

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2021

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.

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., професор НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньєва, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ".

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

В. П. Шаповров, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ХТПЕ НТУ "ХПІ"

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

Ю. Б. Данилов, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ".

О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил ім. І.Кожедуба

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

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

Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Katolikus egyetem, Budapest, Hungary

Шарифа Рафидан Ван Алві, PhD, professor, Малайзійський університет технологій

Девид Дж. Кукулька, PhD, професор, Державний університет Нью-Йоркського коледжу у Буффало, США

Й. Клемеш, PhD, DSc (Hon), ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина), та ун-та Манчестера (Великобританія)

Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, університет Падерборна, Німеччина

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

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, Салоніки, Греція

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

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

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyanskyi, 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., NTU "KhPI"

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

V. P. Shaporev, 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"

Yu. B. Danilov, 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

Jiří Jaromír Klemes, PhD., professor, DSc (Hon) of the University of Pannonia (Veszprem, Hungary) and the University of Manchester (Great Britain)

Eugen Kenig, prof., dr.-ing., University of Paderborn, Germany

Martin Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato, Mexico

Petar Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre - SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic

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

Petr Stehlik, PhD., professor, Director of Institute BRNO University of Technology, Czech Republic

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

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<i>Дзевочко О. М., Подустов М. О., Дзевочко А. І.</i> Дослідження теплових і масообмінних процесів в газорідних плівкових абсорберах у технології поверхнево-активних речовин.....	3
---	---

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

<i>Алексахін О. О., Єна С. В., Гордієнко О. П., Новіков В. В., Цемох Д. О.</i> Порівняння варіантів виконання розподільної теплової мережі мікрорайону.....	17
<i>Здоренко В. Г., Забіяка Н.А., Себко К.В., Горбунова О.В.</i> Визначення межі міцності на стиск R_p багатошарових плит виконаних з шлакоситалів	26
<i>Хавін Г. Л.</i> Формулювання закону зношування інструменту при різанні полімерних композитів.....	36

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<i>Белінська А. П., Варанкіна О. О., Близнюк О. М., Масалітіна Н. Ю., Кричковська Л. В.</i> Контроль та керування процесу екстракції в промисловій біотехнології бета-каротину з <i>Blakeslea trispora</i>	46
<i>Кричковська Л. В., Лисак П. Ю., Дубоносів В. Л., Грицаєнко Ю. А.</i> Застосування нано і біотехнологічної сировини при створенні препаратів для сільського господарства.....	57

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

<i>Масалітіна Н. Ю., Близнюк О. М., Белінська А. П., Варанкіна О. О., Кричковська Л. В.</i> Дослідження амілолітичної активності культуральної рідини в біотехнології симбіотичних культур <i>Medusomyces gisevii</i> та <i>Oryzomyces Indici</i>	64
<i>Кійко С. Г., Дейнега Л. Ю., Басанець М. І., Каменський Д. В., Діденко А. Є.</i> Управління портфелями проектів енергозбереження на основі теорії Марковіца.....	79

Затверджено Вченою радою НТУ «ХП» (протокол № 8 від 03.09.2021 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХП», 2021. – № 3. – 92 с.

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

© Національний технічний університет «ХП», 2021

Дзевочко О. М., к. техн. наук, доцент, Подустов М. О., д. техн. наук, професор,
Дзевочко А.І., к. техн. наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОРІДИННИХ ПЛІВКОВИХ АБСОРБЕРАХ У ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Ключові слова: поверхнево-активна речовина, плівковий абсорбер, масообмін, теплообмін.

Вступ. Поверхнево-активні речовини (ПАР) знайшли широке застосування у різних галузях промисловості і побуті. У щорічних довідкових виданнях перераховуються безліч варіантів використання ПАР в найрізноманітніших областях народного господарства України. ПАР мають асиметрично побудовану молекулу, яка містить гідрофільну і гідрофобну групи. Такою дифільною структурою і пояснюється поверхнева активність ПАР, тобто здатність накопичуватися на поверхні розділу двох фаз та змінювати властивість поверхні.

Виробництво ПАР складається з таких відділень: отримання сульфатуючого агента, сульфатування органічної речовини, нейтралізація продуктів сульфатування, очищення газоподібних викидів. Основним відділенням виробництва є процес сульфатування органічної речовини. В даний час процес сульфатування органічної речовини проводиться з використанням в якості сульфатуючого агента газоподібного триоксиду сірки, розбавленого осушеним повітрям. В якості обладнання використовуються газорідинні плівкові абсорбери. Для їх розробки необхідні дослідження теплових і масообмінних процесів.

Аналіз літературних даних. Взаємодія гетерогенних систем, яким є процес плівкового сульфатування органічної речовини триоксидом сірки, характеризується різнотипними хімічними і фізичними явищами, пов'язаними між собою та визначаючими якісні показники процесу [1, 2]. Для систем, у яких опір процесам переносу зосереджений у газовій фазі, необхідний аналіз взаємодії газової фази з плівкою рідини, що дозволяє кількісно характеризувати транспорт реагенту до поверхні контакту фаз [3, 4].

Процес сульфатування в газорідинних плівкових абсорберах складається з таких стадій: процес масообміну триоксиду сірки з газоповітряного потоку до рідинної фази; процес абсорбції триоксиду сірки органічною речовиною з проходженням екзотермічної хімічної реакції; процес теплообміну між рідинною фазою та газоповітряним потоком; процес теплообміну між рідинною фазою та потоком охолоджувальної води [5].

Як показує аналіз літературних даних [6–11] проведена значна кількість експериментальних досліджень і відповідно є велика кількість експериментальних даних по визначенню коефіцієнта масопередачі і коефіцієнтів теплопередачі. Враховуючи, що проведення такого роду експериментальних досліджень є достатньо складним, з'являється необхідність проаналізувати наявні дані та використовувати отримані рівняння у подальших наших розрахунках та математичному моделюванні процесу сульфатування органічних речовин газоподібним триоксидом сірки.

Мета роботи. Провести аналіз теплових і масообмінних процесів при сульфатуванні органічних речовин газоподібним триоксидом сірки та обрати рівняння для їх розрахунку.

Основна частина. Аналіз теплових процесів при сульфатуванні органічної речовини проводився наступним чином. При розрахунках коефіцієнта теплопередачі від рідини до газу, коли дифузійні і теплові числа Прандтля близькі до одиниці рекомендується використовувати рівняння [12]:

$$K_{TG} = K_G \cdot c_G \cdot \rho_G \cdot \left(\frac{Pr_D}{Pr_T} \right)^{0,67}, \quad (1)$$

де K_G – коефіцієнт масопередачі, м/с; c_G – питома теплоємність газоповітряного потоку, Дж/(кг·К); ρ_G – густина газоповітряного потоку, кг/м³; Pr_D – дифузійний критерій Прандтля; Pr_T – тепловий критерій Прандтля.

Коефіцієнт теплопередачі від рідинної фази до охолоджувальної води визначається за класичним рівнянням [13]:

$$K_{TX} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від рідинної фази до стінки, Вт/(м²·К); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до охолоджувальної води, Вт/(м²·К); $\delta_{ст}$ – товщина стінки реакційної труби, м; $\lambda_{ст}$ – питома теплопровідність стінки, Вт/(м·К).

Коефіцієнти тепловіддачі обчислювалися наступним чином. Класичне рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від рідинної фази до стінки реакційної труби наведено в літературі [14].

$$Nu_{пл} = 0,67 \cdot Re_{пл}^{0,11} \cdot Pr_p^{0,33} \left(\frac{\delta_{пп}}{h} \right)^{0,33}, \quad (3)$$

де $Nu_{пл}$ – критерій Нуссельта для плівки; $Re_{пл}$ – критерій Рейнольдса для плівки; Pr_p – критерій Прандтля для рідинної фази; $\delta_{пп}$ – приведена товщина плівки, м; h – висота вертикальної поверхні, м.

Розкрив критерій Нуссельта маємо

$$\alpha_1 = 0,67 \cdot Re_{пл}^{0,11} \cdot Pr_p^{0,33} \left(\frac{\delta_{пп}}{h} \right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda_p}{\delta_{пп}}, \quad (4)$$

де λ_p – питома теплопровідність рідинної фази, Вт/(м·К).

Однак цей коефіцієнт тепловіддачі має складну залежність від фізико-хімічних параметрів у процесі руху плівки рідини. Ці питання були розглянуті у літературі [15–17]. Автори [17] наводять таке рівняння для розрахунку α_1 :

$$\alpha_1 = 0,34 \frac{\lambda_p}{d} \left(\frac{\rho_p}{\rho_\Gamma} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{d \cdot G_{\Gamma P}}{\mu_p} \right)^{0,87} \cdot Pr_\Gamma^{0,4}, \quad (5)$$

де λ_p – питома теплопровідність рідинної фази, Вт/(м·К); d – діаметр реакційної труби, м; ρ_p – густина рідинної фази, кг/м³; ρ_Γ – густина газоповітряного потоку, кг/м³; $G_{\Gamma P}$ – масова витрата газорідинного потоку, кг/с; μ_p – динамічна в'язкість рідинної фази, Па·с; Pr_Γ – тепловий критерій Прандтля.

Як показали наступні розрахунки вибір цього рівня дає можливість приблизити температурні профілі по довжині реакційної труби до реальних експериментальних даних [18]. Тому це рівняння було взято як базове, при наступному математичному моделюванні процесу сульфатування.

Тепловіддача від стінки до однофазного потоку вивчена достатньо. Тому для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі від стінки до охолоджувального потоку води при його турбулентному русі використовується наступне співвідношення [19]:

$$Nu_X = 0,021 \cdot Re_X^{0,8} \cdot Pr_X^{0,4} \left(\frac{Pr_X}{Pr_{CT}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

де Nu_X – критерій Нуссельта для потоку охолоджувальної води; Re_X – критерій Рейнольдса для потоку охолоджувальної води; Pr_X – критерій Прандтля для потоку охолоджувальної води; Pr_{CT} – критерій Прандтля для потоку охолоджувальної води при температурі стінки.

Розкрив критерії маємо:

$$\frac{\alpha_2 \cdot d_{екв}}{\lambda_X} = 0,021 \left(\frac{V_X \cdot d_{екв} \cdot \rho_X}{\mu_X} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{c_X \cdot \mu_X}{\lambda_X} \right)^{0,4}, \quad (7)$$

де $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр, м; λ_X – питома теплопровідність охолоджувальної води, Вт/(м·К); V_X – швидкість потоку охолоджувальної води, м/с; ρ_X – густина охолоджувальної води, кг/м³; μ_X – динамічна в'язкість охолоджувальної води, Па·с; c_X – питома теплоємність охолоджувальної води, Дж/(кг·К).

Діаметр еквівалентний розраховувався наступним чином. Для випадку теплообміну «труба в трубі» [14]:

$$d_{екв} = d_{вн} - d_{зовн}, \quad (8)$$

де $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр зовнішньої труби, м; $d_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр реакційної труби, м.

Перетворивши рівняння 7 отримаємо:

$$\alpha_2 = 0,021 \cdot \frac{\lambda_X}{d_{\text{екв}}} \cdot \left(\frac{V_X \cdot d_{\text{екв}} \cdot \rho_X}{\mu_X} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{c_X \cdot \mu_X}{\lambda_X} \right)^{0,4} \quad (9)$$

Аналіз процесу масообміну проводився за літературними даними дослідників плівкових абсорберів.

Рівняння для розрахунку коефіцієнта масопередачі було отримано аналізом 6-х рівнянь різних авторів [17, 18, 20–23], які займалися процесом сульфатування органічних речовин.

Отже, були вибрані для порівняння наступні рівняння для розрахунку коефіцієнта масопередачі:

$$K_{\Gamma} = 0,023 \cdot Re_{\Gamma}^{0,83} \cdot Pr_D^{0,44} \cdot \frac{D_{\Gamma}}{d}, \quad (10)$$

$$K_{\Gamma} = 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot Re_{\Gamma} \cdot h^{-0,2} \quad (11)$$

$$K_{\Gamma} = 0,079 \cdot Re_{\Gamma}^{0,67} \cdot Pr_D \cdot \frac{D_{\Gamma}}{d}, \quad (12)$$

$$K_{\Gamma} = 0,046 \cdot Re_{\Gamma}^{0,83} \cdot Pr_D^{0,44} \cdot \frac{D_{\Gamma}}{d}, \quad (13)$$

$$K_{\Gamma} = 0,0087 \cdot V_{\Gamma}^{0,8}, \quad (14)$$

$$K_{\Gamma} = B \cdot Pr_D^{-0,704} \cdot \left(\frac{\tau_{\Gamma P}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,5}, \quad (15)$$

де D_{Γ} – коефіцієнт дифузії для газоповітряного потоку, $\text{м}^2/\text{с}$; d – діаметр реакційної труби, м; V_{Γ} – швидкість газоповітряного потоку, м/с; $\tau_{\Gamma P}$ – дотичне напруження на поверхні розділу газ-рідина, Па; h – висота труби, м; ρ_{Γ} – густина газоповітряного потоку, $\text{кг}/\text{м}^3$; B – поправний коефіцієнт.

Результати розрахунків величини коефіцієнта масопередачі за даними рівняннями наведено у табл. 1.

Як видно з табл. 1 величина коефіцієнту масопередачі для різних рівнянь має достатньо широкі межі.

В зв'язку з цим, остаточний вибір рівняння для розрахунку коефіцієнта масопередачі можливий лише при математичному моделюванні процесу сульфатування в трубчастому плівковому абсорбері шляхом зіставлення з експериментальними даними Гутьєрреса [18] та результатами математичного моделювання Дабіра [23].

