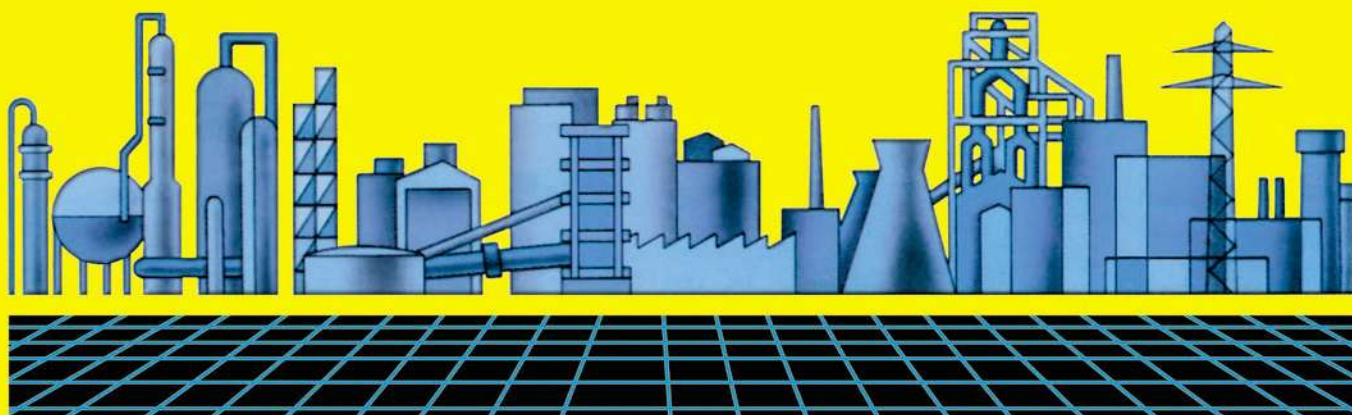


ІТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2024

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. ІТПА НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

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

В. Є. Ведь, д-р техн. наук, професор, професор каф. ІТПА НТУ "ХПІ"

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

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

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

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

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

забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил

ім. І.Козьмидуба

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 Рафиди Ван Алви, 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;
зарєєстрований 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

Eugeniy 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 ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Селіхов Ю. А., Рищенко І. М., Горбунов К. О., Нагорний Е. Р.</i> Інтеграція теплообміну високотемпературної поверхні.....	3
<i>Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Школьнікова Т. В., Пільник І. В.</i> Методика експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну	12

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Бабіченко А. К., Красніков І. Л., Кравченко Я. О., Деменкова С. Д.</i> Дослідження ефективності способів підвищення точності вимірювань технологічних параметрів об'єктів керування.....	20
<i>Крутіков Г. А., Бородін Д. Ю.</i> Визначення змінних стану дискретного пневмоприводу шляхом використання методу січних при лінеаризації математичної моделі.....	29
<i>Селіхов Ю. А., Миронов А. М., Горбунов К. О., Рись В. Г.</i> Експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну.....	43

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Переверзева А. М., Дзевочко О. М.</i> Дослідження відділення абсорбції та дистиляції виробництва кальцинованої соди аміачним способом як об'єкта керування.....	52
<i>Гурін І. В., Невлюдов І. Ш., Овчаренко В. Є., Токарева О. В.</i> Дослідження щільності ВВКМ та її вплив на електричний об'ємний питомий опір.....	61
<i>Петік І. П., Литвиненко О. А., Пономарьова М. С., Діхтярь А. М., Андрєєва С. С., Баландіна І. С., Карюк А. О.</i> Вплив концентрації бета-каротину і хлорофілу на швидкість окиснення їхніх олійних розчинів.....	71
<i>Пугановський О. В., Шутинський О. Г.</i> Програма розрахунку процесу абсорбції у виробництві нітратної кислоти.....	80

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Станкевич С. В., Омельченко С. Б., Котляр О. В., Мюшфік Панах огли Бакіров, Жулінська О. В., Аштаєва Н. Л.</i> Залежність якісних показників екструдату від характеристик сировини.....	89
<i>Сторінка редколегії.....</i>	98

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 7 від 20.09.2024 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : Щоквартальний науково-практичний журнал. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 3. – 100 с.

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

© Національний технічний університет «ХПІ», 2024

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, І. М. Рищенко, д.техн.н., професор,
К. О. Горбунов, к.техн.н., професор, Е. Р. Нагорний, аспірант

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЕРХНІ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Постановка задачі. Аналіз умов роботи низки енерготехнологічних об'єктів дозволяє вважати, що здійснення наміченого збільшення вироблення електричної енергії на АЕС у 8–10 разів, скорочення витрати металу за рахунок нарощування у 2,5–3 рази термозміцненого прокату, підвищення надійності та безпеки експлуатації обладнання в енергетиці, машинобудуванні та металургії пов'язано з необхідністю подальшого дослідження умов теплообміну високотемпературних поверхонь. Так, у перехідних режимах роботи турбоустановок АЕС у проточній частині турбін має місце нестационарна теплова взаємодія поверхонь корпусних елементів з дисперговою рідкою фазою вологої насиченої пари [1]. При цьому точність розрахунків термічних напруг і деформацій у зазначених елементах корпусу турбіни, що виконуються на стадії проектування, а, отже, забезпечення надійності роботи турбоустановки в умовах її експлуатації істотно визначається повнотою інформації про граничні умови теплообміну.

У металургії при виробництві термозміцненого прокату широкого поширення набули системи, в яких потрібний тепловий стан виробів забезпечується за рахунок охолодження високотемпературних поверхонь розпиленою рідиною. Очевидно, що й у цьому випадку забезпечення заданих механічних характеристик прокату, зниження енерговитрат та витрати охолоджувача, вибір режимно-геометричних характеристик термозміцнення визначається достовірністю відомостей про щільність теплового потоку в процесі нестационарного теплообміну диспергової рідини з поверхнею виробу [2].

Вивченню зазначеного процесу в енергетиці та металургії присвячено низку робіт як у нас у країні, так і за кордоном. До них належать дослідження М.А. Стиріковича, В.Г. Лабейша [3, 4], Е.І. Казанцева [5], В.М. Капиноса, В.П. Ісаченко [6], В.І. Кушнірьова [7], В.А. Зисіна [8], Е.Г. Братути [9], Л.І. Урбановича [10], К.Ф. Стародубова, О.Р. Пересьолкова [11], Ю.А. Селіхова [12], Д. Хьюїтта [13], А. Диннера [14], С. Віанне [15], К. Янаги [16].

Разом з тим, відомості про умови теплообміну в зазначеному процесі, необхідні для здійснення термічних керованих впливів багато в чому суперечливі, отримані без урахування взаємопов'язаного впливу певних факторів, у вузькому діапазоні їх зміни. Ряд співвідношень, запропонованих для визначення граничних умов, виявляється справедливим лише стосовно приватних умов проведення експерименту. У ряді випадків результати, отримані при дослідженні стаціонарного процесу теплообміну без достатнього обґрунтування, рекомендуються для застосування в розрахунках нестационарного теплового стану.

При вирішенні різноманітних задач пожежної безпеки, насамперед, для припинення горіння на підставі охолоджуючої та флегматизуючої дії води та для створення умов пожежної безпеки (захисту від теплових конвекційних потоків та випромінювання, а також використання води для захисту будівельних конструкцій в

умовах пожежі), необхідно знати умови теплообміну диспергованої рідини з охолоджуваною поверхнею [17]. Найбільш ефективно гасіння пожеж водою способом охолодження поверхні речовини, що горить, здійснюється під час горіння твердих горючих матеріалів. При охолодженні палаючих речовин водою деяка її кількість випаровується і переходить у пару, завдяки чому підвищується швидкість гасіння. Поверхня матеріалу, що горить, при попаданні води частково змочується. У деяких випадках вода проникає в глибину за рахунок механічної дії струменів. Потрібно зазначити, що у разі наявності гетерогенного горіння (тління, горіння коксу, деревного вугілля, сажі) дія водяного струменя приводить до охолодження безпосередньо зони горіння твердих речовин. У пожежній техніці для розпилення води використовується переважно гідравлічний метод, як найбільш простий і економічний за споживанням енергії на диспергування рідини (2–4 кВт на диспергування 1 т рідини), при цьому, в основному охолоджують матеріали (деревне вугілля, деревину, волокнисті матеріали, пластик, нафтопродукти, огорожувальні поверхні будівельних корпусів і т.д.). Охолодження металевих високотемпературних поверхонь може і робили, але ніяких наукових досліджень охолодження диспергованою рідиною з різною концентрацією поверхнево-активних речовин високотемпературної поверхні ми не знайшли в науковій літературі.

Актуальність подальших досліджень теплообміну високотемпературної поверхні розпиленою рідиною з різними концентраціями поверхнево-активних речовин стосовно теплових процесів в енергетичному обладнанні та металургійному виробництві визначила зміст цієї статті.

Ключові слова: умови теплообміну, високотемпературні поверхні, теплові процеси, енергетичне обладнання, концентрація охолоджувальної рідини, поверхнево-активні речовини, витрата охолоджувача, диспергована рідка фаза, волога насичена пара, енерговитрати, термозміцнення, надійність роботи, турбоустановки, стаціонарні процеси, граничні умови.

Мета статті. Аналіз літературних джерел дозволив зробити наступні висновки.

Мета полягає у розробці узагальнених рекомендацій визначення граничних умов нестационарного теплообміну розпиленої рідини – води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин з високотемпературною поверхнею, справедливих при довільному механізмі диспергування рідини та її подачі до поверхні з урахуванням взаємозалежного впливу визначальних чинників.

Конкретними завданнями є:

1. Розробка методики експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну.

2. Для цього треба розробити та виготовити експериментальний стенд, на якому будуть виконуватись дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню.

3. Розробити або підібрати математичну модель для розрахунків: теплових потоків, коефіцієнтів тепловіддачі, динаміку гідравлічних способів диспергування рідини – води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин, критичних теплових потоків та температур поверхні в області переходу від плівкового до бульбашкового режиму кипіння у функції визначальних факторів.

4. Встановити самостійний вплив ступеня нестационарності процесу на умови теплообміну.

Розгляд результатів опублікованих досліджень показують, що при вивченні теплообміну між високотемпературною поверхнею та диспергованою рідиною можна виділити чотири основні групи факторів.

Першу групу складають гідродинамічні фактори: густина зрошення g , швидкість натікання охолоджуючого середовища на поверхню W_C , концентрація рідини у двофазному середовищі, концентрація поверхнево-активних речовин у рідині та дисперсний склад рідкої фази.

Другу групу утворюють термічні фактори: температура поверхні t_i і температура охолоджуючого середовища t_C (або ступінь недогріву середовища до кипіння Δt_H), швидкість зміни температури поверхні $W_T = \partial t_i / \partial \tau$.

До третьої групи належать геометричні фактори: відстань джерела диспергованого середовища від поверхні H , кут натікання середовища δ_C , форма поверхні, що охолоджується.

До четвертої групи входять технологічні фактори: швидкість переміщення поверхні W_H , щільність розміщення системи джерел диспергованого середовища та їх взаємна орієнтація.

Аналіз природи впливу низки перелічених чинників показав, що у разі, коли вивчається взаємозв'язок між локальними значеннями щільності теплового потоку і щільності зрошення ряд факторів не надає самостійного впливу на умови теплообміну. Роль їх проявляється через величину локальної щільності зрошення, що залежить від зазначених факторів.

У зв'язку з цим ми не аналізуватимемо вплив таких характеристик, як відстань джерела середовища до поверхні, геометричних особливостей розпилювача, концентрації рідкої фази у водоповітряному або пароводяному потоці та щільності розміщення джерел середовища, досліджених у роботі [18].

Відомості про дисперсний склад розпиленої рідини дуже обмежені. Однак, відомі нам результати дозволяють вважати, що в переважній більшості випадків термічної взаємодії поверхні з полідисперсним потоком крапель стосовно об'єктів енергетики і металургії роль зазначеного фактора дуже мала. Дійсно, як впливає з роботи [15], при швидкості двофазного середовища від 15 до 100 м/с та щільності зрошення від 1 до 20 кг/(м²с), середньому діаметрі крапель (за Заутером) D_K від 20 до 100 мкм щільність теплового потоку виявилася пропорційною $D_K^{0,05}$.

Наведені міркування дозволяють вважати, що із сукупності перерахованих факторів, що надають самостійний і безпосередній вплив на умови теплообміну, слід виділити: локальну щільність зрошення g , температуру поверхні t_i , ступінь недогріву рідини Δt_H , швидкість W_C та кут δ_C натікання крапель, швидкість зміни температури W_T та швидкість переміщення поверхні W_i .

При попаданні води на високотемпературну поверхню тепло прогрітого шару поглинається водою за рахунок протікання ендотермічних процесів нагріву і фазового переходу (випаровування). Питома кількість тепла, що поглинається шаром поверхні на одиницю площі поверхні, розраховується за формулами.

Швидкість осідання, а, отже, і час контакту краплі з поверхнею будуть залежати від розміру краплі і виду самої поверхні. У перший момент крапля потрапляє в прогрітий поверхневий шар із температурою t_H . Оскільки температура поверхневого

шару перевищує температуру краплі води в момент попадання її на високотемпературну поверхню, то температура краплі під час падіння починає підвищуватися і досягає своєї максимальної величини. Швидкість руху краплі і температуру краплі в будь-якій точці її руху можемо визначити з енергетичного балансу.

В роботі [19] наведено результати розрахунків часу та відстані, на якій відбудеться повне випаровування краплі води, в залежності від виду поверхні та початкового діаметру крапель.

Розглянемо наявні у літературі результати дослідження впливу зазначених чинників. Підсумки практично всіх відомих нам робіт з теплообміну диспергованої рідини з поверхнею дозволяють вважати, що щільність зрошення, тобто кількість охолоджувача, що припадає на одиницю поверхні в одиницю часу, є центральною величиною, відповідальною не тільки за інтенсивність відведення тепла, але й визначальний ступінь впливу всіх інших чинників.

Якщо коротко оцінити підсумки дослідження впливу щільності зрошення, які опубліковані у роботі [20], то основним є той факт, що збільшення g завжди пов'язане із збільшенням тепловідведення. Водночас встановлено, що залежність $q(g)$ або $\alpha(g)$ не є монотонною. В області $g < 10 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ залежність $q(g)$ має практично лінійний характер. Однак при великих значеннях цього фактора зазначена залежність починає набувати характеру близького до експоненційного і при деякому пороговому значенні g_1 подальше збільшення щільності зрошення практично не призводить до збільшення щільності теплового потоку. Слід зазначити, що за даними різних дослідників рівень g_1 коливається в широких межах від 2 до 80 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Останнє, на наш погляд, пов'язане, в основному, з дуже різномірною методикою проведення дослідів, зокрема з різними способами як оцінки дійсної величини щільності зрошення, так і нерівнозначними способами опосередкування коефіцієнтів тепловіддачі або щільності теплового потоку на поверхні охолодження. Авторами робіт [21] було встановлено, що в міру збільшення щільності зрошення на поверхні листа збільшується товщина плівки рідини, що перешкоджає безпосередньому контакту крапель і струменів із площиною тепловідведення. З цією обставиною фактично пов'язана наявність порогового рівня $g_{\text{п}}$, коли подача додаткового охолоджувача виявляється неефективною через збільшення баластного шару рідини.

Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури поверхні $t_{\text{п}}$ за результатами величезної кількості дослідів, виконаних при «кипінні у великому обсязі» і стосовно парагенеруючих каналів зводиться до відомої «кривої кипіння» [19], що розділяє весь процес на області бульбашкового та плівкового режимів кипіння за наявності критичних температур поверхні $t_{\text{пкр}}$, яким відповідає максимум інтенсивності теплообміну. При охолодженні поверхні розпиленою рідиною вказаний характер залежності $q(t_{\text{п}})$ або $\alpha(t_{\text{п}})$ підтверджується у роботі [22]. Однак у ряді випадків при форсуночному охолодженні поверхні «класичний» характер кривої $q(t_{\text{п}})$ не спостерігався. Так в роботі [23] при $t_{\text{п}} > 300^\circ\text{C}$ не виявлено плівкового режиму теплообміну, а в роботі [24] при $t_{\text{п}} < 150^\circ\text{C}$ не було зафіксовано зменшення інтенсивності охолодження.

Незважаючи на велику передісторію кризових режимів кипіння, це питання стосовно термічної взаємодії розпиленої рідини з поверхнею вивчено вкрай обмежено. За даними різних дослідників величина $t_{\text{ПКР}}$ коливається в інтервалі від 130 до 480 °С, при цьому узагальнюючих зв'язків залежності $t_{\text{ПКР}}$ від визначальних чинників процесу теплообміну ми у доступній нам літературі не виявили.

Незважаючи на велику кількість робіт, опублікованих у відкритому друку, з охолодження високотемпературних поверхонь розпиленою рідиною, ми не виявили публікацій з дослідження умов теплообміну розпиленої води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин.

Висновки. 1. Необхідно розробити методику експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну розпиленої рідини – води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин.

2. Потрібно розробити та виготовити експериментальний стенд, на якому будуть виконуватись дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню.

3. Розробити математичну модель для розрахунків: теплових потоків, коефіцієнтів тепловіддачі, динаміку гідравлічних способів диспергування рідини - води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин, критичних теплових потоків і температур поверхні в області переходу від плівкового до бульбашкового режиму кипіння в функції визначальних факторів.

4. Встановити самостійний вплив ступеня нестационарності процесу на умови теплообміну.

Література

1. Капинос В.М., Чиркин Н.В. и др. Экспериментальное исследование теплообмена при течении водовоздушного потока. – Теплоэнергетика, 1975, №5, С. 28–31.
2. Траянов Г.Г., Петрова Л.В. Исследование водяного и воздушного охлаждения тонкой стальной полосе. – В сб. Металлургическая теплотехника. – М.: Metallurgiya, 1975, №4, С. 95–101.
3. Лабейш В.Г. Примин В.И., Родионов О.А. Определение нестационарных тепловых нагрузок при охлаждении высокотемпературного металла жидкими струями. – Матер. Всесоюз. конф. Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации. – Рига, 1982, т. 1, С. 137–138.
4. Лабейш В.Г. Жидкостное охлаждение высокотемпературного металла. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1983. – 172 с.
5. Казанцев Е.И. Гончаров Н.В., Парамошин А.П. Теплоотдача при водовоздушном охлаждении горячего листа. – Сталь, 1981, №4, С. 88–90.
6. Исаченко В.П., Сидорова И.К. Экспериментальное исследование охлаждения плоской вертикальной поверхности струей диспергированной жидкости. – Теплоэнергетика, 1982, №2, С. 30–33.
7. Кушнырев В.И., Горин С.В., Лебедев В.И. и др. Методика экспериментального исследования коэффициента теплоотдачи при охлаждении нагретой поверхности водой, распыливаемой форсунками. – Непрерывная разливка стали. – Metallurgiya, 1977, №4, С. 95–104.

8. Зысин В.А., Давыдов В.С. Теплоотдача при обтекании решетки профилей потоком, несущим взвешенную влагу. – Энергомашиностроение, 1965, №8, С. 37–39.
9. Братута Э.Г., Заночкин Л.А., Павленко Н.С. Метод исследования гидродинамики пленки жидкости при спрейерном охлаждении листа. – Изв. вузов. Черная металлургия, 1982, №4, С. 126–129.
10. Урбанович Л.И., Горяинов В.А., Севастьянов В.В. и др. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при форсуночном охлаждении непрерывного стального слитка. – Изв. вузов. Черная металлургия, 1980, №9, С. 145–149.
11. Переселков А.Р., Братута Э.Г. Теплообмен при охлаждении высокотемпературной поверхности струей диспергированной жидкости. – В кн.: Энергетическое машиностроение, вып. 54. – Респ. межвед. Науч.-техн. сборник. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1982, С. 77–79.
12. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Кравцов С.Ф. и др. Метод определения локальных условий теплообмена при спрейерном охлаждении. – Сталь, 1985, №4, С. 89–91.
13. Хьюитт Д., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. – М.: Энергия, 1974. – 407 с.
14. Диннер А. Обзор литературы по теплопередаче при струйном охлаждении. М.: Черные металлы, 1976, №4, С. 26–29.
15. Вианне С., Хозеф Ж., Даан Ж. Теплообмен между поверхностью, нагретой до высокой температуры, и нормально падающей струей смеси воздуха с распыленной водой. – Общество Бертен и К°. Отдел теплопередачи и переноса массы. Франция / Пер. с франц. № 80/10747. – М.: ГПНТБ. 1980. – 11 с.
16. Янаги К. Охлаждение каплями жидкости высокотемпературной поверхности. – Нэпре кекай си, 1976, т. 55, № 595, С. 892–897 / Пер. с японск. № А-44053. – М.: Всесоюзный центр переводов, 1978. – 25 с.
17. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі. Навчальний посібник – Харків, 2004. – 252 с.
18. Зимин Н.В. Кинетика душевого охлаждения поверхности и охлаждающая способность душа различных жидкостей. – В сб. Металлургия и коксохимия. Термическая обработка стали. – Киев: Техника, 1973, вып.36. С. 65–68.
19. Несис Е.И. Кипение гидкостей. – М.: Наука, 1973. – 280 с.
20. Эйсмодт К.А., Шустов А.В. и др. Получение и применение жидкостно-воздушных закалочных сред. – В сб. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1980, № 11, С. 43–45.
21. Липунов Ю.И., Траянов Г.Г. Тепловой расчет устройств струйного водяного охлаждения для закалки листового проката. Металлургическая теплотехника. – М.: Металлургия. 1978. № 6, С. 65–68.
22. Переселков А.Р., Братута Э.Г. Теплообмен при охлаждении высокотемпературной поверхности струей диспергированной жидкости. – В кн.: Энергетическое машиностроение. Вып. 38. – Респ. межвед. Науч.-техн. сборник. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984, С. 85–90.
23. Гончаров Н.В., Казанцев Е.И. и др. Исследование теплообмена при струйном охлаждении листового металла водой и водовоздушной смесью. – Сталь, 1977, № 6, С. 564–566.
24. Казанцев Е.И., Гончаров Н.В., и др. Теплоотдача при водовоздушном охлаждении горячего листа. – Сталь, 1981, № 4, С. 88–90.

Bibliography (transliterated)

1. Kapinos V.M., Chirkin N.V. i dr. Eksperimentalnoe issledovanie teploob-mena pri techenii vodovozdushnogo potoka. – Teploenergetika, 1975, #5, P. 28–31.
2. Trayanov G.G., Petrova L.V. Issledovanie vodyanogo i vozdushnogo ohlazhdeniya tonkoy stalnoy polosy. – V sb. Metallurgicheskaya teplotekhnika. – M.: Metallurgiya, 1975, #4, P. 95–101.
3. Labeysh V.G. Primin V.I., Rodionov O.A. Opredelenie nestatsionarnykh tep-lovykh nagruzok pri ohlazhdenii vyisokotemperaturnogo metalla zhidkimi struyami. – Mater. Vsesoyuz. konf. Teplofizika i gidrogazodinamika protsessov kipeniya i kon-densatsii. – Riga, 1982, t. 1, P. 137–138.
4. Labeysh V.G. Zhidkostnoe ohlazhdenie vyisokotemperaturnogo metalla. – L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1983. – 172 p.
5. Kazantsev E.I. Goncharov N.V., Paramoshin A.P. Teplootdacha pri vodovozdushnom ohlazhdenii goryachego lista. – Stal, 1981, #4, P. 88–90.
6. Isachenko V.P., Sidorova I.K. Eksperimentalnoe issledovanie ohlazhdeniya ploskoy vertikalnoy poverhnosti struey dispergirovannoy zhidkosti. – Teploener-getika, 1982, #2, P. 30–33.
7. Kushnyrev V.I., Gorin S.V., Lebedev V.I. i dr. Metodika eksperimentalnogo issle-dovaniya koeffitsienta teplootdachi pri ohlazhdenii nagretoy poverhnosti vody, raspylivae-moy forsunkami. – Nepreryivnaya razlivka stali. – Metallurgiya, 1977, #4, P. 95–104.
8. Zyisin V.A., Davyidov V.S. Teplootdacha pri obtekanii reshetki profiley potokom, nesushchim vzveshennuyu vlagu. – Energomashinostroenie, 1965, #8, P. 37–39.
9. Bratuta E.G., Zanochnik L.A., Pavlenko N.S. Metod issledovaniya gidrodina-miki plenki zhidkosti pri spreynom ohlazhdenii lista. – Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya, 1982, #4, P. 126–129.
10. Urbanovich L.I., Goryainov V.A., Sevastyanov V.V. i dr. Eksperimentalnoe issle-dovanie gidrodinamiki i teploobmena pri forsunochnom ohlazhdenii nepre-ryivnogo stalnogo slitka. – Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya, 1980, #9, P. 145–149.
11. Pereselkov A.R., Bratuta E.G. Teploobmen pri ohlazhdenii vyisokotempera-turnoy poverhnosti struey dispergirovannoy zhidkosti. – V kn.: Energeticheskoe ma-shinostroenie, vyip. 54. – Resp. mezhved. Nauch.-tehn. sbornik. – Harkov: Vischa shkola. Izd-vo pri Hark. un-te, 1982, P. 77–79.
12. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Kravtsov S.F. i dr. Metod opredeleniya lokal-nykh usloviy teploobmena pri spreynom ohlazhdenii. – Stal, 1985, #4, P. 89–91.
13. Hyuitt D., Holl-Taylor N. Koltsevyie dvuhfaznyie techeniya. – M.: Energiya, 1974. – 407 p.
14. Dinner A. Obzor literatury po teploperedache pri strynom ohlazhdenii. M.: Chernyie metally, 1976, #4, P. 26–29.
15. Vianne S., Hozef Zh., Daan Zh. Teploobmen mezhdu poverhnostyu, nagretoy do vyisokoy temperatury, i normalno padayuschey struey smesi vozduha s raspylennoy vodoy. – Obschestvo Berten i K°. Otdel teploperedachi i perenosa massyi. Frantsiya / Per. s frants. # 80/10747. – M.: GPNTB. 1980. – 11 p.
16. Yanagi K. Ohlazhdenie kaplyami zhidkosti vyisokotemperaturnoy poverhno-sti. – Nepre kekay si, 1976, t. 55, # 595, P. 892-897 / Per. s yaponsk. # A-44053. – M.: Vsesoyuz-nyiy tsentr perevodov, 1978. – 25 p.
17. Tarahno O.V., Sharshanov A.Ya. Fiziko-himichni osnovi vikoristannya vodi v pozhezhnyi spravi. Navchalnyi posibnik – Harkiv, 2004. – 252 p.

18. Zimin N.V. Kinetika dushevogo ohlazhdeniya poverhnosti i ohlazhdayuschaya sposobnost dusha razlichnyih zhidkostey. – V sb. Metallurgiya i koksohimiya. Termicheskaya obrabotka stali. – Kiev: Tehnika, 1973, vlp.36. P. 65–68.

19. Nesis E.I. Kipenie gidkostey. – M.: Nauka, 1973. – 280 p.

20. Eysmond K.A., Shustov A.V. i dr. Poluchenie i primeneniye zhidkostno-vozdushnykh zakalochnykh sred. – V sb. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metal-lov. – M.: Metallurgiya, 1980, # 11, P. 43–45.

21. Lipunov Yu.I., Trayanov G.G. Teplovoy raschet ustroystv struynogo vodyanogo ohlazhdeniya dlya zakalki listovogo prokata. Metallurgicheskaya teplotekhnika. – M.: Metallurgiya. 1978.# 6, P. 65–68.

22. Pereselkov A.R., Bratuta E.G. Teploobmen pri ohlazhdenii vyisokotemperaturnoy poverhnosti struey dispergirovannoy zhidkosti. – V kn.: Energeticheskoye mashinostroyeniye. Vyip. 38. – Resp. mezhved. Nauch.-tehn. sbornik. – Harkov: Vischa shkola. Izd-vo pri Hark. un-te, 1984, P. 85–90.

23. Goncharov N.V., Kazantsev E.I. i dr. Issledovaniye teploobmena pri struy-nom ohlazhdenii listovogo metalla vodoy i vodovozdushnoy smesyu. – Stal, 1977, # 6, P. 564–566.

24. Kazantsev E.I., Goncharov N.V., i dr. Teplootdacha pri vodovozdushnom ohlazhdenii goryachego lista. – Stal, 1981, # 4, P. 88–90.

УДК 621.016

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, І. М. Рищенко, д.техн.н., професор,
К. О. Горбунов, к.техн.н., професор, Е. Р. Нагорний, аспірант

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЕРХНІ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Незважаючи на дискретний характер взаємодії крапель розпиленої рідини з високотемпературною поверхнею, неминуче утворення плівки рідини призводить до того, що основні якісні закономірності теплообміну, що маємо при цьому, виявляються характерними для відомого процесу теплообміну при кипінні.

Разом з тим, наявність великих теоретичних та експериментальних досліджень «кипіння у великому обсязі» та процесу генерування пари в каналах не дозволяє встановити умови теплообміну при термічній взаємодії диспергованої рідини - води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин з високотемпературною поверхнею.

У науковій літературі ми не знайшли матеріалів про цей процес. При цілій низці особливостей, загальних з вищезазначеними двома випадками теплообміну (наявність криз кипіння, плівкового та бульбашкового режимів і т.д.), охолодження високотемпературної поверхні краплинним середовищем, що має у своєму складі різні концентрації поверхнево-активних речовин, має суттєві відмінні риси, зумовлені особливостями гідродинаміки процесу, що є предметом подальшого вивчення.

Для повного дослідження вищезазначеної задачі необхідно виконати таке:

1. Розробити методику експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну розпорошеної рідини - води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин.

2. Потрібно розробити та виготовити експериментальний стенд, на якому будуть виконуватись дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню.

3. Розробити математичну модель для розрахунків: теплових потоків, коефіцієнтів тепловіддачі, динаміку гідравлічних способів диспергування рідини - води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин, критичних теплових потоків та температур поверхні в області переходу від плівкового до бульбашкового режиму кипіння до функцій визначальних факторів.

4. Встановити самостійний вплив ступеня нестационарності процесу на умови теплообміну.

Ключові слова: умови теплообміну, високотемпературні поверхні, теплові процеси, енергетичне обладнання, концентрація охолоджувальної рідини, поверхнево-активні речовини, витрата охолоджувача, диспергована рідка фаза, волога насичена пара, енерговитрати, термозміцнення, надійність роботи, турбоустановки, стаціонарні процеси, граничні умови.

Yu. A. Selikhov, I. M. Ryshchenko, K. O. Gorbunov, E. R. Nagorniy

INTEGRATION OF HIGH-TEMPERATURE SURFACE HEAT EXCHANGE

Despite the discrete nature of the interaction of droplets of sprayed liquid with a high-temperature surface, the inevitable formation of a liquid film leads to the fact that the main qualitative laws of the heat exchange that occurs in this case are characteristic of the known process of heat exchange during boiling.

At the same time, the presence of extensive theoretical and experimental studies of “large-volume boiling” and the process of steam generation in channels does not allow us to establish the conditions of heat exchange during the thermal interaction of a dispersed liquid - water with different concentrations of surfactants with a high-temperature surface.

We did not find any materials about this process in the scientific literature. With a number of features common to the above two cases of heat exchange (the presence of boiling crises, film and bubble modes, etc.), cooling a high-temperature surface with a droplet medium containing various concentrations of surfactants has significant distinctive features due to the hydrodynamics of the process, which is the subject of further study.

To fully explore the above task, the following must be done:

1. Develop a methodology for experimental study of local conditions of non-stationary heat exchange of sprayed water with different concentrations of surfactants.

2. Develop and manufacture an experimental setup on which to conduct research on the effects of irrigation density, surface temperature, degree of liquid underheating, its speed and angle of impingement on the surface.

3. Develop a mathematical model for calculations of heat flows, heat transfer coefficients, dynamics of hydraulic methods of liquid dispersion – water with different concentrations of surfactants, critical heat flows and surface temperatures in the transition region from film to bubble boiling as a function of determining factors.

4. Establish the independent influence of the degree of non-stationarity of the process on the heat exchange conditions.

Keywords: heat exchange conditions, high-temperature surfaces, thermal processes, power equipment, coolant concentration, surfactants, coolant flow rate, dispersed liquid phase, wet saturated steam, energy costs, thermal strengthening, operational reliability, turbo plants, stationary processes, non-stationary processes, thermal effects, boundary conditions.

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, К. О. Горбунов, к.техн.н., професор,
Т. В. Школьнікова, к.техн.н., доцент, І. В. Пільник, аспірант

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ УМОВ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: засоби експериментального дослідження, нестационарні локальні умови теплообміну, високотемпературна поверхня, розпилена рідина, плівковий та бульбашковий режим кипіння, ефективні системи охолодження, багатофакторний характер досліджуваного процесу, метод ідентифікації умов теплообміну,

Постановка задачі. Поданий короткий аналіз стану досліджень дозволяє вважати, що існуючі протиріччя в розглянутих результатах можуть бути подолані лише за такої постановки завдання, коли з єдиних методологічних позицій, при максимальному нівелюванні ролі конкретних умов проведення експерименту, вивчається взаємопов'язаний вплив визначальних факторів на локальні (а не середні) умови теплообміну.

В рамках зазначеної постановки задачі та відповідно до характеру та обсягу наявних відомостей про умови теплообміну високотемпературної поверхні з дисперговою рідиною – води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин є можливим позначити коло тих завдань, які необхідно вирішити у цій роботі.

Першим завданням є розробка засобів експериментального дослідження нестационарних локальних умов теплообміну високотемпературної поверхні з розпорошеною рідиною з урахуванням можливості реалізації зміни рівня визначальних факторів у діапазоні, що відповідає їх реальним значенням у натурних об'єктах енергетики та металургії. До цього завдання примикає вибір методу ідентифікації граничних умов теплообміну.

Другим завданням, пов'язаним із забезпеченням достовірності результатів дослідження, є експериментально-теоретичне визначення можливих похибок проведення дослідів, які комплексно відображають як похибки вимірювань, так і помилки, пов'язані з розрахунковим методом ідентифікацій граничних умов.

Аналіз наявних відомостей [1–5] та наші власні попередні досліді [6–10] дозволили встановити, що вплив таких факторів як температура поверхні t_f , ступінь недогріву рідини Δt_n , швидкість W_c та кут δ_c натікання середовища на поверхню цілком визначається рівнем центрального фактора, яким є локальна щільність зрошення g . Як буде показано, при дослідженні локальних умов теплообміну облік різноманітних особливостей та варіантів технічних рішень може бути зведений до дослідження теплообміну при відповідному рівні щільності зрошення. У зв'язку з цим з метою встановлення загальних закономірностей, які стали б основою для розробки ефективних систем охолодження, або для визначення теплового стану об'єкту при різних зовнішніх впливах, виділяються такі етапи досліджень.

Вважаючи, що ступінь впливу недогріву рідини Δt_H до температури насичення не залежить від швидкості та кута натікання дисперсного середовища на поверхню, третім завданням є дослідження інтенсивності теплообміну у функції величини Δt_H , при різних локальних щільностях зрошення g та температурах поверхні t_i .

Четверте завдання присвячується дослідженню кризи теплообміну в області переходу від плівкового до бульбашкового режиму кипіння та встановленню критичних значень щільності теплового потоку $q_{кр}$ та температур поверхні $t_{кр}$ у функції щільності зрошення g та ступеня недогріву рідини Δt_H .

Змістом п'ятого завдання є дослідження граничних умов теплообміну функції взаємопов'язаного впливу щільності зрошення, температури поверхні, швидкості і кута натікання розпиленої рідини на поверхню. У зв'язку з багатофакторним характером досліджуваного процесу встановлення узагальнених залежностей та методики проведення вимірювань – будуються на основі сучасних вимог теорії планування експерименту.

