору дріжджів та застосування технології тривалого наполягання на дріжджовому осаді на формування пінистості властивостей виноматеріалів. Крім цього, експертною комісією проводилося вивчення органолептичних властивостей виноматеріалів Піно Нуар для рожевих ігристих вин, які були отримані за різними технологічними схемами згідно з методикою експерименту. Фактори вибору дріжджів, а також проведення тривалого наполягання на дріжджах впливали на інтенсивність забарвлення виноматеріалів, що важливо враховувати при виборі технології та формуванні стилю майбутнього рожевого ігристого вина. Сенсорний аналіз показав, що оптимальною технологією отримання якісних виноматеріалів є бродіння освітленого суслу Піно Нуар на дріжджах CHALLENGE AROMA WHITE без тривалого настоювання на дріжджовому осаді. Усі варіанти молодих рожевих виноматеріалів Піно Нуар були спрямовані на виробництво готових рожевих ігристих вин. Технологія отримання ігристих вин у всіх варіантах була незмінною, що дозволить надалі вивчити вплив використання різних видів дріжджів та операції витримки на дріжджовому осаді базових виноматеріалів на якість готового продукту. Автори рекомендують продовжити дослідження в цій галузі для більш повного розуміння впливу технології на якість рожевих ігристих вин.

Ключові слова: ігристі виноматеріали, рожеві ігристі вина, технологія, дріжджі, якість, Піно Нуар.

А. Л. Ходаков, А. А. Саркисян, А. В. Василик, Е. М. Мирошніченко, В. Ю. Дели,
Л. А. Ткаченко, Я. М. Ульман, магістр

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НА КАЧЕСТВО РОЗОВЫХ ИГРИСТЫХ ВИНМАТЕРИАЛОВ ПИНО НУАР

Данная статья рассматривает влияние технологии на качество розовых игристых виноматериалов сорта Pinot Noir. Представлен краткий обзор научных работ, которые были направлены на исследование влияния различных технологических приемов на качество виноматериалов и игристых вин Пино Нуар. В обзорной части статьи акцентируется внимание на важности выбора сорта винограда при производстве игристого розового вина и обосновывается выбор сорта Пино Нуар для проведения эксперимента. Энологи выделяют сорт Пино Нуар как фаворит для создания изысканных розовых игристых вин благодаря его характерным особенностям, включая яркие, но изысканные тонкие фруктовые ароматы и хорошую кислотность. Низкое содержание фенольных и красящих веществ в этом сорте позволяет получать тонкие и деликатные игристые вина. Обсуждается важность цвета в розовых игристых виноматериалах и винах, а также влияние технологии на показатели на физико-химические, оптические и органолептические показатели. Отмечено отсутствие в литературе работ, посвященных улучшению технологии производства розовых игристых вин из Pinot Noir в условиях юга Украины. В экспериментальной части исследований использовались два вида дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* селекции Enartis, каждый из которых применялся с и без настаивания на дрожжевом осадке в течение до 3 месяцев. Исследование включало анализ общих физико-химических показателей, а также содержания фенольных веществ, оптических характеристик (оптической плотности D420, D520, интенсивности, оттенка окрашивания). Отдельное внимание уделялось изучению влияния выбора дрожжей и применения технологии длительного настаивания на дрожжевом осадке на формирование специфических показателей, характеризующих пенные свойства виноматериалов. Кроме этого, экспертной комиссией проводилось изучение органолептических свойств виноматериалов Пино Нуар для розовых игристых вин, которые были получены по различным технологическим схемам согласно методики эксперимента. Предварительные результаты указывают на значительное влияние выбора дрожжей и настаивания на дрожжевом осадке на физико-химические и органолептические показатели виноматериалов Пино Нуар для розовых игристых вин. Факторы выбора дрожжей, а также проведение длительного настаивания на дрожжах влияли на интенсивность окраски виноматериалов, что важно учитывать при выборе технологии и формировании стиля будущего розового игристого вина. Сенсорный анализ показал, что оптимальной технологией для получения качественных виноматериалов является брожение осветленного сула Пино Нуар на дрожжах CHALLENGE AROMA WHITE без длительного настаивания на дрожжевом осадке. Все варианты молодых розовых виноматериалов Пино Нуар были направлены на производство готовых игристых розовых вин. Технология получения игристых вин во всех вариантах была неизменной, что позволит в дальнейшем изучить влияние использования различных видов дрожжей и выдержки на дрожжевом осадке базовых виноматериалов

на качество готового продукта. Авторы рекомендуют продолжить исследования в данной области для более полного понимания влияния технологии на качество розовых игристых вин.

Ключевые слова: игристые виноматериалы, розовые игристые вина, технология, дрожжи, качество, Пино Нуар.