Для проведення математичного моделювання процесу сульфатування необхідно мати рівняння для розрахунку густини і динамічної в'язкості реакційної маси за довжиною реактора. Впродовж дослідження [24] були отримані експериментальні дані по зміні цих величин від якісних показників отриманих продуктів при сульфатуванні суміші вищих спиртів фр. C_{12} – C_{14} та моноетаноламідів вищих жирних кислот кокосової

олії. Обробкою експериментальних методом найменших квадратів були отримані наступні рівняння

$$\rho_p = 852 + 2,0 \cdot \eta - 0,68 \cdot (T_p - 273) \quad (16)$$

$$\mu_p = 0,158 \cdot \exp \left\{ -0,5 \cdot \left[0,00013 \cdot (T_p - 273)^2 + 0,00078 \cdot (78 - \eta)^2 \right] \right\}; \quad 0 < \eta < 73 \quad (17)$$

$$\mu_p = 0,0012 \cdot \left[595,6 - 11,34 \cdot \eta + 0,07 \cdot \eta^2 + 0,1 \cdot (T_p - 273) - 0,01 \cdot (T_p - 273)^2 \right]; \quad \eta \geq 73 \quad (18)$$

Похибка розрахунків за рівняннями (16 та 18) становить 6 %.

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта масопередачі (K_Γ) від швидкості газоповітряного потоку V_Γ для різних рівнянь

Швидкість газоповітряного потоку, V_Γ , м/с	Рівняння 10	Рівняння 11	Рівняння 12	Рівняння 13	Рівняння 14	Рівняння 15
8	0,031	0,0067	0,035	0,062	0,047	0,12
10	0,037	0,0083	0,04	0,074	0,055	0,14
12	0,043	0,01	0,0458	0,086	0,0635	0,16
14	0,049	0,0116	0,051	0,098	0,0718	0,18
16	0,055	0,0133	0,0555	0,110	0,08	0,2
18	0,061	0,015	0,06	0,122	0,088	0,22
20	0,066	0,0167	0,065	0,132	0,096	0,24

При розробці математичного опису процесу сульфатування необхідно було скласти балансові рівняння масо- і теплообміну для реакційної труби. Математичний опис складався при наступних допущеннях:

- вхідні й вихідні кінцеві ефекти не враховуються;
- не відбувається краплинного віднесення рідини;
- рідинна плівка симетрична щодо осі абсорбера;
- рідина не випаровується, газ не конденсується;
- втрати тепла в навколишнє середовище відсутні.

Згідно літературних даних [25–31] математичний опис процесу сульфатування в плівкових абсорберах з низпадним потоком фаз може бути представлений такими рівняннями

$$V_z \frac{dC_A}{dz} = -r, \quad (19)$$

$$W_\Gamma \frac{dP_B}{Pdz} = -K_\Gamma \cdot P_B \cdot A_\Gamma, \quad (20)$$

$$V_z \cdot F \cdot c_p \cdot \rho_p \frac{dT_p}{dz} = H_p \cdot F \cdot r - K_{ТХ} \cdot F \cdot (T_p - T_X) - K_{ТГ} \cdot F \cdot (T_p - T_\Gamma), \quad (21)$$

$$Q_\Gamma \cdot c_\Gamma \cdot \rho_\Gamma \frac{dT_\Gamma}{dz} = K_{ТГ} \cdot F \cdot (T_p - T_\Gamma), \quad (22)$$

$$Q_X \cdot c_X \cdot \rho_X \frac{dT_X}{dz} = K_{TX} \cdot F (T_p - T_X), \quad (23)$$

$$V_z = \frac{\tau_{ГР} \cdot \delta}{\mu_p}, \quad (24)$$

$$\tau_{ГР} = f \cdot \rho_{Г} \cdot V_{Г}^2, \quad (25)$$

$$\delta = \left(\frac{3 \cdot \Gamma \cdot \mu_p}{\rho_p \cdot g} \right)^{1/3}, \quad (26)$$

$$f = \frac{86}{Re_{Г}}, \quad (27)$$

$$\rho_p = 852 + 2,0 \cdot \eta - 0,68 \cdot (T_p - 273) \quad (28)$$

$$\mu_p = 0,158 \cdot \exp \left\{ -0,5 \cdot \left[0,00013 \cdot (T_p - 273)^2 + 0,00078 \cdot (78 - \eta)^2 \right] \right\}; \quad 0 < \eta < 73 \quad (29)$$

$$\mu_p = 0,0012 \cdot \left[595,6 - 11,34 \cdot \eta + 0,07 \cdot \eta^2 + 0,1 \cdot (T_p - 273) - 0,01 \cdot (T_p - 273)^2 \right]; \quad \eta \geq 73 \quad (30)$$

$$K_{Г} = B \cdot Pr_D^{-0,704} \cdot \left(\frac{\tau_{ГР}}{\rho_{Г}} \right), \quad (31)$$

$$K_{ТГ} = K_{Г} \cdot c_{Г} \cdot \rho_{Г} \cdot \left(\frac{Pr_D}{Pr_{Г}} \right)^{0,67}, \quad (32)$$

$$K_{ТХ} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (33)$$

$$\alpha_1 = 0,34 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_{Г}} \right)^{0,28} \cdot \left(\frac{d \cdot G_{ГР}}{\mu_p} \right)^{0,87} \cdot Pr_{Г}^{0,4}, \quad (34)$$

$$\alpha_2 = 0,021 \cdot \frac{\lambda_X}{d_{екв}} \cdot \left(\frac{V_X \cdot d_{екв} \cdot \rho_X}{\mu_X} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{c_X \cdot \mu_X}{\lambda_X} \right)^{0,4}, \quad (35)$$

де C_A – молярна концентрація вихідної органічної сировини в рідинній фазі, моль/м³; V_z – швидкість рідинної фази, м/с; r – швидкість реакції, моль/(м²·с); z – осьова координата, м; P – загальний тиск газоповітряного потоку, Па; P_B – поточний парціальний тиск триоксиду сірки в газоповітряному потоці, Па; $W_{Г}$ – відношення молярної витрати триоксиду сірки на одиницю довжини периметру реакційної труби, моль/(м·с); $K_{Г}$ – коефіцієнт масопередачі, м/с; c_p – питома теплоємність рідинної фази, Дж/(кг·К); ρ_p – густина рідинної фази, кг/м³; T_p – температура рідинної фази, К; H_p – тепловий ефект реакції, Дж/моль; F – площа теплообміну, м²; T_X – температура охолоджувальної води, К; $K_{ТХ}$ – коефіцієнт теплопередачі від рідинної фази до потоку охолоджувальної води, Вт/(м²·К); $K_{ТГ}$ – коефіцієнт теплопередачі від рідинної фази до газоповітряного потоку, Вт/(м²·К); $Q_{Г}$ – об'ємна витрата газоповітряного потоку, м³/с; $T_{Г}$ – температура га-

зоповітряного потоку, K ; c_{Γ} – питома теплоємність газоповітряного потоку, Дж/(кг·K); ρ_{Γ} – густина газоповітряного потоку, кг/м³; Q_{X} – об’ємна витрата охолоджувальної води, м³/с; c_{X} – питома теплоємність охолоджувальної води, Дж/(кг·K); ρ_{X} – густина охолоджувальної води, кг/м³; $\tau_{\Gamma\text{P}}$ – дотичне напруження на поверхні розділу газ-рідина, Па; δ – товщина плівки рідини, м; μ_{p} – динамічна в’язкість рідинної фази, Па·с; f – коефіцієнт тертя; V_{Γ} – швидкість газоповітряного потоку, м/с; Γ – лінійна щільність зрошування, м²/с; Re_{Γ} – критерій Рейнольдса для газоповітряного потоку; B – поправний коефіцієнт; η – ступінь сульфатування, %; Pr_{D} – дифузійний критерій Прандтля; D_{Γ} – коефіцієнт дифузії для газоповітряного потоку, м²/с; Pr_{T} – тепловий критерій Прандтля для рідинної фази; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від рідинної фази до стінки реакційної труби, Вт/(м²·K); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки реакційної труби до потоку охолоджувальної води, Вт/(м²·K); δ_{CT} – товщина стінки реакційної труби, м; λ_{CT} – питома теплопровідність стінки, Вт/(м·K); λ_{p} – питома теплопровідність рідинної фази, Вт/(м·K); d – діаметр реакційної труби, м; $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр для потоку охолоджувальної води, м; $G_{\Gamma\text{P}}$ – масова витрата газорідинного потоку, кг/с; V_{X} – швидкість потоку охолоджувальної води, м/с; λ_{X} – питома теплопровідність охолоджувальної води, Вт/(м·K); μ_{X} – динамічна в’язкість охолоджувальної води, Па·с.

Після розробки математичного опису процесу сульфатування сумішею органічних речовин в газорідинному плівковому абсорбері в першу чергу був проведений аналіз 6 рівнянь для розрахунку коефіцієнта масопередачі.

Була розроблена програма розрахунку процесу сульфатування сумішею органічних речовин в газорідинному плівковому абсорбері з використанням пакета прикладних програм *MatLab*.

Результати математичного моделювання зіставлені з експериментальними даними Гутьєрреса [18] та результатами математичного моделювання Дабіра [23]. Для кращого зіставлення діаметр реакційної труби був взятим рівним $d = 0,0139$ м, з такими ж умовами, як і у авторів [18, 23]. В табл. 2 наведені результати математичного моделювання. Аналіз отриманих даних (табл. 2) показує, що з найменшими похибками результати розрахунку ступеня сульфатування дає рівняння 15, яке і було обране для подальших досліджень.

Одночасно було показано адекватність математичної моделі реальним експериментальним даним. Максимальна похибка при розрахунках дорівнює 12 %, а в більшості – 2–7 %.

Висновки

1. Досліджено теплообмінні процеси при сульфатуванні суміші органічних речовин газоподібним триоксидом сірки в плівковому абсорбері. Обрані необхідні рівняння для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі та теплопередачі.

2. Досліджені масообмінні процеси в плівковому абсорбері. Проаналізовано 6 рівнянь різних дослідників та обрано рівняння для розрахунків коефіцієнта масопередачі при математичному моделюванні плівкового абсорбера.

3. Наведено рівняння для розрахунку густини та динамічної в'язкості реакційної маси у процесі сульфатування.
4. Наведено математичний опис процесу сульфатування в газорідному плівковому абсорбері.

Література

1. Шевердяев О.Н., Белов П.С., Шкитов А.М. Основы технологии поверхностно-активных веществ и синтетических моющих средств. Москва : МГОУ, 2001. 201 с.
2. Николаев П.В., Козлов Н.А., Петрова С.Н. Основы химии и технологии производства синтетических моющих средств. Иваново : Иван. гос. хим. техн. наук. у-т, 2007. 116 с.
3. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. Пер. с нем. Москва : Техносфера, 2007. Ч. 1. 141 с.
4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для ВУЗов. 10-е изд. стереотип., доработ. Москва : ООО ТИД "Альянс", 2004. 753 с.
5. Дзевочко А.І. Підвищення ефективності процесу сульфатування в трубчастому плівковому реакторі у виробництві поверхнево-активних речовин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08. Харків, 2021. 22 с.
6. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Москва : Высшая школа, 2002. 912 с.
7. Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Альянс, 2008. 496 с.
8. Бучинський А.К., Коваленко В.С. Основи технології та техніки абсорбційних процесів : навч. посіб. Днепропетровск : УДХТУ, 2004. 155 с.
9. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. Москва : Химия, 1990. 384 с.
10. Баранов Д.А., Блиничев В.Н., Вязкин А.В. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Москва : Логос, 2001. 600 с.
11. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 1995. 768 с.
12. Дзевочко А.І., Подустов М.О., Панасенко В.О. Розробка математичної моделі процесу сульфатування в плівковому реакторі. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків. 2017. № 1. С. 25–33.
13. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., ГОТЛИНСКАЯ А.П., ЛЕЩЕНКО В.О., НЕЧИПОРЕНКО Д.И., ЧЕРНЫШОВ И.С. Процессы и аппараты химической технологии : учебник в 2 ч. Ч. 1 / под ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. Харьков : НТУ "ХПИ", 2004. 632 с.
14. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Альянс, 2014. 753 с.
15. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Ленинград : Машиностроение, 1976. 215 с.
16. Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. Киев : Техника, 1975. 312 с.
17. Johnson G.R., Grynes B.L. Modeling of a thin-film sulfur trioxide sulfonation reactor. Ind. Eng. Chem. Process. 1974. Vol. 13, No. 1. P. 6–35.
18. Gutierrez G.Y., Mans T.C. Improved mathematical model for a falling film sulfonation reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 1988. Vol. 27, No. 9. P. 1701–1707.
19. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., ГОТЛИНСКАЯ А.П., ЛЕЩЕНКО В.О., НЕЧИПОРЕНКО Д.И., Че-

рнышов И.С. Процессы и аппараты химической технологии : учебник : в 2 ч. Ч. 2 / под ред. Л.Л. Тобажнянского. Харьков : НТУ "ХПИ", 2005. 532 с.

20. Brohström A. Mathematical model for simulating the sulphonation of dodecylbenzene with gaseous sulfur trioxide in an industrial reactor of votater type. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 1975. Vol. 53, No. 1. P. 29–43.

21. Земенков Д.И., Правдин В.Г., Литвиненко И.И. Исследование межфазного обмена при сульфатировании высших жирных спиртов серным ангидридом. *Химическая технология.* 1979. № 5. С. 14–15.