Як уже зазначалося, до визначальних факторів слід також віднести швидкість зміни температури поверхні $W_T = \partial t_i / \partial \tau$. Нам здається, що у зв'язку з відомими теплофізичними особливостями кінетики процесу кипіння ступінь впливу практично всіх факторів, зазначених як визначальні, повинен залежати від ступеня нестационарності процесу охолодження поверхні. Очевидно, що при цьому вивчення граничних умов теплообміну у функції W_T виливається у велике самостійне завдання. Це завдання ускладнюється як практичною відсутністю відомостей про зазначену закономірність, так і необхідністю в значному обсязі досліджень, проблематичному в рамках цієї роботи навіть при мінімізації числа одиночних дослідів завдяки залученню теорії планування експерименту.

У зв'язку з цим, у порядку розв'язання шостого завдання представилося доцільним обмежитися встановленням залежності $q(W_T)$ при різних щільностях зрошення g та температурах поверхні t_i .

Якщо швидкість розтікання рідини W_C по поверхні суттєво перевищує швидкість її руху W_i , то можна вважати, що вплив W_i на умови теплообміну стає малоістотним. Разом з тим, стосовно процесу термозміцнення прокату чорних металів і відповідної схеми розміщення форсунок над поверхнею листа, що рухається, кожен його елемент фактично охолоджується при змінній в часі локальній щільності зрошення. Природно, що при цьому температурне поле за товщиною об'єкта, що охолоджується, стає однозначно пов'язаним зі швидкістю його руху. Незважаючи на актуальність дослідження такого процесу, відповідні результати, що опубліковані в пресі, нам не відомі.

Це визначило необхідність вирішення сьомого завдання, пов'язаного з експериментально-теоретичним дослідженням нестационарного охолодження металу при змінній у часі інтенсивності зрошення високотемпературної поверхні та різних схемах розміщення розпилювачів стосовно розробки ефективних систем термозміцнення прокату.

Мета статті. Розробка методики експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну. Для цього треба сконструювати експериментальний стенд, на якому будуть виконуватись дослідження впливу

щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню.

Термозонд визначення умов теплообміну

Відповідно до сучасного стану наукових відомостей про процес термічної взаємодії розпиленої рідини з високотемпературною поверхнею, єдино можливим в даний час методом визначення граничних умов теплообміну, що забезпечує достовірність результатів, є метод фізичного моделювання. Тому коректність вирішення завдань, поставлених та сформульованих вище у цій статті, насамперед визначається обґрунтованістю вибору методу експериментального визначення локальних умов теплообміну.

Аналіз можливих варіантів вирішення дозволив зробити вибір на користь методу ідентифікації граничних умов теплообміну шляхом вирішення оберненого завдання теплопровідності (ОЗТ) [11–16].

Як відомо, найдостовірніші результати при вирішенні ОЗТ можна отримати при одномірному температурному полі. Тому для дослідження теплообміну був сконструйований термозонд з матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності, бічна поверхня і один торець якого теплоізолювані, а охолодження здійснюється з поверхні другого торця (цю поверхню називатимемо робочою).

Очевидно, що правомірність припущення про одномірність температурного поля визначається не лише значенням коефіцієнта теплопровідності матеріалу термозонда та низькою інтенсивністю теплообміну на його бічній поверхні, а й ступенем зміни щільності зрошення в межах робочої поверхні термозонда.

Додатковою вимогою до форми термозонду і форми елементів, що входять до конструкції вимірювального блоку, повинна бути їх гранична простота. Виконання цієї вимоги дозволяє не тільки забезпечити більш точне рішення ОЗТ, але і більш точно оцінити розрахунковим шляхом можливі похибки у визначенні граничних умов, що шукаються, викликані відхиленням реальних особливостей теплообміну елементів конструкції термозонда від передбачуваних при розрахунковому відновленні коефіцієнтів тепловіддачі або щільності теплового потоку.

Попередні розрахунки показали, що за коефіцієнтів тепловіддачі, що досягають $30 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, швидкість падіння температури поверхні, що охолоджується розпиленою рідиною, може перевищувати 100 градусів в секунду. У зв'язку з цим, крім необхідності застосування малоінерційних датчиків температури, виникає необхідність використання сучасної швидкодіючої апаратури для вимірювання термоелектрорушійної сили (ТЕРС).

Представлені міркування з'явилися опорними даними: для розробки конструкції термозонда і вибору вторинної вимірювальної апаратури; у формуванні методики проведення дослідів; і обробці їх результатів.

Розроблений стосовно поставленої задачі термозонд і допоміжні елементи, необхідні для організації експерименту, показані на рис. 1.

Стрижень термозонда 2 сконструйований із двох напівциліндричних елементів, які необхідно виготовити з електролітичної міді. В одному з елементів, до складання, в строго координованих точках за допомогою срібного припою будуть зафіксовані три хромель-алюмелеві термоприймачі 5 з діаметром електродів 0,2 мм, один від одного ізолюваних термостійкою ізоляцією. За спеціально профрезерованими пазами термоприймачі повинні бути виведені з елемента вздовж ізотермічних поверхонь.

У другому напівциліндричному елементі, який ретельно притертий до поверхні першого, закладено два контрольні термоприймачі таким чином, як і в першому елементі, але в інших точках. Після збирання напівелементів вони утворюють єдине циліндричне тіло діаметром 30 мм та довжиною 50 мм. Елементи стрижня термозонда з'єднані за допомогою радіальних шворнів, які повинні бути виготовлені з такої ж електролітичної міді, що і стрижень, і запресовані гарячою посадкою з наступним приварюванням шворнями торців до зовнішньої поверхні елементів. Після збирання стрижня повинна проводитися остаточна механічна обробка його бічної поверхні, шліфування та хромування торця робочої поверхні.

Наведена конструкція стрижня термозонда дозволить з точністю до 0,1 мм встановити справжні координати спаїв термоприймачів, що, як відомо, є однією з основних умов, що визначають достовірність відновлення граничних умов теплообміну під час вирішення ОЗТ.

Стрижень термозонда 2 спеціальним пристроєм 18 в трьох точках за своїм колом прикріплений до корпусу 6. Ущільнюючим елементом служить кільце 3, яке повинно бути виготовлене з термостійкої пластмаси, товщиною 4 мм і стрижень, що з'єднує термозонд 2 з основною плитою 4. Корпус термозонда через фланцеве з'єднання закріплений в основній плиті, яка разом із поверхнею стрижня термозонда забезпечує реальні умови розтікання струменя рідини, що охолоджує.

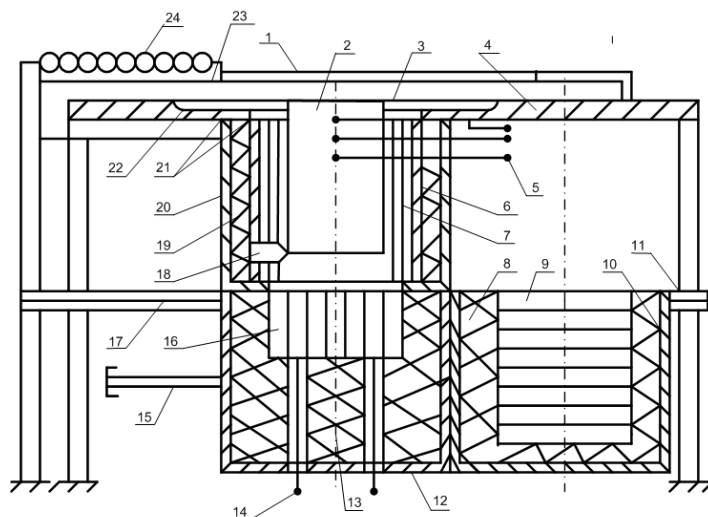


Рисунок 1 – Конструкція термозонду

Внутрішні 6 і 20 зовнішні корпусні елементи через фланцеве з'єднання закріплені в плиті 4.

Для зменшення теплових втрат через бічну поверхню стрижня термозонда встановлені екрани 7, які виконані з нержавіючої сталі IX18H9T товщиною 0,1 мм, а порожнину між внутрішнім корпусом 6 і 20 зовнішнім буде заповнено скловолокном 19.

Одним з недоліків в організації проведення експерименту, властивому великому числу методик, розглянутих раніше, є попереднє нагрівання зразків в печі з подальшим їх переміщенням в камеру зрошення. У цьому випадку неминуче виникає асиметрія вихідного теплового стану, тривалість періоду часткового зрошення поверхні, часті пошкодження термоприймачів. У зв'язку з цим, нагрівання стрижня термозонда здійснюватиметься нагрівачем зі стрічкового ніхрому 16, розташованому

безпосередньо під нижнім торцем стрижня. Корпус ніхромового нагрівача 12 закріплений на несучій плиті 11 за допомогою фланцевого з'єднання. Теплоізоляційним матеріалом між безпосередньо нагрівачем 16 і корпусом 12 служить азбоцементна маса 13, через яку проходять контакти нагрівача 14. Також на несучій плиті 11 закріплений корпус теплоізоляційної заглушки 10. Внутрішня частина заглушки складається з екранів 9, а порожнину між екранами 9 і корпусом 10 заповнено скловолокном 8.

Після того, як нагрівання стрижня термозонда до заданої температури завершено, за допомогою рукоятки 15 несуча плита 11 за направляючими 17 зсувається в сторону, і на місце корпусу 12 з нагрівачем 16 встановлюється корпус 10 з екранами 8. Це забезпечує надійну ізоляцію нижнього торця стрижня тепломіра в період проведення дослідів.

Після установки заглушки включається спусковий механізм і пружина 24 швидко зміщує штору 1, рідина, що розпилюється надходить на робочу поверхню термозонда 2.

Наступним етапом є розробка схеми вимірювання ТЕРС термоприймачів, встановлених у тілі стрижня термозонда 2.

Висновки. Була розроблена методика експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну і був сконструйований термозонд для визначення умов теплообміну, на якому будуть виконуватись дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню.

Література

1. Братута Э.Г., Мацевитый Ю.М., Мултановский А.В. Идентификация нестационарных граничных условий при поверхностном кипении недогретой жидкости. – Инж.-физ. Журнал, 1985, т. 49, № 3, С. 486–491.
2. Исаченко В.П., Кушнырев В.И. Струйное охлаждение. – М.: нергоатом издат, 1984. –216 с.
3. Переселков А.Р., Братута Э.Г. Теплообмен при охлаждении высокотемпературной поверхности струнй диспергированной жидкости. – В кн.: Энергетическое машиностроение. Вып. 38. – Респ. Межвед. Науч.-техн. Сборник. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984, С. 85–90.
4. Исаченко В.П., Сидорова И.К. Экспериментальное исследование охлаждения плоской вертикальной поверхности струей диспергированной жидкости. – Теплоэнергетика, 1982, №2, С. 30–33.
5. Диннер А. Обзор литературы по теплопередаче при стрйном охлаждении. М.: Черные металлы, 1976, №4, С. 26–29.
6. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Кравцов С.Ф. и др. Метод определения локальных условий теплообмена при спрейерном охлаждении. – Сталь, 1985, №4, С. 89–91.
7. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Кравцов С.Ф. и др. Критический тепловой поток при форсуночном охлаждении поверхности. Сб.Энергетическое машиностроение. – Харьков:, 1986, вып.31, С. 107–111.
8. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Кравцов С.Ф. и др. Экспериментальное сравнение пароводяного и воздушного охлаждения высокотемпературной поверхности. Сб. Интенсификация использования вторичных энергетических ресурсов и способов охлаждения агрегатов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1986, С. 23–27.
9. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Теббал М., Родионова Т.Ф. Распределение локальных расходов при спрейерном охлаждении поверхностей. - В кн.:

Энергетическое машиностроение. Вып. 36. – Респ. Межвед. Науч.-техн. Сборник. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1983, С. 111–117.

10. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Теббал М. Неаддитивность локальных плотностей орошения в зоне взаимодействия факелов щелевых форсунок. – В кн.: Энергетическое машиностроение. Вып. 37. – Респ. Межвед. Науч.-техн. Сборник. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984, С. 94–98.

11. Дождиков В.И., Горяинов В.А., Емельянов В.А. Математическое моделирование форсуночного охлаждения непрерывного слитка. – В сб.: Непрерывная разливка стали. – М.: Металлургия, 1978, № 5, С. 20–25.

12. Темкин А.Г. Обратные методы теплопроводности. – М.: Энергия, 1973. – 464с.

13. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. – С.: Машиностроение, 1979. – 216 с.

14. Мацевитый Ю.М., Мултановский А.В. Идентификация в задачах теплопроводности. – Киев: Наукова думка, 1982. – 240 с.

15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. – 599 с.

16. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976, т. 2. – 896 с.

Bibliography (transliterated)

1. Bratuta E.G., Matsevityiy Yu.M., Multanovskiy A.V. Identifikatsiya nestatsionarnyih granichnih rusloviy pri poverhnostnomkipenii nedogretoy zhidkosti. – Inzh.-fiz. Zhurnal, 1985, t. 49, # 3, P. 486–491.

2. Isachenko V.P., Kushnyirev V.I. Struynoe ohlazhdenie. – М.: nergoatom izdat, 1984. –216 p.

3. Pereselkov A.R., Bratuta E.G. Teploobmen pri ohlazhdenii vyisokotemperaturnoy poverhnosti struny dispergirovannoy zhidkosti. – V kn.: Energeticheskoe ma-shinostroenie. Vyip. 38. – Resp. Mezhved. Nauch.-tehn. Sbornik. – Harkov: Vischa shko-la. Izd-vo pri Hark. un-te, 1984, P. 85–90.

4. Isachenko V.P., Sidorova I.K. Eksperimentalnoe issledovanie ohlazhdeniya ploskoy vertikalnoy poverhnosti struey dispergirovannoy zhidkosti. – Teploener-getika, 1982, #2, P. 30–33.

5. Dinner A. Obzor literaturyi po teploperedache pri strynom ohlazhdenii. М.: Chernye metallyi, 1976, #4, P. 26–29.

6. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Kravtsov S.F. i dr. Metod opredeleniya lokalnyih usloviy teploobmena pri sprejernom ohlazhdenii. – Stal, 1985, #4, P. 89–91.

7. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Kravtsov S.F. i dr. Kriticheskii teplovoy potok pri for-sunochnom ohlazhdenii poverhnosti. Sb.Energeticheskoe mashinostroenie. – Harkov:, 1986, vyip.31, P. 107–111.

8. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Kravtsov S.F. i dr. Eksperimentalnoe sravne-nie pa-rovodyanogo i vozdushnogo ohlazhdeniya vyisokotemperaturnoy poverhnosti. Sb. Intensi-fikatsiya ispolzovaniya vtorichnyih energeticheskikh resursov i sposobov ohlazhdeniya agregatov v chernoy metallurgii. – М.: Metallurgiya, 1986, P. 23–27.

9. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Tebbal M., Rodionova T.F. Raspredelenie lo-kalnyih rashodov pri sprejernom ohlazhdenii poverhnostey. - V kn.: Energeticheskoe mashi-nostroenie. Vyip. 36. – Resp. Mezhved. Nauch.-tehn. Sbornik. – Harkov: Vischa shkola. Izd-vo pri Hark. un-te, 1983, P. 111–117.

10. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Tebbal M. Neadditivnost lokalnyih plotnostey oro-sheniya v zone vzaimodeystviya fakelov schelevyih forsunok. – V kn.: Energeticheskoe mashinostroenie. Vyip. 37. – Resp. Mezhved. Nauch.-tehn. Sbornik. – Harkov: Vi-scha shko-la. Izd-vo pri Hark. un-te, 1984, P. 94–98.

11. Dozhdikov V.I., Goryainov V.A., Emelyanov V.A. Matematicheskoe modelirovanie forsunochnogo ohlazhdeniya nepreryivnogo slitka. – V sb.: Nepreryivnaya razlivka stali. – M.: Metallurgiya, 1978, # 5, P. 20–25.
12. Temkin A.G. Obratnyie metodyi teploprovodnosti. – M.: Energiya, 1973. – 464 s.
13. Alifanov O.M. Identifikatsiya protsessov teploobmena letatelnyih appa-ratov. – S.: Mashinostroenie, 1979. – 216 p.
14. Matsevityiy Yu.M., Multanovskiy A.V. Identifikatsiya v zadachah teploprovodnosti. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 240 p.
15. Lyikov A.V. Teoriya teploprovodnosti. – M.-L.: GITTL, 1952. – 599 p.
16. Teplotekhnicheskii spravochnik / Pod red. V.N. Yureneva i P.D. Lebedeva. – M.: Energiya, 1976, t. 2. – 896 p.

УДК 621.016

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, К. О. Горбунов, к.техн.н., професор,
Т. В. Школьнікова, к.техн.н., доцент, І. В. Пільник, аспірант

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ УМОВ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Поставлене завдання дослідження умов теплообміну розпиленої рідини – води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин із високотемпературною поверхнею визначило низку завдань, які необхідно вирішити.

Два завдання: розробка засобів експериментального дослідження нестационарних локальних умов теплообміну високотемпературної поверхні з розпиленою рідиною з урахуванням можливості реалізації зміни рівня визначальних факторів у діапазоні відповідних їх реальних значень у натурних об'єктах енергетики та металургії та завдання вибору методу ідентифікації граничних умов теплообміну на наш погляд є головними.

Аналіз наукових публікацій та наші власні дослідження дозволили встановити, що центральним фактором, що впливає на локальні умови теплообміну, є локальна щільність зрошення, яка стала б одним із факторів для розробки ефективних систем охолодження, або для визначення теплового стану об'єкта при різних зовнішніх впливах.

Наступним завданням дослідження є дослідження інтенсивності теплообміну в функції недогріву розпиленої рідини - води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин при різних локальних щільностях зрошення і температурах поверхні.

Оскільки ми розглядаємо багатфакторну задачу, то сучасні вимоги теорії планування експерименту дали можливість розробити методику експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну, що дозволить нам провести дослідження граничних умов теплообміну в функції взаємопов'язаного впливу щільності зрошення, температури поверхні, швидкості і кута натікання розпиленої рідини на поверхню.

Розроблена методика проведення вимірювань дозволить нам отримати достовірні результати досліджень.

Вирішення зворотного завдання теплопровідності дозволить встановити ступінь впливу практично всіх факторів, зазначених як визначальні. Очевидно, що при цьому вивчення граничних умов теплообміну функції швидкості руху високотемпературної поверхні виливається у велике самостійне завдання.

Ключові слова: засоби експериментального дослідження, нестационарні локальні умови теплообміну, високотемпературна поверхня, розпилена рідина, плівковий та бульбашковий режим кипіння, ефективні системи охолодження, багатofакторний характер досліджуваного процесу, метод ідентифікації умов теплообміну, узагальнені залежності.

Уц. А. Selikhov, К. О. Gorbunov, Т. V. Shkolnikova, І. V. Pilnyk

METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDY OF LOCAL CONDITIONS OF NON-STATIONARY HEAT TRANSFER

The task of studying the conditions of heat exchange of a sprayed liquid – water with different concentrations of surfactants with a high-temperature surface has defined a number of problems that need to be solved.

Two tasks: development of means for experimental study of non-stationary local conditions of heat exchange of a high-temperature surface with a sprayed liquid, taking into account the possibility of implementing a change in the level of determining factors in the range corresponding to their real values in full-scale energy and metallurgy facilities, and the task of choosing a method for identifying the boundary conditions of heat exchange, from our point of view, are the main ones.

Analysis of scientific publications and our own research have allowed us to establish that the central factor influencing local heat exchange conditions is the local irrigation density, which would be one of the factors for developing effective cooling systems, or for determining the thermal state of an object under various external influences.

The next objective of the study is to investigate the intensity of heat exchange as a function of underheating of the sprayed liquid – water with different concentrations of surfactants at different local irrigation densities and surface temperatures.

Since we are considering a multifactorial problem, modern requirements of the theory of experimental planning have made it possible to develop a methodology for experimental study of local conditions of non-stationary heat exchange, which will allow us to conduct a study of the boundary conditions of heat exchange as a function of the interrelated influence of the irrigation density, surface temperature, velocity and angle of impingement of the sprayed liquid onto the surface.

The measurement technique we have developed will allow us to obtain reliable research results.

Solving the inverse problem of heat conduction will allow us to establish the degree of influence of almost all factors noted as determining. It is obvious that in this case, studying the boundary conditions of heat exchange as a function of the speed of movement of a high-temperature surface results in a large independent problem.

Keywords: means of experimental research, non-stationary local conditions of heat exchange, high-temperature surface, sprayed liquid, film and bubble boiling regime, effective cooling systems, multifactorial nature of the process under study, method of identifying heat exchange conditions, generalized dependencies.

А. К. Бабіченко, к. техн. наук, професор, І. Л. Красніков, к. техн. наук, професор,
Я. О. Кравченко, PhD, доцент, С. Д. Деменкова, ст. викладач

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: вимірювальний комплект, технологічний регламент, точність вимірювання, метрологічні параметри, об'єкт керування.

Вступ

Технологічні регламенти для виробництва продукції в частині метрологічних вимог призначені для персоналу служб контрольно-вимірювальних приладів і автоматизації, які як правило також приймають участь у їх розробці [1, 2]. При цьому норми і показники контролюємих технологічних параметрів можуть бути представлені двома способами: номінальним значенням з межево-припустимими відхиленнями або діапазоном припустимих значень параметра [3, 4]. Номінальне значення технологічного параметра – це приписане (оголошене) значення технологічного параметра, за якого передбачається ведення технологічного процесу з найбільшою ефективністю. Межево-припустимі відхилення від номінального значення – це межі відхилень від номінального значення, усередині яких припустимо вести технологічний процес з достатньою ефективністю. Отже розділ щодо контролю виробництва та керування технологічного процесу є однією з найважливіших частин технологічного регламенту [5]. Окрема задача цього розділу є метрологічна, що забезпечує підбір засобів вимірювання згідно вимог до перелічених вище норм та показників контролюємих параметрів. Найбільша складність такого підбору виникає при контролі параметра технологічного процесу за допомогою вимірювального комплексу у складі датчика (первинний перетворювач), можливого проміжного перетворювача та вторинного приладу. За таких обставин забезпечення потрібної точності дещо ускладнюється, а процес її досягнення пов'язаний з аналізом та визначенням певних технологічних способів [6].

Мета роботи

Дослідити процес забезпечення точності контролю параметра вимірювальними комплектами згідно вимог технологічного регламенту та визначити ефективність пропонуємих способів її досягнення.

Результати досліджень

При застосуванні вимірювального комплексу необхідно враховувати усі прилади, що входять до його складу, із зазначенням найменування і типу, діапазону вимірювання, класу точності та інших метрологічних характеристик. За таких обставин похибка вимірювання буде залежати від похибки усіх складових, що утворюють цей комплект вимірювання технологічного параметру. При цьому припустимо

використання тільки атестованих засобів вимірювання. Згідно регламентованого стандарту [7,8] визначення загальної похибки вимірювання здійснюється у передбаченні, що найбільш ймовірним значенням параметру є лише один результат вимірювань, а складовими похибки результату вимірювання є абсолютні основна та додаткова похибки (невиключені систематичні) засобу вимірювання, які обчислюються за даними наведеними у нормативно-технічній документації (НТД) на прилад. Сумарна похибка вимірювального комплексу [5, 9], визначається величиною середньоквадратичного відхилення σ за формулою:

$$\sigma = \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_i^2}, \quad (1)$$

де 1,1 – коефіцієнт, що визначається ймовірністю $P=0,95$ попадання похибки у заданий довірчий інтервал; Δ_i – основна, додаткова та інші можливі похибки складових вимірювального комплексу; m – кількість складових похибок засобів вимірювання.

Розрахунок похибки вимірювання технологічного параметра розпочинають з аналізу складових похибок засобів вимірювання, що утворюють комплект. У загальному випадку складовими є основні та додаткові похибки засобів вимірювання, що входять у вимірювальний ланцюг, методична похибка і похибка зчитування. Останні дві як правило не враховуються. Після цього визначають границі кожної похибки. Основна похибка, як правило, визначається класом точності засобу вимірювання. При цьому клас точності для різних засобів вимірювання може бути вираженим у формі абсолютних, відносних чи наведених похибок і для розрахунку похибки контролю слід обирати основну похибку у точці з номінальним або тим межовим значенням, за якого похибка максимальна.

Найчастіше припустиме за нормою технологічного регламенту відхилення показань від номінального в процесі вимірювання задається наступним виразом:

$$(X \pm \Delta), \quad (2)$$

де X – номінальне значення параметра згідно технологічного регламенту; Δ – абсолютна похибка вимірювального комплексу (довірчий інтервал згідно регламенту).

Згідно правила трьох сигм (3 σ) абсолютна похибка не може перевищувати її величини. Тому після визначення величини середньоквадратичної похибки вимірювального комплексу перевіряється умова [5, 10]:

$$\sigma \leq \Delta/3. \quad (3)$$

Виконання цієї умови свідчить, що обрані засоби вимірювального комплексу з їх нормованими метрологічними показниками відповідають вимогам технологічного регламенту. У протилежному випадку мають бути розроблені способи щодо підвищення точності вимірювання параметра X . Серед цих способів, як правило застосовують наступні: обрання засобів вимірювання з більш високим класом точності; зменшення діапазону вимірювання; усунення умов, що впливають на підвищення додаткових похибок. Ефективність від застосування перелічених способів може бути досліджена на розглянутих нижче прикладах.

Приклад 1. (Базовий варіант №1) Необхідно оцінити сумарну похибку вимірювання температури газової суміші на виході трубчастої печі виробництва аміаку комплексу, що складається з термопар типу ТХА-0188 класу допуску 2 та вторинного приладу Диск-250 (модифікація 3111) класу точності 0,5 зі шкалою 400–1000 °С. Припустимо відхилення показань приладу від номінального значення згідно регламенту складає (700 ± 12) °С. При цьому згідно НТД на вторинний прилад [11] похибка, що викликана зміною температури навколишнього середовища Θ_p від 20 °С до верхнього (нижнього) робочого значення не перевищує величини $\gamma_\Theta = 0,015(\Theta_p - 20)$. Температура навколишнього середовища Θ_p для умов експлуатації вторинного приладу складає 30 °С. Похибка вторинного приладу, що обумовлена зміною напруги живлення від номінальної не перевищує половини абсолютного значення меж припустимої похибки, похибка, що викликана впливом зовнішнього магнітного поля за самих не сприятливих умов не перевищує абсолютного значення межі основної похибки. За відсутності методичних похибок необхідно зробити висновок щодо правильності вибору вимірювального комплексу з вищенаведеним довірчим інтервалом згідно регламенту. У випадку невідповідності розробити заходи для підвищення точності вимірювання до норми технологічного регламенту.

Визначення складових похибок вимірювання для такого комплексу здійснюється у наступній послідовності.

Межа основної похибки вторинного приладу Δ_1 у відповідності з його класом точності γ визначається за рівнянням:

$$\Delta_1 = \frac{\gamma \cdot X_N}{100}, \quad (4)$$

де X_N – нормоване значення шкали вторинного приладу.

Межі додаткових похибок вторинного приладу, що викликані впливом температури навколишнього середовища Δ_2 , зовнішнього магнітного поля Δ_3 та внаслідок коливання напруги живлення Δ_4 обчислюються за формулами:

$$\Delta_2 = \frac{\gamma_\Theta \cdot X_N}{100}; \quad (5)$$

$$\Delta_3 = \pm \Delta_1; \quad (6)$$

$$\Delta_4 = \frac{\Delta_1}{2}. \quad (7)$$

Межа основної похибки Δ_5 термоелектричного перетворювача визначається рівнянням [12]:

$$\Delta_5 = 0,0075\Theta, \quad (8)$$

де Θ – номінальне значення температури згідно регламенту, °С.

Приклад 2 (Базовий варіант №1). Необхідно оцінити сумарну похибку вимірювання рідкого аміаку у ресивері конденсатора холодильної установки під тиском $P=1,58$ МПа комплектом, що містить буйковий рівнемір типу «Сапфір-22ДУ» моделі 2640 з припустимою основною похибкою $\gamma_{\Pi} = \pm 1\%$ у відсотках від верхньої межі вимірювання та вторинного приладу типу РП-160-01 класу точності 0,5 із шкалою 0÷2

м. Припустимо відхилення показань приладу від номінального значення згідно регламенту складає $(1 \pm 0,21)$ м. Згідно НТД на вторинний прилад [11] похибка, що викликана зміною температури навколишнього середовища Θ_P від 20°C до верхнього (нижнього) робочого значення не перевищує величини $\gamma_{\Theta 1}=0,025(\Theta_P-20)$. Температура Θ_P навколишнього середовища для умов експлуатації вторинного приладу та датчика рівня складає 30°C . Зміна похибки, що викликана зовнішнім магнітним полем не перевищує $\pm 0,5\%$ від нормованого значення. Згідно НТД на «Сапфір-22ДУ» [12] похибка вимірювання в умовах зміни температури навколишнього повітря не перевищує на кожні 10°C величини $\gamma_{\Theta 2}=(0,42+0,18\rho_{\max}/\rho_1)$. Для цієї моделі рівнеміра $\rho_{\max}=2000\text{ кг/м}^3$, а $\rho_1=580\text{ кг/м}^3$ для аміаку, рівень якого підлягає вимірюванню. Зміна значення вихідного сигналу, викликане зміною робочого тиску у діапазоні від нуля до межево припустимого і навпаки, що має відбиття у відсотках від зміни вихідного сигналу, не повинно перевищувати значення $\gamma_P=(0,4+0,5\rho_{\max}/\rho_1)$. При цьому межево припустима похибка γ_B , що викликана впливом вібрації не перевищує 2% для перетворювачів, що настроєні на густину рідини до 800 кг/м^3 . За відсутності методичних похибок зробити висновок щодо правильності вибору вимірювального комплексу. Також у разі невідповідності із заданим довірчим інтервалом розробити заходи для підвищення точності вимірювання рівня аміаку до норми технологічного регламенту.

Визначення складових похибок вимірювання здійснюється у такій послідовності.

Межа основної похибки вторинного приладу Δ_1 та загальної похибки буйкового рівнеміра Δ_5 у відповідності з їх класами точності γ визначається рівнянням (4). При цьому загальна похибка γ перетворювача рівня згідно стандарту розраховується за формулою [12]:

$$\gamma = \left[\gamma_{\Pi} + 0,1\gamma_{\Theta_2} (\Theta_P - 23) + \gamma_P \left(\frac{P}{6,3} \right) + \gamma_B \right], \quad (9)$$

де $P=1,6\text{ МПа}$ – найбільший тиск у ресивері конденсатора.

Межі додаткових похибок вторинного приладу, що викликані впливом навколишнього середовища Δ_2 та зовнішнього магнітного поля Δ_3 , обчислюються за рівняннями:

$$\Delta_2 = \gamma_{\Theta_1} \cdot X_N / 100; \quad (10)$$

$$\Delta_3 = 0,5X_N / 100. \quad (11)$$

Додаткова похибка внаслідок коливання напруги живлення не нормується для цього вторинного приладу, тобто $\Delta_4=0$.

Вплив способів забезпечення точності вимірювання оцінювався коефіцієнтом ефективності K за наступним співвідношенням:

$$K = \frac{(\sigma_1 - \sigma_n)}{\sigma_1}. \quad (12)$$

Результати розрахунків за формулами (1,4–12) та перевірки умови (3) щодо відповідності обраних комплектів вимогам технологічного регламенту, а також досліджень для забезпечення умови (3) для вищенаведених прикладів зведені до табл. 1 і 2.

Таблиця 1 – Результати розрахунків та досліджень щодо визначення похибок вимірювального комплекту температури

Похибки основні та додаткові вимірювального комплекту Δ , °C	Варіанти наближення до норми довірчого інтервалу згідно вимог технологічного регламенту, п				
	№1	№2	№3	№4	№5
Основна похибка вторинного приладу Δ_1	± 3	± 3	± 3	$\pm 1,5$	± 2
Додаткова похибка вторинного приладу:					
Δ_2	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$	$\pm 0,6$
Δ_3	± 3	± 3	± 3	$\pm 1,5$	± 2
Δ_4	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 0,75$	± 1
Основна похибка датчика Δ_5	$\pm 5,25$	$\pm 2,8$	± 1	$\pm 5,25$	$\pm 1,75$
Загальна похибка комплекту, σ	$\pm 8,42$	$\pm 5,91$	$\pm 5,16$	$\pm 6,36$	$\pm 3,87$
Перевірка виконання умови (3)	$8,42 > 4$	$5,91 > 4$	$5,16 > 4$	$6,36 > 4$	$3,87 < 4$
Параметрична чутливість С	-	0,29	0,38	0,24	0,54

Таблиця 2 – Результати розрахунків та досліджень щодо визначення похибок вимірювального комплекту рівня

Похибки основні та додаткові вимірювального комплекту Δ_i , м	Варіанти наближення до норми довірчого інтервалу згідно вимог технологічного регламенту, п				
	№1	№2	№3	№4	№5
Основна похибка вторинного приладу Δ_1	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,008$	$\pm 0,01$	$\pm 0,004$
Додаткова похибка вторинного приладу:					
Δ_2	$\pm 0,005$	$\pm 0,005$	$\pm 0,004$	$\pm 0,005$	$\pm 0,004$
Δ_3	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,008$	$\pm 0,01$	$\pm 0,004$
Загальна похибка датчика Δ_5	$\pm 0,085$	$\pm 0,068$	$\pm 0,085$	$\pm 0,075$	$\pm 0,06$
Загальна похибка комплекту, σ	$\pm 0,095$	$\pm 0,077$	$\pm 0,094$	$\pm 0,084$	$\pm 0,067$
Перевірка виконання умови (3)	$0,095 > 0,07$	$0,077 > 0,07$	$0,094 > 0,07$	$0,084 > 0,07$	$0,067 < 0,07$
Коефіцієнт ефективності К	-	0,189	0,011	0,125	0,302

При цьому у табл. 1 у порівнянні з базовим варіантом відмінність наведених варіантів полягає у наступному: варіант №2 (термопара ТХА класу допуску 1) варіант №3 (термопара ТПП класу допуску 1), варіант №4 (вторинний прилад Альфалог-100 класу точності 0,25), варіант №5 (термопара ТПП класу допуску 2 і вторинний прилад Диск-250 з діапазоном вимірювання $600 \div 1000^{\circ}\text{C}$). У табл. 2 представлені варіанти у порівнянні з базовим варіантом забезпечуються відмінністю наступних складових: варіант №2 (перетворювач «Сапфір-22ДУ» з діапазоном вимірювання $0 \div 1,6$ м), варіант №3 (вторинний прилад РП-160 з діапазоном вимірювання $0 \div 1,6$ м), варіант №4 (перетворювач «Сапфір-22ДУ» класу точності 0,5), варіант №5 (перетворювач «Сапфір-22ДУ» класу точності 0,5 з діапазоном вимірювання $0 \div 1,6$ м, вторинний прилад Альфалог-100 класу точності 0,25 зі шкалою $0 \div 1,6$ м).