O. L. Khodakov, G. O. Sarkisian, O. V. Vasylyk, O. M. Myroshnichenko, V. Yu. Deli,
L. O. Tkachenko, Ya. M. Ulman

STUDYING THE INFLUENCE OF TECHNOLOGY ON THE QUALITY OF PINO NOIR WINE MATERIAL FOR SPARKLING WINES

The article examines the impact of technology on the quality of pink sparkling wines of the Pinot Noir variety. A brief overview of scientific works that were aimed at studying the influence of various technological methods on the quality of wine materials and sparkling Pinot Noir wines is presented. The review part of the article focuses on the importance of choosing a grape variety in the production of sparkling rose wine and justifies the choice of Pinot Noir variety for the experiment. Oenologists highlight Pinot Noir as a favorite for creating fine rosé sparkling wines due to its characteristics, including bright but refined subtle fruit aromas and good acidity. The low content of phenolic and coloring substances in this variety allows you to obtain fine and delicate sparkling wines. The importance of color in pink sparkling wines and wines is discussed, as well as the impact of technology on physicochemical, optical and organoleptic characteristics. There is a lack of works in the literature devoted to improving the technology for the production of pink sparkling wines from Pinot Noir in the conditions of southern Ukraine. In the experimental part of the study, two species of yeast *Saccharomyces cerevisiae* bred Enartis were used, each of which was used with and without infusion on yeast sediment for up to 3 months. The study included an analysis of general physicochemical indicators, as well as the content of phenolic substances, optical characteristics (optical density D420, D520, intensity, color shade. Special attention was paid to studying the influence of the choice of yeast and the use of long-term infusion technology on yeast sediment on the formation of specific indicators characterizing foamy properties of wine materials. In addition, the expert commission studied the organoleptic properties of Pinot Noir wine materials for pink sparkling wines, which were obtained using various technological schemes according to the experimental methodology. Preliminary results indicate a significant influence of the choice of yeast and infusion on yeast sediment on physicochemical and organoleptic characteristics of Pinot Noir wine materials for pink sparkling wines. Factors in the choice of yeast, as well as long-term infusion on yeast, influenced the color intensity of wine materials, which is important to consider when choosing a technology and forming the style of a future pink sparkling wine. Sensory analysis has shown that the optimal technology for obtaining high-quality wine materials is the fermentation of clarified Pinot Noir must with CHALLENGE AROMA WHITE yeast without long-term infusion on yeast sediment. All variants of young rosé wine materials Pinot Noir were aimed at producing ready-made sparkling rosé wines. The technology for producing sparkling wines in all variants was unchanged, which will make it possible to further study the effect of using different types of yeast and aging base wine materials on yeast lees on the quality of the finished product. The authors recommend further research in this area to better understand the impact of technology on the quality of rosé sparkling wines.

Keywords: sparkling wine materials, pink sparkling wines, technology, yeast, quality, Pinot Noir.

«ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

Щоквартальний науково-практичний журнал

Редколегією до опублікування приймаються статті, написані **державною мовою**, за наступними науковими напрямками:

- ✓ *енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;*
- ✓ *тепловикористовуючі установки; моделювання процесів промислового обладнання; процеси та апарати різних галузей промисловості (хімічної, харчової, медичної та ін.);*
- ✓ *застосування ЕОМ в технологічних процесах; автоматизовані системи управління та обробки інформації;*
- ✓ *тепло- і масообмінні процеси та обладнання спеціальної техніки; теплові процеси та кріогенне устаткування медичного призначення;*
- ✓ *електроенергетика; обладнання електростанцій і передача електроенергії;*
- ✓ *економічні аспекти енергетики й промислової екології; комерційний інжиніринг, реінжиніринг та також інших напрямкам на межі різних галузей знань.*

Матеріали до опублікування в кожний наступний номер приймаються до 20 числа останнього місяця попереднього кварталу. Рукописи авторам не повертаються.

Електронна версія статті має бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows версій 97, XP, 2000 або 2003. Сама стаття друкується у 2-х примірниках. До матеріалів повинні додаватися експертний висновок про можливість опублікування матеріалів у відкритій пресі та рецензія доктора наук за профілем статті.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:

Розмір сторінки А4 (210x297 мм); ліве і праве поля – 25 мм, верхнє і нижнє – 30 мм; рекомендований шрифт Times New Roman Суг; розмір шрифту – 12; міжрядковий інтервал – 1.

ПОРЯДОК РОЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ:

- безпосередньо під верхньою межею зліва **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** друкується УДК статті;
- пропустивши один рядок, по центру друкуються прізвища та ініціали авторів, їх науковий ступінь та звання;
- пропустивши один рядок, по центру напівжирним шрифтом **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** друкується назва статті;
- нижче, пропустивши одну строку, друкується назва організації, де працюють автори статті;
- після – розміщуються ключові слова;
- пропускається один рядок і з абзацу (1,25 см) друкується основний текст, відформатований по ширині сторінки;
- перед і після формул і рівнянь має бути відстань в один порожній рядок до тексту з інтервалом 1;
- формули і рівняння мають бути вирівняні по центру;
- номери формул і рівнянь мають бути вирівняні по правому краю;
- розмір шрифту формул і рівнянь для основного тексту – 12 пт.;
- рисунки, схеми і графіки мають бути виконані в чорно-білому зображенні;
- пропустивши один рядок, подається список літератури, оформлений відповідно до вимог ДСТУ. Згідно вимогам МОН України кількість літературних джерел має бути не менш за 12.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті трьома мовами (українська, російська та англійська) мають бути надруковані УДК, прізвище, ім'я, по батькові авторів, назва і анотація. Мінімальна кількість символів кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email.

**СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ЗА ВСІМА ВИМОГАМИ,
РЕДКОЛЕГІЯ НЕ РОЗГЛЯДАЄ ТА НЕ РОЗМІЩУЄ У ЖУРНАЛІ**

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ

Україна, 61002,
Харків-2, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ», редколегія журналу
«Інтегровані технології та енергозбереження»,
технічний редактор: к.техн.н., доцент, зав. каф. ІТПА
Горбунов К.О.

Тел. (057) 707-69-58.
Факс (057) 720-22-95.
Email: gor.kona2016@gmail.com

**НА ЖУРНАЛ ВІДКРИТО ПЕРЕДПЛАТА
В ПОШТОВИХ ВІДДІЛЕННЯХ УКРАЇНИ**

Індекс видання: 22786
Індекс видання: 46738 – тільки для Донецька та Луганська

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

2'2024

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 10.06.2024 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,8. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–30.
Зам. № . Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.