22. Подустов М.О., Тошинський В.І., Жученко О.А., Петров В.М. Масопередача в системі газ–рідина при сульфатуванні органічної речовини. *Наукові вісті НТУУ "КПІ".* 2008. № 1. С. 128–131.

23. Dabir B. Riazi M. R., Davoudirad H. R. Modelling of Falling Film Reactors. *Chem. Engng. Sci.* 1996. No. 51. P. 2553–2558.

24. Дзевочко О.М., Подустов М.О. Дослідження процесу сульфатування органічних речовин газоподібним триоксидом сірки. *Інтегровані технології та енергозбереження.* 2018. № 2. С. 50–55.

25. Torres J.A., Díaz L., Sánchez F.J. Falling film reactor for methyl ester sulphonation with gaseous sulphur trioxide. *Ing. Investig.* 2009. Vol.29. No. 3. P. 48–53.

26. Federico I. Talens-Alesson. The modelling of falling film chemical reactors. *Chem. Engng. Sci.* 1999. Vol. 54. P. 1871–1881.

27. Torres J.A., Sulfonation/Sulfation Processing Technology for Anionic Surfactant Manufacture. *Advances in Chemical Engineering.* 2012. P. 269–294.

28. Roberts D.W. Optimization of linear alkyl benzene sulfonation process for surfactant manufacture. *Org. Process Res. Dev.* 2003. Vol. 7, P. 172–184.

29. Talens F.L. The modeling of falling film chemical reactor. *Chem. Eng. Sci.* 1999. Vol. 54, No. 12. PP. 1871–1881.

30. Akanksha P., Pant K.K., Srivastava V.K. Modelling of sulphanation of tridecylbenzene in a falling film reactor. *Math. Comp. Model.* 2007. Vol. 46, No. 9–10. P. 1332–1344.

31. Ortega Y.T. Sulfonation/Sulfation processing technology for anionic surfactant manufacture. *Advances in Chemical Engineering.* 2011. Vol. 11. P. 269–294.

Bibliography (transliterated)

1. Heverdyayev O.N., Belov P.S., Shkitov A.M. *Osnovy tekhnologii poverhnostno-aktivnyh veshchestv i sinteticheskikh moyushchih sredstv.* Moskva : MGOU, 2001. 201 p.

2. Nikolaev P.V., Kozlov N.A., Petrova S.N. *Osnovy himii i tekhnologii proizvodstva sinteticheskikh moyushchih sredstv.* Ivanovo : Ivan. gos. him. tekhn. nauk. u-t, 2007. 116 p.

3. Ignatovich E. *Himicheskaya tekhnika. Processy i apparaty.* Per. s nem. Moskva : Tekhnosfera, 2007. CH. 1. 141 p.

4. Kasatkin A.G. *Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologi : ucheb. dlya VUZov.* 10-e izd. stereotip., dorabot. Moskva : OOO TID "Al'yans", 2004. 753 p.

5. Dzevochko A.I. *Pidvyshchennia efektyvnosti protsesu sulfatuvannia v trubchastomu plivkovomu reaktori u vyrobnytstvi poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.17.08.* Kharkiv, 2021. 22 p.

6. Ajsnshtejn V.G., Zaharov M.K., Nosov G.A. *Obshchij kurs processov i apparatov himicheskoy tekhnologii.* Moskva : Vysshaya shkola, 2002. 912 p.

7. Borisov G.S., Brykov V.P., Dytnerskij YU.I. *Osnovnye processy i apparaty*

himicheskoy tekhnologii. Moskva : Al'yans, 2008. 496 p.

8. Buchynskiy A.K., Kovalenko V.S. Osnovy tekhnologii ta tekhniki absorbttsiinykh protsesiv : navch. posib. Dnepropetrovsk : UDKhTU, 2004. 155 p.

9. Romankov P.G., Frolov V.F. Massoobmennyye processy himicheskoy tekhnologii. Moskva : Himiya, 1990. 384 p.

10. Baranov D.A., Blinichev V.N., Vyazkin A.V. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii. CHast' 2. Moskva : Logos, 2001. 600 p.

11. Dytnerskiy YU.I. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii. Moskva : Himiya, 1995. 768 p.

12. Dzevochko A. I., Podustov M.O., Panasenko V.O. Rozrobka matematychnoi modeli protsesu sulfatuvannia v plivkovomu reaktori. Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia. Kharkiv. 2017. № 1. P. 25–33.

13. Tovazhnyanskyy L.L., Gotlinskaya A.P., Leshchenko V.O., Nechiporenko D.I., CHernyshov I.S. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii : uchebnik v 2 ch. CH. 1 / pod red. L.L. Tovazhnyans'kogo. Har'kov : NTU "HPI", 2004. 632 p.

14. Kasatkin A.G. Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii. Moskva : Al'yans, 2014. 753 p.

15. Sokolov V.N., Domanskiy I.V. Gazozhidkostnye reaktory. Leningrad : Mashinostroenie, 1976. 215 p.

16. Tananajko Yu.M., Voroncov E.G. Metody rascheta i issledovaniya plenochnykh processov. Kiev : Tekhnika, 1975. 312 p.

17. Johnson G.R., Grynes B.L. Modeling of a thin-film sulfur trioxide sulfonation reactor. Ind. Eng. Chem. Process. 1974. Vol. 13, No. 1. P. 6–35.

18. Gutierrez G.Y., Mans T.C. Improved mathematical model for a falling film sulfonation reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 1988. Vol. 27, No. 9. P. 1701–1707.

19. Tovazhnyanskyy L.L., Gotlinskaya A.P., Leshchenko V.O., Nechiporenko D.I., CHernyshov I.S. Processy i apparaty himicheskoy tekhnologii : uchebnik : v 2 ch. CH. 2 / pod red. L.L. Tovazhnyans'kogo. Harkov : NTU "HPI", 2005. 532 p.

20. Brohström A. Mathematical model for simulating the sulphonation of dodecylbensone with gaseous sulfur trioxide in an industrial reactor of votater type. Trans. Just. Chem. Eng. 1975. Vol. 53, No. 1. P. 29–43.

21. Zemenkov D.I., Pravdin V.G., Litvinenko I.I. Issledovanie mezhfaznogo obmena pri sulfatirovanii vysshih zhirnykh spirtov sernym angidridom. Himicheskaya tekhnologiya. 1979. № 5. P. 14–15.

22. Podustov M.O., Toshynskiy V.I., Zhuchenko O.A., Petrov V.M. Masoperedacha v systemi haz-ridyna pry sulfatuvanni orhanichnoi rehovyny. Naukovi visti NTUU KPI. 2008. № 1. P. 128–131.

23. Dabir B. Riazi M. R., Davoudirad H. R. Modelling of Falling Film Reactors. Chem. Engng. Sci. 1996. No. 51. P. 2553–2558.

24. Dzevochko O.M., Podustov M.O. Doslidzhennia protsesu sulfatuvannia orhanichnykh rehovyn hazopodibnym tryoksydom sirky. Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia. 2018. № 2. P. 50–55.

25. Torres J.A., Díaz L., Sánchez F.J. Falling film reactor for methyl ester sulfonation with gaseous sulphur trioxide. Ing. Investig. 2009. Vol.29. No. 3. P. 48–53.

26. Federico I. Talens-Alesson. The modelling of falling film chemical reactors. Chem. Engng. Sci. 1999. Vol. 54. P. 1871–1881.

27. Torres J. A., Sulfonation/Sulfation Processing Technology for Anionic Surfactant Manufacture. Advances in Chemical Engineering. 2012. P. 269–294.

28. Roberts D.W. Optimization of linear alkyl benzene sulfonation process for surfactant manufacture. *Org. Process Res. Dev.* 2003. Vol. 7, P. 172–184.

29. Talens F.L. The modeling of falling film chemical reactor. *Chem. Eng. Sci.* 1999. Vol. 54, No. 12. PP. 1871–1881.

30. Akanksha P., Pant K.K., Srivastava V.K. Modelling of sulphation of tridecylbenzene in a falling film reactor. *Math. Comp. Model.* 2007. Vol. 46, No. 9–10. P. 1332–1344.

31. Ortega Y.T. Sulfonation/Sulfation processing technology for anionic surfactant manufacture. *Advances in Chemical Engineering.* 2011. Vol. 11. P. 269–294.

УДК 661.185 : 66.02

Дзевочко О.М., к. техн. наук, доцент, Подустов М.О., д. техн. наук, професор,
Дзевочко А.І., к. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОРІДИННИХ ПЛІВКОВИХ АБСОРБЕРАХ У ТЕХНОЛОГІЇ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

У статті наведено, що поверхнево-активні речовини (ПАР) мають асиметрично побудовану молекулу, яка містить гідрофільну та гідрофобну групи. Основним відділенням виробництва ПАР є процес сульфатування органічної речовини газоподібним триоксидом сірки.

Показано, що процес сульфатування в газорідинних плівкових абсорберах складається з таких стадій: процес масообміну триоксиду сірки з газоповітряного потоку до рідинної фази; процес абсорбції триоксиду сірки органічною речовиною з проходженням екзотермічної хімічної реакції; процес теплообміну між рідинною фазою та газоповітряним потоком; процес теплообміну між рідинною фазою та потоком охолоджувальної води.

Дослідження теплових і масообмінних процесів на цих стадіях дають можливість обрати необхідні рівняння для розрахунку коефіцієнтів теплопередачі, коефіцієнтів тепловіддачі та коефіцієнта масопередачі.

Розрахунок коефіцієнта теплопередачі від рідини до газу рекомендовано проводити за рівнянням коли дифузійні і теплові числа Прандтля близькі до одиниці. Використання класичного рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від рідинної фази до стінки реакційної труби не дали необхідного результату. Тому було використано рівняння, яке враховує властивості газорідинного потоку в цілому. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від стінки реакційної труби до охолоджувального потоку води рекомендовано проводити за класичним рівнянням критерію Нуссельта.

Наведено дані обробки експериментальних даних по розрахунку густини та динамічної в'язкості реакційної маси за довжиною реактора.

Рівняння для розрахунку коефіцієнта масопередачі було отримано аналізом 6-ти рівнянь різних авторів, які займалися процесом сульфатування органічних речовин. Для проведення аналізу було розроблено математичний опис процесу сульфатування в плівковому абсорбері. При розробці математичного опису були складені балансові рівняння масо- і теплообміну для реакційної труби. За результатами математичного моделювання було обрано рівняння, яке включає дотичне напруження на поверхні розділу газ-рідина.

Результати математичного моделювання були зіставлені з експериментальними даними Гутьєрреса та результатами математичного моделювання Дабіра. Отримані результати будуть використані при математичному моделюванні процесу сульфатування в плівковому абсорбері.

Ключові слова: поверхнево-активна речовина, плівковий абсорбер, масообмін, теплообмін.

Дзевочко А.М., к. техн. наук, доцент, Подустов М.А., д. техн. наук, професор,
Дзевочко А.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ АБСОРБЕРАХ В ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

В статье представлено, что поверхностно-активные вещества (ПАВ) имеют асимметрично построенную молекулу, которая содержит гидрофильную и гидрофобную группы. Основным отделением производства ПАВ является процесс сульфатирования органического вещества газообразным триоксидом серы.

Показано, что процесс сульфатирования в газожидкостных пленочных абсорберах состоит из следующих стадий: процесс массообмена триоксида серы с газовоздушного потока к жидкой фазе; процесс абсорбции триоксида серы органическим веществом с прохождением экзотермической химической реакции; процесс теплообмена между жидкостной фазой и газовоздушным потоком; процесс теплообмена между жидкостной фазой и потоком охлаждающей воды.

Исследование тепловых и массообменных процессов на этих стадиях дают возможность выбрать необходимые уравнения для расчета коэффициентов теплопередачи, коэффициентов теплоотдачи и коэффициента массопередачи.

Расчет коэффициента теплопередачи от жидкости к газу рекомендуется проводить по уравнению, когда диффузные и тепловые числа Прандтля близки к единице. Использование классического уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи от жидкой фазы к стенке реакционной трубы не дали необходимого результата. Поэтому было использовано уравнение, которое учитывает свойства газожидкостного потока в целом. Расчет коэффициента теплоотдачи от стенки реакционной трубы к охлаждающему потоку воды рекомендуется проводить по классическому уравнению критерия Нуссельта.

Приведены данные обработки экспериментальных данных по расчету плотности и динамической вязкости реакционной массы по длине реактора.

Уравнения для расчета коэффициента массопередачи было получено анализом 6-ти уравнений различных авторов, занимавшихся процессом сульфатирования органических веществ. Для проведения анализа было разработано математическое описание процесса сульфатирования в пленочном абсорбере. При разработке математического описания были составлены балансовые уравнения массо- и теплообмена для реакционной трубы. По результатам математического моделирования было выбрано уравнение, которое включает касательное напряжение на поверхности раздела газ-жидкость.

Результаты математического моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными Гутьєрреса и результатами математического моделирования Дабіра. Полученные результаты будут использованы при математическом моделировании процесса сульфатирования в пленочном абсорбере.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, пленочный абсорбер, массообмен, теплообмен.

Dzevochko O., Podustov M., Dzevochko A.

RESEARCH OF THERMAL AND MASS-EXCHANGE PROCESSES IN GAS-LIQUID FILM ABSORBERS IN SURFACE-ACTIVE TECHNOLOGY

The article states that surfactants have an asymmetrically constructed molecule that contains hydrophilic and hydrophobic groups. The main department of surfactant production is the process of sulfation of organic matter with gaseous sulfur trioxide.