Аналіз результатів досліджень щодо можливості підвищення точності вимірювання комплектів за різних способів, наведених у табл. 1 і 2, свідчить, що найбільший вплив на точність забезпечується за рахунок заміни у їх складі первинних перетворювачів. Такий висновок підтверджується коефіцієнтами ефективності. При цьому заміна термopар з більш високим класом допуску (варіант №3, табл. 1) обумовлює коефіцієнт ефективності 0,38 у порівнянні з коефіцієнтом 0,248 у випадку заміни вторинного приладу з підвищеним класом точності (варіант №4, табл. 1). Ідентичний висновок спостерігається і у випадку зменшення діапазону вимірювання первинного перетворювача у порівнянні з діапазоном шкали вторинного приладу, що підтверджується коефіцієнтом ефективності 0,189 (варіант №2, табл. 2) і 0,011 (варіант №3, табл. 2). За таких обставин в першу чергу у випадку необхідності підвищення точності вимірювального комплекту слід розпочинати з первинного перетворювача, обираючи його або з більш низькою межею припустимої основної похибки або з меншим діапазоном вимірювання.

Висновки

Представлені результати досліджень щодо забезпечення точності контролю параметрів вимірювальним комплектом згідно вимог технологічних регламентів з метою визначення ефективності запропонованих способів її досягнення. Серед цих способів, як правило, застосовують такі як обрання засобів вимірювання з більш високим класом точності, зменшення діапазону вимірювання та усунення по можливості умов, що впливають на збільшення додаткових похибок. На конкретних прикладах доведено, що найбільша ефективність у підвищенні точності вимірювання технологічного параметру забезпечується способом, який передбачає збільшення точності вимірювання первинного перетворювача або зменшення його діапазону вимірювання.

Література

1. Положення про технологічні регламенти для виробництва продукції на підприємствах (в організаціях) хімічної промисловості. Керівний нормативний документ КНД 6-001-2000.

2. Метрологія. Типове положення про відомчі метрологічні служби. Р50-060-95. – К.: Держстандарт України, 1998.
3. Цюцюра С. В., Цюцюра В. Д. Метрологія, основи вимірювань, стандартизація та сертифікація: навч. посіб. – К.: Знання, 2006. – 242 с.
4. International vocabulary of metrology. Fourth edition. Joint Committee on Guides for Metrology (JCGM), 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/54295284/VIM4_CD_210111c.pdf
5. Метрологічні вимоги до технологічних регламентів: методичні вказівки МУ №28-95. – Северодонецьк, 1995. – 30 с.
6. Raghavendra, N.V. Engineering metrology and measurements. Oxford University Press, 2013. 526 p.
7. Основи вимірювань і автоматизації технологічних процесів: підручник / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, Ю.А. Бабіченко та ін.; за ред. А.К. Бабіченка. – Харків: Вид-во ТОВ «С.А.М.», 2009. – 616 с.
8. Основи метрології та вимірювальної техніки. Навчальний посібник / За заг. ред. Н.А. Яремчук. – К: Видавництво «Політехніка», 2012. – 266 с.
9. Збірник задач з метрології та основ вимірювань: навч. посіб. / А.К. Бабіченко, І.Л. Красніков, В.І. Вельма та ін.; за ред. А.К. Бабіченка. – Харків: Друкарня Мадрид, 2021. – 93 с.
10. Поліщук Є.С. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник - М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т "Львівська політехніка"; 2-е вид., доп. та перероб. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 544 с.
11. Промислові засоби автоматизації. Ч. 2. Регулюючі і виконавчі пристрої: навч. посіб. / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський, М.О. Подустов та ін.; за ред. А.К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 658 с.
12. Промислові засоби автоматизації. Ч. 1. Вимірювальні пристрої: навч. посіб. / А. К. Бабіченко, В. І. Тошинський, М. О. Подустов та ін.; за ред. А. К. Бабіченка. – Харків: НТУ «ХПІ», 2001. – 470 с.

Bibliography (transliterated)

1. Polozhennia pro tekhnolohichni rehlementy dlia vyrobnytstva produktsii na pidpriemstvakh (v orhanizatsiiakh) khimichnoi promyslovosti. Kerivnyi normatyvnyi dokument KND 6-001-2000.
2. Metrolohiia. Typove polozhennia pro vidomchi metrolohiichni sluzhby. R50-060-95. – К.: Derzhstandart Ukrainy, 1998.
3. Tsiutsiura S. V., Tsiutsiura V. D. Metrolohiia, osnovy vymiriuvan, standartyzatsiia ta sertyfikatsiia: navch. posib. – К.: Znannia, 2006. – 242 p.
4. International vocabulary of metrology. Fourth edition. Joint Committee on Guides for Metrology (JCGM), 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/54295284/VIM4_CD_210111c.pdf.
5. Metrolohiichni vymohy do tekhnolohichnykh rehlementiv: metodychni vkazivky MU №28-95. – Severodonetsk, 1995. – 30 p.

6. Raghavendra, N.V. Engineering metrology and measurements. Oxford University Press, 2013. 526 p.
7. Osnovy vymiriuvan i avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv: pidruchnyk / A. K. Babichenko, V. I. Toshynskiy, Yu. A. Babichenko ta in.; za red. A. K. Babichenka. – Kharkiv: Vyd-vo TOV «S.A.M.», 2009. – 616 p.
8. Osnovy metrolohii ta vymiriuvalnoi tekhniki. Navchalnyi pidruchnyk / Za zah. red. N.A. Yaremchuk. – K: Vydavnytstvo «Politekhnik», 2012. – 266 p.
9. Zbirnyk zadach z metrolohii ta osnov vymiriuvan: navch. posib. / A. K. Babichenko, I. L. Krasnikov, V. I. Velma ta in.; za red. A. K. Babichenka. – Kharkiv: Drukarnia Madryd, 2021. – 93 p.
10. Polishchuk Ye.S. ta in. Metrolohii ta vymiriuvalna tekhnika: pidruchnyk - M-vo osvity i nauky, molodi ta sportu Ukrainy, Nats. un-t "Lvivska politekhnik"; 2-e vyd., dop. ta pererob. Lviv : Vyd-vo Lvivskoi politekhniky, 2012. – 544 p.
11. Promyslovi zasoby avtomatyzatsii. Ch. 2. Rehuliuichi i vykonavchi prystroi: navch. posib. / A. K. Babichenko, V. I. Toshynskiy, M. O. Podustov ta in.; za red. A. K. Babichenka. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2003. – 658 p.
12. Promyslovi zasoby avtomatyzatsii. Ch. 1. Vymiriuvalni prystroi: navch. posib. / A. K. Babichenko, V. I. Toshynskiy, M. O. Podustov ta in.; za red. A. K. Babichenka. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2001. – 470 p.

A. K. Бабіченко, к. техн. наук, професор, І. Л. Красніков, к. техн. наук, професор,
Я. О. Кравченко, PhD, доцент, С. Д. Деменкова, ст. викладач

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Встановлені норми і показники контролюємих параметрів технологічних процесів, представлення яких найчастіше забезпечується номінальним значенням з межево-припустимим відхиленням (довірчим інтервалом). Показано, що розділ контролю виробництва та керування процесу є одним з найважливіших частин технологічного регламенту. Окрема задача цього розділу суто метрологічна, що забезпечує підбір засобів вимірювання згідно вимог до перелічених вище показників та норм контролюємих параметрів. Відзначено, що найбільша складність такого підбору виникає при контролі технологічного параметру процесу із застосуванням вимірювального комплексу у складі первинного перетворювача, можливого проміжного перетворювача та вторинного приладу. При цьому згідно регламентованого стандарту визначення загальної похибки вимірювання за таких обставин здійснюється у передбачені, що найбільш ймовірним значенням параметру є лише один результат вимірювання, а складовими похибки результату вимірювання є абсолютні основна і додаткові (невиключені систематичні) похибки засобів вимірювання. Наведені рекомендації щодо обрання основної похибки, а саме у точці з номінальним або з тим межовим значенням, за якого похибка максимальна. Сформульована умова, за якої обрані засоби вимірювального комплексу з їх нормованими метрологічними характеристиками мають відповідати вимогам

технологічного регламенту. На конкретних прикладах досліджено ефективність різних методів підвищення точності вимірювань деяких технологічних параметрів, включаючи розрахунок коефіцієнта ефективності їх застосування. Це включає аналіз впливу як основних, так і додаткових похибок, що виникають під час вимірювань. Похибки розраховувалися на основі даних, наведених у нормативно-технічній документації на відповідні прилади, що дозволило точно оцінити їх вплив на загальну точність вимірювань. Доведено, що найбільша ефективність у підвищенні точності вимірювання технологічного параметра забезпечується за рахунок збільшення точності вимірювання первинного перетворювача або зниження його діапазону вимірювання.

Ключові слова: вимірювальний комплект, технологічний регламент, точність вимірювання, метрологічні параметри, об'єкт керування.

A. K. Babichenko, I. L. Krasnikov, Y. O. Kravchenko, S. D. Demenkova

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE CONTROLLED OBJECT

The norms and indicators of controlled parameters of technological processes are established, which are most often represented by a nominal value with a maximum permissible deviation (confidence interval). It is shown that the section on production control and process management is one of the most important parts of the technological regulations. A separate task of this section is purely metrological, which ensures the selection of measuring instruments in accordance with the requirements for the above indicators and norms of the controlled parameters. It is noted that the greatest difficulty in such selection arises when controlling a process parameter using a measuring set consisting of a primary converter, a possible intermediate converter and a secondary instrument. At the same time, according to the regulated standard, the determination of the total measurement error in such circumstances is carried out in the assumption that the most probable value of the parameter is only one measurement result, and the components of the measurement result error are the absolute basic and additional (non-excluded systematic) errors of the measuring instruments. Recommendations are given on the choice of the main error, namely, at the point with the nominal or the limit value at which the error is maximum. A condition is formulated under which the selected measuring instruments with their standardised metrological characteristics must meet the requirements of the technological regulations. The effectiveness of various methods of improving the accuracy of measurements of some technological parameters is investigated on specific examples, including the calculation of the efficiency factor of their application. This includes an analysis of the impact of both basic and additional errors that occur during measurements. The errors were calculated on the basis of the data provided in the regulatory and technical documentation for the relevant devices, which made it possible to accurately assess their impact on the overall measurement accuracy. It is proved that the greatest efficiency in improving the measurement accuracy of a process parameter is provided by increasing the measurement accuracy of the primary converter or reducing its measurement range.

Keywords: measuring set, technological regulation, measurement accuracy, metrological parameters, control object.

Г. А. Крутіков, д.т.н., професор, Д. Ю. Бородін, к.техн.н., доцент

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІННИХ СТАНУ ДИСКРЕТНОГО ПНЕВМОПРИВОДУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СІЧНИХ ПРИ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Ключові слова: математична модель, лінеаризація, критерії динамічної подоби пневмоприводу, метод січних, змінні стану дискретного пневмоприводу.

Математична модель дискретного (розімкнутого) пневмоприводу (рис. 1) є системою нелінійних диференціальних рівнянь, яку прийнято вирішувати чисельним методом [2, 4, 10]:

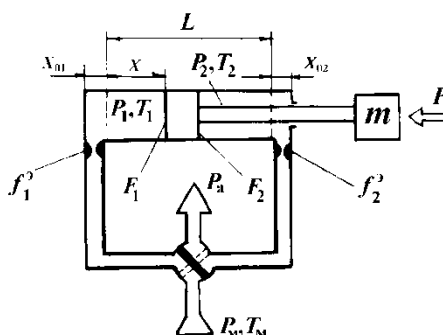


Рисунок 1 – Розрахункова схема ПП

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k f_1^3 p_M \sqrt{k R T_M} \varphi\left(\frac{p_1}{p_M}\right)}{F_1(x_{01} + x)} - \frac{k p_1}{x_{01} + x} \cdot \frac{dx}{dt}; \\ \frac{dp_2}{dt} &= - \frac{k f_2^3 p_2^{\frac{3k-1}{2k}} \sqrt{k R T_M} \varphi\left(\frac{p_a}{p_2}\right)}{F_2(L - x + x_{02}) p_M^{\frac{k-1}{2k}}} + \frac{k p_2}{L - x + x_{02}} \cdot \frac{dx}{dt}; \\ \frac{dx}{dt} &= v; \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{m} (p_1 F_1 - p_2 F_2 - P), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\text{де } \varphi(\sigma) = \begin{cases} 0,579 & \text{при } \sigma < 0,528 \\ \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}} \right)} & \text{при } \sigma > 0,528 \end{cases}$$

Під час розгляду слідкуючих гідропневоприводів часто використовують лінеаризовані математичні моделі, одержувані шляхом заміни реальних нелінійних

залежностей першими членами їх розкладання до ряду Тейлора [1]. Використання гіпотези малого відхилення змінних у такому випадку цілком припустимо, тому що через наявність зворотного зв'язку відхилення реальних величин у фізичній моделі від значень, що встановилися, як правило, незначні. При розгляді дискретних (розімкнутих) пневмоприводів (ПП) цей підхід призводить до дуже великих похибок, так як при спрацюванні такого ПП тиск в порожнинах циліндра, швидкість і положення поршня змінюються в широких межах.

Перейдемо до безрозмірної форми запису рівнянь (1) виходячи з принципу мінімізації незалежних параметрів, визначальних характер перехідного процесу (2) [2,6,12].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k}{\xi_{01} + \xi} \left[\varphi(\sigma_1) - \sigma_1 \frac{d\xi}{d\tau} \right] \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} = \frac{k}{\xi_{02} + 1 - \xi} \left[\frac{\Omega \sigma_2^{\frac{3k-1}{2k}} \varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right)}{\Pi_{21}^F} - \sigma_2 \frac{d\xi}{d\tau} \right] \\ \frac{d^2\xi}{d\tau^2} = \frac{1}{\beta} (\sigma_1 - \Pi_{21}^F \sigma_2 - \chi) \end{array} \right. \quad (2)$$

де $\sigma_1 = p_1/p_m$; $\sigma_2 = p_2/p_m$; $\xi = x/L$ – безрозмірний тиск і переміщення поршня;
 $\Pi_{21}^F = \frac{F_2}{F_1}$; $\tau = t/t_6$ – безрозмірний час; $t_6 = \frac{F_1 \cdot L}{f_1^3 \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot T_m}}$.

Базова одиниця часу t_6 , як видно з виразу, чисельно дорівнює часу заповнення робочого об'єму пневмоциліндра $F_1 \cdot L$ середовищем, що рухається зі швидкістю звуку $a_m = \sqrt{kRT_m}$ через отвір, що дорівнює ефективній площі впускного тракту f_1^3 .

Внаслідок нормування отримуємо систему безрозмірних рівнянь (2). Після нормування в якості незалежних замість 10-ти параметрів у моделі (1) залишаються 4 параметри $\chi, \Omega, \beta, \Pi_{21}^F$. Основними критеріями динамічної подібності є перші три параметри [3, 4, 5]:

1) $\chi = P/(p_m \cdot F_1)$ – відносне статичне навантаження; 2) $\Omega = f_2^3 / f_1^3$ – відносна ефективна площа вихлопного тракту; 3) $\beta = \frac{m \cdot L}{t_6^2 \cdot F_1 \cdot p_m}$ – критерій інерційності (безрозмірна маса), чисельно рівний відношенню сили інерції при базовому прискоренні $\frac{L}{t_6^2}$ до максимальної (індикаторної) сили, що розвивається поршнем.

2.5.1. Вибір раціонального способу лінеаризації нелінійних залежностей у математичній моделі пневмопривода.

Лінеаризації насамперед підлягають нелінійні функції у правих частинах перших двох рівнянь системи (2) $\varphi(\sigma_1)$ и $\psi(\sigma_2) = \sigma_2^{\frac{3k-1}{2k}} \varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right)$

При зміні в широкому діапазоні відносних тисків σ_1 і σ_2 видаткові функції $\varphi(\sigma_1)$ і $\psi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right)$ доцільно замінювати не дотичними, а січними. (рис. 2, 3).

$$\begin{aligned}\bar{\varphi} &= \alpha_1 \sigma_1 + \beta_1; \\ \bar{\psi} &= \alpha_2 \sigma_2 + \beta_2.\end{aligned}\quad (3)$$

При визначенні оптимальних значень коефіцієнтів α і β було закладено два принципи. Перший принцип полягає у дотриманні рівності інтегральних оцінок реальної функціональної залежності та її апроксимації. При цьому середня помилка витрати в робочому діапазоні зміни параметра σ дорівнює нулю.

Наприклад, для першої січної (3) значення α_1 і β_1 можна визначити з наступної рівності:

$$\int_{\sigma_H}^{\sigma_K} \Delta d\sigma_1 = 0, \quad (4)$$

де $\Delta = \varphi(\sigma_1) - (\alpha_1 \sigma_1 + \beta_1)$ – помилка щодо витрати.

У зв'язку з громіздкістю витратної функції $\varphi(\sigma_1)$ її можна замінити більш простим виразом на основі спрощеної формули для масової витрати [6, 8].

$$G = \mu f p_m \sqrt{\frac{2}{RT_1}} \sqrt{\sigma_1 (1 - \sigma_1)}; \quad (5)$$

$$\varphi(\sigma_1) = \sqrt{\frac{2}{k-1}} (\sigma_1^{2/k} - \sigma_1^{k+1/k}) \approx \varphi^*(\sigma_1) = \sqrt{\frac{2}{k}} \sqrt{\sigma_1 - \sigma_1^2}. \quad (6)$$

Вираз, що стоїть у правій частині (6) є рівнянням кола з центром з координатами (0,5; 0) (рис. 2)

$$\begin{aligned}(\sigma_1 - 0,5)^2 + y^2 &= 0,25; \\ y &= \sqrt{0,25 - (\sigma^2 - \sigma + 0,25)} = \sqrt{\sigma - \sigma^2}.\end{aligned}\quad (7)$$

Максимальна помилка від спрощення формули (5) становить 3,4% [6, 8]. Надкритичний режим у разі буде при $\sigma_1 = 0 \div 0,5$.

$$\int_{0,528}^1 \varphi(\sigma) d\sigma \approx \sqrt{\frac{2}{k}} \int_{0,5}^1 \sqrt{\sigma - \sigma^2} d\sigma = 0,234. \quad (8)$$

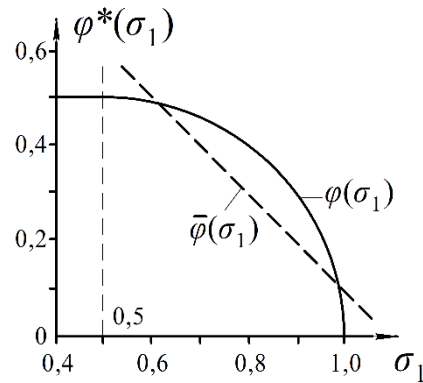


Рисунок 2 – Залежність $\varphi(\sigma_1)$ при докритичному режимі та її лінійна апроксимація

Умова рівності нулю середньої інтегральної помилки призводить до простого інтегрального рівняння

$$\sqrt{\frac{2}{k}} \int_{0.5}^1 \sqrt{\sigma - \sigma^2} d\sigma - \int_{0.5}^1 (\alpha_1 \sigma_1 + \beta_1) d\sigma_1 = 0;$$

Тобто

$$\int_{0.5}^1 (\alpha_1 \sigma_1 + \beta_1) d\sigma_1 = 0,234. \quad (9)$$

Другим принципом при виборі оптимального вираження для січної є умова рівності помилок в межах інтервалу σ_1 , тобто:

$$(\alpha_1 \sigma_1 + \beta_1) - \sqrt{\frac{2}{k}(\sigma_1 - \sigma_1^2)} \Big|_{0.5}^1 = 0. \quad (10)$$

Вирішуючи спільно рівняння (9) та (10), отримаємо універсальне для всього діапазону σ_1 рівняння січної (пунктирна лінія на рис. 2)

$$\varphi^*(\sigma_1) = 1,36 - 1,19\sigma_1, \text{ тобто } \alpha_1 = -1,19; \beta_1 = 1,36. \quad (11)$$

На основі цих принципів, так само як і для $\varphi(\sigma_1)$, значення $\psi(\sigma_2)$ у всій галузі зміни σ_2 можна апроксимувати лінійною залежністю (рис. 3):

$$\bar{\psi} = 0,6\sigma_2 - 0,03, \text{ тобто } \alpha_2 = 0,6; \beta_2 = -0,03. \quad (12)$$

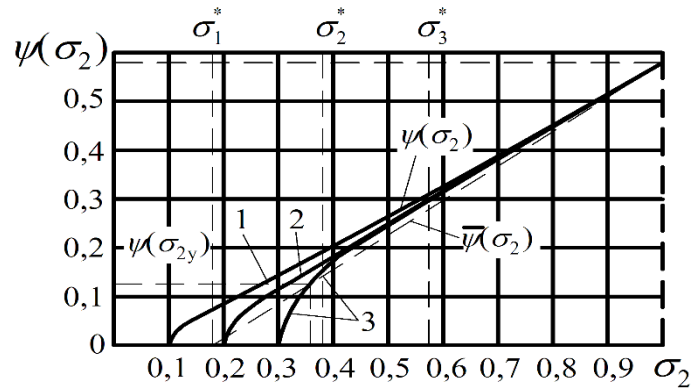


Рисунок 3 – Залежність $\psi(\sigma_2) = \sigma_2^{\frac{3k-1}{2k}} \varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right)$ а її лінійна апроксимація

(1 – $\sigma_a = 0,1$; 2 – $\sigma_a = 0,2$; 3 – $\sigma_a = 0,3$; σ_1^* , σ_2^* , σ_3^* – критичні відносини тисків для кривих 1, 2, 3)

Лінеаризації також підлягають члени рівнянь системи (2), складені з творів та приватних від поділу шуканих змінних (рис. 4)

$$\frac{k\sigma_1\dot{\xi}}{\xi_{01} + \xi} \approx \frac{k\sigma_{1y}}{\xi_{01} + \xi_c} \dot{\xi}; \quad (13)$$

$$\frac{k\sigma_2\dot{\xi}}{1 + \xi_{02} - \xi} \approx \frac{k\sigma_{2y}\dot{\xi}}{1 + \xi_{02} - \xi_c},$$

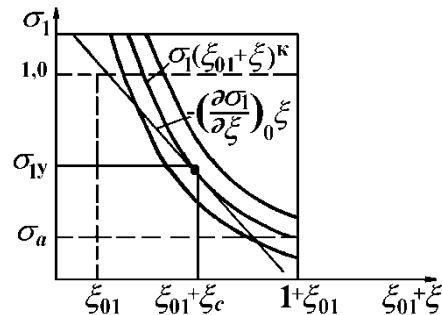


Рисунок 4 – До питання лінеаризації функції $\frac{k\sigma_1}{\xi_{01} + \xi} \xi$

Суть проведеної заміни встановлюється на прикладі розгляду усіченого першого рівняння системи (2)

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_1}{d\tau} &\cong -\frac{k\sigma_1}{\xi_{01} + \xi} \frac{d\xi}{d\tau}, \\ \frac{d\sigma_1}{d\tau} &\cong \frac{k\sigma_{1y}}{\xi_{01} + \xi_c} \frac{d\xi}{d\tau}. \end{aligned} \quad (14)$$

Значення, що встановилися, σ_{1y} , σ_{2y} можна орієнтовно встановити на основі вихідних даних.

$$\sigma_{1y} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{2}\right)^2}; \quad \sigma_{2y} = (\sigma_{1y} - \chi) \frac{1}{\Pi_{21}^F}. \quad (15)$$

Інтегрування першого рівняння системи (14) призводить до рівняння адіабатичного процесу.

$$\sigma_1(\xi_{01} + \xi)^k = \text{const.}$$

Інтегрування другого - до лінійної спадної функції, яка є дотичною до кривої $\sigma_1(\xi)$ у точці з координатами $\xi_{01} + \xi_c$, σ_{1y} :

$$\sigma_1 = -\left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \xi}\right) \xi + C = -\frac{k\sigma_{1y}}{\xi_{01} + \xi_c} \xi + C.$$

Лінійна модель 3-го порядку для дискретного пневмоприводу.

В результаті проведеної лінеаризації система рівнянь ПП набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k\alpha_1}{\xi_{01} + \xi_c} \sigma_1 - \frac{k\sigma_{1y}}{\xi_{01} + \xi_c} \dot{\xi} + \frac{k\beta_1}{\xi_{01} + \xi_c}; \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} = -\frac{k\Omega\alpha_2}{\Pi_{21}^F(1 + \xi_{02} - \xi_c)} \sigma_2 + \frac{k\sigma_{2y}}{1 + \xi_{02} - \xi_c} \dot{\xi} - \frac{k\beta_2\Omega}{\Pi_{21}^F(1 + \xi_{02} - \xi_c)}; \\ \beta \frac{d\xi}{d\tau} = \sigma_1 - \Pi_{21}^F \sigma_2 - \chi. \end{cases} \quad (16)$$

Вирішення цієї системи лінійних неоднорідних рівнянь 3-го порядку видається досить громіздким, що ускладнює їх практичне використання.

Лінійна модель 2-го порядку.

Завдання може бути значно спрощене лише за зниження порядку системи лінійних диференціальних рівнянь. Як свідчить досвід розрахункових робіт, така можливість існує. Можна без помітного погіршення точності розрахунку суттєво спростити лінійну модель, привівши її до системи другого порядку, якщо припустити, що тиск у робочій порожнині встановлюється досить швидко (значно швидше, ніж змінюється швидкість), тобто:

$$\frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k}{\xi_{01} + \xi_c} [(\alpha_1 \sigma_1 + \beta_1) - \sigma_{1y} \dot{\xi}] \approx 0,$$

звідки

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{1y} \dot{\xi} - \beta_1}{\alpha_1}. \quad (17)$$

Внаслідок цього система лінійних диференціальних рівнянь третього порядку перетворюється на систему другого порядку:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_2}{d\tau} = -\frac{k\alpha_2\Omega\sigma_2}{(1+\xi_{02}-\xi_c)} + \frac{k\sigma_{2y}\dot{\xi}}{(1+\xi_{02}-\xi_c)} - \frac{k\beta_2\Omega}{(1+\xi_{02}-\xi_c)\Pi_{21}^F}; \\ \beta \frac{d\dot{\xi}}{d\tau} = \sigma_1 - \Pi_{21}^F\sigma_2 + \frac{\sigma_{1y}}{\alpha_1}\dot{\xi} - \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} + \chi\right). \end{cases} \quad (18)$$

Відповідна матрична форма системи;

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\tau} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}, \quad (19)$$

$$\text{де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}; \quad a_{11} = \frac{k\alpha_2\Omega}{1+\xi_{02}-\xi_c}; \quad a_{12} = \frac{k\sigma_{2y}}{1+\xi_{02}-\xi_c}; \\ a_{21} = -B\Pi_{21}^F; \quad a_{22} = \frac{B\sigma_{1y}}{\alpha_1}; \quad b_1 = \frac{k\beta_2\Omega}{1+\xi_{02}-\xi_c}; \quad b_2 = -\frac{1}{\beta} \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1} + \chi \right).$$

Значно спроститься процес знаходження рішення. Коріння характеристичного рівняння знаходиться в результаті розв'язання квадратного рівняння.

$$\lambda_{1,2} = \frac{a_{11} + a_{22} \pm \sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}}}{2}. \quad (20)$$

Модальна матриця H та зворотна їй матриця H^{-1} має вигляд:

$$H = \begin{bmatrix} \lambda_1 - a_{22} & \lambda_2 - a_{22} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; \quad H^{-1} = \frac{1}{a_{21}(\lambda_1 - \lambda_2)} \begin{bmatrix} a_{21} & -(\lambda_2 - a_{22}) \\ -a_{22} & \lambda_1 - a_{22} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Рішення системи (19) знаходиться у вигляді:

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{x}^*, \quad (22)$$

Загальне рішення має вигляд:

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} \frac{((\lambda_1 - a_{22})x_{10} + a_{12}x_{20})e^{\lambda_1\tau} - ((\lambda_2 - a_{22})x_{10} + a_{12}x_{20})e^{\lambda_2\tau}}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ (a_{21}x_{10} - (\lambda_2 - a_{22})x_{20})e^{\lambda_1\tau} - (a_{21}x_{10} - (\lambda_1 - a_{22})x_{20})e^{\lambda_2\tau} \end{pmatrix} \quad (23)$$

Приватне рішення x^* після алгебраїчних перетворень подається у вигляді:

$$x^* = \begin{pmatrix} \frac{\left(b_1 - \frac{1}{\lambda_1}(a_{22}b_1 - a_{12})\right)e^{\lambda_1\tau} - \left(b_1 - \frac{1}{\lambda_1}(a_{22}b_1 - a_{12}b_2)\right)e^{\lambda_2\tau} + C_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \\ -\left(b_2\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1}(a_{22}b_2 - a_{21}b_1)\right)e^{\lambda_1\tau} + \left(b_2\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2}(a_{22}b_{21} + a_{21}b_1)\right)e^{\lambda_2\tau} + C_2 \end{pmatrix} \quad (24)$$

де C_1 і C_2 - постійні інтегрування, які перебувають з умови встановленого режиму $\frac{d\sigma_1}{d\tau}; \frac{d\zeta}{d\tau} = 0$.

$$C_1 = \sigma_{2y} = -\frac{a_{22}b_1 - a_{12}b_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}; \quad C_2 = \zeta_y = \frac{a_{11}b_2 - a_{21}b_1}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}}.$$

Змінні стану дискретного пневмоприводу

Змінні стану ПП σ_2 і ζ є елементами вектора загального розв'язання системи неоднорідних рівнянь, які у свою чергу видаються у вигляді суми загального розв'язання однорідної системи (23) та приватного розв'язання неоднорідної системи (24).

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= y^{\lambda_2\tau} \left[\frac{a_{11} - a_{22}(x_{10} - x_{1y}) + 2a_{12}(x_{20} - x_{2y})}{2\lambda_i} sh(\lambda_i\tau) + (x_{10} - x_{1y})ch(\lambda_i\tau) \right] + x_{1y} \\ \dot{\zeta} &= e^{\lambda_2\tau} \left[\frac{(a_{22} - a_{11})(x_{20} - x_{2y}) + 2a_{11}(x_{10} - x_{1y})}{2\lambda_i} sh(\lambda_i\tau) + \right. \\ &\quad \left. + (x_{20} - x_{2y})ch(\lambda_i\tau) \right] + x_{2y} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{где } \lambda_r = \frac{a_{11} + a_{22}}{2}; \quad \lambda_i = \frac{\sqrt{|\mathcal{D}|}}{2} = \frac{\sqrt{(a_{11} - a_{22})^2 + 4a_{12}a_{21}}}{2}.$$

Вираз (25) справедливо для дійсних коренів ($\mathcal{D} > 0$). У разі уявного коріння ($\mathcal{D} < 0$) у виразі (25) гіперболічні синус і косинус необхідно замінити на тригонометричні синус і косинус, тобто.

Значення змінних стану x_{1y} і x_{2y} , що встановилися, можна визначити відповідно до виразу:

$$x_{1y} = x_{2y} = \frac{-a_{22}b_1 + a_{12}b_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}; \quad x_{2y} = \xi_y = \frac{a_{11}b_2 + a_{21}b_1}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}. \quad (26)$$

Третя змінна стану σ_1 визначається відповідно до виразу (17).

Інтеграли від отриманих виразів ξ , σ_1 та σ_2 є відповідно координатою поршня ξ

та імпульсом тиску $\bar{I}_1$ і $\bar{I}_2$ в робочій та вихлопній порожнинах:

$$\begin{aligned} \xi = \int_0^\tau \dot{\xi} d\tau = e^{\lambda_i \tau} & \left[\frac{x_{20} - x_{2y}}{\lambda_i} + \frac{(a_{11} + a_{22})(-a_{11}(x_{20} - x_{2y}) + a_{21}(x_{10} - x_{1y}))}{2\lambda_i(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \times \right. \\ & \times sh(\lambda_i \tau) - \frac{a_{21}(x_{10} - x_{1y}) - a_{11}(x_{20} - x_{2y})}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} ch(\lambda_i \tau) \Big] + \\ & + x_{2y} \tau + \frac{a_{21}(x_{10} - x_{1y}) - a_{11}(x_{20} - x_{2y})}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} + \xi_0; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\bar{J}_1 = \int_0^\tau \sigma_1 d\tau = \frac{\sigma_{1y}}{\alpha_1} \int_0^\tau \xi d\tau - \frac{\beta_1}{\alpha_1} \tau + \bar{I}_{10} = \frac{\sigma_{1y}}{\alpha_1} \xi - \frac{\beta_1}{\alpha_1} \tau + \bar{I}_{10} = \quad (28)$$

$$= \frac{\sigma_{1y}}{\alpha_1} \xi - \frac{\beta_1}{\alpha_1} \tau + \bar{I}_{10};$$

$$\begin{aligned} \bar{J}_2 = \int_c^\tau \sigma_2 d\tau = e^{\lambda_i \tau} & \left[\left(\frac{x_{10} - x_{1y}}{\lambda_i} + \frac{(a_{11} + a_{22})(-a_{22}(x_{10} - x_{1y}) + a_{12}(x_{20} - x_{2y}))}{2\lambda_i(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \right) \times \right. \\ & \times sh(\lambda_i \tau) - \frac{a_{12}(x_{10} - x_{1y}) - a_{22}(x_{20} - x_{2y})}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} ch(\lambda_i \tau) \Big] + \\ & + x_{1y} \tau + \frac{a_{12}(x_{10} - x_{1y}) - a_{22}(x_{20} - x_{2y})}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} + \bar{I}_{20}, \end{aligned}$$

де ξ_0 , I_{10} и I_{20} – початкові значення шуканих змінних.

Аналогічно вирази (27, 28) у разі мнімих коренів гіперболічні функції замінюються на відповідні тригонометричні функції.

Для деяких оптимізаційних завдань і завдань управління, коли отриманий результат повинен бути абсолютно надійним, тобто реальна система повинна мати завжди дещо кращі динамічні характеристичні, ніж лінійна модель, за фіксовану координату поршня доцільно брати координату ξ_c з мінімальної пневматичної жорсткості c_n ПП, яка знаходиться з умови [7, 11]

$$\frac{dc_n}{d\xi} = 0,$$

звідки

$$\xi_c = \frac{\sqrt{\sigma_{1y}}(1 + \xi_{02}) - \sqrt{\Pi_{21}^F \sigma_{2y}} \xi_{01}}{\sqrt{\sigma_{1y}} + \sqrt{\Pi_{21}^F \sigma_{2y}}}. \quad (29)$$

Проведені розрахунки за лінійною моделлю другого порядку, які охоплювали 160 варіантів вихідних даних, переконливо свідчать про достатній рівень адекватності результатів цих розрахунків з результатами, отриманими на основі нелінійної моделі.