It is shown that the process of sulfation in gas-liquid film absorbers consists of the following stages: the process of mass transfer of sulfur trioxide from the gas stream to the liquid phase; the process of absorption of sulfur trioxide by organic matter with the passage of an exothermic chemical reaction; the process of heat exchange between the liquid phase and the gas stream; the process of heat exchange between the liquid phase and the flow of cooling water.

Studies of heat and mass transfer processes at these stages make it possible to select the necessary equations for the calculation of heat transfer coefficients, heat transfer coefficients and mass transfer coefficient.

It is recommended to calculate the heat transfer coefficient from liquid to gas by the equation when the diffusion and thermal Prandtl numbers are close to unity. The use of the classical equation to calculate the heat transfer coefficient from the liquid phase to the wall of the reaction tube did not give the desired result. Therefore, an equation was used that takes into account the properties of the gas-liquid flow as a whole. It is recommended to calculate the heat transfer coefficient from the reaction pipe wall to the cooling water flow according to the classical Nusselt equation.

Experimental data processing data for calculating the density and dynamic viscosity of the reaction mass along the length of the reactor are presented.

The equation for calculating the mass transfer coefficient was obtained by analyzing 6 equations of different authors who were engaged in the process of sulfation of organic substances. A mathematical description of the sulfation process in a film absorber was developed for analysis. During the development of the mathematical description, the balance equations of mass and heat transfer for the reaction tube were compiled. Based on the results of mathematical modeling, an equation was chosen that includes the tangential stress at the gas-liquid interface.

The results of mathematical modeling were compared with Gutierrez's experimental data and the results of Dabir's mathematical modeling. The obtained results will be used in mathematical modeling of the sulfation process in a film absorber.

Keywords: surfactant, film absorber, mass transfer, heat transfer.

Алексахін О.О.¹, к.т.н., доцент, Єна С.В.², ст. викладач, Гордієнко О.П.², ст. викладач,
Новіков В.В.¹, студент, Цемох Д.О.¹, студент.

¹ Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків

ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ВИКОНАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ ТЕПЛОВОЇ МЕРЕЖІ МІКРОРАЙОНУ

Ключові слова: централізоване теплопостачання, системи опалення мікрорайону, розподільні теплові мережі, втрати теплоти трубопроводами, закон зміни витрат теплоносія по довжині теплопроводу, енергозбереження.

Важливим резервом підвищення ефективності централізованого теплопостачання є зниження втрат теплоти в теплових мережах, які згідно з нормативними матеріалами можуть становити до 13 % від відпущеної до мереж теплоти [1]. Досягається зменшення теплових втрат застосуванням сучасних ізоляційних матеріалів і технологій при спорудженні і реконструкції теплових мереж, оптимізацією проектних рішень з трасування мереж, дотриманням умов експлуатації теплопроводів [2,3]. За роки становлення і розвитку централізованого теплопостачання інженерна інфраструктура мікрорайону стала одним з підрозділів складної, розгалуженої системи. При розробці проектів теплових мереж житлової групи необхідно враховувати велику кількість факторів: геологічні і містобудівні умови, показники забудови, наявність і можливості джерел теплової енергії і магістральних мереж від них тощо.

Важливими показниками при виборі варіанта виконання мікрорайонної теплової мережі є характеристики гідравлічного і теплового режимів [4,5]. Величина витрат теплоносія на ділянці теплової мережі обумовлює повну теплоємність потоку речовини, його теплоакумулюючу здатність й інтенсивність охолодження теплоносія. Чим більше витрати теплоносія на ділянці, тим менше його охолодження і вище температура, а отже більше втрати теплопередачею до оточуючого середовища. Проектуючи мережу відповідним чином, можна формувати закон розподілу витрат теплоносія по довжині трубопроводу і впливати на теплові втрати. У роботі [6] на прикладах систем теплопостачання ідеалізованих груп будівель проаналізовано вплив закону зміни витрат теплоносія по довжині теплопроводу на втрати теплоти у мережі.

Метою роботи є оцінка впливу розподілу витрат мережної води по довжині трубопроводу розгалуженої теплової мережі на втрати теплоти теплопроводами системи опалення житлового мікрорайону.

Сформульовані підходи проілюстровано на прикладі опалювальної мережі 522-1 мікрорайону Салтівського житлового масиву у м. Харкові. Система розподільних теплопроводів має дві основні гілки з приблизно однаковим тепловим навантаженнями приєднаних до гілок будівель. Основні показники теплових мереж подано у табл. 1. Розрахункова схема теплопроводів фрагменту мікрорайонної мережі наведена на рис. 1.

Матеріальну характеристику трубопроводів мережі обчислено за формулою

$$M = \sum_{i=1}^n (d_i * l_i), \quad (1)$$

де d_i, l_i – діаметр і довжина розрахункових ділянок гілки; n – кількість розрахункових ділянок.

Таблиця1 – Характеристики системи опалення 522-1 мікрорайону

Показник	гілка (0-1-21)	гілка (0-19-33)	мікрорайон в цілому
Максимальні витрати теплоти для опалення, МВт	9,9	8,1	18,0
Довжина теплопроводів основного напрямку, м	608	521	1129
Довжина теплопроводів відгалужень, м	627	386	1013
матеріальна характеристика трубопроводів, м ²			
- основного напрямку	99,4	104	203,4
- відгалужень	82,5	99,7	182,2

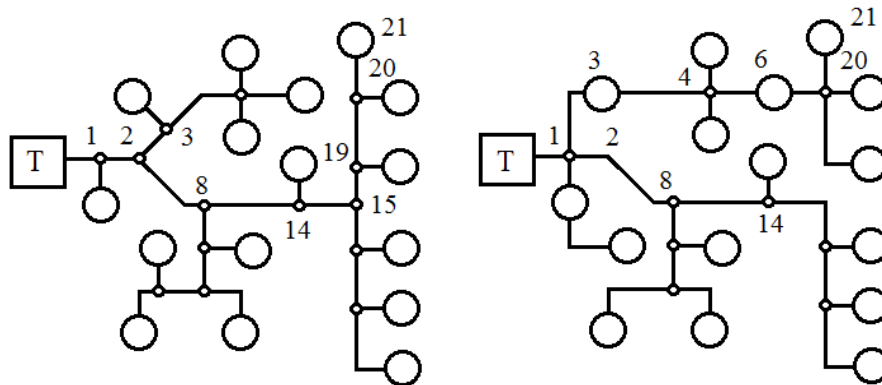


Рисунок 1 – Схема теплових мереж фрагменту 522-1 мікрорайону

T – центральний тепловий пункт; 1...21 – розрахункові точки ділянок мережі, а – проектний («базовий») варіант виконання мережі; б – запропонований варіант реконструкції

Значення діаметрів і довжин ділянок прийнято за проектними даними. Прокладку теплопроводів здійснено переважно у непрохідних каналах. За проектними тепловими навантаженнями приєднаних до теплових мереж будівель визначено витрати мережної води на розрахункових ділянках теплопроводів. Розподіл витрат мережної води вздовж теплопроводу має ступінчастий характер з незмінними значеннями у межах окремих ділянок (рис. 2). Апроксимація реальної зміни витрат теплоносія для головної гілки (0-1-21) наведеного на рис.1 фрагменту мережі має вигляд

$$\bar{G}(\bar{x}) = 1 - 0,94 \bar{x}^{-1,13}, \quad (2)$$

де $\bar{G}(\bar{x}) = G(\bar{x})/G_{\max}$ – локальні відносні витрати теплоносія на гілці; G_{\max} – витрати теплоносія на вході до гілки; $\bar{x} = x/L$ – відносна координата.

Для гілки (0-19-33) мережі апроксимація реального розподілу витрат по довжині головної гілки має вигляд

$$\bar{G}(\bar{x}) = 1 - 0,96 \bar{x}^{-0,92}. \quad (3)$$

Значення показника ступеня у рівнянні, що описує розподіл витрат мережної води, більше одиниці обумовлює незначне зменшення величини витрат на вхідних ділянках гілки і різке зниження витрат на кінцевих ділянках. При значеннях показника ступеню менше одиниці спостерігається більш суттєве зниження витрат теплоносія на ближніх до входу до гілки мережі ділянках з поступовим зменшенням витрат до мінімальної на гілці величини G_{\min} . У першому випадку слід очікувати більш помітний вплив заходів з реконструкції мережі на втрати теплоти трубопроводами. Тому для подальшого розгляду прийнято гілку (0-1-21), для якої показник ступеня у рівнянні закону зміни витрат $n > 1$.

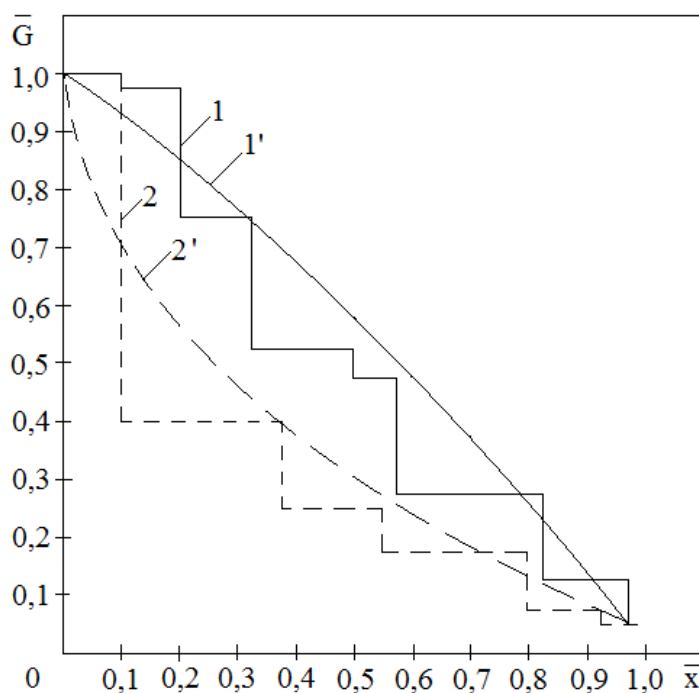


Рисунок 2 – Розподіл витрат мережної води по довжині головної гілки (0-1-21) опалювальної мережі мікрорайону

1, 2 – фактичний розподіл відносних витрат мережної води для вихідного («базового») і запропонованого варіантів виконання мережі відповідно; 1', 2' – апроксимація закону розподілу відносних витрат мережної води для вихідного і запропонованого варіантів відповідно

Втрати теплоти трубопроводами опалювальної мережі обчислено з використанням викладеної у роботах [7,8] методики. Питомі теплові втрати через теплову ізоляцію

трубопроводів прийнято на рівні нормативних значень [9]. Втрати теплоти конструктивними елементами мереж враховано коефіцієнтом $k = 1,15$ [8]. Температуру ґрунту на глибині вісі теплопроводу прийнято рівною $5\text{ }^\circ\text{C}$ [10]. Температуру води у подавальному трубопроводі на виході з ЦТП до мікрорайонної мережі прийнято $105\text{ }^\circ\text{C}$, на виході з системи опалення будівель $70\text{ }^\circ\text{C}$. Порівняння варіантів виконання гілки (0-1-21) опалювальної мережі мікрорайону подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Показники варіантів виконання теплових мереж гілки опалювальної мережі мікрорайону

Параметр	Варіант	
	«базовий»	після реконструкції
Опалювальне навантаження, МВт	9,9	9,9
Середній діаметр трубопроводу головної гілки, м	0,164	0,136
Матеріальна характеристика трубопроводів головної гілки, м^2	99,4	74,4
Зміна* матеріальної характеристики трубопроводів головної гілки, %	0	-25%
Матеріальна характеристика трубопроводів відгалужень, м^2	82,5	95,02
Зміна* матеріальної характеристики трубопроводів відгалужень, %	0	+15%
Зміна* матеріальної характеристики мережі в цілому, %	0	-6,9%
Співвідношення матеріальних характеристик трубопроводів відгалужень і головної гілки	0,83	1,28
Відносні мінімальні витрати мережної води на головній гілці G_{\min}	0,06	0,06
Відносні середні витрати мережної води на головній гілці, $G_{cp}/G_{від}$	0,574	0,34
Втрати теплоти трубопроводами мережі, кВт	224,55	212,1
Зміна* теплових втрат, %	0	-5,5

Примітка: * – «+» – збільшення, «-» – зменшення.

Середній діаметр трубопроводу і середні витрати мережної води обчислено за формулами (4) і (5) відповідно

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i * l_i)}{\sum_{i=1}^n l_i}, \quad (4)$$

$$\bar{G}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{G}_i * l_i)}{\sum_{i=1}^n l_i}. \quad (5)$$

Виконання теплової мережі за запропонованим варіантом (рис.1,б) забезпечує перехід на новий закон розподілу витрат мережної води по довжині головної гілки (рис. 2), який можна апроксимувати формулою

$$\bar{G}(\bar{x}) = 1 - 0,94x^{-0,5}. \quad (6)$$

Показник ступеня у рівнянні витрат теплоносія для нового варіанта менше, ніж для «базового», що дозволяє очікувати зменшення витрат води а, отже і діаметрів трубопроводів ділянок головної гілки. Зменшення середнього діаметру теплопроводів і довжини головної гілки забезпечило для нового варіанта зменшення матеріальної характеристики трубопроводів головної гілки приблизно на 25 %. Незважаючи на зростання матеріалоемності відгалужень (приблизно на 15 %) запропоновані заходи забезпечують зменшення матеріальної характеристики гілки в цілому на 6,9 %. У підсумку можливе зменшення загальних витрат теплоти трубопроводами опалювальної мережі становить приблизно 5,5 %. Реалізація зменшення показника ступеня у рівнянні для закону витрат досягається збільшенням витрат мережної води через відгалуження на найближчих до центрального теплового пункту ділянках гілки.

При формуванні схеми теплових мереж, наведеної на рис. 1,б не враховувалися такі фактори [11], як геологічні умови, наявність існуючої мережі інших інженерних комунікацій і елементів благоустрою території мікрорайону у зоні прокладки «нових» ділянок теплопроводів тощо. При техніко-економічному обґрунтуванні варіантів реконструкції мікрорайонної розподільної теплової мережі слід враховувати не тільки вартість робіт з улаштування опалювальної мережі, але і трубопроводів централізованого гарячого водопостачання [12].

Висновки

1. При виборі схеми виконання розподільної мережі системи опалення групи будівель перевагу слід надавати варіанту з меншим значенням показника ступеня у рівнянні зміни витрат теплоносія по довжині головної гілки мережі. В умовах розгалужених теплових мереж це досягається приєднанням якомога більшої кількості будівель до найближчих до центрального теплового пункту ділянок теплової мережі.

2. Збільшення витрат мережної води через відгалуження на початкових ділянках гілки забезпечує зменшення теплових витрат трубопроводами мережі. Для розглянутого фрагменту житлового мікрорайону зменшення витрат теплоти при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря становить 5,5 %.

Література

1. Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарські потреби в Україні // Керівний технічний матеріал 204 України, 244-94. – 1995. – 636 с.
2. Е.П. Шубин Основные вопросы проектирования систем теплоснабжения городов / Шубин Е.П. – М.: Энергия, 1979. – 360 с.
3. А.В. Дмитриев Городские инженерные сети / Дмитриев А.В., Кетаев А.Б. – М.: Стройиздат, 1988. – 176 с.

4. Н.М. Зингер Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Зингер Н.М. – М.: Энергоиздат, 1986. – 320 с.
5. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. Справ. пособие / Под ред. Л.Д. Богуславского – М.: Стройиздат, 1990. – 624 с.
6. О.О. Алексахін Теплові режими опалювальної мережі при утепленні будівель / Алексахін О.О., Бобловський О.В., Жарий К.О., Сидоренко Ж.В., Скорик М.С. – «Комунальне господарство міст», Наук.-технічний збірник, Харків. – 2020. – вип.154, – с. 159–164.
7. А.А. Алексахин Теплотери трубопроводами отопительной сети при изменении расчетной отопительной загрузки зданий микрорайона / Алексахин А.А., Бобловский А.В. – «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит», – 2011. – №9.
8. Теплова ізоляція будівель.: ДБН В.2.6-31:2016. – К.:Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2016. – 31 с.
9. Проектирование тепловых сетей. Справочник проектировщика / Под ред. А.А. Николаева – М.: Стройиздат, 1965. – 359 с.
10. Будівельна кліматологія: ДСТУ – НБВ.1.1-27:2010. – К.: Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2011. – 123 с.
11. М.В. Губіна Формування житлової забудови в містах. Навч. посібник / Губіна М.В. – К.: ІСДО, 1994. – 136 с.
12. Н.Н. Чистяков Повышение эффективности работы систем горячего водоснабжения / Чистяков Н.Н., Грузинский М.М., Ливчак В.И. и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 314 с.

Bibliography (transliterated)

1. Normy ta vказivky po normuvanniu vytrat palyva ta teplovoi enerhii na opalennia zhytlovykh ta hromadskykh sporud, a takozh na hospodarski potreby v Ukraini // Kerivnyi tekhnichniy material 204 Ukrainy, 244-94. – 1995. – 636 p.
2. E.P. Shubin Osnovnyie voprosyi proektirovaniya sistem teplosnabzheniya gorodov / Shubin E.P. – М.: Energiya, 1979. – 360 p.
3. A.V. Dmitriev Gorodskie inzhenernyie seti / Dmitriev A.V., Ketaev A.B. – М.: Stroyizdat, 1988. – 176 p.
4. N.M. Zinger Gidravlicheskie i teplovyie rezhimy teplofikatsionnykh sistem / Zinger N.M. – М.: Energoizdat, 1986. – 320 p.
5. Energoberezhenie v sistemah teplosnabzheniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozduha. Sprav. posobie / Pod red. L.D. Boguslavskogo. – М.: Stroyizdat, 1990. – 624 p.
6. О.О. Aleksakhin Teplovi rezhimi opalyuvalnoyi merezhi pri uteplenii budivel / Aleksakhin O.O., Boblovskiy O.V., Zhariy K.O., Sidorenko Zh.V., Skoryik M.S. – «Komunalne gospodarstvo mist», Nauk.-tehnichnyi zbirnyk, Harkiv. – 2020. – vyip.154, – s.159-164.
7. A.A. Aleksahin Teplopoteri truboprovodami otopitelnoy seti pri izmenenii raschetnoy otopitelnoy zagruzki zdaniy mikrorayona / Aleksahin A.A., Boblovskiy A.V. – «Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit», – 2011. – №9.
8. Teplova izoliatsiia budivel.: DBN V.2.6-31:2016. – К.:Minrehionbud ta ZhKH Ukrainy, 2016. – 31 s.
9. Proektirovanie teplovykh setei. Spravochnik proektirovshchika / Pod red. A.A. Nikolaeva – М.: Stroiizdat, 1965. – 359 p.

10. Budivelna klimatologiya: DSTU –NBV.1.1-27:2010. – К.: Minregionbud ta ZhKG Ukrainy, 2011. – 123 p.
11. M.V. Gubina Formuvannya zhitlovoYi zabudovi v mistah. Navch. posibnik / Gubina M.V. – К.: ISDO, 1994. – 136 p.
12. N.N. Chistyakov Povyishenie effektivnosti raboty sistem goryachego vodosnabzheniya / Chistyakov N.N., Grudzinskiy M.M., Livchak V.I. i dr. – М.: Stroyizdat, 1988. – 314 p.

УДК 658.264

Алексахін О.О., Єна С.В., Гордієнко О.П., Новіков В.В., Цемох Д.О.

ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ВИКОНАННЯ РОЗПОДІЛЬНОЇ ТЕПЛОВОЇ МЕРЕЖІ МІКРОРАЙОНУ

На прикладі житлового мікрорайону м. Харкова проведено порівняння втрат теплоти трубопроводами розгалуженої мікрорайонної системи опалення для двох варіантів виконання розподільної мережі. Запропонований варіант конфігурації теплопроводів відрізняється від існуючого («базового») законом зміни витрат теплоносія по довжині теплопроводу, для якого характерний підвищений рівень витрат мережної води через відгалуження на початкових ділянках гілки. Фактичний розподіл витрат теплоносія апроксимований ступеневим законом. Відмінність законів зміни витрат враховано величиною показника ступеня. Обчислення теплових втрат проведено для умов підземної прокладки трубопроводів у непрохідних каналах. Температуру мережної води прийнято відповідно до розрахункової для опалення температури зовнішнього повітря за температурним графіком теплової мережі. Питомі втрати теплоти трубопроводами на ділянках мережі прийнято на рівні нормативних значень для вказаного способу прокладки. Температуру ґрунту на глибині вісі теплопроводу прийнято рівною 5 °С. Втрати теплоти конструктивними елементами мереж враховано коефіцієнтом 1,15. Обчислення проведено з урахуванням зміни витрат і температури мережної води на розрахункових ділянках. Витрати мережної води на ділянках мережі визначено за проектними тепловими навантаженнями приєднаних будівель.

Показано, що при виборі конфігурації розподільної мережі системи опалення групи будівель перевагу слід надавати варіанту з меншим значенням показника ступеня у рівнянні зміни витрат теплоносія по довжині головної гілки мережі. В умовах розгалужених теплових мереж це досягається приєднанням якомога більшої кількості будівель до найближчих до центрального теплового пункту ділянок розподільної теплової мережі. Збільшення витрат мережної води через відгалуження на початкових ділянках гілки забезпечує зменшення теплових втрат трубопроводами мережі. Для розглянутого фрагменту житлового мікрорайону зменшення втрат теплоти при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря становить приблизно 5,5 %.

Ключові слова: централізоване тепlopостачання, системи опалення мікрорайону, розподільні теплові мережі, втрати теплоти трубопроводами, закон зміни витрат теплоносія по довжині теплопроводу, енергозбереження.

Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П., Новиков В.В., Цемох Д.О.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ МИКРОРАЙОНА

На примере жилого микрорайона г. Харькова выполнено сравнение потерь теплоты трубопроводами разветвленной микрорайонной системы отопления для двух вариантов исполнения распределительной сети. Предлагаемый вариант конфигурации тепловой сети отличается от существующего («базового») законом изменения расхода теплоносителя по длине теплопровода, для которого характерен повышенный уровень расхода сетевой воды через ответвления на начальных участках ветви. Фактическое распределение расхода аппроксимировано ступенчатым законом. Отличие законов изменения расхода учтено величиной показателя степени. Расчет тепловых потерь проведен для условий подземной прокладки трубопроводов в непроходных каналах. Температура сетевой воды принята соответствующей расчетной для отопления температуре наружного воздуха по температурному графику тепловой сети. Удельные потери теплоты трубопроводами на участках сети приняты на уровне нормативных значений для указанного способа прокладки. Температура грунта на глубине заложения оси теплопровода принята равной 5 °С. Потери теплоты конструктивными элементами сети учтены коэффициентом 1,15. Вычисления выполнены с учетом изменения расхода и температуры сетевой воды на расчетных участках. Расход воды на участках найден по проектным тепловым нагрузкам присоединенных зданий.

Показано, что при выборе конфигурации распределительной сети системы отопления группы зданий преимущество следует отдавать варианту с меньшим значением показателя степени в уравнении изменения расхода теплоносителя по длине главной ветви сети. В условиях разветвленных тепловых сетей этого можно добиться присоединением как можно большего числа зданий к ближайшим к центральному тепловому пункту участкам тепловой сети. Увеличение расхода сетевой воды через ответвления на начальных участках ветви обеспечивает уменьшение тепловых потерь трубопроводами сети. Для рассмотренного фрагмента жилого микрорайона уменьшение потерь теплоты при расчетной для отопления температуре наружного воздуха составляет 5,5 %.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, системы отопления микрорайона, распределительные тепловые сети, потери теплоты трубопроводами, закон изменения расхода теплоносителя по длине теплопровода, энергосбережение.

Aleksakhin O.O., Yena S.V., Hordiienko O.P., Novikov V.V., Tsemokh D.O.

COMPARISON OF OPTIONS FOR THE HEAT DISTRIBUTION NETWORK OF THE RESIDENTIAL NEIGHBORHOOD

The comparison of heat losses by pipelines of an extensive residential neighborhood heating system for two options of the distribution network was carried out for a residential neighborhood in Kharkov. The proposed configuration of the heating network differs from the existing ("basic") one in using of the law of heating medium flow rate variation along the heat

pipe length. This law takes into account increased flow rate of heating water through branches at the initial sections of the pipeline. The actual flow rate distribution is approximated by a step function. The difference in the laws of flow rate variation is taken into account by the exponent value. The calculation of heat losses was carried out for underground pipelining in non-accessible tunnels. The temperature of heat line water is taken to be the corresponding to the design outdoor air temperature for heating according to the temperature schedule of the heating network. Specific heat losses by pipelines in heat network sections are considered to be at the standard level for non-accessible tunnels. The soil temperature at the depth of the heat pipe axis is taken equal to 5°C. Heat losses by the structural elements of the heat network are taken into account by a factor of 1.15. The variation of the flow rate and temperature of network water in rated pipeline sections is considered in the analysis. The water flow rate at the sections was found based on the design thermal loads of connected buildings.

It is shown that when choosing the configuration of the distribution network of the heating system of a group of buildings, preference should be given to the option with a lower value of the exponent in the equation for heating medium flow rate variation along the length of the main line of the network. For extensive heating networks, this can be achieved by connecting as many buildings as possible to the heating network sections close to a heat supply station. An increase in the network water flow rate through the branches at the initial sections of the pipeline ensures a decrease in heat losses by the network pipelines. For the considered part of a residential neighborhood, the decrease in heat loss at the design outdoor air temperature for heating is 5.5 %.

Keywords: centralized heat supply, heating systems of residential neighborhood, distribution heating networks, pipelines heat losses, law of heating medium flow rate variation along the heat pipe length, energy saving.

Здоренко В. Г., д.техн.н., професор, Забіяка Н.А., PhD, асистент, Себко К.В., студент,
Горбунова О.В., старший викладач

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖІ МІЦНОСТІ НА СТИСК R_p БАГАТОШАРОВИХ ПЛИТ ВИКОНАНИХ З ШЛАКОСИТАЛІВ

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського», Київ*

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: шлакоситали, будівельні конструкції, межа міцності, диференціальний акустичний метод, п'єзокерамічний перетворювач, амплітуда акустичних імпульсів, відношення коефіцієнтів згасання, швидкість проходження акустичних імпульсів, цифровий код, імітація процесу нагрівання.