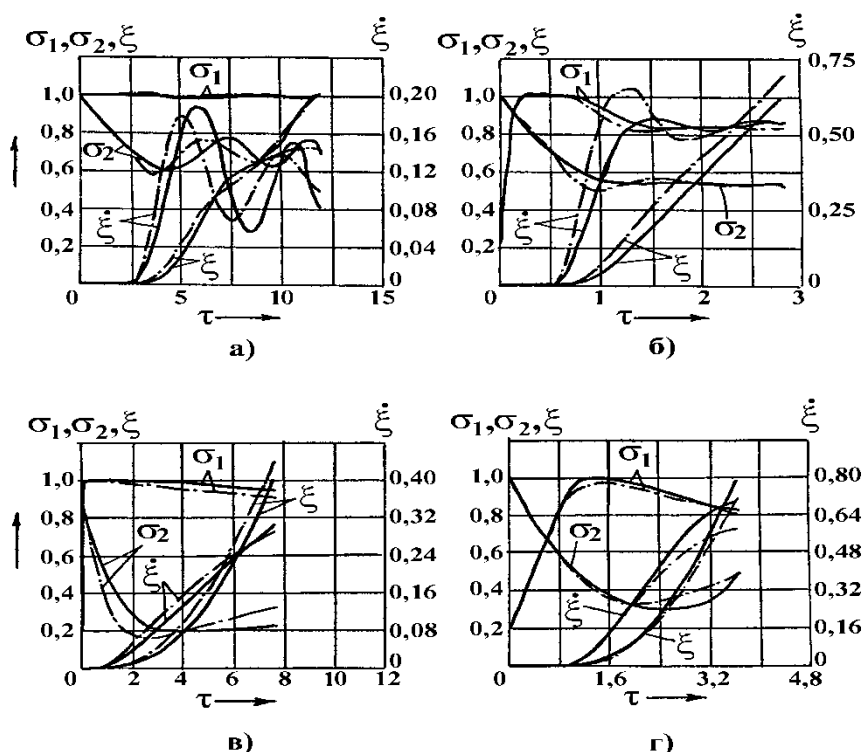


Рисунок 5 – Перехідні процеси, отримані на ЕОМ за нелінійною моделлю

(—) і за лінійною моделлю (---) другого порядку:

$a - \beta = 1, \chi = 0,3, \Omega = 0,2, \xi_{01} = 0,15$; $б - \beta = 0,2, \chi = 0,3, \Omega = 1, \xi_{01} = 0,15$; $в - \beta = 5, \chi = 0,3, \Omega = 1, \xi_{01} = 0,15$; $г - \beta = 1, \chi = 0,3, \Omega = 1, \xi_{01} = 1$

На рис. 5 а, б, в, г показані нелінійні рішення (суцільні лінії) і лінійні рішення (пунктирні лінії) для системи другого порядку. Область використання лінійної моделі другого порядку дещо вужче, ніж для моделі третього порядку. Якщо для моделі третього порядку не спостерігалось жодних істотних відхилень результатів розрахунку від нелінійної моделі у всьому зазначеному вище діапазоні безрозмірних параметрів, то для лінійної моделі другого порядку при великих значеннях $\xi_{01}=1$, $\beta=0,2$, $\chi=0,3$; $\Omega=5$ помилка у транспортному часі спрацьовування становила 3 %, а значення швидкості виявилось менше 11 % проти нелінійних рішень.

Висновки

Показано, що заміна нелінійних залежностей першими членами їх розкладання в ряд Тейлора (метод дотичної), яка практикується для слідкувальних гідропневмоприводів, стосовно дискретних приводів призводить до великих похибок. Запропонована лінепризація методів січих за умови вибору оптимальної форми сіючої дозволила значно підвищити розрахункову точність лінійної математичної моделі і отримати в аналітичній формі перемінні стани пневмопривода.

Проведені розрахунки за лінійною моделлю другого порядку переконливо свідчать про те, що вона цілком адекватна за розрахунковою точністю нелінійної математичної моделі у всьому діапазоні найімовірніших параметрів χ , Ω , β і ξ_{01} розрахункова точність математичної моделі другого порядку цілком достатня для практичного використання.

Література

1. Крутіков Г.А. Системи гідроприводів [навчальний посібник] / Г.А. Крутіков, М.Г. Стрижак – Харків, НТУ "ХПІ", 2015.–220 с.
2. Крутіков Г.А. Розрахунок перехідних процесів у дискретних гідропневмоприводах на основі їх лінійних моделей / Г.А. Крутіков, А.Н. Онищенко.- Навчально-методичний посібник. –Харків, НТУ «ХПІ», 2005. – 51 с.
3. Крутіков Г.А. Розширення області ефективного застосування пневмопривода. /Крутіков Г.А., Стрижак В.В. // Промислова Гидравлика і Пневматика №2(62). –2018 . С. 37–47.
4. Krutikov G, The synthesis of structure and parameters of energy efficient pneumatic actuator/G. Krutikov, M. Strizhak, V. Strizhak // Eastern- European Journal of Enterprise technologies./ Vol 1, №7 (85) (2017) Applied mechanics. – P. 38–44.
5. Krutikov G, Improving power efficiency of pneumatic logistic complex actuator through selection of a rational scheme of their control / G. Krutikov, M. Strizhak, V. Strizhak// Eastern- European Journal of Enterprise Technologies./ Vol 1, №2/8 (92) (2018) Applied mechanics. – P. 43–49.

6. Krutikov G.A., Strizhak Saving compressed air by choosing an efficient pneumatic control circuit / G.A Krutikov, M. G. Strizhak // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія : Автомобіле-тракторобудування.: №1, 2024. С. 10–34.
7. Moore P. R. Compensation in pneumatically Actuated servomechanisms / P. R. Moore, P. H. Westone, T. W. Thather // Transactions Institution of Measurement and Control. – 1989. – № 7. – P. 47–63.
8. Frank S. Servo-pneumatic drives for weld guns.// 5th International fluid conference. –Aachen, Germany, 2006, T.7, Vol..5. – P. 171–182.
9. Khalid A. Al-Dakkan Eric J. Barth Michael Goldfarb. Dynamic Constraint-Based Energy-Saving Control of Pneumatic Servo Systems. //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control SEPTEMBER 2006, Vol. 128 / 655 Copyright © 2006 by ASME.
10. Люта А.В., Чекулаев С.Ф. (2020) Гідропневмопривод та пристрої автоматики Навчальний посібник – Кроматорськ, НДМА, 172 с.
11. Пневматичні приводи машин будівельно-дорожньої інфраструктури: підручник / Пелевін Пелевін Л.Є., Горбатюк Є.В., Русан І.В., Терентьев О.О., Свідерський А. Л.Є., Горбатюк Є.В., Русан І.В., Терентьев О.О., Свідерський А.Т. Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2020. 212 с.
12. D.H. Tsai , C.E. Cassidy, “Dynamic behavior of a simple pneumatic reducer”, Journal Basic Engineering, 1961, Vol. 83(2), pp. 252–264.

Bibliography (transliterated)

1. Krutikov G.A. Sistemi gidroprivodiv [navchalniy posibnik] / G.A. Krutikov, M.G. Strizhak – Harkiv, NTU "HPI", 2015.–220 p.
2. Krutikov G.A. Rozrahunok perehdsnih protsessiv u diskretnih gsdropnevio-privodah na osnovi Yih lnsynih modeley / G.A.Krutikov, A.N.Onischenko.– Navchalno-metodichniy possbnik. –Harksv, NTU «HPI», 2005. – 51 p.
3. Krutikov G.A. Rozshirenniya oblasts effektivnogo zastosuvannya pnevmoprivoda. /Krutikov G.A., Strizhak, V.V. // Promislova Gidravlika i Pnevmatika #2(62). –2018. P. 37–47.
4. Krutikov G, The synthesis of structure and parameters of energy efficient pneumatic actuator/G. Krutikov, M. Strizhak, V.Strizhak // Eastern- European Journal of Enterprise technologies./ Vol 1, #7 (85) (2017) Applied mechanics. – P. 38–44.
5. Krutikov G, Improving power efficiency of pneumatic logistic complex actuator through selection of a rational scheme of their control / G. Krutikov, M. Strizhak, V.Strizhak// Eastern- European Journal of Enterprise Technologies./ Vol 1, #2/8 (92) (2018) Applied mechanics. – P. 43–49.
6. Krutikov G.A. Strizhak Saving compressed air by choosing an efficient pneumatic control circuit / G.A Krutikov, M. G. Strizhak //Visnik Natsionalnogo tehnichnogo univrsitetu «HPI» Seriya : Avtomobile-traktorobuduvannya.:#1, 2024. P. 10–34.
7. Moore P.R. Compensation in pneumatically Actuated servomechanisms / P.R. Moore, P. H. Westone, T. W. Thather // Transactions Institution of Measurement and Control. – 1989. – # 7. – P. 47–63.

8. Frank S. Servo-pneumatic drives for weld guns.// 5th International fluid conference. –Aachen, Germany, 2006, T.7, Vol.5. – P. 171–182.
9. Khalid A. Al-Dakkan Eric J. Barth Michael Goldfarb. Dynamic Constraint-Based Energy-Saving Control of Pneumatic Servo Systems. //Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control SEPTEMBER 2006, Vol. 128 / 655 Copyright © 2006 by ASME.
10. Lyuta A.V.,Chekulaev S.F.(20200 Gidropnevmoprivod ta pristroyi avtomatiki Navchalniy posibnik – Kromatorsk, NDMA, 172 p.
11. Pnevmatichni privodi mashin budivelno-dorozhnoyi infrastrukturi: pidruchnik / Pelevin Pelevin L.E., Gorbatyuk E.V., Rusan I.V., Terentev O.O., Sviderskiy A. L.E., Gorbatyuk E.V., Rusan I.V., Terentev O.O., Sviderskiy A.T. Kiyiv: FOP Yamchinskiy O.V., 2020. 212 p.
12. D.H. Tsai , C.E. Cassidy, “Dynamic behavior of a simple pneumatic reducer”, Journal Basic Engineering, 1961, Vol. 83(2), pp. 252–264.

УДК 621.05

Г. А. Крутіков, Д. Ю. Бородин

ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІННИХ СТАНУ ДИСКРЕТНОГО ПНЕВМОПРИВОДУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ СІЧНИХ ПРИ ЛІНЕАРИЗАЦІЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.

Пневмопривід як термодинамічна система описується з урахуванням принципів «термодинамики тіла змінної маси». При описі термодинамічних і газодинамічних процесів у пневмоприводах склалися дві наукові школи: дослідники першої школи представляють процеси в порожнинах приводу як політропічні процеси зі змінним показником політопи, а другі- розглядають процеси спираючись на рівняння енергетичного (теплого) балансу газу у незамкнених порожнинах. Авторами досліджується нелінійна математична модель, отримана на уявленнях другої школи. У цілях скорочення числа незалежних параметрів, визначальних характер перехідного процесу у приводі, здійснено перехід до безрозмірної форми рівнянь, проведений з урахуванням принципу мінімізації безрозмірних комплексів (критеріїв динамічного подоби), визначальних характер перехідного процесу. Завдання лінеаризації нелінійної моделі ставилося з метою отримання на основі лінійної моделі аналітичних виразів для всіх змінних станів, які дозволять уникнути при розрахунках чисельних крокових методів інтегрування вихідної нелінійної моделі. Показано, що заміна нелінійних залежностей першими членами їх розкладання до ряду Тейлора (метод дотичної), яка практикується для слідкувальних гідропневмоприводів по відношенню до дискретних приводів призводить до великих похибок. Запропонована лінеаризація методом січних з вибором оптимальної форми січної дозволила значно підвищити розрахункову точність лінійної математичної моделі. та отримати в аналітичній формі змінні стани пневмоприводу.Проведені розрахунки за лінійною моделлю другого порядку переконливо свідчать, що вона цілком адекватна розрахункової точності нелінійної

математичної моделі. У всьому діапазоні найімовірніших параметрів розрахункова точність математичної моделі другого порядку є цілком достатньою для практичного використання. Таким чином, виключається необхідність залучення крокових чисельних методів інтегрування рівнянь нелінійної моделі та організації обчислювального процесу на ЕОМ.

Ключові слова: математична модель, лінеаризація, критерії динамічної подоби пневмоприводу, метод січних, змінні стану дискретного пневмоприводу.

G. Krutikov, D. Borodin

DETERMINING THE STATE VARIABLES OF A DISCRETE PNEUMATIC DRIVE BY USING THE SECANT METHOD WHEN LINEARIZING A MATHEMATICAL MODEL

The pneumatic drive as a thermodynamic system is described based on the principles of "thermodynamics of a body of variable mass". In describing thermodynamic and gas-dynamic processes in pneumatic drives, two scientific schools have developed: researchers of the first school represent processes in the cavities of the drive as polytropic processes with a variable polytropic index, and the second consider processes based on the equation of energy (heat) balance of the gas-pneumatic drive in an open space. The authors investigate a nonlinear mathematical model obtained on the concepts of the second school. In the cycles of reducing the number of independent parameters that determine the nature of the transient process in the drive, a transition to a dimensionless form of equations is carried out based on the principle of minimizing dimensionless complexes (dynamic similarity criteria) that determine the nature of the transient process. The task of linearization of the nonlinear model was set with the purpose of obtaining analytical expressions for all state variables based on the linear model, which will allow avoiding the numerical step methods of integration of the original nonlinear model in calculations. It is shown that the replacement of nonlinear dependencies by the first terms of their expansion in a Taylor series (the tangent method), which is practiced for servo hydraulic pneumatic drives, leads to large errors in relation to discrete drives. The proposed linearization by the secant method with the choice of the optimal form of the sowing allowed to significantly increase the calculated accuracy of the linear mathematical model. and obtain the state variables of the pneumatic drive in analytical form.

The calculations performed using the second-order linear model convincingly indicate that it is quite adequate to the calculated accuracy of the nonlinear mathematical model. In the entire range of the most probable parameters, the calculated accuracy of the second-order mathematical model is quite sufficient for practical use. Thus, the need to use step-by-step numerical methods for integrating the equations of a nonlinear model and organizing the computational process on a computer is eliminated.

Keywords: mathematical model, linearization, criteria for the dynamic similarity of a pneumatic actuator, secant method, state variables of a discrete pneumatic actuator.

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, А. М. Миронов, к.техн.н., доцент,
К. О. Горбунов, к.техн.н., професор, В. Г. Рись, аспірант

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ УМОВ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну, високотемпературна поверхня, розпилена рідина, метод ідентифікації умов теплообміну, сопло щільної форсунки, змінний набір сопел, кріплення блоку, спеціальний координатний пристрій, регулювальний вентиль, перегріта рідина, випарне охолодження, пароводяне середовище.

Постановка задачі

Сконструйовану схему експериментальної установки для комплексного дослідження теплообміну при охолодженні високотемпературної поверхні диспергованою рідиною показано на рис. 1.

Для дослідження охолодження поверхонь водою та водоповітряною сумішшю використовується універсальний блок 18, у нижньому фланці якого можна встановлювати як спеціальні сопла для прискорення та диспергування рідини при водоповітряному охолодженні, так і щільні форсунки [1–3]. Для водоповітряного розпилю з резервуару 8 вода надходить до живильника 10 і диспергується далі через сопловий апарат 11, за рахунок розширення стисненого повітря. Через сполучну магістраль 7 забезпечується вирівнювання тиску повітря перед соплом 11 над рівнем води в резервуарі 8. Це дозволяє змінювати витрату води шляхом переміщення резервуара 8 вздовж вертикальної траверси. Для дослідження впливу кута натікання диспергової рідини на поверхню, що охолоджується, блок 18 може повертатися навколо осі за допомогою цапфового пристрою 19. При цьому кут натікання δ_c можна буде міняти від 0 до 90 градусів. Відмінною особливістю конструкції кріплення блоку 18 буде те, що при зміні в зазначених межах величини δ_c буде можливим зберігати незмінною відстань від вихідного перерізу сопла розпилювача до робочої поверхні термозонда вздовж осі руху охолоджуючого середовища [4]. При вивченні охолодження поверхні перегрітої рідиною буде використовуватися блок 5, з електронагрівачем 2, керованим автотрансформатором 6, регулювальним вентилем 4 і змінним набором сопел, які будуть монтуватися до патрубку 3. Для дослідження впливу температури рідини на умови теплообміну в резервуарі 8 є електронагрівач 9, за допомогою якого температура води перед соплом може бути доведена до 95 °С. Регулювання ступеня нагрівання води здійснюватиметься автотрансформатором 6.

Для подачі та диспергування рідини за допомогою щільних (спрейєрних) форсунок установка буде забезпечена насосом 13, що подає воду з резервуара 14 до блоку 18. Блоки 5, 8 і 18 розташовані на спеціальному координатному пристрої 1, що має три ступені свободи, що дозволить вводити у взаємодію з термозондом 15 охолоджувальне середовище з різними температурними та дисперсно-кінематичними характеристиками.

На рис. 1 показана плита 16, у площині якої закріплений термозонд 15, а також шторковий пристрій 17, що дозволяє в необхідний момент часу розпочати процес зрошення робочої поверхні термозонда.

Крім охолодження поверхні дисперговою водою, водоповітряним середовищем і перегрітою рідиною в ряді технологічних процесів металургійного виробництва набуло поширення пароводяного середовища [5–6]. При цьому замість стиснутого повітря для розпилювання рідини використовується пара, що генерується в системі випарного охолодження домен, що в ряді випадків виявляється економічно вигіднішим.

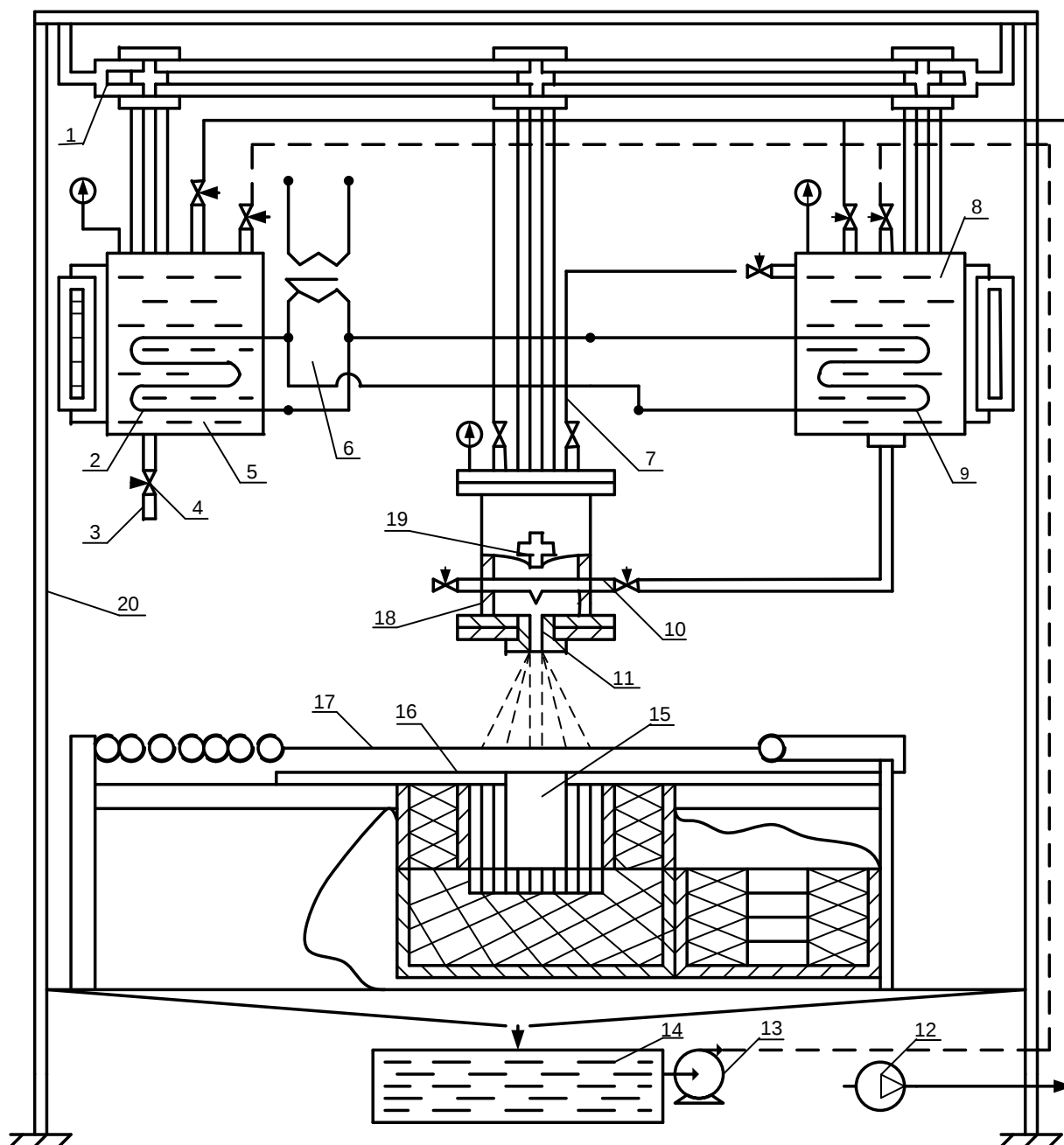


Рисунок 1 – Схема експериментального стенду на дослідження умов теплообміну при взаємодії розпиленої рідини з нагрітою поверхнею

Мета статті. Розробка експериментального стенду для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну. Для цього треба сконструювати експериментальний стенд, на якому будуть виконуватись дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню. Треба розробити схему вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) термоприймачів, встановлених у тілі стрижня термозонда 15, а також підібрати швидкодіюче цифрове записуюче обладнання. На рис. 1 представлена схема експериментального стенду.

Для здійснення наміченої нами програми дослідження, крім розробки методики ідентифікації граничних умов теплообміну, виявилось необхідним вирішити низку спеціальних завдань, пов'язаних із визначенням режимних параметрів середовища. До таких належать локальна щільність зрошення g та швидкість диспергованого середовища біля поверхні термозонда W_c .

При дослідженні теплообміну поверхні з розпиленою рідиною, коли щільність зрошення g становить більше $15 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ особливих ускладнень у вимірі цієї величини ми не виявили. У цьому випадку з достатнім ступенем точності визначення g повинні бути використані батарейні відбірники проб із циліндричними приймальними патрубками. Разом з тим, перші досліди, що з визначенням локальних щільностей зрошення у водоповітряному потоці при швидкості повітря близько 30 м/с і вище, і середньому розмірі крапель від 20 до 200 мкм можуть виявити серйозні труднощі у вимірі локальних питомих витрат. Незалежно від діаметра добірної трубки при всіх режимах натікання забезпечити ізокінетичний відбір проб (коли швидкість середовища на підході до відбірника дорівнює швидкості всередині прямого патрубка) не уявлялося можливим. У такій ситуації зазвичай застосовують штучне відсмоктування проби за допомогою вакуумних насосів і ежекторів.

Однак при цьому виникає проблема сепарації крапель після прийомного патрубка відбірника для вимірювання кількості відібраної рідини. При дуже малому витраті рідини, що відбирається як проба, і зазначених розмірах крапель, організація надійної сепарації (за допомогою відповідних циклонних пристроїв або пластинчастих сепараторів) представляє, як відомо, досить складне самостійне завдання.

Тому для надійного визначення локальної протності зрошення, а також визначення дисперсного складу крапель повинен бути використаний лічильно-імпульсний метод [7, 8], який одержав можливість практичної реалізації у нас в країні завдяки роботам [9–10].

Методика визначення локальної щільності зрошення за допомогою лічильно-імпульсного методу вперше була запропонована в роботах [5–10].

Якщо в дисперсний потік електропровідних крапель внести два співвісні електроди, на які подана різниця потенціалів, то при контакті краплі з кінцями електродів у ланцюзі виникає імпульс струму, а на опорі R – імпульс напруги, який посилюється та реєструється електронним лічильником. Послідовно змінюючи відстань між електродами S , можна отримати експериментальну залежність $h(S)$ частоти замикання краплями кінців електродів, що віддаляються один щодо одного на відстані S . Як випливає з [11] та [12] залежність $h(S)$ є достатньою для визначення як функції розподілу числа крапель за розмірами $\varphi_0(D)$, так і величини локальної витрати або

локальної щільності зрошення g .

Так, авторами роботи [13] було встановлено, що за будь-яких способів диспергування рідини та за будь-яких фізичних причин руйнування крапель залежність $h(S)$ добре апроксимується експоненційною залежністю

$$h(S) = B \cdot \exp(-\alpha \cdot S), \quad (1)$$

де B і α – параметри експоненційної залежності, що визначаються з графіка функції $h(S)$, побудованої у напівлогарифмічних координатах. При цьому $B = h(0)$, а

$$\alpha = [\ln h(S_1) - \ln h(S_2)] \cdot (S_2 - S_1)^{-1}. \quad (2)$$

Після відповідного аналізу у роботі [6] було встановлено, що локальна щільність зрошення може бути знайдена як

$$g = \beta (2 \cdot \alpha)^{-1} \cdot \pi \cdot B. \quad (3)$$

Значення коефіцієнта β залежить тільки від електропровідності розпорошеної води, параметрів вторинної вимірювальної апаратури та визначається експериментально. Для цього в нерухомому повітрі шляхом розпорошення досліджуваної рідини створюється потік крапель, що рухаються вертикально вниз. Спеціальною діафрагмою виділяється вузький крапельний пучок і потім, у його поперечному перерізі, за допомогою лічильно-імпульсного методу визначається поле локальних значень об'ємної витрати зареєстрованих крапель рідини g' , обчислюваного як

$$g' = (2 \cdot \alpha)^{-1} \cdot \pi \cdot B. \quad (4)$$

Значення загальної об'ємної витрати зареєстрованих крапель V' визначається шляхом інтегрування по всьому виділеному діафрагмою перерізу F , як

$$V' = \iint_F g'(F) \cdot dF. \quad (5)$$

Дійсна витрата V у виділеному пучку вимірюється шляхом сепарації крапель та збору рідини у мірну ємність. В результаті шуканий коефіцієнт β знаходимо як

$$\beta = V/V'. \quad (6)$$

Оскільки за даними [6] значення коефіцієнта β не залежить від дисперсного складу та швидкості крапель, то для експериментального його визначення був використаний грубодисперсний краплинний потік із середньою швидкістю в зоні вимірювання не вище 10 м/с. Це дозволило з достатнім ступенем точності визначити

дійсну об'ємну витрату V , а отже і величину β з рівняння 6, Так, наприклад, при різниці потенціалів на електродах зонда $U = 9$ В, чутливості підсилювача $\Delta U = 25$ кВ та електропровідності рідини $\chi = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ величина коефіцієнта $\beta = 1,52$.

На рис. 2 представлена схема вимірювання ЕРС термоприймачів, встановлених у тілі стрижня термозонда 1. Структура схеми вторинної електронної апаратури визначалася особливостями дослідження нестационарного теплообміну.

Електричний сигнал від хромель-алюмелевих термоприймачів надходитиме або на ручний перемикач 2 (цей режим можливий коли протягом усього експерименту необхідно реєструвати показання одного з термоприймачів), або через перехідний блок 8 на електронний перемикач 6, який буде виготовлений спеціально відповідно до параметрів інших блоків схеми. Електронний перемикач дозволить по чергово виводити інформацію від трьох термоприймачів на вхід універсального цифрового вольтметра 3 і далі - до швидкодіючого цифрового пристрою 4, що має вихід до ЕОМ 5.

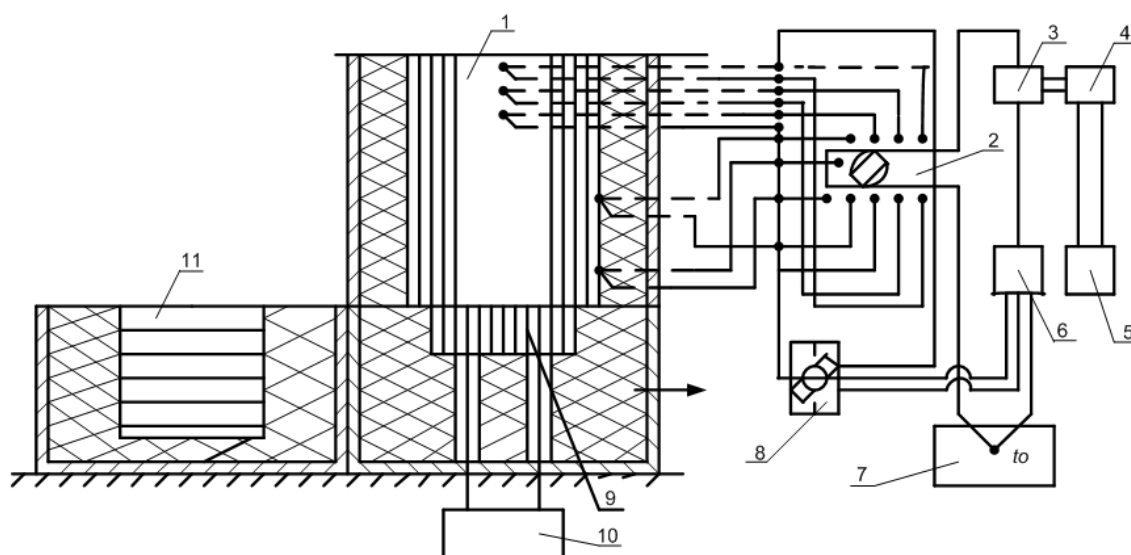


Рисунок 2 – Схема вимірювання ЕРС термоприймачів

Схема повинна включати термостат 7 з льодом, що тане, приготованим з дистильованої води, для забезпечення нульового рівня температури холодного спаю термоприймачів. Електронний перемикач дозволить передавати на роз'єм «вихід на друк» числові значення вимірюваної величини, код знака перемикачання, код межі та роду вимірювання, код навантаження приладу, а також імпульс «строб» для синхронізації роботи приладу із зовнішнім пристроєм друку [14, 15]. При цьому інтервал часу «опитування» термоприймачів повинен становити не менше 0,08 секунди, а максимальна швидкість друку, що вводиться в пристрій інформації, не менше 30 рядків на секунду. На схемі показаний також автотрансформатор 10, електронагрівач 9 робочого блоку термозонда 1 [16].

При діаметрі стрижня тепломіра 30 мм, коефіцієнт теплопровідності міді порядку 360 Вт/(мК) та інтенсивності теплообміну на бічній, ізольованій його поверхні, що не перевищує 10 Вт/(м²·с), критерій Ві складає менше 10⁻³.

Висновки. Сконструйований експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну високотемпературної поверхні з розпиленою рідиною: із форсунок різних модифікацій (спрейерних у тому числі); водоповітряне; пароповітряне; пароводяне; перегрітої; води із різними концентраціями поверхнево-активних речовин. На експериментальному стенді будуть виконуватись дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню. Була розроблена схема вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) термоприймачів, встановлених у тілі стрижня термозонда 15, а також підібрано швидкодіюче цифрове записуюче обладнання.

Література

1. Исаченко В.П., Кушнырев В.И. Струйное охлаждение. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
2. Братута Э.Г. Определение плотностей орошения при охлаждении в спрейерах. – Сталь, 1983, № 7, С. 85–87.
3. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Ивановский А.Ю. Стенд для исследования пароводяного охлаждения высокотемпературных поверхностей. – В кн.: Энергетическое машиностроение, вып. 37, – Респ. межвед. науч.-техн. Сборник. – Харьков: Вища школа, Харьков, 1982, С. 77–79.
4. Диннер А. Обзор литературы по теплопередаче при струйном охлаждении. М.: Черные металлы, 1976, №4, С. 26–29.
5. Братута Э.Г., Переселков А.Р. Счетно-импульсный метод исследования распределения капель по размерам в дисперсных потоках. – В кн.: Энергетическое машиностроение, вып. 16, – Респ. межвед. науч.-техн. Сборник. – Харьков: Вища школа, изд-во при Харьк. ун-те, 1973, С. 72–78.
6. А.С. 466431 (СССР). Устройство для измерения размеров капель / Э.Г. Братута, А.Р. Переселков. – Оpubл. В Б.И., 1975, № 13.
7. Братута Э.Г., Переселков А.Р. Сравнение результатов измерения дисперсного состава капель с помощью счетно-импульсного и инерционного методов. – В кн.: Энергетическое машиностроение, вып. 22, – Респ. межвед. науч.-техн. Сборник. – Харьков: Вища школа, изд-во при Харьк. ун-те, 1976, С. 55–62.
8. Братута Э.Г., Переселков А.Р. Определение локальных расходов дисперсной среды в газожидкостном потоке с помощью счетно-импульсного метода. – Теплоэнергетика, 1975, № 5, С. 32–34.
9. Леончик Б.И., Маякин В.П. Измерения в дисперсных потоках. – М.: Энергия, 1971. – 248 с.
10. Ертанова О.Н., Лепешинский И.А. Решетников В.А. Голографический анализ дисперсной фазы двухфазного потока. – Теплофизика высоких температур, 1979, т. 17, № 4, С. 819–821.
11. Левин А.Л., Старченко Г.Е. Определение скорости, размера и функции распределения частиц по диаметрам в двухфазной струе.. – Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1975, № 6, С. 51–58.
12. Ринкевичус Б.С. Лазерная анемометрия. – М.: Энергия, 1978. – 159 с.
13. Аладьев И.Т., Гинзбург Б.М., Гаврилов Н.Д. и др. Исследование возможности применения голографии к изучению двухфазных течений. – Теплоэнергетика, 1973, № 8, С. 66–68.

14. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1952. – 599 с.
15. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976, т. 2. – 896 с.
16. Селихов Ю.А., Братута Э.Г., Кравцов С.Ф. и др. Метод определения локальных условий теплообмена при спрейерном охлаждении. – Сталь, 1985, №4, С. 89–91.

Bibliography (transliterated)

1. Isachenko V.P., Kushnyrev V.I. Struynoe ohlazhdenie. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 216 p.
2. Bratuta E.G. Opredelenie plotnostey orosheniya pri ohlazhdenii v spreyerah. – Stal, 1983, # 7, P. 85–87.
3. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Ivanovskiy A.Yu. Stend dlya issledovaniya parovodyanogo ohlazhdeniya vyisokotemperaturnykh poverkhnostey. – V kn.: Energeticheskoe mashinostroenie, vyip. 37, – Resp. mezhved. nauch.-tehn. Sbornik. – Harkov: Vischa shkola, Harkov, 1982, P. 77–79.
4. Dinner A. Obzor literatury po teploperedache pri struynom ohlazhdenii. M.: Chernyie metally, 1976, #4, P. 26–29.
5. Bratuta E.G., Pereselkov A.R. Schetno-impulsnyiy metod issledovaniya raspredeleniya kapel po razmeram v dispersnykh potokakh. – V kn.: Energeticheskoe mashinostroenie, vyip. 16, – Resp. mezhved. nauch.-tehn. Sbornik. – Harkov: Vischa shkola, izd-vo pri Hark. un-te, 1973, P. 72–78.
6. A.S. 466431 (SSSR). Ustroystvo dlya izmereniya razmerov kapel / E.G. Bratuta, A.R. Pereselkov. – Opubl. V B.I., 1975, # 13.
7. Bratuta E.G., Pereselkov A.R. Sravnenie rezultatov izmereniya dispersnogo sostava kapel s pomoschyu schetno-impulsnogo i inertsionnogo metodov. – V kn.: Energeticheskoe mashinostroenie, vyip. 22, – Resp. mezhved. nauch.-tehn. Sbornik. – Harkov: Vischa shkola, izd-vo pri Hark. un-te, 1976, P. 55–62.
8. Bratuta E.G., Pereselkov A.R. Opredelenie lokalnykh rashodov dispersnoy sredy v gazozhidkostnom potoke s pomoschyu schetno-impulsnogo metoda. – Teploenergetika, 1975, # 5, P. 32–34.
9. Leonchik B.I., Mayakin V.P. Izmereniya v dispersnykh potokakh. – M.: Energiya, 1971. – 248 p.
10. Ertanova O.N., Lepeshinskiy I.A. Reshetnikov V.A. Golograficheskiy analiz dispersnoy fazyi dvuhfaznogo potoka. – Teplofizika vyisokikh temperatur, 1979, t. 17, # 4, P. 819–821.
11. Levin A.L., Starchenko G.E. Opredelenie skorosti, razmera i funktsii raspredeleniya chastits po diametram v dvuhfaznoy strue.. – Izv. AN SSSR. Mehanika zhidkosti i gaza, 1975, # 6, P. 51–58.
12. Rinkevichus B.S. Lazernaya anemometriya. – M.: Energiya, 1978. – 159 p.
13. Aladev I.T., Ginzburg B.M., Gavrilov N.D. i dr. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya golografii k izucheniyu dvuhfaznykh techeniy. – Teploenergetika, 1973, # 8, P. 66–68.
14. Lyikov A.V. Teoriya teploprovodnosti. – M.-L.: GITTL, 1952. – 599 p.
15. Teplotekhnicheskii spravochnik / Pod red. V.N. Yureneva i P.D. Lebedeva. – M.: Energiya, 1976, t. 2. – 896 p.

16. Selihov Yu.A., Bratuta E.G., Kravtsov S.F. i dr. Metod opredeleniya lokalnyih usloviy teploobmena pri sprejernom ohlazhdenii. – Stal, 1985, #4, P. 89–91.

УДК 621.016

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, А. М. Миронов, к.техн.н., доцент,
К. О. Горбунов, к.техн.н., професор, В. Г. Рись, аспірант

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ УМОВ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Сконструйований експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну при охолодженні високотемпературної поверхні рідиною, що розпилюється: з форсунок різних модифікацій (спрейєрних у тому числі); водоповітряне; пароповітряне; пароводяне; перегрітою рідиною; води із різними концентраціями поверхнево-активних речовин.

Аналіз наукових джерел визначив методику досліджень, яка дозволить виконувати дослідження впливу щільності зрошення, температури поверхні, ступеня недогріву рідини, її швидкості та кута натікання на поверхню з урахуванням можливості реалізації зміни визначальних факторів у діапазоні відповідних їх реальних значень у натурних об'єктах енергетики та металургії та завдання вибору методу ідентифікації граничних умов теплообміну.

Дослідження інтенсивності теплообміну функції недогріву розпиленої рідини – води з різними концентраціями поверхнево-активних речовин при різних локальних щільностях зрошення і температурах поверхні в наукових публікаціях ми не зустріли. Тому ці дослідження, а також розробка ефективних систем охолодження або визначення теплового стану об'єктів за різних зовнішніх впливів для нас є головними.

Для здійснення наміченої нами програми дослідження, крім розробки методики ідентифікації граничних умов теплообміну, виявилось необхідним вирішити низку спеціальних завдань, пов'язаних із визначенням режимних параметрів середовища. До таких належать локальна щільність зрошення і швидкість диспергованого середовища біля поверхні термозонда.

Для надійного визначення локальної щільності зрошення, а також визначення дисперсного складу крапель повинен бути використаний лічильно-імпульсний метод, який одержав можливість практичної реалізації в нашій країні.

Для визначення локальних умов нестационарного теплообміну нами розроблено схему вимірювання ЕРС термоприймачів, встановлених у тілі стрижня термозонда, а також підібрати швидкодіюче цифрове записувальне обладнання.

Вирішення зворотного завдання теплопровідності дозволить встановити ступінь впливу практично всіх факторів, зазначених як визначальні.

Ключові слова: експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну, високотемпературна поверхня, розпилена рідина, метод

ідентифікації умов теплообміну, сопло щільної форсунки, змінний набір сопел, кріплення блоку, спеціальний координатний пристрій, регулювальний вентиль, перегріта рідина, випарне охолодження, пароводяна середа.

Yu. A. Selikhov, A. M. Mironov, K. O. Gorbunov, V. G. Ris

EXPERIMENTAL STAND FOR STUDYING LOCAL CONDITIONS OF TRANSIENT HEAT TRANSFER

An experimental setup has been designed to study local conditions of non-stationary heat exchange during cooling of a high-temperature surface with a sprayed liquid: from nozzles of various modifications (including sprayers); water-air; steam-air; steam-water; superheated liquid; water with different concentrations of surfactants.

An analysis of scientific sources has determined a research methodology that will allow the study of the influence of irrigation density, surface temperature, degree of liquid underheating, its velocity and angle of flow onto the surface, taking into account the possibility of implementing a change in the determining factors in the range of their corresponding real values in natural energy and metallurgy facilities and the task of selecting a method for identifying the boundary conditions of heat exchange.

We have not come across any studies of heat exchange intensity as a function of underheating of sprayed liquid – water with different concentrations of surfactants at different local irrigation densities and surface temperatures in scientific publications. Therefore, these studies, as well as the development of effective cooling systems or determination of the thermal state of objects under various external influences, are of primary importance to us.

In order to implement our planned research program, in addition to developing a method for identifying the boundary conditions of heat exchange, it was necessary to solve a number of special problems associated with determining the operating parameters of the cooling medium. These include the local irrigation density and the velocity of the dispersed medium at the surface of the thermal probe.

For reliable determination of local irrigation flow rate, as well as determination of the dispersed composition of drops, the pulse counting method, which has the possibility of practical implementation in our country, should be used.

To determine local conditions of non-stationary heat exchange, we have developed a scheme for measuring the EMF of temperature detectors installed in the body of the rod of the thermal probe, and also selected high-speed digital recording equipment.

The solution of the inverse problem of heat conduction will allow us to establish the degree of influence of practically all factors indicated as determining ones.

Keywords: experimental setup for studying local conditions of non-stationary heat exchange, high-temperature surface, sprayed liquid, method of identifying heat exchange conditions, slot nozzle, replaceable set of nozzles, block fastening, special coordinate device, control valve, superheated liquid, evaporative cooling, steam-water medium.

А. М. Переверзева, асистент, О. М. Дзевочко, к. техн. н., доцент

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДДІЛЕННЯ АБСОРБЦІЇ ТА ДИСТИЛЯЦІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ АМІАЧНИМ СПОСОБОМ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: кальцинована сода, ефективність, аміачний спосіб виробництва, відділення абсорбції та дистиляції, система керування

Кальцинована сода є одним із найбільш великотоннажних хімічних продуктів та найважливішим сировинним компонентом в різних галузях промисловості. Об'єм виробництва кальцинованої соди в значній мірі впливає на розвиток ряду інших галузей промисловості, до яких відносяться виробництво скла, чорної та кольорової металургії.

Високим ступенем концентрації характеризується не тільки сфера виробництва, а і сфера споживання кальцинованої соди. Світове споживання кальцинованої соди за 2012 рік склало, за оцінками експертів, 54,7 млн. т / рік, його зростання становить 1 % на рік.

Отримують кальциновану соду різними методами та з різної сировини.

За даними ДУ «НІОХІМ» в 2012 році приблизно 76 % кальцинованої соди вироблялось аміачним способом, зокрема за схемою Сольве – приблизно 47 %, методом висалювання Те Панго з одночасним отриманням хлористого амонію – близько 27 %, так званім методом сухого вапняку – не менше 2 %, методом висалюванням з одночасним отриманням хлористого кальцію – менше 0,2 %. За даними [1] у 2021 році було виготовлено 42 млн. т. синтетичної соди.

Сировиною для виробництва соди аміачним способом є хлорид натрію та карбонат кальцію у вигляді вапняку, рідше – крейда, а аміак, який знаходиться в технологічному циклі, відносно невеликі його виробничі втрати поповнюються зі сторони [2, 3].

В Україні до 1990 року було три содових заводи з сумарною потужністю 1,5 млн. тон кальцинованої соди на рік, що складало до 4 % світового обсягу її виробництва. В 1996 році у зв'язку з низькою рентабельністю виробництва був закритий содовий завод у місті Слов'янську потужністю 200 тис. тон на рік. В 2009 році був зупинений Лисичанський содовий завод потужністю 610 тис. тон на рік, який був заснований у 1891 році компанією Сольве. Основні причини його закриття – це висока вартість енергоресурсів та виснаження кондиційних запасів карбонатної сировини (крейди). З травня 2014 року в Україні сода кальцинована не виробляється. Єдиний національний виробник соди кальцинованої – ПАТ «Кримський содовий завод» знаходиться на анексованій території АР Крим.

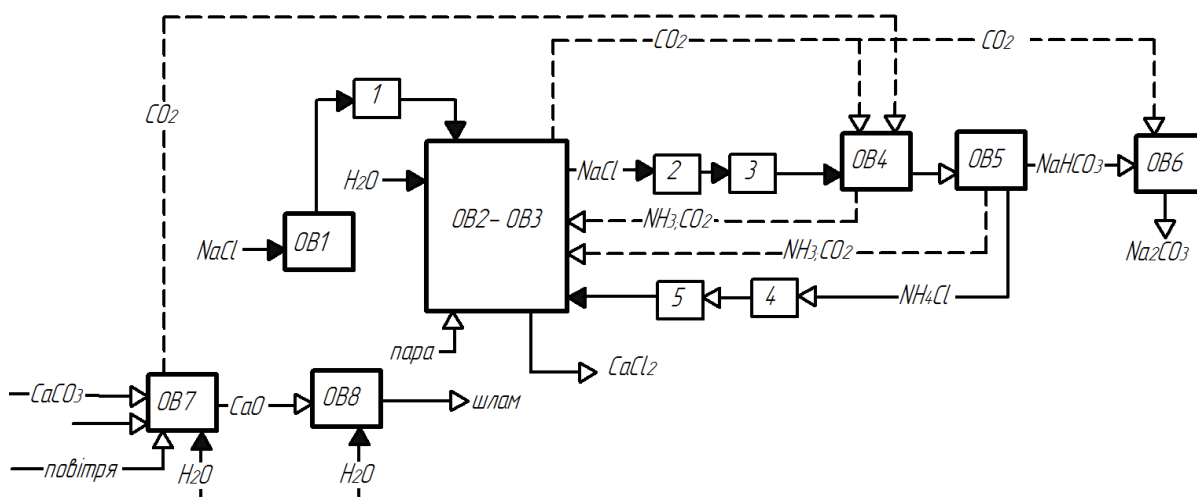
В Україні є оптимальна площадка для побудови заводу з виробництва кальцинованої соди, яка відповідає усім потребам, а саме наявність затверджених запасів хлоридно-натрієвої та карбонатної сировини, що відповідає потребам виробництва кальцинованої соди, а також територіальна близькість цих сировинних ресурсів. ДУ «НІОХІМ» пропонує створення індустріального парку, базовим

підприємством якого буде підприємство з виробництва кальцинованої соди на території колишнього содового заводу в місті Слов'янськ Донецької області [4].

Як технологічний об'єкт виробництва кальцинованої соди відрізняє складна схема матеріальних потоків, що протікають в основному через апарати колонного типу, багатостадійність неперервних хіміко-технологічних процесів, багатомірність, інерційність, складними залежностями між вхідними та вихідними параметрами технологічних режимів тощо, тобто володіє всіма характерними рисами складних систем.

Багатoelementне виробництво кальцинованої соди – один із найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів. На 1 тону кальцинованої соди витрачається 1,5–1,6 тон карбонатної сировини, 1,3–1,4 Гкал пари, 34–37 кВтгод електроенергії, 90–100 м³ води. Будь-яке суттєве відхилення від норм технологічного режиму в елементі одного із відділень (на кожне із яких діє велика кількість збурень) тягне за собою порушення роботи всього виробництва. Процес керування ускладнюється наявністю агресивних, абразивних та середовищ, що кристалізуються.

Виробництво кальцинованої соди відноситься до класу складних неперервних хіміко-технологічних виробництв та детально розглядається у роботах [2, 3]. Технологічна схема виробництва кальцинованої соди приведена на рис. 1.



ОВ1 – основне відділення очищення хлориду натрію; ОВ2- ОВ3 – основне відділення абсорбції-дистиляції (десорбції); ОВ4 – основне відділення карбонізації; ОВ5 – основне відділення фільтрування; ОВ6 – основне відділення кальцінації; ОВ7 – основне відділення отримання карбонатної сировини; ОВ8 – основне відділення переробка карбонатної сировини; 1 – напірний бак очищеного розсолу; 2 – холодильник амонізованого розсолу; 3 – збірник амонізованого розсолу; 4 – збірник фільтрової рідини; 5 – напірний бак фільтрової рідини

Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва кальцинованої соди

До складу виробництва кальцинованої соди входять 8 основних та 3 допоміжних відділень (під відділенням мають на увазі групу апаратів, які пов'язані спільністю процесів, що відбуваються в них через наявність провідних потоків та відповідних збірників для зберігання сировини). Основні відділення (ОВ) забезпечують своєчасну та якісну переробку відповідної сировини за технологічними регламентами, серед них: очищення хлориду натрію (ОВ1), абсорбція (ОВ2), дистиляція (десорбція) (ОВ3),

карбонізація (ОВ4), фільтрування (ОВ5), кальцинація (ОВ6), отримання карбонатної сировини (ОВ7), переробка карбонатної сировини (ОВ8). Допоміжні відділення (ДВ) своєчасно забезпечують відповідні основні відділення необхідними матеріальними потоками, серед них: компримування (ДВ1), водопостачання та водовідведення (ДВ2), вироблення пари та електроенергії (ДВ3) (на рисунку ці відділення не зображені).

Між відділеннями виробництва кальцинованої соди існує тісний взаємозв'язок, який видно в наступному ланцюжку: абсорбція (ОВ2) – карбонізація (ОВ4) – фільтрація (ОВ5) – кальцинація (ОВ6) – дистиляція (ОВ3). Порухення технологічного режиму на будь-якому одному відділенні приводить до розладу режиму на всіх відділеннях. Особливо тісно пов'язані один з одним відділення абсорбції та дистиляції. Частіше всього вони об'єднані у один цех. Апарати відділень абсорбції та дистиляції розраховані на одну і ту ж продуктивність та представляють собою один елемент абсорбції-дистиляції. І саме цей елемент і визначає продуктивність заводу.

Наведений вище докладний аналіз дозволяє зробити висновок про можливість і необхідність декомпозиції загальної задачі керування виробництва кальцинованої соди на підзадачі керування відділеннями абсорбції та дистиляції (ОВ2–ОВ3), карбонізації, фільтрування та кальцинації (ОВ4–ОВ5–ОВ6) та іншими виробничими відділеннями. Така декомпозиція є природною технологічно, оскільки відділення абсорбції та дистиляції не мають збірників для збирання парогазової суміші та дає можливість розроблювати та впроваджувати системи керування такими відділеннями та виробництвом кальцинованої соди в цілому за стадіями при умові узгодженні продуктивності відповідних відділень.

Існує принаймні декілька причин, що обґрунтовують розробку системи керування відділення абсорбції-дистиляції :

- аналіз загальної суми витрат на отримання 1 т кальцинованої соди підтверджує, що на реалізацію технологічних процесів відділень абсорбції-дистиляції приходить понад 60% всіх витрат на виробництво кальцинованої соди;
- втрати виробництва кальцинованої соди багато в чому обумовлені порушенням технологічного режиму у відділенні абсорбції-дистиляції;
- відділення абсорбції-дистиляції виробляє значну частину рідких відходів виробництва кальцинованої соди (9,1 м³ на 1 т соди) та при порушенні режиму його роботи значно збільшується ступінь забруднення навколишнього середовища [5-8].

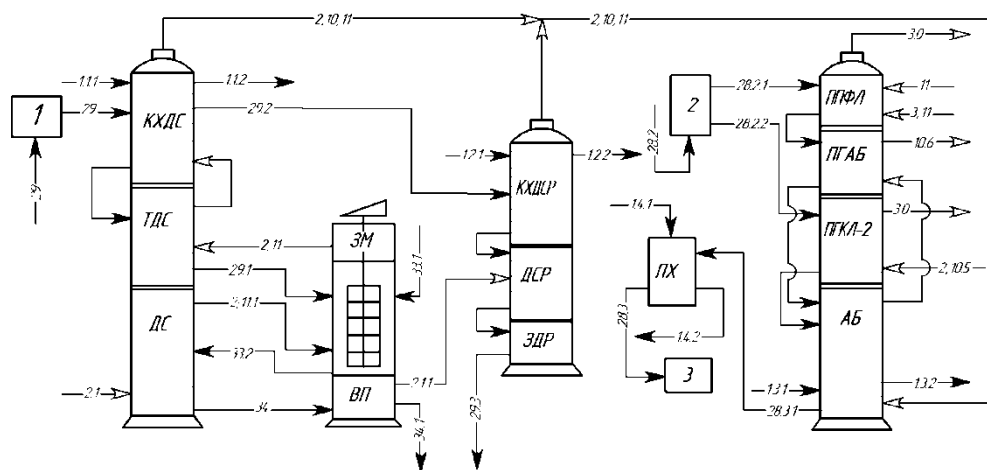
Таким чином, система керування абсорбції та дистиляції, забезпечує з одного боку, рішення першочергових задач зниження собівартості готового продукту та охорони навколишнього середовища, а з іншого боку, можливий подальший природний розвиток системи керування всім виробництвом як ієрархічної системи більш високого рівня.

Існує різновид технологічних схем відділення абсорбції-дистиляції (одна з них приведена на рис. 2.). Різновид цих схем зумовлений будовою абсорбційної колони, традиційно на содових заводах використовують два абсорбери барботажного типу та до складу абсорбційної колони входить холодильник газу дистиляції [2, 3]. У 70–80 роках минулого століття для поглинання аміаку та вуглекислого газу був розроблений абсорбер з протитічними трубно-решітчастими та решітчастими контактними елементами, який за продуктивність та іншими характеристиками переважав абсорбери барботажного типу. А для зменшення газових викидів виробництва кальцинованої соди науковці дослідили [9, 10], що більш доцільно розробляти вихрові апарати для абсорбції із застосуванням протитечійного способу контактування фаз.

Проте всі ці технологічні схеми відділення абсорбції та дистиляції характеризуються наступними особливостями:

1) гази, які виходять із абсорбційної колони не повинні містити скільки-небудь помітних кількостей аміаку (з 450–470 кг 100 % NH_3 на 1 т соди, що подається на абсорбцію, з газами губиться менше 1 кг 100 % NH_3);

2) з парогазової суміші, що подається з КХГД в АБ поступає переважна кількість аміаку (більш 80 %).



апарати: 1 – напірний бак фільтрової рідини, КХДС – конденсатор-холодильник колони дистиляції, ТДС – теплообмінник дистиляції, ДС – дистилер, ЗМ – змішувач, ВП – випарник, КХДСР – конденсатор-холодильник колони дистиляції слабкої рідини, ДСР – дистилер слабкої рідини, ЗДР – збірник дегазованої рідини, 2 – напірний бак очищеного розсолу (NaCl), ППФЛ – промивач повітря фільтрів, ПГАБ – промивач газу абсорбції, ПГКЛ-2 – другий промивач газу колон, АБ – абсорбер, ПХ – пластинчатий холодильник, 3 – збірник амонізованого розсолу; матеріальні потоки: 28.2, 28.2.1, 28.2.2 – очищений розсіл NaCl ; 1.1.1, 1.1.2, 1.2.1, 1.2.2, 1.3.1, 1.3.3, 1.4.1, 1.4.2 – вода; 28.3.1, 28.3 – амонізований розсіл; 3.11 – суміш повітря і аміаку, 11 – аміак, 3 – повітря, 10.6 – вуглекислий газ, 2.10.5 – суміш пару та вуглекислого газу, 29, 29.1 – фільтрова (маточна) рідина, 29.2 – слабка рідина, 29.3 – дегазована рідина 2.1, 2.1.1 – пара, 33.1, 33.2 – вапняна суспензія, 2.11, 2.11.1 – суміш пари і аміаку, 34, 34.1 – суспензія дистиляції, 2.10.11 – парогазова суміш

Рисунок 2 – Технологічна схема відділення абсорбції та дистиляції ВКС

Основним призначенням відділення абсорбції та дистиляції (ОВ2–ОВ3) (див. рис. 1) є практично повна регенерація аміаку та діоксиду вуглецю з фільтрової рідини (29) як ведучого потоку цього відділення та формування безперервного матеріального потоку парогазової суміші (2.10.11), що спрямовується на отримання регламентної кількості амонізованого розсолу (28.3) у вигляді безперервного матеріального потоку, що подається на відділення карбонізації (ОВ4) з наступними технологічними показниками [11, 12]:

– вміст в парогазовій суміші, % :

аміаку

51–53,

діоксиду вуглецю

26–28,

– вміст в амонізованому розсолі, н.д. (у ВКС застосовується позасистемна одиниця виміру концентрації – «нормальне ділення» (н.д.), яка відповідає 1/20 екв. речовини в 1 л розчину):

прямий титр аміаку (прямий титр розчину визначається титруванням проби рідини, що містить солі натрію і аміаку, а також аміак у вигляді NH_4OH , нормальним розчином соляної або сірчаної кислоти в присутності метилоранжу до фарбування проби в рожевий колір, при цьому результати аналізу виражаються в н.д.) 100-106,

хлорид-іонів	не менше 89,
– температура парагазової суміші, °С	58–60,
– температура амонізованого розсолу, °С	28–32.

При цьому одночасно відділення абсорбції та дистиляції повинно забезпечити поглинання аміаку (11) з вихлопних газів виробництва кальцинованої соди з доведенням концентрації аміаку в них до санітарних норм.

Технологічні процеси, що протікають у відділенні абсорбції та дистиляції визначаються двома основними фізико-хімічними процесами: регенерацією аміаку та діоксиду вуглецю із фільтрової рідини (ОВЗ) та абсорбцією виділених газів очищеним розсолом (ОВ2). Аміак служить для накопичення в розсолі іонів HCO_3^- у вигляді NH_4HCO_3 та для зв'язування хлор-іонів у вигляді NH_4Cl , причому (після регенерації аміаку із фільтрової рідини) він знаходиться в замкнутому технологічному циклі та не входить в склад готового продукту. В фільтровій рідині містяться зв'язані сполуки аміаку [NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] та напівзв'язані сполуки аміаку [$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, NH_4HCO_3]. Потік фільтрової рідини обумовлений попередньою за технологічною схемою виробництва кальцинованої соди відділенням, є ведучим для відділення абсорбції та дистиляції. Даний потік необхідно повністю переробити та він визначає навантаження як цього відділення, так і усіх відділень виробництва кальцинованої соди. Через те що, потік фільтрової рідини є ведучим для відділення, потоки пари, очищеного розсолу, вапняної суспензії, води на охолодження є залежними від ведучого потоку.

Таким чином, процес регенерації аміаку та діоксиду вуглецю вельми складний, потребує значних матеріально-енергетичних витрат та протікає в паралельно працюючих апаратах зі змінними в процесі роботи характеристиками, що робить актуальну задачу оптимального розподілення навантаження за фільтровою рідиною (що поступає з одного джерела) між паралельно працюючими елементами відділення абсорбції та дистиляції.

Висновки. Хіміко-технологічні процеси відділення абсорбції та дистиляції відносяться до класу технологічних процесів, в яких технологічний потік сировини, що переробляється знаходиться в неперервному контакті з технологічними апаратами, змінює свій хімічний склад. Переробка сировини досягається в результаті цілого ряду реакцій хімічного перетворення, міжфазного масообміну, змішування та поділу, нагрівання та охолодження.

Для рішення задачі керування відділенням абсорбції та дистиляції необхідно виділити наступні особливості технологічного процесу:

1. найбільш поширені відділення абсорбції-дистиляції складаються із чотирьох паралельно працюючих елементів;
2. характеристики елементів відділення різні та змінюються в часі;
3. на елементи відділення впливають значна кількість неконтрольованих впливів матеріальних потоків та навколишнього середовища;
4. є досить жорсткі обмеження, що накладаються на технологічний процес (у вигляді норм його поведінки), на матеріальні потоки, а також обумовлені роботою суміжних відділень виробництва кальцинованої соди.

Задача керування відділенням абсорбції та дистиляції може бути описана на основі проведеного дослідження як задача розподілу матеріальних ресурсів та енергії таким чином, що буде виконуватись як кінцева мета функціонування відділення абсорбції та дистиляції, так і мета всього виробництва кальцинованої соди. Крім того, повинні виконуватись обмеження, перераховані в пункті 4, враховуватись нестационарні характеристики елементів відділення та збурень, що описані в пунктах 2 та 3.

Щоб з єдиних позицій розглядати ціль функціонування відділення абсорбції та дистиляції і ціль виробництва кальцинованої соди, необхідно ввести техніко-економічний критерій (ТЕК) функціонування виробництва, що виражається через критерій функціонування його частин (відділень). Такий підхід дозволяє формалізувати задачу керування даного відділення та визначити структуру його рішення.

Література

1. Wallace P. Bolen U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. January 2022, P. 154–155.
2. Технологія соди та лугів : навч. посіб. / Іванченко Л.В., Кожухар В.Я., Брем В.В., Шаповал І.В. Одеса: ОП, 2021. 207 с.
3. Сода: навч. посіб. / Кожухар В.Я., Рябих В.Г., Брем В.В., Іванченко Л.В. Одеса: "Сімекс-прінт", 2012. 208 с.
4. Слов'янський індустріальний парк. URL: <https://niochim.kharkov.ua/uk/projects-3/priority-projects/slavyansk-industrial-park/> (дата звернення: 04.12.2023).
5. Михайлова Є.О., Маркова Н.Б., Багрова І.В., Гавриш Ю.Г., Панасенко В.О. Спосіб утилізації рідинних відходів виробництва кальцинованої соди // Химия и технология производств основной химической промышленности. 2013. Т. 77. С. 76–81.
6. Гринь Г.І., Грінцова А.В., Ларіна І.В., Кобзев О.В., Авіна С.І. Отримання кальцинованої соди аміачним способом та методи утилізації рідких відходів виробництва // «Молодий вчений». 2018. №10 (62). С. 126–129.
7. Marcin Cichosz, Urszula Kielkowska, Kazimierz Skowron, Łukasz Kiedzik, Sławomir Łazarski, Marian Szkudlarek, Beata Kowalska, Damian Zurawski. Changes in Syn-

thetic Soda Ash Production and Its Consequences for the Environment. *Materials*. 2022. № 15, 4828. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15144828>.

8. Georg Steinhauser Cleaner production in the Solvay Process: general strategies and recent developments. *Journal of Cleaner Production*. 2008. №16. P. 833–841.

9. Моїсєєв В. Ф., Манойло Є.В., Грубнік А.О. Ефективна абсорбція аміаку у виробництві кальцинованої соди // матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. «ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ: НАУКА, ЕКОНОМІКА ТА ВИРОБНИЦТВО», м. Шостка, 23-25 листопада 2016 р. Шостка, 2016. С. 100–101.

10. Моїсєєв В. Ф., Манойло Є.В., Грубнік А.О. Зниження техногенного навантаження на довкілля при проведенні процесу абсорбції аміаку у содовій промисловості // *Journal of Engineering Sciences*. 2016. Vol. 3. Issue 2. P. 1–7.

11. Jotanović Milovan B. Regeneracija amonijaka i ugljendioksida iz višekomponentnih rastvora – I. Postavka i razvoj matematičkog modela. *Hemijska industrija*. 2002. Vol. 56. No. 7–8. P. 330–337.

12. Jotanović Milovan B. Regeneracija amonijaka i ugljen-dioksida iz višekomponentnih rastvora II - Simulacija i analiza rezultata. *Hemijska industrija*. 2002. Vol. 56. No. 10. P. 422–428.

Bibliography (transliterated)

1. Wallace P. Bolen U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. January 2022, P. 154–155.

2. Tekhnolohiia sody ta luhiv: navch. posib. / Ivanchenko L.V., Kozhukhar V.Ia., Brem V.V., Shapoval I.V. Odesa: OP, 2021. 207 p.

3. Soda: navch. posib. / Kozhukhar V.Ia., Riabych V.H., Brem V.V., Ivanchenko L.V. Odesa: "Simeks-print", 2012. 208 p.

4. Slovianskyi industrialnyi park. URL: <https://niochim.kharkov.ua/uk/projects-3/priority-projects/slavyansk-industrial-park/> (data zvernennia: 04.12.2023).

5. Mykhailova Ye.O., Markova N.B., Bahrova I.V., Havrysh Yu.H., Panasenko V.O. Sposib utylizatsii ridynnykh vidkhodiv vyrobnytstva kaltsynovanoi sody // *Khymyia y tekhnolohyia proyzvodstv osnovnoi khymycheskoï promyshlennosti*. 2013. T. 77. P. 76–81.

6. Hryn H.I., Hrintsova A.V., Larina I.V., Kobziev O.V., Avina S.I. Otrymannia kaltsynovanoi sody amiachnym sposobom ta metody utylizatsii ridkykh vidkhodiv vyrobnytstva // «*Molodyi vchenyi*». 2018. №10 (62). P. 126–129.

7. Marcin Cichosz, Urszula Kielkowska, Kazimierz Skowron, Łukasz Kiedzik, Sławomir Łazarski, Marian Szkudlarek, Beata Kowalska, Damian Zurawski. Changes in Synthetic Soda Ash Production and Its Consequences for the Environment. *Materials*. 2022. № 15, 4828. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15144828>.

8. Georg Steinhauser Cleaner production in the Solvay Process: general strategies and recent developments. *Journal of Cleaner Production*. 2008. №16. P. 833–841.

9. Moisieiev V. F., Manoilo Ye.V., Hrubnik A.O. Efektyvna absorbttsiia amiaku u vyrobnytstvi kaltsynovanoi sody // materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «KhIMICHNA TEKhnOLOHIJA: NAUKA, EKONOMIKA TA VYROBNYTSTVO», m. Shostka, 23-25 lystopada 2016 r. Shostka, 2016. P. 100–101.

10. Moisieiev V. F., Manoilo Ye.V., Hrubnik A.O. Znyzhennia tekhnohennoho navantazhennia na dovkillia pry provedenni protsesu absorbttsii amiaku u sodovii promyslovosti // Journal of Engineering Sciences. 2016. Vol. 3. Issue 2. P. 1–7.

11. Jotanović Milovan B. Regeneracija amonijaka i ugljendioksida iz višekomponent-nih rastvora-I. Postavka i razvoj matematičkog modela. *Hemijska industrija*. 2002. Vol. 56. No. 7–8. P. 330–337.

12. Jotanović Milovan B. Regeneracija amonijaka i ugljen-dioksida iz višekompo-nentnih rastvora -II. Simulacija i analiza rezultata. *Hemijska industrija*. 2002. Vol. 56. No. 10. P. 422–428.

УДК 681.5 : 661.3

А. М., Переверзева, О. М. Дзевочко

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДДІЛЕННЯ АБСОРБЦІЇ ТА ДИСТИЛЯЦІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ АМІАЧНИМ СПОСОБОМ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Кальцинована сода є одним із найбільш великотоннажних хімічних продуктів та найважливішим сировинним компонентом в різних галузях промисловості. Об'єм виробництва кальцинованої соди в значній мірі впливає на розвиток ряду інших галузей промисловості, до яких відносяться виробництво скла, чорної та кольорової металургії.

Високим ступенем концентрації характеризується не тільки сфера виробництва, а і сфера споживання кальцинованої соди. Світове споживання кальцинованої соди за 2012 рік склало, за оцінками експертів, 54,7 млн. т / рік, його зріст становить 1 % на рік.

Як технологічний об'єкт виробництва кальцинованої соди відрізняє складна схема матеріальних потоків, що протікають в основному через апарати колонного типу, багатостадійність неперервних хіміко-технологічних процесів, багатомірність, інерційність, складними залежностями між вхідними та вихідними параметрами технологічних режимів тощо, тобто володіє всіма характерними рисами складних систем. До складу виробництва кальцинованої соди входять 8 основних та 3 допоміжних відділень (під відділенням мають на увазі групу апаратів, які пов'язані спільністю процесів, що відбуваються в них через наявність провідних потоків та відповідних збірників для зберігання сировини).

У статті аналізується можливість і необхідність декомпозиції загальної задачі керування виробництва кальцинованої соди на підзадачі керування відділеннями абсорбції та дистиляції; карбонізації, фільтрування та кальцинації та іншими

виробничими відділеннями. Така декомпозиція є природною технологічно, оскільки відділення абсорбції та дистиляції не мають збірників для збирання парогазової суміші та дає можливість розроблювати та впроваджувати системи керування такими відділеннями та виробництвом кальцинованої соди в цілому за стадіями при умові узгодженні продуктивності відповідних відділень. Також у статті проводиться дослідження відділення абсорбції та дистиляції як об'єкту керування та ставиться загальна задача керування цим відділенням.

Ключові слова: кальцинована сода, ефективність, аміачний спосіб виробництва, відділення абсорбції та дистиляції, система керування.

A. M. Pereverzieva, O. M. Dzevochko

RESEARCH OF THE PROCESS OF ABSORPTION AND DISTILLATION OF SODA ASH PRODUCTION BY THE AMMONIA METHOD AS A CONTROL OBJECT

Soda soda is one of the largest volume chemical products and the most important raw material component in various industries. The volume of soda ash production significantly affects the development of a number of other industries, including the production of glass, ferrous and non-ferrous metallurgy.

Not only the sphere of production, but also the sphere of consumption of soda ash is characterized by a high degree of concentration. The global consumption of soda ash in 2012 was, according to experts, 54.7 million tons / year, its growth is 1% per year.

As a technological facility for the production of soda ash, it is distinguished by a complex scheme of material flows flowing mainly through column-type devices, multi-stage continuous chemical-technological processes, multidimensionality, inertia, complex dependencies between input and output parameters of technological modes, etc., i.e. it has all the characteristic features complex systems. The production of soda ash includes 8 main and 3 auxiliary departments (a department means a group of devices that are connected by the commonality of processes occurring in them due to the presence of leading flows and appropriate collectors for storing raw materials).

The article analyzes the possibility and necessity of decomposition of the general task of control soda ash production into the subtask of managing absorption and distillation departments; carbonation, filtering and calcination and other production departments. Such a decomposition is technologically natural, since the absorption and distillation departments do not have headers for collecting the steam-gas mixture and makes it possible to develop and implement control systems for such departments and the production of soda ash as a whole by stages, provided that the productivity of the relevant departments is coordinated. The article also conducts a study of the absorption and distillation department as an object of control and sets the general task of control this department.

Keywords: soda ash, efficiency, ammonia production method, absorption and distillation department, control system.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ВВКМ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОБ'ЄМНИЙ ПИТОМИЙ ОПІР

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка, щільність, пористість, електричний об'ємний питомий опір.

Розробка та вдосконалення енергетичних установок вимагає нових підходів до створення матеріалів для критичних компонентів обладнання. Такі матеріали повинні працювати не тільки в умовах високих температур, мати високу механічну міцність, радіаційну та корозійну стійкість, що дозволяють зберегти працездатність систем протягом часу у повітряному середовищі, необхідного для ліквідації аварії. Одними із матеріалів, які традиційно використовуються в різних галузях промисловості є вуглець-вуглецеві композити [1]. Потенціал цих матеріалів і на сьогоднішній день ще не вичерпаний, їх розглядають як одні із найпріоритетніших матеріалів для використання як в авіаційній, космічній техніці, автомобільній промисловості, так і при створенні різноманітних електричних нагрівачів. Це пов'язано з їх унікальними фізико-механічними властивостями, які забезпечують їм перевагу порівняно з традиційними матеріалами - металами і металевими сплавами [2–4].

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) є різномірною структурою, що складається з волокон, матриці та пор. Зміни у структурі вуглецевого матеріалу відбуваються під впливом високих температур та часу ізотермічного витримання, що відображається у змінах фізичних і хімічних властивостей. Високотемпературна обробка за певних технологічних умов та часу ізотермічного витримання заготовок, наступна карбонізація та ущільнення заготовок є важливими технологічними етапами, які впливають на подальші структурні, фізичні та хімічні властивості вуглецевих композитів.

Дослідження та вирішення проблем можливих причин зміни механічних та електричних характеристик вихідних матеріалів ВВКМ та технології отримання матриці сприяють їх широкому використанню в конструкціях електричних нагрівачів спеціальної техніки.

У роботі досліджено структуру та властивості ВВКМ, в якому вуглецева матриця отримана методом осадження піролітичного вуглецю у пористому об'ємі вуглеволоконістого каркаса (преформи) з використанням термоградієнтних газофазних технологій піроущільнення. Формування преформи відбувається шляхом намотування шарів з вуглецевої тканини на графітову оправку. Технологічні режими термоградієнтних газофазних методів ущільнення піровуглецем при температурах 800–1100 °С суттєво впливають на структуру матеріалу.