Вступ

На сьогоднішній день досить перспективними будівельними матеріалами, які по довговічності не поступаються граніту і базальту та за своїми характеристиками міцності наближаються до чавуну є шлакоситали [1, 2]. У зв'язку з цим, поєднання фізичних і механічних властивостей шлакоситалів обумовлює можливість їх широкого використання в будівництві, наприклад, для підлог промислових і цивільних будівель, декоративного та захисного облицювання зовнішніх і внутрішніх стін, перегород і цоколів. Слід зазначити, що при рівній масі міцність шлакоситалових виробів близька до міцності чавунних і сталевих. Таке поєднання властивостей дозволяє використовувати шлакоситали для захисту будівельних конструкцій і апаратури хімічної галузі [1–4]. При сучасних темпах розвитку будівництва ступінь важливості неруйнівного контролю (НК) будівельних матеріалів, виробів та елементів конструкцій має особливе значення, оскільки такий контроль є необхідним на всіх етапах, від проектування до здачі об'єкта в експлуатацію [3, 4]. Слід визначити, що зниження показників якості будівельних матеріалів, деталей і елементів конструкцій важливо вчасно виявити, найкраще на початковому етапі розвитку до можливого виникнення критичних дефектів і пошкоджень. Особливого значення набуває подальший розвиток методів і пристроїв акустичного неруйнівного контролю будівельних матеріалів, конструкцій і споруд, перевагами якого є безконтактність, простота функцій перетворення і схемних реалізацій, висока надійність, чутливість, а також можливість легкої автоматизації процесу вимірювального контролю фізико-механічних властивостей контрольованих об'єктів [3–17]. Сутність методів акустичного НК матеріалів та елементів будівельних конструкцій, полягає у взаємодії проникального пакета акустичних хвиль у зразок матеріалу, що контролюється, з подальшою реєстрацією та аналізом його змінення у порівнянні зі зразком-еталоном.

Тому виникає важлива наукова і практична проблема, яка полягає в зниженні і максимальному запобіганні можливих ризиків пов'язаних із застосуванням в будівництві неякісних матеріалів за рахунок контролю фізико-механічних параметрів виробів та елементів будівельних конструкцій багатопараметровими акустичними методами неруйнівного контролю (НК).

Таким чином, НК фізико-механічних параметрів будівельних матеріалів, виробів та елементів конструкцій, є основою для перевірки їх працездатності та довговічності. Реалізація методів НК набуває також особливе самостійне значення під час оцінювання надійності об'єктів, які є складовими частинами будівельних конструкцій і споруд, при цьому на різних ділянках виробів і конструкцій їх основні фізико-механічні характеристики можуть істотно відрізнятись [5–11]. Також в процесі вимірювального контролю необхідно враховувати зв'язок поміж температурними і механічними параметрами досліджуваних будівельних виробів і елементів конструкцій, матеріалів і арматури, такими як нерівномірність розподілу температури по довжині об'єкта (в результаті нагрівання), що, в свою чергу, призводить до неоднорідності розподілу температурної деформації в об'єкті контролю [1–3].

Як відомо, акустичні методи НК засновані на реєстрації взаємодії характеристик пружної хвилі (пакетів пружних хвиль) з об'єктом контролю. При цьому параметри пакетів пружних хвиль, наприклад, амплітуду і фазу реєструють за допомогою автоматизованих систем контролю, які в якості первинних пристроїв, застосовують п'єзокерамічні перетворювачі [3–11]. В результаті такої взаємодії змінюються інформативні характеристики п'єзокерамічного перетворювача, які пов'язані з фізико-механічними параметрами будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, а саме: v швидкість звукової поздовжньої хвилі, а також відносне збільшення коефіцієнта загасання $\Delta\eta/\eta$ (в залежності від частоти хвилі) [8, 9].

Слід зазначити, що можливості акустичного контролю механічних параметрів будівельних матеріалів, виробів та елементів конструкцій, виконаних з різних видів технічного скла і шлакоситалів на сьогоднішній день до кінця не вивчені. Не досліджені особливості роботи таких пристроїв при випробуваннях різних будівельних матеріалів і елементів конструкцій. Потребують також подальшого розвитку й вдосконалення автоматизовані багатофункціональні широкомежеві пристрої на базі п'єзоперетворювачів для визначення міцності будівельних матеріалів, виробів та елементів конструкцій. Слід зазначити, що сучасні запити будівельної галузі та науково-дослідних інститутів наполегливо вимагають вирішення зазначених вище важливих питань.

Метою роботи є дослідження диференціального методу акустичного НК межі міцності на стиск R_p та змінювання відношення коефіцієнта загасання $\Delta\eta_{23}/\eta_4$ шлакоситалових плит, що контролюються.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) навести алгоритми вимірювальних та розрахункових процедур межі міцності на стиск R_p шлакоситалових плит.
- 2) запропонувати структурну схему автоматизованої установки для реалізації диференціального акустичного методу контролю параметрів R_p та $\Delta\eta_{23}/\eta_4$ шлакоситалових плит.

Акустичний метод вимірювального контролю межі міцності на стиск R_p та змінювання відношення коефіцієнтів загасання $\Delta\eta_{23}/\eta_4$ шлакоситалових плит

При створенні сучасних систем вимірювального контролю необхідно орієнтуватися на використання спеціалізованих приладів, що, в свою чергу, вносить певні додаткові труднощі під час проектування пристроїв контролю міцності будівельних виробів і конструкцій. При цьому, автоматизація процесу акустичного контролю та реалізація диференціальних методів, дозволить здійснювати вимірювальний контроль міцності за відносно короткий проміжок часу та завдяки усередненню результатів вимірювань,

зменшувати випадкові похибки вимірювань і тим самим підвищити точність вимірювання міцності будівельних матеріалів, виробів та елементів конструкцій.

На рис. 1, надано варіант автоматизації вимірювального контролю межі міцності R_p шлакоситалових плит.

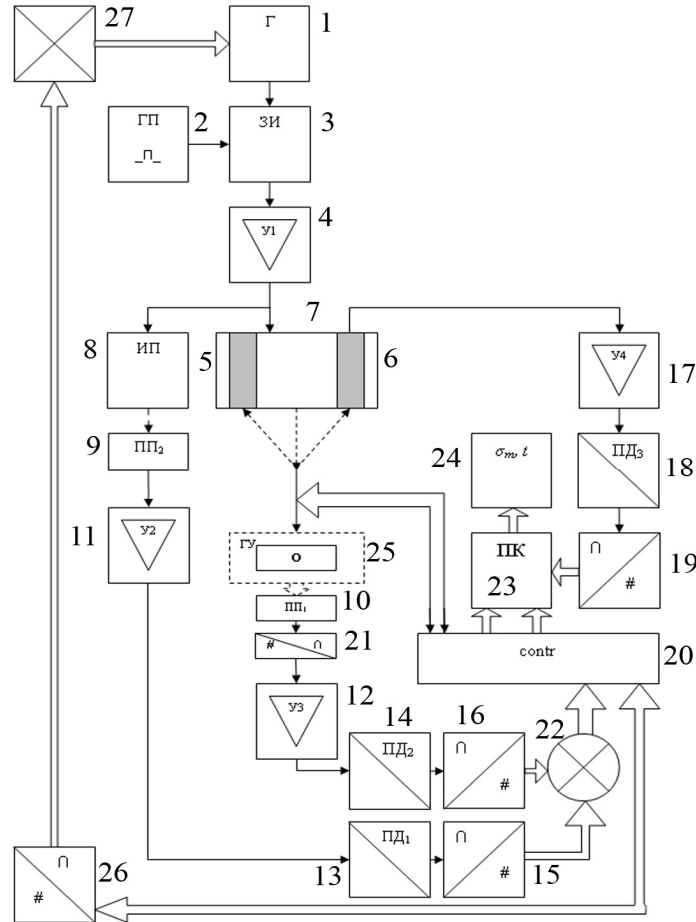


Рисунок 1 – Вимірювальний контроль фізико-механічних параметрів багатошарових шлакоситалових плит:

- 1 – генератор електричних коливань (Г); 2 – генератор прямокутних імпульсів (ГП);
- 3 – прилад створення зондуючих імпульсів (ЗІ); 4, 11, 12, 17 – підсилювачі (У1 – У4);
- 7 – п'єзокерамічний перетворювач; 5 – випромінювач; 6 – та приймач; 8 – випромінюючий п'єзоперетворювач (ВП); 9, 10 – приймаючі п'єзоперетворювачі (ПП₁, ПП₂);
- 13, 14, 18 – пікові детектори (ПД₁ – ПД₃); 15, 16, 19 – аналого-цифрові перетворювачі (АЦП);
- 20 – контролер; 21 – цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП); 22 – диференціальний пристрій (ДП); 23 – персональний комп'ютер (ПК); 24 – дисплей; О – контрольований зразок; 25 – гріюче улаштування (ГУ); 26 – ЦАП; 27 – керуючий блок (драйвер)

При цьому електричні коливання з виходу генератора 1, можуть бути описані виразом:

$$K_o = A_a \cdot \cos(w_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

де t – це час, A_a – амплітудне значення електричних коливань, w_0 – циклічна частота електричних коливань генератора Γ_1 , φ_0 – початкова фаза збуджуючих коливань.

Далі після перетворення за допомогою генератора ГП прямокутних імпульсів та пристрою 3, в зондувальні акустичні імпульси, які надходять на У1, для амплітуди акустичних коливань можна записати:

$$M_1(t) = \eta_1 \cdot S_1 \cdot U_a \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \quad (2)$$

де $M_1(t)$ – амплітуда акустичних коливань, η_1 – коефіцієнт посилення У1, S_1 – крутизна перетворення електричних коливань в зондуючі акустичні коливання.

Потім зондуючі імпульси надходять на перетворювач 7 та потрапляють на ПП₁ (п'єзоперетворювач 10), після проходження ними контрольованого зразка О.

Амплітуда коливань, які виникають після проходження акустичного сигналу через контрольований зразок, пропорційна амплітуді:

$$M_2(t) = \eta_1 \cdot S_1 \cdot U_a \cdot A_{22} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0), \quad (3)$$

де: A_{22} – коефіцієнт загасання для зондуючих коливань у відповідності з формулою (2).

Далі після посилення пристроєм У3, амплітуда електричних коливань проходить через детектор 14 і надходить на АЦП 16, за допомогою якого далі перетворюється в цифровий код η_1 .

Зондуючі імпульси, після їх посилення на У1, подаються на п'єзоперетворювач 8, за допомогою якого імпульси перетворюються в електричні коливання, які надходять на ПП₂ – 9.

Електричні коливання, після перетворення пристроєм 9 та посилення їх на У2, потрапляють спочатку на пристрій ПД1, після чого отримана напруга U_1 надходить на АЦП 15 та перетворюється в цифровий код η_2

$$\eta_2 = \frac{U_1}{\delta_2} = \frac{U_a \cdot G_{1-8}}{\delta_2}, \quad (4)$$

де: G_{1-8} – коефіцієнт передачі пристроїв 1–8, δ_2 – одиниця молодшого розряду АЦП 15.

Акустичні коливання, які відбиваються від зразка О, потрапляють на приймач 6 п'єзоперетворювача 5, де перетворюються в електричні коливання, потім, після їх посилення пристроєм У4, потрапляють на детектор ПД3, де створюється напруга U'_1 , яка надходить на АЦП 19, потім напруга U'_1 перетворюється в код η_3 .

Всі цифрові коди записуються в пам'ять ПК 23, при цьому прийняте для порівняння значення коду еталонного зразка – η_4 , записується в пам'ять ПК один раз.

Визначити зміну відношення $\Delta\eta_{23}/\eta_4$ можна за допомогою диференціального пристрою 22, за зміною цифрового коду η_3 або цифрового коду η_4 (при контролі еталонного зразка, виконаного з того ж матеріалу).

Таким чином

$$\frac{\Delta\eta_{23}}{\eta_4} = f(R_p). \quad (5)$$

Регулювання частоти генератора Г здійснюється за допомогою контролера 20 через ЦАП 26 при використанні драйвера 27.

Слід зазначити, що контроль міцності матеріалу R на кратних частотах, пов'язаний з тим, що незначна зміна геометричних параметрів контрольованої плити, призводить до значної зміни узагальнених параметрів універсальних функцій перетворення вимірювального пристрою, які пов'язані з фізико-механічними характеристиками матеріала зразка. При цьому на кратних частотах f_0 , якщо довжина плити становить l , то швидкість v_t проходження акустичних імпульсів через плиту, на першій кратній частоті f_0 визначається за формулою:

$$v_T = \frac{l}{t} = 2f_0l, \quad (6)$$

де індекс "Т" – означає, що дана величина залежить від температури.

Результати вимірювального контролю межі міцності на стиск R_p контрольованої плити, виводяться на дисплей 24.

Процес нагріву виробу, що контролюється для випадку імітації виробничих процесів при виготовленні шлакоситалових плит, здійснюється за допомогою цифро-аналогового перетворювача ЦАП 21, на який надходять цифрові коди з мікропроцесорного контролера 20.

В табл. 1, наведено результати вимірювального контролю параметрів R_p і $\frac{\Delta\eta_{t23}}{\eta_4}$, зразка (плити виконаної з матеріалу СТМ - 1).