При формуванні твердого об'ємного тіла можуть утворюватися пори (порожнини), які можуть бути ізольовані одна від одної і не зв'язані з поверхнею; такі пори називаються недоступними. При цьому, пори, які мають вихід на поверхню

твердого тіла, але не пов'язані між собою, називаються тупиковими. Інший тип - це каналні або транспортні пори, які мають зв'язок між собою і з поверхнею твердого тіла. Через ці пори може відбуватися масоперенесення речовини в пористому тілі (фільтрація, дифузія). Середній радіус переважаючих пор: нижній межа становить 1,7–2,5 мкм (тип - дрібнозернистий графіт); верхня межа відповідає 8,9–11,2 мкм (крупнозернистий графіт). Ущільнення преформи термоградієнтним газофазним методом характеризується анізотропією, обумовленою типом використовуваного вуглеволокнистого каркаса.

Процес осадження піроуглероду в порах ВВКМ відбувається шарами, передусім на поверхні посилення волокон [5]. Механізм осадження шарів піроуглероду на поверхні волокон, на нашу думку, подібний до механізму епітаксialного росту і, по суті, аналогічний формуванню шарів графену. Подібні і схожі методи утворення шарів з графену при розкладанні газової суміші на поверхні різних матеріалів висловлені в роботі [5]. Наявність в композиційному матеріалі шарів графену веде до покращення механічних, теплопровідних і електричних характеристик матеріалу. Найбільшого поширення в матеріалознавстві в якості нанорозмірних наповнювачів композитів різного призначення отримали наноструктури вуглецю. З моменту відкриття вуглецевих нанотрубок (ВНТ) вони стали об'єктом численних експериментальних і теоретичних досліджень. Цікавість пояснюється отриманням достатньо високих механічних, хімічних і електричних характеристик даних наноструктур вуглецю. На сьогоднішній день опубліковано велику кількість робіт, присвячених дослідженню залежностей електричних властивостей вуглецевих нанотрубок від їх структури і розмірів [6,7].

ВНТ, залежно від їх структури та будови, можуть проявляти властивості як металу, так і напівпровідника, що підтверджується зменшенням електричного опору ВВКМ при підвищенні температури, тобто температурна залежність має від'ємний температурний коефіцієнт.

Мінімум у температурній залежності електричного питомого опору ВВКМ обумовлений взаємодією двох чинників: зниженням електричного опору аморфного вуглецю, який має напівпровідникові властивості, та зростанням електричного опору впорядкованого (кристалічного) вуглецю, що має властивості напівметала. В процесі термообробки кількість аморфного вуглецю зменшується, в результаті чого графіт набуває властивості напівпровідника, і мінімум питомого електричного опору зміщується в бік більш низьких температур. Взаємодія вуглецю та графіту в композитах, в яких протікає подібний процес, обумовлює утворення перколяційних кластерів. Аналогічні процеси досліджуються в фізико-хімічних та інших галузях для опису виникнення зв'язаних структур у випадкових середовищах, що складаються з окремих елементів [8]. В представлений роботі дані процеси не розглядаються.

Протікання електричного струму в пористому матеріалі також є досить складним явищем, оскільки воно залежить від різних факторів, таких як розмір і форма пор, електричні властивості матеріалу і пор, а також наявність носіїв заряду (наприклад, електронів або іонів).

ВВКМ є чисто вуглецевим матеріалом, який має певну пористість, що залежить від типу використаного вуглецевого волокна та технології виготовлення зразків. До експлуатаційних фізичних властивостей ВВКМ, які є предметом цього дослідження, відносяться такі параметри, як щільність, пористість та електричний об'ємний питомий опір, значення яких залежать від ступеня розподілу пор за розмірами, середнім радіусом та виштовхуваністю капілярів.

Метою представленої роботи є дослідження гідростатичними методами уявної щільності ВВКМ та визначення впливу її значень на електричний об'ємний питомий опір матеріалу.

Для визначення щільності та пористості використані модельні тиглі з ВВКМ. Були проведені зважування сухого зразка – маса P_1 , вага мокрого зразка (після кип'ятіння у воді до постійної ваги) P_2 , та маса зразка у воді P_3 . Потім були розраховані уявна щільність ρ_y , пікнометрична щільність ρ_n та пористість виробу P_0 за формулами [9]:

$$\rho_y = \frac{P_1}{P_2 - P_3}, \quad P_0 = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_3} \cdot 100\%, \quad \rho_n = \frac{P_1}{P_1 - P_3}.$$

Заготовки з ВВКМ № 1–10 для тиглів мали такі геометричні розміри: зовнішній діаметр заготовки ($D_{\text{зовн}}$) становив близько 58 мм, внутрішній діаметр заготовки ($D_{\text{внутр}}$) був близько 27 мм. Висота заготовок знаходилась у межах 44,9–45,1 мм. Усі розміри вихідного матеріалу наведені в табл.1. Щільність за геометричними розмірами (ρ) знаходилась у межах від 1,244 г/см³ до 1,327 г/см³.

Таблиця 1 – Характеристики заготовок з ВВКМ

№ заготовки	$D_{\text{зовн}}$, мм	$D_{\text{внутр}}$, мм	H_1 , мм	H_2 , мм	V , см ³	m , г	ρ , г/см ³
1	58,0	27,05	45,1	34,7	99,17	130,37	1,314
2	57,9	27,1	45,1	34,6	98,74	125,62	1,272
3	57,95	27,0	45,1	34,6	99,09	123,28	1,244
4	58,0	27,05	45,0	34,5	99,02	127,79	1,290
5	57,95	27,05	44,95	34,5	98,68	125,73	1,274
6	58,0	27,15	44,9	34,6	98,55	130,86	1,327
7	57,95	27,1	45,0	34,6	98,68	126,88	1,285
8	58,0	27,05	45,1	34,5	99,28	126,67	1,275
9	58,0	26,9	45,0	34,5	99,24	126,71	1,276
10	57,95	27,15	45,0	34,5	98,67	122,95	1,246

Примітка: H_1 – висота циліндричної заготовки, H_2 – висота вирізу циліндру діаметром $D_{\text{внутр}}$, V – об'єм, m – маса

Для більш точного визначення щільності, а також для визначення пористості вихідного матеріалу ці заготовки були протестовані гідростатичним методом. В якості рідини для зважування використовували дистильовану воду, щільність якої для підвищення достовірності результатів вимірювали під час проведення дослідження. Суть методу полягає в зважуванні зразка на повітрі, а потім у воді та обчисленні його щільності, тобто визначали P_1 – вага сухого зразка, P_2 – вага мокрого зразка та P_3 – вага зразка у воді. Уявна щільність, визначена таким методом, склала 1,257–1,374 г/см³, що дещо вище, ніж за геометричними розмірами. Пористість заготовок коливається в межах від 8,2 % до 12,5 %.

Для підвищення міцності ВВКМ у наступних експериментах всі заготовки для тиглів ущільнювали в установці піролізу за таким режимом: температуру на поверхні заготовок піднімали від 800 °С до 1100 °С зі швидкістю 10–15 град/год. Тривалість процесу ущільнення становила 24 години. Витрати газу 3–5 м³/год. Після ущільнення

щільність заготовок збільшилась і склала 1,401–1,569 г/см³, пористість зменшилась і становила 3,4–5,4 %.

З ущільнених заготовок були виточені модельні тиглі. Отримані тиглі (коди 14–23, табл. 2) були протестовані гідростатичним методом і повторно розраховані відповідні щільності та пористість. Експериментальні дані представлені в табл. 2. Уявна щільність тиглів з ущільнених заготовок склала 1,362–1,419 г/см³, пористість 4,2–5,8 %.

Таблиця 2 – Щільність та пористість партії тиглів з ущільнених заготовок

Код тигля	P ₁ , г	P ₂ , г	P ₃ , г	ρ _у , г/см ³	Π ₀ , %	ρ _п , г/см ³
14	54,72	56,38	17,30	1,400	4,2	1,46
15	55,12	57,33	16,87	1,362	5,5	1,44
16	55,39	57,46	17,68	1,392	5,2	1,47
17	54,68	56,77	16,67	1,364	5,2	1,44
18	55,91	58,10	18,33	1,406	5,5	1,49
19	54,98	57,12	17,10	1,374	5,3	1,45
20	55,33	57,40	18,40	1,419	5,3	1,50
21	52,42	54,37	15,92	1,363	5,1	1,44
22	54,21	56,48	17,25	1,382	5,8	1,47
23	56,46	58,46	18,42	1,410	5,0	1,48

Далі тиглі з кодами 14–23 були повторно ущільнені в установці піролізу протягом 6 годин за таким режимом: для тиглів з кодами 14–18 встановили температуру на поверхні тиглів 900 °С, витримали протягом 3 годин, потім підняли температуру до 1000 °С, витримали 2 години, знову підняли до 1050 °С і витримали 1 годину. Витрати газу склали 3–4 м³/год. Для ущільнення тиглів № 19–23 встановили температуру на поверхні 900°С, витримали 2 години, потім витримали 1 годину при температурі 950 °С, 1 годину при температурі 1000 °С, 1 годину при температурі 1050 °С і ще 1 годину при температурі 1100 °С. Витрати газу залишилися не змінні. Після ущільнення тиглі також були протестовані гідростатичним методом для визначення щільності та пористості. Отримані значення наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Щільність та пористість партії тиглів з ВВКМ після ущільнення

Код тигля	P ₁ , г	P ₂ , г	P ₃ , г	ρ _у , г/см ³	Π ₀ , %	ρ _п , г/см ³
14	55,87	57,28	17,69	1,411	3,6	1,46
15	56,82	58,52	17,48	1,385	4,1	1,44
16	56,98	58,71	18,25	1,408	4,3	1,47
17	56,31	57,8	17,13	1,385	3,7	1,44
18	57,75	59,48	19,02	1,427	4,3	1,49
19	56,46	58,02	17,6	1,397	3,9	1,45
20	57,89	59,33	19,4	1,450	3,6	1,50
21	54,69	56,08	16,81	1,393	3,5	1,44
22	55,83	59,05	18,03	1,410	3,6	1,45
23	58,01	59,53	18,99	1,431	3,7	1,49

Для тиглів після ущільнення уявна щільність становить 1,385–1,450 г/см³ (порівняно з 1,362–1,419 г/см³ до ущільнення), пористість після ущільнення для тиглів складає 3,5–4,3 %. Розподіл пор і їх розмірів по об'єму прийнято умовно рівномірним. Порівняльна таблиця з щільністю та пористістю тиглів до та після ущільнення наведена в таблиці 4.

Таблиця 4 – Зведені характеристики тиглів до та після ущільнення

Код тигля	ρ_y , г/см ³		P_0 , %	
	до ущільнення	після ущільнення	до ущільнення	після ущільнення
14	1,400	1,411	4,2	3,6
15	1,362	1,385	5,5	4,1
16	1,392	1,408	5,2	4,3
17	1,364	1,385	5,2	3,7
18	1,406	1,427	5,5	4,3
19	1,374	1,397	5,3	3,9
20	1,419	1,450	5,3	3,6
21	1,363	1,393	5,1	3,5
22	1,382	1,410	5,8	3,6
23	1,410	1,431	5,0	3,7

Порівняльний аналіз щільності та пористості тиглів до і після ущільнення дозволяє зробити наступні висновки. Початкові дані свідчать про високий рівень пористості та відносно низьку густоту матеріалу. Однак після процесу ущільнення спостерігається значне зменшення пористості та збільшення густоти, що свідчить про ефективність даної технології. Отримані результати свідчать про те, що процес ущільнення сприяє покращенню структури матеріалу, його фізичних та експлуатаційних характеристик, що є ключовим фактором для підвищення якості та міцності кінцевого виробу.

Розглянуті параметри ВВКМ, такі як щільність, пористість та електричне об'ємний питомий опір, мають важливе значення в процесі виробництва ВВКМ та у подальшому застосуванні в різних галузях. Вимірювання щільності дозволяє контролювати процес формування матеріалу та його структуру, що впливає на його міцність та теплофізичні властивості. Вимірювання пористості важливе для оцінки якості матеріалу, його повітропроникності, а також для оптимізації технологічного процесу його виробництва.

Електричний об'ємний питомий опір є мірою опору матеріалу проходженню електричного струму через його об'єм. Цей параметр важливий для оцінки електричних властивостей ВВКМ, таких як їх провідність, та розраховується за формулою [10]:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{t},$$

де R_v – об'ємний активний опір, Ом; S – площа поперечного перерізу тигля, мм²; t – висота тигля, м.

Одним із способів вимірювання опору матеріалу є використання чотириточкового зонду. Ця техніка передбачає приведення чотирьох однаково розташованих зондів у контакт з досліджуємым матеріалом невідомого опору [11]. Для вимірювання об'ємного

активного опору використовувався цифровий вимірювач RLC E7-10: діапазон вимірювань активного опору от 0,001 Ом до 10 МОм, частота вимірювань 1000 Гц, напруга на вимірюваному об'єкті 4,3 В.

Вимірювання опору тиглів проводили в термостаті при температурі 20 ± 1 °С. Тигель розміщувався між двома електродами, форма яких відповідала контуру поперечного перерізу тигля. Вимірювальні електроди виконані планарними, з мідної фольги товщиною 0,1 мм. Електроди стискали з тиглем важельно-гвинтовим пресом, який забезпечує тиск $5,88 \pm 0,03$ МПа [12]. Пропускаючи через тигель постійний електричний струм, за допомогою вимірювальних електродів вимірювалося падіння напруги між торцями виробу, і розрахунковим шляхом визначалося значення об'ємного електричного опору. Результати розрахунку об'ємного електричного питомого опору повторно ущільнених тиглів із ВВКМ наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Характеристики повторно ущільнених тиглів

Код тигля	ρ_y , г/см ³	П ₀ , %	ρ_v , Ом·мм ² /м
14	1,411	3,6	39,612
15	1,385	4,1	40,973
16	1,408	4,3	39,885
17	1,385	3,7	40,971
18	1,427	4,3	39,485
19	1,397	3,9	39,999
20	1,450	3,6	38,94
21	1,393	3,5	40,259
22	1,361	4,1	41,517
23	1,431	3,7	39,156

Розбіжність у розрахунках вимірювань уявної щільності приблизно на $\pm 2,1\%$ можна пояснити очевидною нерівномірністю просочення преформи.

Отримані результати підтверджують, що уявна щільність матеріалу ВВКМ впливає на його електричний об'ємний питомий опір. На рис. 1 приведений графік залежності електричного об'ємного питомого опору від уявної щільності ВВКМ.



Рисунок 1 – Залежність електричного об'ємного питомого опору від уявної щільності

З результатів дослідження видно, що електричний об'ємний питомий опір залежить від багатьох факторів, включаючи і щільність матеріалу. Висока уявна

щільність сприяє зменшенню пористості матеріалу, що, в свою чергу, впливає на електричний об'ємний питомий опір. Таким чином, контроль щільності є важливим аспектом для досягнення певного рівня електричної провідності у вуглець-вуглецевих композитних матеріалів.

Отримані під час дослідження результати свідчать про те, що процес ущільнення ВВКМ сприяє поліпшенню як структури заготовок, так і тиглів, а також підвищенню їх фізичних та експлуатаційних характеристик, що робить їх більш придатними для використання в умовах підвищених температур, агресивних середовищ, у виробництві термостійких компонентів та інших високотехнологічних областях.

Зміна характеристик ВВКМ при повторному ущільненні заготовок свідчить про суттєвий вплив цього процесу на якість матеріалу. Повторне ущільнення збільшує щільність ВВКМ, що призводить до зменшення пористості та покращення механічних властивостей; змінює розподіл пор по об'єму ВВКМ, що впливає на пористість і міцність матеріалу.

Випробування на стенді модельних зразків з ВВКМ підтверджують, що підвищення уявної щільності матеріалу призводить до зменшення його електричного об'ємного питомого опору. Для забезпечення контролю в промисловій практиці ефективним і доступним методом оцінки ступеня завершення кристалічних перетворень і визначення ступеня графітизації при високотемпературній обробці вуглецевих матеріалів можна рекомендувати порівняння електричного об'ємного питомого опору робочого зразка з еталонним.

Таким чином, вимірювання параметрів ВВКМ відіграє ключову роль у забезпеченні їх якості, відповідності технічним вимогам та ефективного використання. Оцінка таких параметрів, як щільність, пористість і електричний об'ємний питомий опір, дозволяє контролювати процес виробництва та якість кінцевого продукту. Ці дані допомагають оптимізувати технологічні процеси та регулювати склад композиційних матеріалів для досягнення бажаних властивостей і характеристик. Точне вимірювання цих параметрів також сприяє підвищенню надійності та довговічності матеріалів під час їх застосування в авіаційній, космічній техніці, автомобільній промисловості та при розрахунку промислових електронагрівачів.

Література

1. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) / V.N. Voyevodin, Yu.O. Gribanov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Gujda // Problems of atomic science and technology. – 2015, No 2 (96), p. 52–64.
2. Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation / I.V. Gurin, I.Sh. Nevliudov, V.Ye. Ovcharenko, O.V. Tokarieva // Problems of atomic science and technology. – 2024, № 1 (149) p. 125–127.
3. Застосування ВВКМ для виготовлення високотемпературних нагрівачів теплових вузлів з автоматичним регулюванням температури / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023, №3, с. 56–66.
4. Струмопідвід для резистивних ВВКМ нагрівачів / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2023, №4, с. 49–57.
5. About the possibility of the TG-CVI processes realizing at the decreased temperatures / I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2015, № 5 (99), p. 140–144.

6. Zhang T, Mubeen S, Myung NV, Deshusses MA. Recent progress in carbon nano-tube-based gas sensors. *Nanotechnology*. 2008 Aug 20; 19(33):332001. DOI: 10.1088/0957-4484/19/33/332001.
7. Recum P, Hirsch T. Graphene-based chemiresistive gas sensors. *Nanoscale Adv*. 2023 Oct 23;6(1):11-31. DOI: 10.1039/d3na00423f.
8. Herega A., Vyrovoy V., Pysarenko A. Percolation Model of Composites: Fraction Clusters and Internal Boundaries. // *International Journal of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 142–146.
9. Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Griбанov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // *Problems of atomic science and technology*. – 2020, № 1 (125), p. 154–160.
10. Електроматеріалознавство: навч. посібн. / О. В. Паржницький, С. В. Аушева, Г. Ю. Шулепіна. – Київ: Грамота, 2023. – 224 с.
11. Математичне моделювання контролю питомого електричного опору матеріалів електроконтактним чотиризондовим методом / Є.Р. Доценко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2010, № 1 (34), с. 82–90.
12. Патент 73401 У Україна, МПК G01R 27/02 (2006.01). Установка для вимірювання питомого електричного опору вуглецевих матеріалів при високих температурах / Т.В. Чирка, Г.М. Васильченко, Ю.В. Дудник; заявник і патентовласник НТУ України «Київ. політехн. ін-т». – № u 2012 02096; заявл. 23.02.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18. – 5 с.

Bibliography (transliterated)

1. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review) / V.N. Voyevodin, Yu.O. Griбанov, V.A. Gurin, I.V. Gurin, V.V. Gujda // *Problems of atomic science and technology*. – 2015, No 2 (96), p. 52–64.
2. Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation / I.V. Gurin, I.Sh. Nevliudov, V.Ye. Ovcharenko, O.V. Tokarieva // *Problems of atomic science and technology*. – 2024, № 1 (149) p. 125-127.
3. Zastosuvannia VVKM dlia vyhotovlennia vysokotemperaturnykh nahrivachiv teplovykh vuzliv z avtomatychnym rehuliuivanniam temperatury / Gurin I.V., Nevliudov I.Sh., Ovcharenko V.Ye., Tokarieva O.V. // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. – 2023, № 3, p. 56-66.
4. Strumopidvid dlia rezystyvnykh VVKM nahrivachiv / Gurin I.V., Nevliudov I.Sh., Ovcharenko V.Ye., Tokarieva O.V. // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. – 2023, № 4, p. 49-57.
5. About the possibility of the TG-CVI processes realizing at the decreased temperatures / I.V. Gurin // *Problems of atomic science and technology*. – 2015, № 5 (99), p. 140–144.
6. Zhang T, Mubeen S, Myung NV, Deshusses MA. Recent progress in carbon nano-tube-based gas sensors. *Nanotechnology*. 2008 Aug 20; 19(33):332001. DOI: 10.1088/0957-4484/19/33/332001.
7. Recum P, Hirsch T. Graphene-based chemiresistive gas sensors. *Nanoscale Adv*. 2023 Oct 23;6(1):11-31. DOI: 10.1039/d3na00423f.
8. Herega A., Vyrovoy V., Pysarenko A. Percolation Model of Composites: Fraction Clusters and Internal Boundaries. // *International Journal of Composite Materials*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 142–146.

9. Study on corrosion properties of carbon-carbon composites / Yu.A. Gribanov, I.V. Gurin, V.V. Gujda, A.N. Bukolov, V.V. Kolosenko // Problems of atomic science and technology. – 2020, № 1 (125), p. 154–160.

10. Elektromaterialoznavstvo: navch. posibn. / O.V. Parzhnyskyi, S.V. Ausheva, H.Yu. Shulepina. – Kyiv: Hramota, 2023. – 224 p.

11. Matematychnе modeliuвання kontroliu pytomoho elektrychnoho oporu materialiv elektrocontactnym chotyryzondovym metodom / Ye.R. Dotsenko // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. – 2010, № 1 (34), p. 82-90.

12. Patent 73401 U Ukraina, MPK G01R 27/02 (2006.01). Ustanovka dlia vymiriuvannya pytomoho elektrychnoho oporu vuhletsevykh materialiv pry vysokykh temperaturakh / T.V. Chyrka, H.M. Vasylychenko, Yu.V. Dudnyk; zaiavnyk i patentovlasnyk NTU Ukrainy «Kyiv. politekhn. in-t». – № u 2012 02096; zaiavl. 23.02.2012; opubl. 25.09.2012, Biul. № 18. – 5 p.

УДК 621.365.4

I. В. Гурін, к.техн.н., I. Ш. Невлюдов, д.техн.н., професор,
В. Є. Овчаренко, д.техн.н., професор, О. В. Токарева, к.техн.н., професор

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ВВКМ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОБ'ЄМНИЙ ПИТОМИЙ ОПІР

В статті досліджено структуру та властивості вуглець-вуглецевих композитних матеріалів (ВВКМ), в яких вуглецева матриця формується методом осадження піролітичного вуглецю у пористому об'ємі вуглеволокнутого каркаса з використанням термоградієнтних газофазних технологій піроуцільнення.

Представлено результати дослідження уявної щільності ВВКМ гідростатичними методами та її вплив на електричний об'ємний питомий опір матеріалу. У проведеному дослідженні встановлено, що електричний об'ємний питомий опір ВВКМ значною мірою залежить від ряду факторів, одним з яких є щільність матеріалу. Збільшення уявної щільності матеріалу призводить до зниження його пористості, що, в свою чергу, впливає на зменшення електричного опору. Підкреслено, що контроль щільності стає ключовим чинником для забезпечення оптимальних показників електропровідності вуглець-вуглецевих композитних матеріалів.

Показано, що ущільнення ВВКМ значно покращує структуру заготовок і тиглів, підвищуючи їх фізичні та експлуатаційні характеристики. Це робить їх більш придатними для використання в умовах високих температур, агресивних середовищ, у виробництві термостійких компонентів та інших високотехнологічних областях.

Повторне ущільнення ВВКМ виявило суттєвий вплив на якість матеріалу. Показано, що збільшення щільності після додаткового ущільнення призводить до зниження пористості, покращення механічних властивостей і зміни розподілу пор у матеріалі, що позитивно впливає на його пористість та міцність.

Проведені стендові дослідження модельних зразків з ВВКМ показали, що збільшення уявної щільності матеріалу призводить до зниження його електричного опору. Для забезпечення контролю в промисловій практиці ефективним і доступним методом оцінки ступеня завершення кристалічних перетворень і визначення ступеня графітизації при високотемпературній обробці вуглецевих матеріалів рекомендовано порівняння електричного об'ємного питомого опору робочого зразка з еталонним.

Підкреслено важливість контролю параметрів щільності, пористості та електричного опору для оптимізації технологічних процесів і забезпечення високої якості кінцевих продуктів. Отриманні дані можуть бути корисними для застосувань у різних галузях промисловості.

Ключові слова: технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка, щільність, пористість, електричний об'ємний питомий опір.

I. Hurin, I. Nevlyudov, V. Ovcharenko, O. Tokarieva

INVESTIGATION OF THE DENSITY OF CCCM AND ITS INFLUENCE ON SPECIFIC VOLUME ELECTRICAL RESISTIVITY

This article investigates the structure and properties of carbon-carbon composite materials (CCCM), where the carbon matrix is formed by the deposition of pyrolytic carbon in the porous volume of a carbon fiber preform using thermogradient gas-phase pyrolysis densification technologies.

The results of studying the apparent density of CCCM by hydrostatic methods and its influence on the specific volume electrical resistivity of the material are presented. The conducted study established that the specific volume electrical resistivity of CCCM significantly depends on a number of factors, one of which is the material density. An increase in the apparent density of the material leads to a decrease in its porosity, which, in turn, affects the decrease in electrical resistance. It is emphasized that density control becomes a key factor in ensuring optimal electrical conductivity of carbon-carbon composite materials.

It is shown that the densification of CCCM significantly improves the structure of blanks and crucibles, increasing their physical and operational characteristics. This makes them more suitable for use in high-temperature conditions, aggressive environments, in the production of heat-resistant components and other high-tech areas.

Repeated densification of CCCM revealed a significant impact on the quality of the material. It is shown that an increase in density after additional densification leads to a decrease in porosity, improvement of mechanical properties and a change in the pore distribution in the material, which positively affects its porosity and strength.

Bench tests of model samples made of CCCM showed that an increase in the apparent density of the material leads to a decrease in its electrical resistance. To ensure control in industrial practice, an effective and affordable method for assessing the degree of completion of crystalline transformations and determining the degree of graphitization during high-temperature treatment of carbon materials is recommended to compare the specific volume electrical resistivity of the working sample with the reference one.

The importance of controlling the parameters of density, porosity, and electrical resistance to optimize technological processes and ensure high quality of final products is emphasized. The obtained data can be useful for applications in various industries.

Keywords: technological process, carbon-carbon composite material, blank, density, porosity, specific volume electrical resistivity.

І. П. Петік¹, к.техн.н., О. А. Литвиненко², к.техн.н., ст.наук.співроб.,
М. С. Пономарьова³, к.економ.н., доцент, А. М. Діхтярь³, к.техн.н., доцент,
С. С. Андрєєва³, к.техн.н., доцент, І. С. Баландіна⁴, к.економ.н., доцент,
А. О. Карюк⁴, ст.викл.

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ БЕТА-КАРОТИНУ І ХЛОРОФІЛУ НА ШВИДКІСТЬ ОКИСНЕННЯ ЇХНІХ ОЛІЙНИХ РОЗЧИНІВ

¹ Український науково-дослідний інститут олій та жирів
Національної академії аграрних наук України, Харків

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

³ Державний біотехнологічний університет, Харків

⁴ Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,
Харків

Ключові слова: хлорофіл, бета-каротин, антиоксидант, прооксидант, прискорене окиснення, диференційна скануюча калориметрія.

Вступ

Важливим завданням олійножирової промисловості є забезпечення якості рослинних олій, як під час виробництва, так і при зберіганні. Всі олійножирові продукти схильні до окиснювального псування. Основним фактором, що впливає на ступінь окиснення олій, є жирнокислотний склад, а саме наявність ненасичених жирних кислот та їх сумісне розташування в молекулі триацилгліцерину. На стійкість до окиснення жирних кислот та олій загалом впливає також присутність супутніх речовин – фосфоліпідів, токоферолів, каротиноїдів, хлорофілу. Ці сполуки залежно від їх складу та кількості, можуть гальмувати процес окиснення або, навпаки, прискорювати його [1, 2].

Біологічна ефективність та харчова цінність олій залежить від складу, умов та термінів зберігання. В результаті окиснювальних процесів у оліях можуть накопичуватися первинні (пероксида та гідропероксида) та вторинні (карбонільні сполуки, полімери) продукти окиснення, що погіршує органолептичні та фізико-хімічні показники, а також стабільність олії при зберіганні [3]. Продукти окиснення призводять до зміни основних органолептичних характеристик продукту (смак, запах) та зниження його харчової цінності. Крім того, продукти окиснення можуть становити небезпеку для здоров'я людини. Тому швидкість процесу окиснення і характеристика ступеня окиснення олій визначається не лише показником «пероксидне число», що відображає вміст у олії первинних продуктів окиснення, а й цілим комплексом показників [1,4]. Отже, дослідження, направлені на прогнозування термінів придатності олій та продукції на їхній основі, дозволять виявити залежність тривалості зберігання від складу сировини, прогнозувати термін зберігання продукції, оптимізувати ряд технологічних процесів виробництва.

Наукові дослідження щодо виявлення закономірностей впливу речовин, супутніх рослинним оліям, на окислювальне псування олійної продукції є актуальними. Результати таких досліджень потрібні виробництву через необхідність прогнозування

термінів придатності такої продукції, у тому числі нерафінованих олій, вітамінізованих олій і розчинів жиророзчинних біологічно активних сполук.

Дослідження існуючих рішень проблеми

В роботі [5] наведено результати досліджень щодо впливу жирнокислотного складу, а також складу ізомерів токоферолів на стабільність до окислювального псування олій рижику і дескурайнії софії в темряві та при світлі. Показано, вміст токоферолів позитивно впливає на збільшення періоду індукції за умови окиснення при світлі. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з впливом інших супутніх речовин, зокрема фосфоліпідів і жиророзчинних барвників (хлорофілу і каротиноїдів) на стабільність до окиснення. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути зміна матеріалів дослідження з рафінованих на нерафіновані. Саме такий підхід використано в роботі [6], де представлено огляд антиоксидантних властивостей полярних, неполярних і амфіфільних ліпідів, зокрема фосфоліпідів які містяться в харчових оліях. В роботі залишається невизначеним питання комплексних механізмів антиоксидантної та прооксидантної дії супутніх речовин, що омилуються (фосфоліпідів) та супутніх речовин, що неомилуються (фітостеринів, рослинних барвників тощо).

Питання впливу вмісту натуральних (токоферол, антоціани) та синтетичних (бутилокситолуол, бутилоксіанізол, пропілгалат) антиоксидантів, важких металів, а також моно- і диацилгліцеролів на період індукції окиснення тригліцеролів соєвої олії розглянуто в роботі [7]. Представлено огляд механізмів реакцій натуральних і синтетичних антиоксидантів з вільними радикалами. Спробою дослідити вплив хлорофілу на динаміку окиснення гарбузової олії є результати роботи [8], де змодельовано термічний окисний стрес гарбузової олії за температури 120 °C. Разом з високим вмістом токоферолів гарбузова олія характеризується наявністю хлорофілу. Це може знижувати антиоксидантні властивості олії під час зберігання або термічної обробки, сприяючи утворенню токсичних продуктів окиснення. Але у вказаній роботі залишилося невизначеним питання щодо з'ясування власне взаємозв'язку між вмістом супутніх речовин і стабільністю олії до окисного псування. В роботі [9] досліджено вплив біологічно активних речовин рисової олії на її стійкість до окиснення. Встановлено, що аномально високий вміст вітаміну Е в рисовій олії навіть при значній кількості γ -оризанолу чинить прооксидантну дію під час прискореного окиснення. Відповідно до розглянутих робіт, супутні речовини олій, зокрема жиророзчинні барвники, надають різного впливу на стабільність до окиснення ліпідів. Їхня дія може бути як антиоксидантною, так і прооксидантною. У роботі [10] показано, що ріпакова олія, очищена на колонці з кремнієвою кислотою, не містила жодних хлорофілів і не утворювала летких сполук у просторі над олією під впливом світла за 10 °C. Але очищена ріпакова олія з добавкою хлорофілу і ріпакова олія рафінована, вибілена та дезодорована утворювали леткі сполуки за наведених умов експерименту.

Бета-каротин уповільнює окиснення олії шляхом часткового поглинання світла, інактивації сенсibilізаторів та нейтралізації вільних радикалів. Сира пальмова олія та червоний пальмовий олеїн містять 450–750 ppm каротиноїдів. У сирій оливковій олії вміст бета-каротину становить 1,2–2,9 ppm та лютеїну 0,8–2,2 ppm [11]. В роботі не визначено, який вміст бета-каротину є ефективним щодо гальмування окисних процесів. В роботі [12] визначено, що в присутності хлорофілів бета-каротин чинить

гальмуючу дію на окисні процеси соєвої олії, що зберігалася на світлі. Припускається, що такі антиокисні процеси відбуваються, головним чином, за рахунок передачі енергії синглетного кисню каротиноїдам без утворення продуктів окиснення. Але залишилося невирішеним питання щодо впливу на окисну стабільність олій різного співвідношення рослинних барвників. Таким чином, недостатньо наукових даних щодо впливу міnorних компонентів на стабільність до окиснення рослинних олій. Відсутні дані щодо впливу окремого і сумісного вмісту жиророзчинних барвників хлорофілу і бета-каротину на період індукції прискореного окиснення рафінованої соняшникової олії. Таким чином, є доцільним встановлення залежності впливу жиророзчинних барвників на стабільність до окиснення соняшникової олії. Така розробка дозволить раціоналізувати ряд технологічних процесів олієжирового виробництва, визначати залежності тривалості зберігання олійної продукції від складу і вмісту жиророзчинних барвників. Крім того, на основі отриманих даних перспективним буде прогнозування термінів зберігання олійної продукції, збагаченої жиророзчинними барвниками.

Мета та основні задачі дослідження

Метою дослідження є визначення впливу вмісту жиророзчинних барвників на період індукції окиснення їхніх олійних розчинів. Це дасть змогу прогнозувати термін придатності олійних розчинів жиророзчинних барвників. Також отримані дані будуть корисними для обґрунтування рафінації олій нетрадиційними способами для збереження біологічно активних речовин в оліях.

Для досягнення поставленої мети необхідним є вирішення таких задач:

- визначити показники якості матеріалів дослідження – соняшникової олії, олійного концентрату хлорофілу, олійного концентрату бета-каротину;
- визначити вплив сумісного вмісту барвників хлорофілу і бета-каротину на період індукції прискореного окиснення рафінованої соняшникової олії.

Матеріали та методи досліджень

Під час досліджень використано наступні матеріали:

- олія соняшникова рафінована, вибілена та дезодорована (виробництво Україна), згідно з ДСТУ 4492;
- олійний концентрат хлорофілу (виробництво Україна), згідно з реєстраційним посвідченням UA/1556/02/01;
- олійний концентрат бета-каротину (виробництво Україна), згідно з UA/2685/01/01.

Визначення кислотного та пероксидного чисел, масової частки вологи та летких речовин, а також вміст бета-каротину і хлорофілу в зразках олії соняшникової та олійних концентратів хлорофілу і бета-каротину проведено згідно стандартних методик.

Зразки розчинів жиророзчинних барвників різної концентрації в олії соняшниковій рафінованій дезодорованій отримували шляхом змішування розрахованої кількості олійних екстрактів барвників і олії соняшникової. Отримані розчини піддавали експозиції за температури 40 °C протягом 10 хвилин з подальшою гомогенізацією зі швидкістю не менш ніж 1000 об./хв. протягом 5 хвилин.

Визначання періоду індукції зразків олій, що досліджувалися, проведено методом диференціальної скануючої калориметрії за температури +110 °C згідно з рекомендаціями [13]. Маса зразка для дослідження становить від 5 мг до 15 мг.

Ізотермічний період індукції є часом між початком подачі кисню у вимірювальний осередок і початком реакції окиснення. На початок окиснення вказує різке збільшення тепла, що виділяється, яке можна спостерігати на кривій залежності теплового потоку від температури. Закінчення періоду індукції окиснення речовини зразку відзначається підвищенням ентальпії реакції внаслідок збільшення швидкості реакції окиснення ненасичених ліпідів із молекулами кисню. Термін придатності зразку олії прямо пропорційний величині індукційного періоду окиснення. В дослідженнях щодо визначення впливу вмісту хлорофілу А і бета-каротину на період індукції прискореного окиснення соняшникової олії застосовано двохфакторні експерименти. У кожному досліді виконано трикратне повторення. Статистичні моделі означених залежностей розраховано за допомогою апроксимації експериментальних даних шляхом побудови лінії тренду. Обробку одержаних даних та побудування графічних залежностей виконано з використанням пакетів Microsoft Excel (США) і Stat Soft Statistica v 6.0 (США).

Результати дослідження

Визначено фізико-хімічні показники і вміст жиророзчинних барвників в зразках олії соняшникової рафінованої дезодорованої, олійних концентратах хлорофілу і бета-каротину, що досліджувалися. Результати дослідження наведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні показники досліджуваних зразків олійної сировини

Фізико-хімічні показники	Досліджувані зразки		
	олія соняшникова	концентрат хлорофілу	концентрат бета-каротину
Кислотне число, мг KOH /г	0,110±0,005	0,87±0,04	1,07±0,05
Пероксидне число, ммоль $\frac{1}{2}O$ /кг	0,200±0,011	0,44±0,02	0,61±0,03
Масова частка вологи та летких речовин, %	0,0150±0,0005	0,130±0,005	0,070±0,004

Таблиця 3 – Вміст жиророзчинних барвників в зразках олії соняшникової рафінованої дезодорованої, олійних концентратах хлорофілу і бета-каротину

Найменування жиророзчинних барвників	Досліджувані зразки		
	олія соняшникова	олійний концентрат хлорофілу	олійний концентрат бета-каротину
Хлорофіл, г/л	—	10,70±0,50	0,012±0,006
Бета-каротин, г/л	—	0,015±0,006	3,62±0,16

Відповідно до результатів експериментів (табл. 2, 3), досліджувані зразки олійної сировини відповідають вимогам, встановленим у відповідній нормативній документації – ДСТУ 4492; UA/1556/02/01; UA/2685/01/01.

Досліджено двохфакторну залежність періоду індукції прискореного окиснення олійних розчинів жиророзчинних барвників у рафінованій соняшниковій олії від вмісту хлорофілу А і бета-каротину. За допомогою рівняння (1) представлено апроксимаційну залежність періоду індукції прискореного окиснення олійних розчинів жиророзчинних барвників у рафінованій соняшниковій олії (IP , хв.) від сумісного вмісту хлорофілу А (C_{ch} , г/л) і бета-каротину (C_{bc} , г/л).

$$IP(c_{ch}, c_{bc}) = 326,8048 + 128,3354 \cdot c_{ch} + 1091,6377 \cdot c_{bc} - 5343,3472 \cdot c_{ch}^2 - 4700,1145 \cdot c_{ch} \cdot c_{bc} + 66,6837 \cdot c_{bc}^2. \quad (1)$$

Поверхню отриманої залежності періоду індукції прискореного окиснення олійних розчинів жиророзчинних барвників у рафінованій соняшниковій олії від сумісного вмісту жиророзчинних барвників представлено на рис. 1.

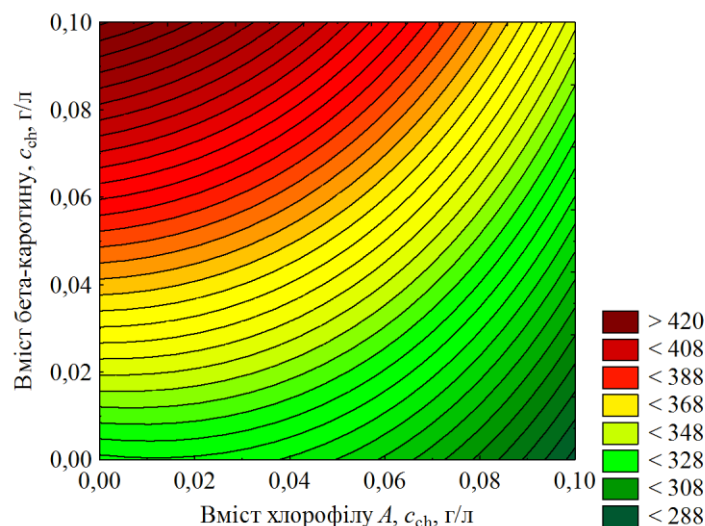


Рисунок 1 – Залежність періоду індукції прискореного окиснення олійних розчинів жиророзчинних барвників від сумісного вмісту жиророзчинних барвників

Апроксимаційна залежність (1) адекватно описує періоди індукції прискореного окиснення розчинів жиророзчинних барвників у рафінованій соняшниковій олії в інтервалах вмісту хлорофілу A $0 \dots 0,10$ г/л і бета-каротину $0 \dots 0,1$ г/л. Результати проведених досліджень свідчать про певний компенсуючий вплив бета-каротину на прооксидантну дію хлорофілу A у розчині рафінованої соняшnikової олії. Наприклад, присутність в олійному розчині $0,05$ г/л хлорофілу A незначним чином впливає на антиоксидантну дію бета-каротину. За умови додавання в цю систему $0,05$ г/л бета-каротину період індукції прискореного окиснення буде таким же, як в олійному розчині без хлорофілу A (371 і 373 хв. відповідно). За умови додавання в цю систему $0,10$ г/л бета-каротину період індукції прискореного окиснення буде на $8,4$ % меншим, ніж в олійному розчині без хлорофілу A (408 і 445 хв. відповідно). За умови окремого вмісту хлорофілу A на рівні $0,10$ г/л період індукції прискореного окиснення розчину знижується на 14 % відносно контрольного зразку. У разі додавання до цього розчину $0,5$ г/л бета-каротину період індукції практично не знижується порівняно з контрольним зразком (зниження на 3 %). У разі збільшення концентрації бета-каротину у розчині до $0,10$ г/л період індукції зростає на 8 % порівняно з контрольним зразком.

Висновки

1. Визначено показники якості (кислотне число, пероксидне число, масову частку води та летких речовин), а також вміст жиророзчинних барвників в об'єктах дослідження – соняшниковій олії, олійних концентратах хлорофілу та бета-каротина.

Зразки олійної сировини, що досліджувалися, відповідають вимогам, встановленим у відповідній нормативній документації – ДСТУ 4492/CAS 8001-21-6; UA/1556/02/01/CAS 479-61-8; UA/2685/01/01/CAS 7235-40-7. За складом жирних кислот зразок олії соняшникової відповідає вимогам ДСТУ 4492/CAS 8001-21-6. За складом жирних кислот олійних концентратів хлорофілу і бета-каротину ідентифіковано олійні основи концентратів – це кукурудзяна і соняшникова олії відповідно.

2. Визначено вплив сумісного вмісту барвників хлорофілу і бета-каротину на період індукції прискореного окиснення рафінованої соняшникової олії. Доведено компенсуючий вплив бета-каротину на прооксидантну дію хлорофілу *A* у розчині рафінованої соняшникової олії. Вміст в олійному розчині 0,05 г/л хлорофілу *A* незначним чином впливає на антиоксидантну дію 0,05 г/л бета-каротину (період індукції 371 і 373 хв. відповідно). Вміст в олійній системі 0,10 г/л бета-каротину і 0,05 г/л хлорофілу *A* призводить до зменшення періоду індукції прискореного окиснення на 8,4 % порівняно з олійним розчином 0,10 г/л бета-каротину без хлорофілу *A* (період індукції 408 і 445 хв. відповідно).

Література

1. Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. et al. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review // *Oil Crop Science*. 2023. 8. 1. 35–44.
2. Rashid, F., Ahmed, Z., Hussain, S., Huang, J.-Y. et al. *Linum usitatissimum* L. seeds: Flax gum extraction, physicochemical and functional characterization // *Carbohydrate Polymers*. 2019. 215. 29–38.
3. Gharby, S., Hajib, A., Ibourki, M., Sakar, El. H. et al. Induced changes in olive oil subjected to various chemical refining steps: A comparative study of quality indices, fatty acids, bioactive minor components, and oxidation stability kinetic parameters // *Chemical Data Collections*. 2021. Vol. 33. P. 100702.
4. Petik, P., Stankevych, S., Zabrodina, I., Zhulinska, O. et al. Determination of fat-soluble dyes influence on the oxidation induction period of their oil solutions // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 3(6 (123)). 13–21.
5. Saveliev, D., Hryhorenko, O., Mykhailova, E., Kravtsov et al. Development of technology for obtaining fat compositions with increased oxidative stability // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 1/6 (121). 33–39.
6. Abad, A., Shahidi, F. Fatty acid, triacylglycerol and minor component profiles affect oxidative stability of camelina and sophia seed oils // *Food Bioscience*. 2021. 40. 100849.
7. Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. et al. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review // *Oil Crop Science*, 2023. 8. 1. 35–44.
8. Maszewska, M., Florowska, A., Dłużewska, E., Wroniak, M. et al. Oxidative Stability of Selected Edible Oils // *Molecules*. 2018. 23 (7). 1746.

9. Yuan, L., Xu, Z., Tan, Ch.-P., Liu, Yu. at al. Biohazard and dynamic features of different polar compounds in vegetable oil during thermal oxidation // *LWT*. 2021. 146. 111450.
10. Li, X., Yang, R., Lv, Ch., Chen, L. et al. Effect of Chlorophyll on Lipid Oxidation of Rapeseed Oil // *European journal of lipid science and technology*. 2018. 121. 4. e1800078.
11. Ayu, D. F., Andarwulan, N., Hariyadi, P., Purnomo, E. H. Effect of tocopherols, tocotrienols, β -carotene, and chlorophyll on the photo-oxidative stability of red palm oil // *Food Science and Biotechnology*. 2016. 30. 25(2). 401–407.
12. Ashenafi, E.L., Nyman, M.C., Shelley, J.T., Mattson, N.S. Spectral properties and stability of selected carotenoid and chlorophyll compounds in different solvent systems // *Food Chemistry Advances*. 2023. 2. 100178.
13. Setting Up a DSC Oxygen Induction Time Procedure. DSC Online Help. Retrieved from [https://folk.ntnu.no/deng/fra_nt/other%20stuff/DSC_manuals/QDSC/Setting_Up_a_DSC_Oxygen_Induction_Time_Procedure.htm](https://folk.ntnu.no/deng/fra_nt/other%20stuff/DSC_manuals/QDSC/Setting_Up_a_DSC_Oxygen_Induction_Time_Procedure.htm#top) (2023).

Bibliography (transliterated)

1. Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. at al. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review // *Oil Crop Science*. 2023. 8. 1. 35–44.
2. Rashid, F., Ahmed, Z., Hussain, S., Huang, J.-Y. at al. *Linum usitatissimum* L. seeds: Flax gum extraction, physicochemical and functional characterization // *Carbohydrate Polymers*. 2019. 215. 29–38.
3. Gharby, S., Hajib, A., Ibourki, M., Sakar, El. H. at al. Induced changes in olive oil subjected to various chemical refining steps: A comparative study of quality indices, fatty acids, bioactive minor components, and oxidation stability kinetic parameters // *Chemical Data Collections*. 2021. Vol. 33. P. 100702.
4. Petik, P., Stankevych, S., Zabrodina, I., Zhulinska, O. at al. Determination of fat-soluble dyes influence on the oxidation induction period of their oil solutions // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 3(6 (123). 13–21.
5. Saveliev, D., Hryhorenko, O., Mykhailova, E., Kravtsov et al. Development of technology for obtaining fat compositions with increased oxidative stability // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 1/6 (121). 33–39.
6. Abad, A., Shahidi, F. Fatty acid, triacylglycerol and minor component profiles affect oxidative stability of camelina and sophia seed oils // *Food Bioscience*. 2021. 40. 100849.
7. Wang, D., Xiao, H., Lyu, X., Chen, H. at al. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review // *Oil Crop Science*,. 2023. 8. 1. 35–44.
8. Maszewska, M., Florowska, A., Dłużewska, E., Wroniak, M. et al. Oxidative Stability of Selected Edible Oils // *Molecules*. 2018. 23 (7). 1746.

9. Yuan, L., Xu, Z., Tan, Ch.-P., Liu, Yu. at al. Biohazard and dynamic features of different polar compounds in vegetable oil during thermal oxidation // LWT. 2021. 146. 111450.

10. Li, X., Yang, R., Lv, Ch., Chen, L. et al. Effect of Chlorophyll on Lipid Oxidation of Rapeseed Oil // European journal of lipid science and technology. 2018. 121. 4. e1800078.

11. Ayu, D.F., Andarwulan, N., Hariyadi, P., Purnomo, E.H. Effect of tocopherols, tocotrienols, β -carotene, and chlorophyll on the photo-oxidative stability of red palm oil // Food Science and Biotechnology. 2016. 30. 25(2). 401–407.

12. Ashenafi, E.L., Nyman, M.C., Shelley, J.T., Mattson, N.S. Spectral properties and stability of selected carotenoid and chlorophyll compounds in different solvent systems // Food Chemistry Advances. 2023. 2. 100178.

13. Setting Up a DSC Oxygen Induction Time Procedure. DSC Online Help. Retrieved from https://folk.ntnu.no/deng/fra_nt/other%20stuff/DSC_manuals/QDSC/Setting_Up_a_DSC_Oxygen_Induction_Time_Procedure.htm#top. https://folk.ntnu.no/deng/fra_nt/other%20stuff/DSC_manuals/QDSC/Setting_Up_a_DSC_Oxygen_Induction_Time_Procedure.htm (2023).

УДК 665.3: 541.127

І. П. Петік, к.техн.н., О. А. Литвиненко, к.техн.н., ст.наук.співроб.,
М. С. Пономарьова, к.економ.н., доцент, А. М. Діхтярь, к.техн.н., доцент,
С. С. Андрєєва, к.техн.н., доцент, І. С. Баландіна, к.економ.н., доцент,
А. О. Карюк, ст.викл.

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ БЕТА-КАРОТИНУ І ХЛОРОФІЛУ НА ШВИДКІСТЬ ОКИСНЕННЯ ЇХНІХ ОЛІЙНИХ РОЗЧИНІВ

Об'єктом дослідження є період індукції прискореного окиснення олійних розчинів жиророзчинних барвників хлорофілу та бета-каротину. Досліджено вплив вмісту жиророзчинних барвників на період індукції прискореного окиснення їхніх розчинів в олії соняшниковій рафінованій. Особливість роботи полягає у встановленні апроксимаційних графічних та математичних залежностей терміну періоду індукції прискореного окиснення рафінованої соняшникової олії від сумісного вмісту хлорофілу і бета-каротину. Це є важливим для прогнозування термінів придатності олійних розчинів жиророзчинних барвників.

Визначено, що хлорофіл А практично не виявляє прооксидантної дії за умови його вмісту до 0,05 г/л. Вміст хлорофілу А на рівні 0,10 г/л призводить до зменшення терміну періоду індукції на 14 %; 0,20 г/л – на 36 %; 0,30 г/л – на 48 %. Вміст бета-каротину на рівні 0,10 г/л призводить до збільшення терміну періоду індукції на 35 %; 0,20 г/л – на 47 %; 0,30 г/л – на 54 %. Вміст в олійній системі 0,10 г/л бета-каротину і 0,05 г/л хлорофілу А призводить до зменшення терміну періоду індукції прискореного окиснення на 8,4 % порівняно з олійним розчином 0,10 г/л бета-каротину без хлорофілу А. Отримані дані пояснюються тим, що існує компенсуючий вплив антиоксиданту бета-каротину на прооксидантну дію хлорофілу А в олійному розчині. Особливістю отриманих результатів є можливість прогнозування термінів придатності олійних розчинів жиророзчинних барвників. З практичної точки зору результати

досліджень дозволяють розробляти олійні системи з урахуванням окремої та сумісної особливостей реакційної здатності щодо окиснення хлорофілу і бета-каротину. Прикладним аспектом використання наукового результату є можливість розширення асортименту олійної продукції підвищеної харчової цінності з різним вмістом хлорофілу і бета-каротину.

Ключові слова: хлорофіл, бета-каротин, антиоксидант, прооксидант, прискорене окиснення, диференційна скануюча калориметрія.

I. P. Petik, E. A. Litvinenko, M. S. Ponomarova, A. M. Dikhtyar, S. S. Andrieieva,
I. S. Balandina, A. O. Kariyk

THE INFLUENCE OF BETA-CAROTENE AND CHLOROPHYLL CONCENTRATION ON THE OXIDATION RATE OF THEIR OIL SOLUTIONS

The object of the study is the induction period of accelerated oxidation of oil solutions of fat-soluble dyes chlorophyll and beta-carotene. The effect of the content of fat-soluble dyes on the induction period of accelerated oxidation of their solutions in sunflower oil was studied. The peculiarity of the work consists in establishing the approximation graphical and mathematical dependencies of the induction period of accelerated oxidation of refined sunflower oil on the combined content of chlorophyll and beta-carotene. This is of interest for predicting the shelf life of oil solutions of the specified fat-soluble dyes. It was determined that chlorophyll A has virtually no prooxidant effect provided that its content in the oil solution is up to 0.05 g/l. The content of chlorophyll A at the level of 0.10 g/l leads to a decrease in the induction period by 14 %; 0.20 g/l – by 36 %; 0.30 g/l – by 48 %. The content of beta-carotene at the level of 0.10 g/l leads to an increase in the induction period by 35 %; 0.20 g/l – by 47 %; 0.30 g/l – by 54 %. The content of 0.10 g/l beta-carotene and 0.05 g/l chlorophyll A in the fat system leads to a decrease in the induction period of accelerated oxidation by 8.4 % compared to an oil solution of 0.10 g/l beta-carotene without chlorophyll A. The obtained data are explained by the fact that there is a compensating effect of the antioxidant beta-carotene on the prooxidant action of chlorophyll A in the oil solution. A special feature of the obtained results is the possibility of predicting the shelf life of oil solutions of fat-soluble dyes. From a practical point of view, the results of the studies allow us to substantiate the composition of fat systems taking into account the joint features of the reactivity to oxidative destruction of chlorophyll and beta-carotene. The applied aspect of using the scientific result is the possibility of expanding the range of fat products of increased nutritional value with different contents of chlorophyll and beta-carotene.

Keywords: chlorophyll, beta-carotene, antioxidant, prooxidant, accelerated oxidation, differential scanning calorimetry.

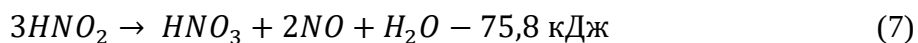
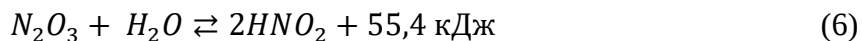
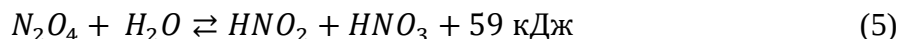
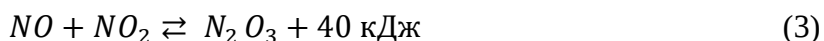
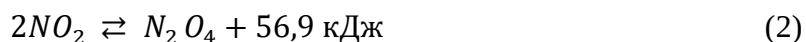
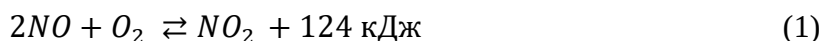
О. В. Пугановський, старший викладач, О. Г. Шутинський, к.техн.н., доцент

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ АБСОРБЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: нітратна кислота, абсорбція оксидів нітрогену, автоматизація процесу абсорбції, програма на C#, розрахунок процесу абсорбції.

Вступ. Виробництво нітратної кислоти відноситься до базових технологічних процесів основної хімії. Нітратна кислота широко використовується при отриманні вибухових речовин і добрив та у багатьох галузях промисловості як реагент для синтезу хімічних сполук або як складова для витягання металів із їх сумішей та мінералів. Основними промисловими процесами отримання нітратної кислоти є витіснення її з природних нітратів сірчаною кислотою або синтез із оксидів нітрогену і води [1]. В Україні промислово використовують процес абсорбції оксидів нітрогену водою. Для отримання оксидів нітрогену використовують процес окиснення аміаку на каталізаторах. Узагальнено процес описують системою хімічних рівнянь [2]:



Процеси поглинання оксидів нітрогену вивчаються протягом останніх 60 років, мають добре описані алгоритми розрахунку і моделі, що дають достатню точність для створення технологічного обладнання. В наукових організаціях використовують власні програми розрахунку, що враховують особливості технологічних процесів виробництва хімічних апаратів і обладнання або патентовані універсальні програмні середовища. Наприклад, Aspen та SimSci, які використовують автори досліджень [3], [4].

Їх використання окрім високої собівартості, потребує окремого вивчення і доцільне у спеціалізованих проєктних або дослідницьких організаціях.

Мета роботи. При створенні систем автоматизованого керування виникають завдання, що відрізняються від технологічних завдань [5]. Наприклад, обчислення залежностей одних параметрів від інших або визначення впливу зміни параметру на роботу апарату. Отримання такої інформації на об'єктах, що працюють, ускладнюється безпекою виробництва та технологічним регламентом. Тому метою роботи стало створення комп'ютерної програми, що дозволяє вносити модифікації в алгоритм обчислення процесу абсорбції без використання коштовних патентованих програм. Розроблена програма повинна бути зрозуміла у використанні а її код можна використати на різних операційних платформах. Такий підхід дозволяє використовувати програму і код повторно, як для наукових співробітників так і для навчання студентів.

Інструменти та алгоритми. У якості інструменту розробки використано мову C#, що входить до середовища MS Visual Studio [6]. Версія продукту не принципова, так як розроблюваний додаток має мінімалістичний інтерфейс і функціонал. Вибір інструментарію ґрунтується на досвіді авторів саме у цій мові програмування та на прийнятності коду при необхідності його переробки на інші мови чи середовища програмування. Використання платформи .NET [7] дозволяє за необхідності розгортати програму як у середовищі MS Windows так і під керуванням інших операційних систем, що підтримують технологію .NET. Використання мови C#, завдяки її синтаксису, дозволяє легко експортувати код у інші мови програмування. Розроблена програма побудована на основі загально прийнятого порядку (алгоритму) розрахунку процесу абсорбції.

Не зважаючи на різні теорії щодо істинних механізмів протікання реакцій, розрахунок проводиться за однаковим алгоритмом. Відмінності полягають у деяких розрахункових формулах та способах реалізації послідовності обчислень. Детально алгоритм описаний, наприклад, у [8]. Узагальнено послідовність розрахунку складається з наступних кроків, що повторюються від першої (нижньої) тарілки абсорбційної колони до верхньої.

Спочатку вводяться вхідні дані по продуктивності, складу газів та концентраціях конденсату і продукційної кислоти, параметрам обладнання. Усі параметри перераховуються у одну систему вимірювань. Наприклад, концентрації у відсотках і витрати у т/год ($\text{м}^3/\text{год}$), перераховуються у кмоль/год або моль/с. Обчислюються швидкості переміщення газового та рідинного потоків. Також на цьому етапі обчислюються або вводяться допоміжні значення, що необхідні для розрахунків. Такі, як кількість води, температури і тиски по тарілкам, висота переливів та об'єми міжтарілкового простору.

Наступним кроком є обчислення ступенів окиснення у гетерогенній та гомогенній фазах. Для обчислення використовують рівняння Боденштейна та модель отриману [9]:

$$Kp \cdot P^2 \cdot \tau = \frac{1}{(b-a)^2} \cdot \left[\frac{\alpha \cdot (b-a)}{(1-\alpha) \cdot a} + 2,3 \cdot \lg \frac{1-\alpha}{1-\frac{a}{b} \cdot \alpha} \right], \quad (9)$$

де K_p – константа швидкості окислення NO; P – тиск, МПа; τ – час окиснення, с; b – початкова об'ємна частка кисню, м.о.; $2a$ – початкова об'ємна частка оксиду азоту (II), м.о.; α – окисненість газу, в.о.

Так як різні наукові колективи можуть використовувати рівняння та моделі, відмінні від вказаних, ця частина може бути модифікована окремо від іншого коду. Окиснення відбувається в проміжку між тарілками для гомогенного окиснення та у спіненому рідинному шарі для гетерогенного окиснення [10].

Отримані значення ступенів окиснення використовують для визначення складу газу перед входом на наступну тарілку. На нього впливають температура, початкові концентрації та час перебування. Останній обчислюється на основі геометричних розмірів колони та швидкості руху газу.

Перед розрахунком кількості нітратної кислоти, що утворюється в результаті поглинання оксидів нітрогену, розраховують парціальний тиск оксиду нітрогену (II). Існують різні методики та рівняння для цих розрахунків [11]. Для даної програми було обрано кубічне рівняння Атрощенко, що добре зарекомендувало себе при проведенні досліджень і проєктуванні промислових агрегатів:

$$3 \cdot K_1 \cdot P_{NO_2}^3 + 2 \cdot \frac{P_{NO_2}^2}{K_2} + P_{NO_2} = 3 \cdot P_{NO} + P_{NO_2}, \quad (10)$$

де K_1 – приватна константа рівноваги, K_2 – константа полімеризації, P_{NO} та P_{NO_2} – парціальні тиски оксидів нітрогену.

Зокрема, промислові установки АК-72 та УКЛ-7 в Україні побудовані за цими проєктами [12]. Для використання цього рівняння, попередньо обчислюють допоміжні коефіцієнти.

На основі проведених розрахунків обчислюють кількість нітратної кислоти, що утворилася в результаті реакції оксидів з водою та кількість оксиду нітрогену (I), що виділився. Ці розрахунки виконуються на основі обчисленої реальної ефективності використовуваних тарілок. Проводять обчислення нового складу газу та концентрації його компонентів і концентрації нітратної кислоти.

Окремим моментом є порівняння поточної розрахованої концентрації кислоти на тарілці і концентрації кислоти в конденсаті, що подають з холодильників-конденсаторів. У випадку, коли ці концентрації близькі по значенню, у розрахунки вносять корективи – віднімають від поточних значень рідинної фази кількість речовини, що надійшла з конденсатом.

Вказану послідовність дій повторюють для всіх тарілок. Таким чином отримують значення концентрації оксидів нітрогену у газі, що виходить з колони.

Доповненням до описаної послідовності розрахунку є уведення додаткового повітря у простір між тарілками. Вплив кисню на процес описано [8] але у розробленому його авторами алгоритмі це не враховано.

Програма для розрахунку. При розробці програми було використано сучасні підходи до розробки програм розрахунків. Так, як використано візуальне оформлення програми, то усі елементи інтерфейсу і дії користувача обробляються окремими методами. Умовно весь код можна розділити на наступні блоки.

Блок ініціалізації даних виконується одразу після запуску програми на виконання. На цьому кроці вводяться всі необхідні значення для базового розрахунку.

Це забезпечує функціонування програми без необхідності постійного введення усіх технічних і технологічних параметрів.

Блок введення даних є базовим кодом, що забезпечує способи отримання вхідної інформації. Передбачено два способи введення – за допомогою елементів форми та через файл. Можливості налаштування обчислень через форму обмежені – вікно інтерфейсу користувача наведено на рис. 1.

Рисунок 1 – Інтерфейс користувача

Як видно з рисунку, є можливість задати:

- кількість доданого кисню та номеру тарілки на яку він буде доданий;
- концентрації газів, що входять у колону;
- додавати кисень одним чи двома потоками на обрані тарілки;
- обрати співвідношення нітроген-кисень;
- задати концентрацію газів, що входять у склад нітrogenного газу (кількість нітрогену розраховується через загальну витрату).

Використання файлу з даними розширює можливості налаштування. Крім параметрів вхідного газу в ньому задають:

- температури по окремим тарілкам;
- висоту шару рідини на окремих тарілках;
- відстані між поверхнею рідини на тарілках і наступною тарілкою, які необхідні для обчислення окислювального об'єму;

При роботі програми можна використати комбінований підхід – використання даних з файлу та наступна модифікація через інтерфейс користувача. Це розширює функціонал програми. Така можливість забезпечена автономністю даних при роботі програми. Тобто дані, які не були введені з файлу чи змінені через інтерфейс користувача, залишаються за замовчуванням або з попереднього етапу обчислень.

Після того, як уся необхідна інформація була уведена, відбувається розрахунок у послідовності, що описана вище. Окремі частини розрахунку винесено в окрему бібліотеку. Це зроблено для можливості заміни цих обчислень за іншими

математичними моделями. Таким чином оформлено обчислення коефіцієнтів ступеню окислення оксиду нітрогену за рівнянням Боденштейна та розв'язання кубічного рівняння Атрощенко. Бібліотека містить клас *solv*, що містить два методи *alfa_ocs* та *sub_solv*. Для обчислення, при виклику цим методами передають відповідні значення.

Метод *alfa_ocs* має формат:

double alfa_ocs(double a, double b, double c)

Змінні, що передаються, це відповідно: мольна частка оксиду нітрогену (I), мольна частка кисню та значення правої частини виразу (1).

Метод *sub_solv* має формат:

double alfa_ocs(double a, double b, double c, double d)

Змінні, що передаються, це відповідно: парціальний тиск оксиду нітрогену (I), парціальний тиск оксиду нітрогену (II), приватна константа рівноваги K_1 та константа полімеризації K_2 за рівнянням (2).

Обидва методи реалізовані за методом дихотомії, як найбільш простим способом пошуку рішення. Завдяки реалізації у вигляді окремої бібліотеки, ці методи можуть бути реалізовані іншими способами. Для цього можна використати мову програмування, що підтримує технологію .NET з версією NetFramework не вище 3.5. Створена бібліотека повинна містити клас та методи, що описано вище.

Блок виведення результатів дозволяє зберегти у вигляді структурованого текстового файлу результати обчислення концентрацій рідинного і газового потоків по тарілках. На інтерфейсі користувача відображається тільки кінцеве значення концентрації оксидів нітрогену у скидних газах.

Результати роботи. За допомогою створеної програми було досліджено вплив для обчислення впливів кількості доданого повітря на роботу абсорбційної колони. На першому етапі було визначено залежність концентрації оксидів нітрогену у викидах від точки уведення доданого повітря по висоті абсорбційної колони. Результат представлено на рис. 2.

Розраховані значення корелюються з даними [8] для нижніх тарілок, що були отримані на діючому виробництві. Також з отриманих розрахунків видно, що ефективність від доданого повітря підвищується у середній частині колони. Можна припустити, що це зумовлено зниженням концентрації кисню в процесі окиснення і додатковий кисень сприяє окисненню оксиду нітрогену (I) у оксид нітрогену (II). Особливе значення додавання кисню відіграє при низьких початкових концентраціях кисню у нітрозних газах, що подають на вхід абсорбційної колони.

На другому етапі було розраховано вплив кількості доданого повітря. За точку уведення було обрано 20 тарілку. Результати розрахунків представлені на рисунку 3.

Як видно з наведених залежностей, концентрація оксиду нітрогену (I) знижується більш стрімко у порівнянні з концентрацією оксиду нітрогену (II), що є показником більш ефективної переробки оксидів нітрогену на кислоту у верхній частині колони де їх концентрація дуже низька. Також необхідно враховувати незначне розбавлення газів доданим повітрям.

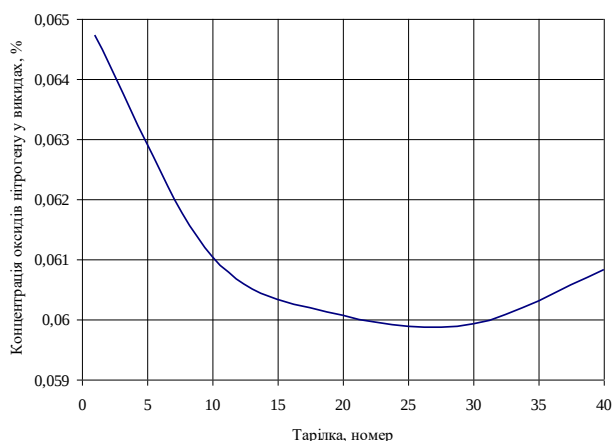


Рисунок 2 – Залежність концентрації викидів від точки введення доданого кисню

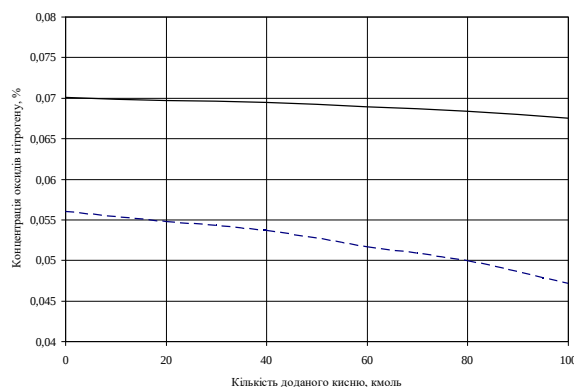


Рисунок 3 – Вплив кількості доданого кисню на концентрацію викидів:

— концентрація оксидів нітрогену (II);
 ---- концентрація оксидів нітрогену (I).

Висновки. З огляду на представлені результати та на суб'єктивні оцінки роботи з програмою, можна зробити ряд висновків. В подальшому до програми доцільно додати опцію візуалізації залежностей з вибором діапазону. Це дозволить одразу оцінювати зміни в роботі абсорбційної колони при зміні вхідних даних без необхідності використовувати дані з файлу результатів.

Ще однією опцією може бути пакетна обробка даних. Наприклад, послідовне завантаження вхідних даних з одного чи кількох файлів. Така опція дозволить отримувати одразу кілька розрахованих залежностей без необхідності задавати нові дані окремо.

В цілому розроблена програма є базовим варіантом, доступним для повторення будь якою мовою програмування з відкритим кодом і може використовуватись як в навчальному процесі так і при теоретичних дослідженнях.

Література

1. Гринь Г.І. Історичні етапи зародження та розвитку технології нітратної кислоти контактним методом окиснення аміаку / Г.І. Гринь, П.В. Кузнецов, В.В. Казаков // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : История науки и техники. – Х. : НТУ "ХПИ", 2008. – № 53. – С. 33–40.

2. Ворожбян М.И. Окислительные и абсорбционные процессы в технологии азотной кислоты: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.17.01 / М.И. Ворожбян. – Харьков, 2002. – 33 с.
3. Hupen B. Rigorous modelling of NO_x absorption in tray and packed columns / B. Hupen, E.Y. Kenig // Chemical Engineering Science. – 2005. – vol. 60. – P. 6462–6471.
4. Liu Y. Static and dynamic simulation of NO_x absorption tower based on a hybrid kinetic-equilibrium reaction model / Y. Liu, D. Bluck, F. Brana-Mulero // Computer Aided Chemical Engineering. – 2014. – vol. 34. – P. 363–368.
5. Проблеми автоматизації виробництва нітратної кислоти / [О. В. Пугановський, М. О. Подустов, О. І. Букатенко та ін.]. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2018. – №2. – С. 38–42.
6. C# documentation [Електронний ресурс] // Microsoft. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/tour-of-csharp>.
7. Overview of .NET Framework [Електронний ресурс] // Microsoft. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/get-started/overview>.
8. Ворожбіян М. І. Окислювальні і абсорбційні процеси в технології азотної кислоти : дис. докт. : 05.17.01 / Ворожбіян Михайло Іванович – Харків, 2002. – 348 с.
9. Bodenstein M. Bildung und Zerlegung von Stickstoffoxyd / Z. Phys. Chem. – 1922. – Vol. 100. – P. 63–72.
10. Ворожбіян М.І. Вплив гетерогенних умов на окислювальні процеси в технології азотної кислоти / М.І. Ворожбіян, О.Я.Лобойко, О.В. Кобзев // Хімічна промисловість України. – 2001. - № 4(45). – С. 36–39.
11. Атрощенко В.И. Технология азотной кислоты / В.И.Атрощенко, С.И. Каргин. – М.: Химия, 1970. – 496 с.
12. Методи розрахунків у технології неорганічних речовин / Лобойко О.Я., Товажнянський Л.Л., Слабун І.О. та ін. – Х. : НТУ «ХПІ», 2001. – 512 с.