Таблиця 1 –Результати контролю параметрів R_p і $\frac{\Delta\eta_{t23}}{\eta_4}$

№	R_p	$\frac{\Delta\eta_{t23}}{\eta_4}$
1	310	0,02
2	350	0,06
3	380	0,12
4	390	0,18
5	398	0,22
6	400	0,25
7	405	0,28
8	412	0,31
9	419	0,34
10	423	0,37

Висновки: в рамках визначення шляхів розв'язування важливої наукової і практичної проблеми, яка полягає в зниженні та максимальному запобіганні можливих ризиків пов'язаних із застосуванням в будівництві неякісних матеріалів за рахунок контролю фізико-механічних параметрів виробів та елементів будівельних конструкцій багатопараметровими акустичними методами неруйнівного контролю (НК), в цій статті досліджено диференціальний двопараметровий метод акустичного контролю межі міцності на стиск R_p шлакоситалових плит та змінення відношення коефіцієнтів згасання

$\Delta\eta_{23}/\eta_4$. При цьому, контроль міцності матеріалу R_p на кратних частотах, пов'язаний з тим, що незначна зміна геометричних параметрів контрольованої плити, призводить до значної зміни узагальнених параметрів універсальних функцій перетворення вимірювального пристрою, які пов'язані з фізико-механічними характеристиками матеріалу зразка. Запропонований варіант автоматизації, надає змогу щодо здійснення вимірювального контролю міцнісних характеристик шлакоситалових плит за відносно короткій проміжок часу. Наведено алгоритми вимірювальних та розрахункових процедур межі міцності на стиск R_p шлакоситалових плит. Запропоновано структурну схему автоматизованого пристрою для реалізації диференціального акустичного методу контролю параметрів R_p та $\Delta\eta_{23}/\eta_4$ шлакоситалових плит. Науковою новизною статті є наведені в роботі теоретичні положення реалізації диференціального методу акустичного контролю R_p межі міцності на стиск шлакоситалових плит, які пов'язують сигнали первинного п'єзоперетворювача (амплітуду і фазу пакетів акустичних коливань) з цифровими кодами $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ багатофункціонального диференціального акустичного пристрою. Практичним значенням роботи є те, що отримано значення відносних змін коефіцієнтів загасання $\frac{\Delta\eta_{123}}{\eta_4}$. При цьому, межі зміни інформативних компонентів сигналів багато-

функціонального акустичного пристрою відповідають діапазонами змінення межі міцності на стиск R_p зразка, що в свою чергу, дозволяє проектувати, конструювати і створювати експериментальні та промислові пристрої на базі акустичних перетворювачів для контролю фізико-механічних характеристик різних типів будівельних конструкцій та матеріалів. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні автоматизованих систем багатопараметрового вимірювального контролю фізико-механічних характеристик матеріалів і елементів будівельних конструкцій широкого асортименту на основі первинних електромагнітних перетворювачів при реалізації методів НК, які дозволяють підвищити вірогідність контролю за рахунок визначення багатьох параметрів будівельних конструкцій.

Література

1. Щербаков А.С. Основы строительного дела. М.: Высшая школа, 1984. 336 с.
2. Лівійський О.М., Куро О.І., Пшінько О.М., Савицький М.В. та ін. Будівельні матеріали та вироби: підручник. К.: «М Леся», 2016. 660 с.
3. Valerie, S., & Tegger, A.D.. Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by Polymer Treatments // International Journal of Sustainable Built Environment. 2013. № 2 (2), P. 143–152.
4. Троицкий В.А. Особенности неразрушающего контроля и диагностики строительных сооружений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2002. № 2, С. 24–28.
5. Ермолов И.Н., Алешин Н.П., Гурвич А.К., Сухоруков В.В.. Неразрушающий контроль каталог в 5 кн.. / Кн. 2: Акустические методы контроля: Практическое пособие. М.: Высшая школа, 1991. 283 с.
6. Таланчук П.М., Скрипник О.Ю., Дубровський В.О. Засоби вимірювання в автоматичних інформаційних та керуючих системах. К.: Райдуга, 1994. 664 с.
7. Коркин В.Б., Григорьянц Т.В., Макаров Э.Ф. и др. Основы автоматизации измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 256 с.
8. Скрипник Ю.А., Присенко М.О., Дубровський В.О. Проектування засобів вимірювання з періодичним порівнянням. К.: КНУТД, 2008. 267 с.

9. Скрипник Ю.О., Здоренко В.Г., Лісовець С.М.. Використання ультразвукових засобів для контролю параметрів технологічних процесів. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах і конверсії виробництва: мат. III науково-технічної конференції, Хмельницький, 23–25 травня 1995 р. Хмельницький: ХТИ, 1995. С. 77.
10. Карпаш М.О.. Підвищення чутливості акустичного методу неруйнівного контролю матеріалів // Техн. діагностика и неразруш. контроль. 2011. № 4. С. 39–43.
11. Здоренко В.Г., Лісовець С.М. Застосування методу скінченних різниць в часовій області для контролю структурно-неоднорідних полікристалічних матеріалів // Вісник Вінницького політехнічного інституту 2014. № 1, С. 9–15.
12. Єременко Б.М. Огляд та аналіз методів і моделей діагностування об'єктів будівництва // Теорія і практика будівництва. 2012. № 9. С. 43–46.
13. Скальський В.Р., Сулим Т.Г. Основи акустичних методів неруйнівного контролю: навчальний посібник. Львів : Видавничий центр Львівського національного університету ім. І.Франка, 2010. 384 с.
14. Скальський В.Р., Сергієнко О.М., Коваль П.М., Лотоцький Ю.Л. Акустико-емісійна оцінка ранніх стадій мікротріщиноутворення під час твердіння бетону // Машинознавство. 2004. № 8. С. 16–21.
15. Головач В.М., Баранова О.С. Вплив характеристик дефектів фанери на коефіцієнт гармонійних спотворень вихідного сигналу ударного датчика // Технічні науки та технології. Чернівці. 2016. № 2(4). С. 195–199.
16. Голофеева М.А. Акустический метод контроля синтеграновых изделий // Проблемы техники. Одеса. 2013. № 3. С. 119–124.
17. Setyowati, E., Hardiman, G., Atmadja, S.T. Green Material Comparison of Sawdust and Coconut Fibre Acoustical Waffle Panel // Applied Mechanics and Materials. 2015 Vol 747. P. 221–225.

Bibliography (transliterated)

1. Shcherbakov A.S. Osnovy stroitel'nogo dela. M.: Vysshaya shkola, 1984. 336 p.
2. Liviiskyi O.M., Kuro O.I., Pshinko O.M., Savytskyi M.V. ta in. Budivelni materialy ta vyroby: pidruchnyk. K.: «M Lesia», 2016. 660 p.
3. Valerie, S., & Tegguer, A.D. Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by Polymer Treatments // International Journal of Sustainable Built Environment. 2013. № 2 (2), P. 143–152.
4. Troitskiy V.A. Osobennosti nerazrushayushchego kontrolya i diagnostiki stroitel'nykh sooruzheniy // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. 2002. № 2. P. 24–28.
5. Ermolov I.N., Aleshin N.P., Gurvich A.K., Sukhorukov V.V. Nerazrushayushchiy kontrol katalog v 5 kn.. / Kn. 2: Akusticheskiye metody kontrolya: Prakticheskoye posobiye. M.: Vysshaya shkola. 1991. 283 p.
6. Talanchuk P.M., Skrypnyk O.Iu., Dubrovskiy V.O. Zasoby vymiriuvannya v avtomatych-nykh informatsiynykh ta keruiuchykh systemakh. K.: Raiduha, 1994. 664 p.
7. Korkin V.B., Grigoriants T.V., Makarov E.F. i dr. Osnovy avtomatizatsii izmereniy. M.: Izd-vo standartov. 1991. 256 p.
8. Skrypnyk Yu.A., Pryslenko M.O., Dubrovskiy V.O. Proektuvannya zasobiv vymiriuvannya z periodychnym porivnianniam. K.: KNUTD, 2008. 267 p.

9. Skrypnyk Yu.O., Zdorenko V.H., Lisovets S.M. Vykorystannia ultrazvukovykh zasobiv dlia kontroliu parametriv tekhnolohichnykh protsesiv. Vymiriuvalna ta obchysliu-valna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh i konversii vyrobnytstva: mat. III naukovotekhnichnoi konferentsii, Khmelnytskyi, 23-25 travnia 1995 r. Khmelnytskyi: KhTY, 1995. P. 77.
10. Karpash M.O. Pidvyshchennia chutlyvosti akustychnoho metodu neruinivnoho kontroliu materialiv // Tekhn. dyahnostyka y nerazrush. kontrol. 2011. № 4. P. 39–43.
11. Zdorenko V.H., Lisovets S.M. Zastosuvannia metodu skinchennykh riznyts v chasovii oblasti dlia kontroliu strukturno-neodnorodnykh polikrystalichnykh materialiv // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu 2014. № 1, P. 9–15.
12. Yeremenko B.M. Ohliad ta analiz metodiv i modelei diahnostuvannia obiektiv budivnytstva // Teoriia i praktyka budivnytstva. 2012. № 9. P. 43–46.
13. Skalskyi V.R., Sulym T.H. Osnovy akustychnykh metodiv neruinivnoho kontroliu: navchalnyi posibnyk. Lviv : Vydavnychiy tsentr Lvivskoho natsionalnoho universytetu im. I.Franka, 2010. 384 p.
14. Skalskyi V.R., Serhienko O.M., Koval P.M., Lototskyi Yu.L. Akustyko-emisiina otsinkarannikh stadii mikrotrishchynoutvorennia pid chas tverdinnia betonu // Mashynoznavstvo. 2004. № 8. P. 16–21.
15. Holovach V.M., Baranova O.S. Vplyv kharakterystyk defektiv fanery na koeffitsient harmoniinykh spotvoren vykhidnoho syhnalu udarnoho datchyka // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. Chernihiv. 2016. № 2(4). P. 195–199.
16. Golofeyeva M.A. Akusticheskiy metod kontrolya sintegranovykh izdeliy // Problemi tekhniki. Odesa. 2013. № 3. P. 119–124.
17. Setyowati, E., Hardiman, G., Atmadja, S.T. Green Material Comparison of Sawdust and Coconut Fibre Acoustical Waffle Panel // Applied Mechanics and Materials. 2015 Vol 747. P. 221–225.

УДК 534.08

Здоренко В.Г., д.техн.н., професор, Забіяка Н.А., PhD, асистент, Себко К.В., студент,
Горбунова О.В., старший викладач

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖИ МІЦНОСТІ НА СТИСК R_p БАГАТОШАРОВИХ ПЛИТ ВИКОНАНИХ З ШЛАКОСИТАЛІВ

Знайшла подальший розвиток методологія створення багатofункціональних акустичних автоматизованих пристроїв, яка заснована на побудові простих алгоритмів перетворення та обробки сигналів засобів вимірювань. Досліджено диференціальний акустичний метод контролю фізико-механічних параметрів багатошарових плит, які виконано з шлакоситалів. Запропоновано структурну схему автоматизованого пристрою для вимірювального акустичного контролю межі міцності на стиск R_p шлакоситалової плити, яка контролюється. Розглянутий у статті варіант автоматизації процесу вимірювального контролю, надає змогу щодо визначення міцнісних характеристик за відносно короткий проміжок часу та завдяки усередненню результатів вимірювань фізико-механічних параметрів шлакоситалових плит, призводить до зменшення випадкових похибок вимірювань та тим самим сприяє підвищенню точності вимірювань фізико-механічних параметрів шлакоситалових виробів. Отримано значення відносних при-

рошень коефіцієнта згасання $\Delta\eta_{23}/\eta_4$, при цьому діапазони змінення значень коефіцієнта згасання пакетів хвиль акустичного пристрою, відповідають діапазонам змінення межі міцності на стиск R_p досліджуваного зразка шлакоситалової плити. При цьому, контроль міцності матеріалу R_p на кратних частотах, пов'язаний з тим, що навіть незначна зміна геометричних параметрів шлакоситалової плити, призводить до змінення узагальнених параметрів універсальних функцій перетворення вимірювального диференціального акустичного пристрою, які пов'язані з фізико-механічними характеристиками матеріалу зразка, що контролюється. Запропонований двопараметровий диференціальний акустичний метод контролю надає змогу враховувати зв'язок поміж важливими експлуатаційними температурними та механічними параметрами: нерівномірністю розподілу температури за довжиною зразка та неоднорідністю розподілу температурної деформації з локалізацією її пластичної складової у середній частині шлакоситалової плити, яка найбільш суттєво піддається температурному впливу та як наслідок піддається повільному руйнуванню.

Ключові слова: шлакоситали, будівельні конструкції, межа міцності, диференціальний акустичний метод, п'єзокерамічний перетворювач, амплітуда акустичних імпульсів, відношення коефіцієнтів згасання, швидкість проходження акустичних імпульсів, цифровий код, імітація процесу нагрівання.

Здоренко В. Г., д.техн.н., професор, Забияка Н. А., PhD, ассистент, Себко К. В., студент, Горбунова О. В., старший преподаватель

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ R_p МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛИТ ВЫПОЛНЕННЫХ С ШЛАКОСИТАЛЛОВ

Нашла дальнейшее развитие методология создания многофункциональных акустических автоматизированных устройств, которая основана на построении простых алгоритмов преобразований и обработки сигналов средств измерений. Исследован дифференциальный акустический метод контроля физико-механических параметров многослойных плит, которые выполнены из шлакоситаллов. Предложено структурную схему автоматизированного устройства для измерительного акустического контроля предела прочности на сжатие R_p контролируемой шлакоситалловой плиты. Рассмотренный в статье вариант автоматизации процесса измерений, даёт возможность осуществлять измерительный контроль прочностных характеристик за относительной короткой промежуток времени и за счет усреднения результатов измерений физико-механических параметров шлакоситалловых плит, приводит к уменьшению значений случайных погрешностей измерений и тем самым способствует повышению точности измерений физико-механических параметров шлакоситалловых изделий. Получены значения относительных приращений коэффициента затухания $\Delta\eta_{23}/\eta_4$, при этом диапазоны изменения значений коэффициента затухания пакетов волн акустического преобразователя, соответствуют диапазонам изменения предела прочности R_p на сжатие исследуемого образца. При этом, контроль прочности материала R_p на кратных частотах, связан с тем, что даже незначительное изменение геометрических параметров шлакоситалловой плиты, приводит к изменению обобщенных параметров универсальных функций преобразования измерительного дифференциального акустического устройств, которые связаны с физико-механическими характеристиками контролируемого материала образца. Предложенный двухпараметровый дифференциальный акустический метод контроля даёт возможность учитывать связь между важнейшими эксплуатационными

температурними и механическими параметрами: неравномерностью распределения температуры по длине образца и неоднородностью распределения температурной деформации с локализацией ее пластической составляющей в средней части шлакоситалловой плиты, которая подвержена влиянию температуры наиболее существенно и как следствие подвержена постепенному разрушению.