Bibliography (transliterated)

1. Hryn H.I. Istorychni etapy zarodzhennia ta rozvytku tekhnolohii nitratnoi kys-loty kontaktnym metodom okysnennia amiaku / H.I. Hryn, P.V. Kuznietsov, V.V. Kazakov // Vestnyk Nats. tekhn. un-ta "KhPY" : sb. nauch. tr. Temat. vip. : Ystoryia nauky y tekhnky. – Kh. : NTU "KhPY", 2008. – № 53. – P. 33–40.
2. Vorozhbyian M.Y. Okyslytelnye y absorbtsonnye protsessi v tekhnolohyy azotnoi kysloti: avtoref. dys. dokt. tekhn. nauk: 05.17.01 / M.Y. Vorozhbyian.– Kharkov, 2002.– 33 p.
3. Hupen B., Rigorous modelling of NO_x absorption in tray and packed columns / B. Hupen, E.Y. Kenig // Chemical Engineering Science. – 2005. – vol. 60. – P. 6462–6471.
4. Liu Y. Static and dynamic simulation of NO_x absorption tower based on a hybrid kinetic-equilibrium reaction model / Y. Liu, D. Bluck, F. Brana-Mulero // Computer Aided Chemical Engineering. – 2014. – vol. 34. – P. 363–368.
5. Problemy avtomatyzatsii vyrobnytstva nitratnoi kysloty / [O. V. Puhanovskyi, M. O. Podustov, O. I. Bukatenko ta in.]. // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – 2018. – №2. – P. 38–42.
6. C# documentation [Електронний ресурс] // Microsoft. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/tour-of-csharp>.

7. Overview of .NET Framework [Електронний ресурс] // Microsoft. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/get-started/overview>.
8. Vorozhbiiian M. I. Okysliuvalni i absobtsiini protsesy v tekhnolohii azotnoi kysloty : dys. dokt. : 05.17.01 / Vorozhbiiian Mykhailo Ivanovych – Kharkiv, 2002. – 348 p.
9. Bodenstein M. Bildung und Zerlegung von Stickstoffoxyd / Z. Phus. Chem. – 1922. – Vol. 100. – P. 63–72.
10. Vorozhbiiian M.I. Vplyv heterohennykh umov na okysliuvalni protsesy v tekhnolohii azotnoi kysloty / M.I. Vorozhbiiian, O.Ia.Loboiko, O.V. Kobziev // Khimichna promysl – 2001. – № 4(45). – P. 36–39.
11. Atroshchenko V.Y. Tekhnolohyia azotnoi kysloti / V.Y.Atroshchenko, S.Y. Karhyn. – M.: Khymyia, 1970. – 496 p.
12. Metody rozrakhunkiv u tekhnolohii neorhanichnykh rehovyn / Loboiko O.Ia., Tovazhnianskyi L.L., Slabun I.O. ta in. – Kh. : NTU «KhPI», 2001. – 512 p.

УДК 004.42

О. В. Пугановський, О. Г. Шутинський

ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ АБСОРБЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Сучасний технологічний процес є продуктом проєктування і моделювання. Перевірка теорій і технічних рішень може бути проведена не на діючому обладнанні а на математичних моделях, шляхом розрахунків. Це підвищує безпеку дослідницької діяльності і прискорює процес проєктування. Для великих дослідних закладів і виробників доцільним є використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як MatLab, ASPEN або SimSci. Такі середовища мають велику кількість бібліотек та додатків, що роблять їх мультифункціональними. При цьому переважна більшість користувачів використовує тільки невелику кількість вузько спеціалізованих функцій, що відповідають напрямку їх діяльності.

Володіння навичками створення програм стало невід’ємною частиною сучасної освіти. Створення програм розрахунку за математичними моделями не є складним завданням для науковців. Стрімкий розвиток мов і технологій програмування дозволяє обирати найбільш прийнятні способи створення програм. C# за оцінками експертів багато років входить у топ-5 популярних мов програмування. Використання цієї мови тісно пов’язане з технологією .NET, що призначена для створення кросплатформових додатків. Корпорація Microsoft надає можливість безкоштовного використання свого продукту MS Visual Studio, що включає в себе також і C#.

У статті описано програму, що створена для використання при дослідженні роботи абсорбційної колони для поглинання оксидів нітрогену у виробництві нітратної кислоти. При розробці програми використано стандартний алгоритм розрахунку, за яким розраховувались промислові апарати, що діють в Україні. В алгоритмі також враховано останні відомості про вплив технологічних параметрів та фізико-хімічні процеси. Програма створена з мінімалістичним інтерфейсом та опціями уведення даних як з вікна програми так і з текстового файлу. Наведено результати розрахунку впливу додавання кисню на концентрацію оксидів нітрогену у скидному газі. Основне призначення програми – дослідження роботи колони як об’єкту автоматизації.

Запропонована програма може бути доповнена новими опціями, такими як автоматичний розрахунок коефіцієнтів підсилення за вказаними каналами, пакетна обробка за даними з файлу та інше. Також програма може бути використана при навчанні студентів та при виконанні дослідних робіт.

Ключові слова: нітратна кислота, абсорбція оксидів нітрогену, автоматизація процесу абсорбції, програма на C#, розрахунок процесу абсорбції.

O. V. Puhanovskyi, O. H. Shutynskyi

CALCULATION PROGRAM OF THE ABSORPTION PROCESS IN NITRIC ACID PRODUCTION

The modern technological process is a product of design and modeling. Verification of theories and technical solutions can be carried out not on existing equipment but on mathematical models, by means of calculations. This increases the safety of research activities and speeds up the design process. For large research institutions and manufacturers, it is advisable to use specialized software such as MatLab, ASPEN or SimSci. Such environments have a large number of libraries and applications, which make them multifunctional. At the same time, the vast majority of users use only a small number of narrowly specialized functions that correspond to the direction of their activity.

Mastering programming skills has become an integral part of modern education. Creating calculation programs based on mathematical models is not a difficult task for scientists. The rapid development of programming languages and technologies allows choosing the most appropriate ways of creating programs. According to experts, C# has been in the top 5 popular programming languages for many years. The use of this language is closely related to the .NET technology, which is intended for creating cross-platform applications. Microsoft Corporation provides the possibility of free use of its product MS Visual Studio, which also includes C#.

The article describes a program created for use in researching the operation of an absorption column for the absorption of nitrogen oxides in the production of nitric acid. When developing the program, a standard calculation algorithm was used, according to which industrial devices operating in Ukraine were calculated. The algorithm also takes into account the latest information on the influence of technological parameters and physico-chemical processes. The program is created with a minimalistic interface and data entry options both from the program window and from a text file. The results of calculating the influence of oxygen addition on the concentration of nitrogen oxides in the discharge gas are given. The main purpose of the program is to study the operation of the column as an object of automation. The proposed program can be supplemented with new options, such as automatic calculation of gain coefficients for specified channels, batch processing based on data from a file, and others. Also, the program can be used for teaching students and performing research.

Keywords: nitric acid, absorption of nitrogen oxides, automation of the absorption process, C# program, calculation of the absorption process.

С. В. Станкевич¹, к.с.-г.н., доцент, С. Б. Омельченко¹, к.техн.н.,
О. В. Котляр¹, к.техн.н. доцент, Мюшфік Панах огли Бакіров¹, к.техн.н.,
О. В. Жулінська², к.техн.н., Н. Л. Аштаєва³, викл.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕКСТРУДАТУ ВІД ХАРАКТЕРИСТИК СИРОВИНИ

¹Державний біотехнологічний університет, Харків

²Відокремлений структурний підрозділ «Житлово-комунальний фаховий коледж
Харківського національного університету міського господарства
імені О.М. Бекетова», Харків

³Відокремлений структурний підрозділ «Харківський торговельно-економічний фаховий
коледж Державного торговельно-економічного університету»

Ключові слова: екструдкування, білково-жирова система, шрот, крупа кукурудзяна, вміст вологи, вміст ліпідів, пористість.

Вступ

Пріоритетним завданням харчового виробництва, зокрема олієжирової промисловості залишається переробка і утилізація відходів [1]. Необхідно зазначити, що переробний потенціал та обсяги переробки олійної сировини щороку зростають, і, як наслідок, збільшується кількість відходів. Олієвидобувні підприємства виробляють у середньому понад 400 000 тонн за рік побічної продукції [2]. Найбільшу частку з зазначеного обсягу побічної продукції виробництва складають цінні білоквмісні продукти (шрот і макуха) [3]. Ці побічні продукти відрізняються багатокomпонентністю складу, який може суттєво змінюватись в результаті видобування рослинних олій різними способами [4], а також в залежності від режиму роботи підприємства. Переробка шротів та макухи олійного насіння на харчові цілі є екологічно, економічно та соціально вигідним процесом.

Сучасним способом переробки шротів і макухи в харчову продукцію можна назвати технології екструдкування, де сировина піддається короткочасній високотемпературній обробці під тиском. Вплив екструдкування на зміну фізико-хімічних властивостей сировини визначається насамперед її вихідним складом та режимами обробки. Основні ефекти від екструдкування включають [5]: руйнування нативної структури сировини; клейстеризацію і часткову декстринізацію крохмалю; денатурацію білка; стерилізацію сировини. Доцільним є розширення асортименту сировинних компонентів в технології екструдованих білково-жирових систем таких як хлібці, снеки, сухі сніданки, корми для тварин тощо за рахунок використання шротів різних олійних культур. Крім того, виявлення залежностей технологічних властивостей екструдованих білково-жирових систем від вмісту вологи та ліпідів в сировинних компонентах має сприяти раціоналізації виробництва, покращенню якості продуктів та розробці нових білково-жирових екструдованих систем.

Дослідження існуючих рішень проблеми

В дослідженні [6] розглянуто шляхи вирішення проблеми переробки відходів олієжирової промисловості, а саме шротів соняшникового та соєвого. Встановлено

пропорцію сировинних інгредієнтів екструдованої системи соняшниковий шрот – 0,40 мас. частки; соєвий шрот – 0,25 мас. частки; вівсяна крупа – 0,35 мас. частки. Розробка дозволяє регулювання пористості готової продукції в залежності від співвідношення компонентів задля змін характеристик продукту згідно вимог споживача.

В роботах [7–10] розроблено технології екструдатів з рослинної сировини, зокрема рисового екструдату з мікроінкапсульованими антоціанами [7], екструдату на основі сумішей кукурудзяної крупи і гречаного борошна [8], екструдату соєвого шроту [9] та екструдату макухи каноли [10]. В даних роботах дослідники обмежилися даними щодо впливу вологості сировинних компонентів на технологічні показники готової продукції і не враховували вміст ліпідів в сировині та його потенційний вплив на технологічні показники готових екструдатів.

В роботі [11], де описується раціоналізація умов екструдування для отримання харчових гранул (з використанням кукурудзи, знежиреного соєвого борошна, насіння кунжуту, м'якоті бананів), навпаки, відсутні відомості щодо вмісту вологості в сировині. Автори дослідження лише опосередковано фіксують вміст вологи в сировинних компонентах через варіації вмісту м'якоті бананів в суміші для екструдування.

В дослідженнях [12, 13] описується вплив на технологічні властивості екструдатів білково-жирових систем з крупи горохової та вівсяної [12] та білкових систем з насіння конопель і клітковини вівса [13] вологості та вмісту протеїну. Автори не брали до уваги вміст жирів, який в означеній сировині є досить високим (наприклад, в гороховій крупі зазвичай – 1...2 %, в вівсяній крупі – 5...7 %, в клітковині вівса – 6...8 %). Крім того, автори дослідили ступінь зволоження сировини, що близький до критичного, і виявили, що збільшення вмісту вологи призводить до зменшення щільності продукту, зміни текстури та погіршення зовнішнього вигляду [12]. Зі збільшенням вмісту вологи було виявлено, що показники твердості та міцності на різання зменшилися [13].

Результати аналітичних досліджень свідчать, що вміст вологи та ліпідів в сировині істотно впливає на процес екструдування. Якщо сировина має низький вміст вологи та ліпідів, вона може бути жорсткою, що буде ускладнювати екструдування. Високий вміст вологи та ліпідів також негативно впливає на технологічні показники екструдатів, зокрема їхню вологість і пористість. Необхідно зазначити, що під час екструдування різної сировини раціональний рівень вологи та ліпідів може відрізнятись, він залежить від властивостей сировини, цільових характеристик продукту та параметрів екструдування.

Існує певний брак даних щодо ефектів сумісного впливу вмісту вологи та ліпідів в сировинних компонентах екструдованих білково-жирових систем, зокрема в шротах таких олійних культур як соя, ріпак і конопля, на технологічні параметри готової продукції. Зважаючи на це, доцільним слід вважати дослідження, присвячене виявленню впливу вмісту вологи та ліпідів в шротах означених олійних культур та крохмалевмісній сировині на технологічні властивості екструдованої білково-жирової системи, зокрема пористості та вмісту вологи. Це дозволить раціоналізувати склад та покращити текстуру інноваційних екструдованих продуктів на базі означеної сировини.

Мета та основні задачі дослідження

Метою дослідження є виявлення впливу вмісту вологи та ліпідів на технологічні властивості екструдованої білково-жирової системи на основі шротів олійних культур

та зернової сировини. Це дасть можливість визначити раціональний склад сировини екструдованої білково-жирової системи для покращення таких технологічних показників готового продукту як пористість і вологість.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі задачі:

- дослідити сумісний вплив вмісту води і ліпідів в модельних зразках сировини на пористість і вологість екструдованої білково-жирової системи;
- порівняти хімічний склад, технологічні та економічні показники екструдованої білково-жирової системи з існуючим аналогічним продуктом.

Матеріали та методи досліджень

Під час досліджень використано такі матеріали:

- шрот соєвий подрібнений (виробництво Україна), згідно з CAS 68308-36-1;
- шрот ріпаковий подрібнений (виробництво Україна), згідно з CAS 8002-13-9;
- шрот конопляний подрібнений (виробництво Україна), згідно з CAS 9000-70-8;
- крупа кукурудзяна подрібнена (виробництво Україна), згідно з CAS 68525-86-0;
- олія соняшникова рафінована (виробництво Україна), згідно з CAS 8001-21-6;
- олія кукурудзяна рафінована (виробництво Україна), згідно з CAS 8001-30-7;
- олеїн пальмовий рафінований (виробництво Малайзія), згідно з CAS 93334-39-5.

З метою дослідження впливу вмісту води і ліпідів в сировині на пористість і вологість екструдованої білково-жирової системи створено ряд модельних зразків суміші сировинних компонентів, що містять різну кількість ліпідів та води. Вміст води у вихідній суміші сировинних компонентів змінювали шляхом додавання дистильованої води, вміст ліпідів – шляхом додавання олії соняшникової рафінованої. Тривалість відволожування, тобто експозиції зволоженої і збагаченої олією сировини після гомогенізації складала 10 хвилин.

Екструдкування сировини проведено на прес-екструдері ПЕ-20, який призначено для отримання спучених екструдованих продуктів. Температура сировини в передматричній зоні не перевищує 135 °С. Швидкість обертання шнека становить 250 обертів на хвилину.

В зразках сировини та екструдованих продуктів визначено: масову частку води та летких речовин – гравіметричним методом згідно ДСТУ 7621; масову частку білку – за методом К'ельдаля згідно ДСТУ 7169; масову частку ліпідів і клітковини – методом спектроскопії в ближній інфрачервоній зоні згідно ДСТУ 7491.

Визначення пористості здійснювалося за допомогою покриття зразків екструдованого матеріалу водостійким лаком. Після висихання зразки поміщали у мірну ємність, наповнену водою. Враховували масу витісненої з циліндра води обробленими екструдованим матеріалом, щоб визначити об'єм зразку екструдованого матеріалу з порами. Зразок екструдату піддавали пресуванню, після чого визначали його об'єм.

Період індукції ліпідної складової екструдованого продукту проведено прискореним методом «активного кисню» згідно з ДСТУ ISO 6886.

Для планування експерименту і обробки даних застосовано математичні методи з використанням програмного пакету Stat Soft Statistica v 6.0 (США). Статистичну модель залежності визначено через апроксимацію експериментальних даних за допомогою побудови лінії тренду. Дослідження проведено в трикратному повторенні.

Результати дослідження

Як сировину для екструдованої білково-жирової системи обрано побічні продукти олієжирових виробництв – подрібнені шроти сої, ріпаку і коноплі, а також крупу кукурудзяну. Досліджено вміст ліпідів, вологи та летких речовин, сирого протеїну і клітковини зразків сировини для екструдованої білково-жирової системи (табл. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад зразків сировини для екструдованої білково-жирової системи

Вид сировини	Вміст, %							
	ліпіди		волога та леткі речовини		сирий протеїн		клітковина	
	Експеримент	Норма	Експеримент	Норма	Експеримент	Норма	Експеримент	Норма
Шрот соєвий	1,4	не більше 1,5	7,2	8,5...10,0	41,5	не менше 40,0	4,9	не більше 5,0
Шрот ріпаковий	1,8	не більше 3,0	7,8	8,0...12,0	38,0	не менше 37,0	14,2	не більше 16,0
Шрот конопляний	1,2	не більше 1,5	6,5	7,5...9,0	33,5	не менше 32,0	32,0	не більше 35,0
Крупа кукурудзяна	1,1	не нормується	14,0	не більше 14,0	8,5	не нормується	5,0	не нормується

Отримані результати досліджень свідчать, що зразки сировини для екструдованої білково-жирової системи відповідають вимогам відповідної нормативної документації. Єдиний показник, що відрізняється, це вологість шротів олійної сировини.

Спираючись на результати досліджень щодо раціонального співвідношення білковмісної і крохмалевмісної сировини, описані в роботі [6], проведено екструдування суміші сировинних компонентів наступного складу: шрот соєвий – 25 %; шрот ріпаковий – 25 %; шрот конопляний – 25 %; крупа кукурудзяна – 25 %. В результаті отримано екструдований продукт, що має наступний хімічний склад: вміст ліпідів – 1,32 %; вміст вологи та летких речовин – 7,20 %; вміст сирого протеїну – 29,90 %; вміст клітковини – 14,40 %. Показники складу свідчать, що в результаті екструдування за зазначених умов (п. п. 4. 3) в отриманому продукті зменшилися: вміст вологи та летких речовин (на 20,0 %); вміст ліпідів (на 4,3 %); вміст сирого протеїну (на 1,6 %). Пористість отриманого екструдованого продукту становить 68 %.

Визначено вплив вмісту вологи (c_w) і ліпідів (c_f) в сировині в співвідношенні 1:1:1:1 на пористість ($P(c_w, c_f)$) і вологість ($M(c_w, c_f)$) екструдованого продукту. Вміст вологи в сировині варіювали в інтервалі 9,0...13,5 % з кроком 1,5 %. Вміст ліпідів в сировині варіювали в інтервалі 2,0...6,0 % з кроком 2,0 %. Отримані значення пористості екструдованої білково-жирової системи знаходилися в межах 68...135 %; вологості екструдованої білково-жирової системи – в межах 7,2...12,7 %. Поверхні отриманих залежностей представлено на рис. 1. У вигляді рівнянь (2) і (3) представлено апроксимаційні залежності технологічних параметрів екструдованої білково-жирової системи, а саме: пористості ($P(c_w, c_f)$); вологості ($M(c_w, c_f)$) від факторів: вмісту вологи (c_w) в сировині; вмісту ліпідів (c_f) в сировині.

$$P(c_w, c_f) = -702,34 + 135,28 \cdot c_w + 13,66 \cdot c_f - 5,82 \cdot c_w^2 + 0,42 \cdot c_w \cdot c_f - 1,91 \cdot c_f^2; \quad (2)$$

$$M(c_w, c_f) = 7,99 - 0,54 \cdot c_w + 0,11 \cdot c_f + 0,0407 \cdot c_w^2 + 0,02 \cdot c_w \cdot c_f. \quad (3)$$

Базуючись на отриманих результатах експериментів та їхній статистичній обробці, скориговано вміст води і ліпідів в обраній сировині для екструдуювання. Окреслено раціональний діапазон досліджених факторів для отримання екструдованої білково-жирової системи задовільної пористості і вологості, а саме: величини вмісту води в сировині – 10,5...12,5 %; величини вмісту ліпідів в сировині – 3,5...5,0 %, за яких технологічні показники продукції в процесі екструдуювання підвищилися, а саме: пористість – 112...135 %; вологість – 8,0...9,2 %. Базуючись на результатах проведених досліджень (рис. 1, 2) і залежностях (2) і (3), отримано експериментальний зразок екструдованої білково-жирової системи. Сировиною є суміш шротів соєвого, ріпакового, конопляного та крупи кукурудзяної в співвідношенні 1:1:1:1 з додаванням олеїну пальмового рафінованого у кількості 3,2 %. Склад дослідженого зразку екструдованої білково-жирової системи порівняно з існуючим аналогом і наведено в табл. 2 (розрахункове значення вологості екструдованої білково-жирової системи запропонованого складу склало 8,8 %).

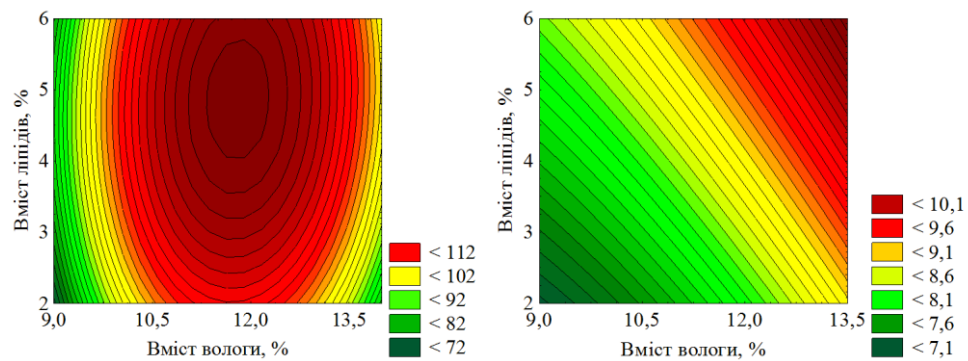


Рисунок 1 – Залежність пористості ($P(c_w, c_f)$) (а) і вологості ($M(c_w, c_f)$) (б) екструдованої білково-жирової системи від величини вмісту води (c_w) і ліпідів (c_f) в сировині

Таблиця 2 – Характеристика досліджуваних зразків екструдованих продуктів

Найменування показника	Зразки екструдованих білково-жирових систем	
	Розроблена	Існуючий аналогічний продукт (зразок порівняння)
Вміст ліпідів, %	4,40±0,16	4,60±0,18
Вміст води та летких речовин, %	8,50±0,34	9,10±3,70
Вміст сирого протеїну, %	29,00±1,16	8,20±0,33
Вміст клітковини, %	14,20±0,57	56,10±2,24
Пористість, %	130,0±5,2 %	105,0±4,2 %.

Зразок екструдованої білково-жирової системи запропонованого складу за вмістом ліпідів практично не відрізняється від зразку існуючого аналогічного продукту (4,40±0,16 % проти 4,60±0,18 % відповідно). Така ж закономірність стосується і вмісту

вологи і летких речовин ($8,50 \pm 0,34$ % проти $9,10 \pm 3,70$ % відповідно). Вміст сирого протеїну в екструдованій білково-жировій системі запропонованого складу перевищує такий в зразку порівняння в 3,5 рази ($29,00 \pm 1,16$ % проти $8,20 \pm 0,33$ % відповідно). Вміст клітковини в екструдованій білково-жировій системі запропонованого складу, навпаки, є меншим за такий в зразку порівняння в 3,9 рази ($14,20 \pm 0,57$ % проти $56,10 \pm 2,24$ % відповідно). Пористість екструдованої білково-жирової системи запропонованого складу перевищує таку у існуючого аналогічного продукту на 24 % ($130,0 \pm 5,2$ % (розрахункове значення – 128,0 %) і $105,0 \pm 4,2$ % відповідно).

Висновки

1. Досліджено вплив вмісту вологи і ліпідів в модельних зразках сировини на пористість і вологість екструдованої білково-жирової системи. Встановлене раціональне співвідношення вмісту вологи (10,5...12,5 %) і ліпідів (3,5...5,0 %) в сировині для екструдату.

2. Порівняно фізико-хімічні та технологічні показники екструдованої білково-жирової системи розробленого складу з тими ж показниками існуючого аналогічного продукту (пластівцями екструдованими мультизлаковими). Показники складу розробленого екструдату відповідають показникам продукту порівняння за вмістом ліпідів (4,4 % проти 4,6 %), вологи та летких речовин (8,5 % проти 9,1 %). Показники розробленого екструдату перевищують показники продукту порівняння за вмістом сирого протеїну (29,0 % проти 8,2 %) і пористості (130 % проти 105 %). Вміст клітковини в розробленому продукті є нижчим за продукт порівняння (14,2 % проти 56,1 %).

Література

1. Wallace, Th., Gibbons, D., O'Dwyer, M., Curran, Th. P. (2017). International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management – A review. *Journal of Environmental Management*, 187, 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.003>.
2. Vambol, V., Vambol, S., Kondratenko, O., Koloskov, V., Suchikova, Y. (2018). Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 87 (2), 77–84.
3. Danchenko, Y., Andronov, V., Kariev, A., Lebedev, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., & Yavorska, D. (2017). Research into surface properties of disperse fillers based on plant raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/12 (89), 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111350>.
4. Tsykhanovska, I., Evlash, V., Alexandrov, A., Lazarieva, T., Svidlo, K., Gontar, T., Yurchenko, L., & Pavlotska, L. (2018). Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of rye-and-wheat flour and the nanoparticles of the magnetofood food additive in order to improve moisture-retaining capacity of dough. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/11 (92), 70–80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126358>.
5. Singh, S., Gamlath, S., Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 42, 8, 916–929. DOI: 10.1111/j.1365- 2621.2006.01309.x
6. Petik, I., Litvinenko, O., Kalyna, V. & Ilinska, O. (2023). Development of extruded animal feed based on fat and oil industry waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 122, 11, 112–120. DOI:10.15587/1729-4061.2023.275509.

7. Rousta, L. K., Bodbodak, S., Nejatian, M. & Yazdi, A. P. Gh. (2021). Use of encapsulation technology to enrich and fortify bakery, pasta, and cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 118, A, 688–710. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.029>.
8. Mazaheri Tehrani, M., Ehtiati, A. & Sharifi Azghandi, S. (2017). Application of genetic algorithm to optimize extrusion condition for soy-based meat analogue texturization. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 1119–1125 <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2524-9>.
9. Singh, J. P., Kaur, A., Singh, B. et al. (2019). Physicochemical evaluation of corn extrudates containing varying buckwheat flour levels prepared at various extrusion temperatures. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2205–2212. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03703-y>.
10. Mridula, D., Sethi, S., Tushir, S. et al. (2017). Co-extrusion of food grains-banana pulp for nutritious snacks: optimization of process variables. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 2704–2716. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2707-4>.
11. Zhang, B., Liu, G., Ying, D., Sanguansri, L. (2017). Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and in vitro protein digestibility of canola meal. *Food Research International*, 100, 1, 658–664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.060>.
12. Zahari, I., Purhagen, J. K., Rayner, M., Ahlström, C. (2023). Extrusion of high-moisture meat analogues from hempseed protein concentrate and oat fibre residue. *Journal of Food Engineering*, 354, 111567. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111567>.
13. do Carmo, C. S., Varela, P., Knutsen, S. H., Sahlstrom, S. (2019). The impact of extrusion parameters on physicochemical, nutritional and sensorial properties of expanded snacks from pea and oat fractions. *LWT – Food Science and Technology*, 112, 108252. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108252.

Bibliography (transliterated)

1. Wallace, Th., Gibbons, D., O'Dwyer, M., Curran, Th. P. (2017). International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management – A review. *Journal of Environmental Management*, 187, 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.003>.
2. Vambol, V., Vambol, S., Kondratenko, O., Koloskov, V., Suchikova, Y. (2018). Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 87 (2), 77–84.
3. Danchenko, Y., Andronov, V., Kariev, A., Lebedev, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., & Yavorska, D. (2017). Research into surface properties of disperse fillers based on plant raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/12 (89), 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111350>.
4. Tsykhanovska, I., Evlash, V., Alexandrov, A., Lazarieva, T., Svidlo, K., Gontar, T., Yurchenko, L., & Pavlotska, L. (2018). Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of rye-and-wheat flour and the nanoparticles of the magnetofood food additive in order to improve moisture-retaining capacity of dough. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/11 (92), 70–80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126358>.
5. Singh, S., Gamlath, S., Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 42, 8, 916–929. DOI: 10.1111/j.1365- 2621.2006.01309.x

6. Petik, I., Litvinenko, O., Kalyna, V. & Ilinska, O. (2023). Development of extruded animal feed based on fat and oil industry waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 122, 11, 112–120. DOI:10.15587/1729-4061.2023.275509.

7. Rousta, L. K., Bodbodak, S., Nejatian, M. & Yazdi, A. P. Gh. (2021). Use of encapsulation technology to enrich and fortify bakery, pasta, and cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, 118, A, 688–710. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.029>.

8. Mazaheri Tehrani, M., Ehtiati, A. & Sharifi Azghandi, S. (2017). Application of genetic algorithm to optimize extrusion condition for soy-based meat analogue texturization. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 1119–1125 <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2524-9>.

9. Singh, J. P., Kaur, A., Singh, B. et al. (2019). Physicochemical evaluation of corn extrudates containing varying buckwheat flour levels prepared at various extrusion temperatures. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2205–2212. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03703-y>.

10. Mridula, D., Sethi, S., Tushir, S. et al. (2017). Co-extrusion of food grains-banana pulp for nutritious snacks: optimization of process variables. *Journal of Food Science and Technology*, 54, 2704–2716. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2707-4>.

11. Zhang, B., Liu, G., Ying, D., Sanguansri, L. (2017). Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and in vitro protein digestibility of canola meal. *Food Research International*, 100, 1, 658–664. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.060>.

12. Zahari, I., Purhagen, J. K., Rayner, M., Ahlström, C. (2023). Extrusion of high-moisture meat analogues from hempseed protein concentrate and oat fibre residue. *Journal of Food Engineering*, 354, 111567. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111567>.

13. do Carmo, C. S., Varela, P., Knutsen, S. H., Sahlstrom, S. (2019). The impact of extrusion parameters on physicochemical, nutritional and sensorial properties of expanded snacks from pea and oat fractions. *LWT – Food Science and Technology*, 112, 108252. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108252.

УДК 664.784.8: 633.854

С. В. Станкевич¹, к.с.-г.н., доцент, С. Б. Омельченко¹, к.техн.н.,
О. В. Котляр¹, к.техн.н. доцент, Мюшфік Панах огли Бакіров¹, к.техн.н.,
О. В. Жулінська², к.техн.н., Н. Л. Аштаєва³, викл.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕКСТРУДАТУ ВІД ХАРАКТЕРИСТИК СИРОВИНИ

Розглянуто шлях вирішення проблеми корегування технологічних показників, зокрема пористості та вмісту вологи в екструдованих білково-жирових системах на основі шротів соєвого, ріпакового, конопляного та крупи кукурудзяної. Особливість роботи полягає у обґрунтуванні раціонального співвідношення вмісту вологи і ліпідів в сировинних компонентах екструдату, що є важливим аспектом раціоналізації складу та покращення текстури інноваційних екструдованих продуктів на базі вказаної сировини.

Об'єктом дослідження є технологічні показники, зокрема пористість і вологість екструдованої білково-жирової системи в залежності від вмісту вологи і ліпідів в сировинних компонентах. Встановлено раціональне співвідношення вмісту вологи (10,5...12,5 %) і ліпідів (3,5...5,0 %) в сировині для екструдованої білково-жирової системи.

Порівняно фізико-хімічні та технологічні показники екструдованої білково-жирової системи розробленого складу з тими ж показниками існуючого аналогічного продукту (пластівцями екструдованими мультизлаковими). Показники складу розробленого екструдату відповідають показникам продукту порівняння за вмістом ліпідів (4,4 % проти 4,6 %), вологи та летких речовин (8,5 % проти 9,1 %). Показники розробленого екструдату перевищують показники продукту порівняння за вмістом сирого протеїну (29,0 % проти 8,2 %) і пористості (130 % проти 105 %). Вміст клітковини в розробленому продукті є нижчим за продукт порівняння (14,2 % проти 56,1 %). Отримані дані пояснюються тим, що використано комплекс складових, частина з яких є відходами виробництва, з обґрунтованим вмістом вологи та ліпідів, що вплинуло на позитивні технологічні характеристики екструдату. Прикладним аспектом використання даного наукового результату є можливість раціоналізації процесу екструдування шротів олійних культур для досягнення бажаної текстури, пористості та стабільності ліпідної компоненти продукту.

Ключові слова: екструдування, білково-жирова система, шроти, крупа кукурудзяна, вміст вологи, вміст ліпідів, пористість.

S. V. Stankevich, S. B. Omelchenko, O. V. Kotlyar, Mushfik Panakh ogly Bakirov,
O. V. Zhulinska, N. L. Ashtaeva

DEPENDENCE OF QUALITY INDICATORS OF EXTRUDATE ON RAW MATERIAL CHARACTERISTICS

The way to solve the problem of correcting the technological indicators, especially porosity and moisture content in extruded protein-fat systems based on soybean, rapeseed, hemp and corn groats is considered. The peculiarity of the work is the substantiation of the rational ratio of the content of moisture and lipids in the raw components of the extrudate, which is an important aspect of rationalizing the composition and improving the texture of innovative extruded products based on the specified raw materials.

The object of the research is the technological indicators, in particular the porosity and humidity of the extruded protein-fat system, depending on the moisture and lipid content of the raw components. A rational ratio of moisture content (10.5...12.5 %) and lipids (3.5...5.0 %) in the raw material for the extruded protein-fat system has been established.

The physico-chemical and technological indicators of the extruded protein-fat system of the developed composition were compared with the same indicators of the existing similar product (extruded multi-cereal flakes). The indicators of the composition of the developed extract correspond to the indicators of the comparison product in terms of lipid content (4.4% vs. 4.6 %), moisture and volatile substances (8.5 % vs. 9.1 %). The indicators of the developed extrudate exceed the indicators of the comparison product in terms of crude protein content (29.0 % vs. 8.2 %) and porosity (130 % vs. 105 %). The fiber content in the developed product is lower than the comparison product (14.2 % versus 56.1 %). The obtained data are explained by the fact that a complex of components was used, some of which are production waste, with reasonable moisture and lipid content, which affected the positive technological characteristics of the extrudate. An applied aspect of using this scientific result is the possibility of rationalizing the process of extruding oilseed meal to achieve the desired texture, porosity and stability of the lipid component of the product.

Keywords: extrusion, protein-fat system, meal, corn grits, moisture content, lipid content, porosity.

«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 технологічний менеджмент, а 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 повинна бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows версій 97, XP, 2000 або 2003. Сама стаття повинна бути роздрукована 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 ініціали та прізвища 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 повинні 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 повинна бути не менш за 12.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті двома мовами (українська та англійська) мають бути надруковані УДК, автори, назва і анотація. Мінімальна кількість символів кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email.

**СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ,
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., професор
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

3'2024

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 23.09.2024 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 8,0. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–20.
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.