Ключевые слова: шлакоситаллы, строительные конструкции, предел прочности, дифференциальный акустический метод, пьезокерамический преобразователь, амплитуда акустических импульсов, отношения коэффициентов затухания, скорость прохождения акустических импульсов, цифровой код, имитация процесса нагрева.

Zdorenko V.H., Zabiika N.A., Sebko K.V., Gorbunova O.V.

DETERMINATION OF THE COMPRESSION STRENGTH R_p OF MULTILAYER PLATES MADE OF SLAGOSITALS

The methodology of creating multifunctional acoustic automated devices has been further developed, it is based on the construction of simple algorithms for transforming and processing signals of measuring instruments. A differential acoustic method for controlling the physical and mechanical parameters of multilayer plates made of slag glass-ceramics has been investigated. A structural diagram of an automated device for measuring acoustic control of the ultimate compressive strength R_p of a controlled slag glass-ceramics plate is proposed. The option of automation of the measurement process considered in the article makes it possible to carry out measuring control of the strength characteristics for a relatively short period of time and by averaging the results of measurements of the physical and mechanical parameters of slag glass-ceramic plates, leads to a decrease in the values of random measurement errors and thereby contributes to an increase in the accuracy of measurements of physical and mechanical parameters of slag glass-ceramics products. The values of the relative increments of the attenuation coefficient $\Delta\eta_{23}/\eta_4$ were obtained, while the ranges of the values of the attenuation coefficient of a transmission of various waveforms of the piezoelectric transducer correspond to the ranges of the compressive strength R_p of the test sample. At the same time, the control of the strength of the material R_p at multiple frequencies is due to the fact that even a slight change in the geometric parameters of the slag glass-ceramics slab leads to a change in the generalized parameters of the universal transformation functions of the measuring differential acoustic devices, which are associated with the physical and mechanical characteristics of the controlled material of the sample. The proposed two-parameter differential acoustic control method allows to keep in mind the linkage between temperature and mechanical parameters: the unequal distribution of the temperature along the length of the sample and the uneven distribution deformation of temperature with the localization of this plastic component in the middle part of the slag glass-ceramics plate, which is most significantly affected by temperature and, as a consequence, is subject to gradual destruction.

Keywords: slag glass-ceramics, building constructions, tensile strength, the fluxional acoustic method, piezo transducer, acoustic pulse amplitude, damping factor ratio, acoustic impulse velocity, digital code, imitation of the heating process.

Хавін Г.Л., д.т.н., професор

ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАКОНУ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ РІЗАННІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: зношування інструменту, абразивний знос, різання композитів, геометрія ріжучої кромки, спадково-старіюча модель закону зношування

Вступ. Постановка задачі

Найважливішою і характерною особливістю механічної обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є інтенсивний знос ріжучої кромки інструменту. Цей факт, перш за все, є результатом сукупності фізичних, хімічних і термомеханічних явищ в процесі різання композиту. При цьому за своїм виглядом зношування носить яскраво виражений абразивний характер і повністю відрізняється від зношування при обробці металів.

Безперервний контакт з ковзанням між вершиною інструменту з високою міцністю і неоднорідним матеріалом, значно поступається своїми властивостями міцності, але володіє високими абразивними властивостями, супроводжується вкрай інтенсивним зносом по задній поверхні. Вивченню проблеми абразивного зносу були присвячені численні теоретичні, експериментальні та чисельні дослідження. Перш за все, цікавили питання прогнозування зносу інструмента, що ведуть до погіршення якості обробки виробу.

Як будь-який фізичний процес, зношування в контакті вершина інструменту-ПКМ, повинно підпорядковуватися деякому закону (закон зношування), який описує в часі видалення матеріалу і дозволяє прогнозувати працездатність інструменту (стійкість). Численні теоретичні та експериментальні дослідження показують, що швидкість зносу залежить від різних факторів в процесі взаємодії. До них відносять фізико-хімічні властивості матеріалів взаємодіючих тіл, шорсткість їх поверхонь, наявність мастила, навантажувально-швидкісний режим, температура і склад навколишнього середовища та ін. Всі ці фактори, в тій чи іншій мірі, повинні бути враховані в законі зношування, докладний опис яких можна знайти, наприклад в [1].

У пропонованій статті зроблена спроба обґрунтувати необхідність використання спеціального формулювання закону зношування в контакті вершини інструменту з полімерним композитом, яка дозволяє враховувати специфіку контактної взаємодії, спадковий характер абразивного зносу і зміну форми ріжучої частини інструменту в часі.

Аналіз досліджень і публікацій з проблеми

Аналіз різних досліджень зношування ріжучої кромки інструменту при обробці ПКМ показав, що є жорстка кореляція між появою зносу, зростанням силового навантаження, температурної напруженості і появою різних дефектів обробленої поверхні [2].

Дослідження впливу факторів процесу різання, таких як сили, температура в контакті, зміна виду стружки дозволило сформулювати деякі закономірності зношування інструменту і прогнозувати його стійкість [3,4]. Аналіз наявних експериментальних до-

сліджень [5,6] дав можливість зробити ряд якісних висновків з фізичної суті процесу, що має місце при зношуванні інструменту.

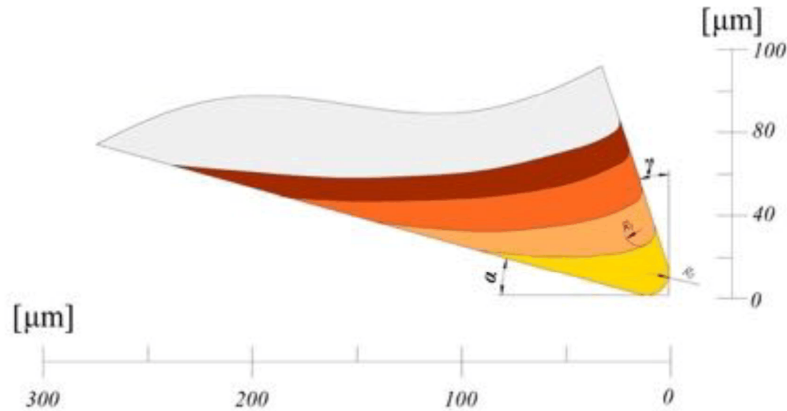


Рисунок 1 – Зміна форми вершини свердла з твердого сплаву в залежності від числа просвердлених отворів [5]

Перш за все, відзначається практично ідентична зміна форми ріжучої кромки, рис. 1. Така форма зносу характерна для інтенсивного видалення матеріалу по задній поверхні інструменту і практично відсутності зносу по передній поверхні [7,8].

Різними авторами були запропоновані моделі на мікрорівні, що описують знос вершини інструменту, як головну складову загального зносу інструменту в цілому. Аналіз цих досліджень зношування ріжучої кромки показав, що є жорстка кореляція між появою зносу, зростанням силового навантаження, температурної напруженості і появою різних дефектів обробленої поверхні [8,9].

Мета роботи. Для абразивного зношування вершини інструменту при механічній обробці ПКМ пропонується подальший розвиток спадково-старіючого закону взаємного зношування в контакт. Це дозволить більш точно описати процес зносу вершини інструменту і прогнозувати його працездатність.

Основна частина. Закон зношування встановлює зв'язок інтенсивності зношування з тиском і швидкістю ковзання індентора для кожної точки поверхні тертя. Форма закону зношування, яка запропонована різними авторами [1], відрізняється достатньою різноманітністю і звичайно припускає явну залежність інтенсивності зносу від часу взаємодії. Головна відмінність математичного формулювання різних законів зношування і, як наслідок, постановок зносоконтактних задач, полягає в можливості врахування впливу тих чи інших фізичних факторів: структури оброблюваного матеріалу, швидкості, температури, умов контакту (мастило, тертя, руйнування) і т.д.

В даний час, незважаючи на численні зусилля дослідників в області механічної обробки композиційних матеріалів, опис зношування інструменту, зміни його мікрогеометрії в процесі роботи і прогнозування його стійкості, носять емпіричний характер і базуються на проведенні конкретних експериментів для окремих матеріалів та інструментів. Теоретичні підходи базуються на використанні співвідношення Арчарда для абразивного зносу. У цьому співвідношенні зношений об'єм матеріалу (відокремлений

об'єм матеріалу) є пропорційним прикладеному контактному зусиллю (контактна сила) і довжині контакту $w = K / 3 \cdot F \cdot l / H$, де w – обсяг зношеного (віддаленого) матеріалу; F – контактна сила; l – довжина контакту; H – твердість більш твердого матеріалу, в даному випадку інструменту; K – коефіцієнт Арчарда. Найчастіше це співвідношення використовують як залежність швидкості зношування dw/dt від контактної тиску і швидкості взаємодії dl/dt . Лінійний характер співвідношення Арчарда коректно виконується досить рідко для окремих видів матеріалу у вузькому діапазоні зміни параметрів взаємодії.

Зміни дії, наприклад, осьової сили F_s в часі з урахуванням зношування (зміни мікрогеометрії вершини інструменту) може бути представлено у вигляді $F_s = K \cdot F^\alpha \cdot V^\beta \cdot g(w)$, де V – швидкість різання, α і β – експериментальні постійні. Функцію $g(w)$ найчастіше представляють в вигляді $g(w) = (w_0 + k_w \cdot w)^\delta$ або $g(w) = w_0 + k_w \cdot w^\delta$, де k_w і δ – експериментальні постійні [10].

В кінцевому підсумку для опису закону зношування і передбачення стійкості інструменту необхідне знання ряду емпіричних постійних, значення яких визначаються зміною мікрогеометрії вершини інструменту в процесі взаємодії заготовки і матеріалу.

Приймемо, що знос носить абразивний характер, тобто більш твердий матеріал видаляє за рахунок різання або розколювання інший, менш твердий. Це припущення підтверджено численними експериментальними дослідженнями багатьох авторів.

Для повного аналітичного уявлення завдання необхідно керуватися законом абразивного зношування, який пропонується у вигляді швидкості зміни об'єму матеріалу вершини інструменту в часі (щільність вважається постійною)

$$\frac{dv(t)}{dt} = K_{wear} \cdot \frac{\mu \cdot F_n}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (1)$$

де dv/dt – швидкість видалення обсягу матеріалу вершини інструменту, м³/с, F_n – нормальна складова сили різання в контакті (може бути визначена експериментально), Н; μ – коефіцієнт тертя в контакті; $[\tau_{sh}]$ – допустиме напруження зсуву матеріалу наповнювача, Н/м²; HV_{fill}, HV_{tool} – твердість матеріалу наповнювача (армуючого елемента) і матеріалу ріжучого інструменту, Н/м²; V – відносна швидкість ковзання (руху вершини інструменту), м/с; Q – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова постійна, Дж/(моль·°С); T – температура в зоні різання, °К; t – час, с; K_{wear} – коефіцієнт об'ємного зносу, який визначає форму та інтенсивність зносу поверхні інструменту в часі.

У представленому співвідношенні перевагу віддано безпосередньо параметру часу, а не якомусь іншому параметру, наприклад, кількості просвердлених отворів. Це більш загальний підхід так, як враховується безпосередньо час роботи інструменту незалежно від виду операції та кількісного еквівалента кожної операції, яку він здійснює.

Сила F_n , нормальна складова інтегральної сили, що має місце на задній поверхні інструменту, в загальному випадку є функція технологічних параметрів обробки – подачі s , м/хв. або мм/об; частоти обертання шпинделя f , об/хв.; глибини різання δ , мм; конструктивного виконання інструменту; накопиченого зносу і взаємного розташування напрямку обробки і напрямку армування композиту. В даний час накопичено достатньо багато експериментальних даних по емпіричному визначенню сил різання різних

композитів і аналітичних моделей, що дозволяють підрахувати цю силу [11,12]. Отже, в загальному випадку, ця сила нелінійно залежить від часу роботи інструменту через міцні геометричні параметри інструменту внаслідок його зносу і зміни технологічних параметрів обробки виробу з часом.

Врахування такого фізичного ефекту як тертя і визначення коефіцієнтів тертя в математичних моделях контактної взаємодії композитів з матеріалом інструменту найістотнішим чином відрізняється від визначення тертя при обробці однорідних матеріалів. Неоднорідність структури і анізотропія властивостей композитів унеможливають застосування класичної теорії контакту. Коефіцієнт тертя, крім ювенільної поверхні контакту, також визначається присутністю продуктів руйнування сполучного і наповнювача в контактній зоні при досить високій температурі. В результаті чого контактна взаємодія відбувається через реально існуючий пружно-пористий або в'язкопружний шар за рахунок розплавленого сполучного.

Побудова моделі контактної взаємодії, розпочате наприклад в [13], між тілами, одне з яких представляє композит, дозволило зробити висновок, що коефіцієнт тертя головним чином впливає на величину зони контакту. Однак більшість досліджень не дає відповіді на головне питання – яка це величина і як змінюється в процесі контактної взаємодії (обробки виробу).

У даній роботі припускається, що величина коефіцієнта тертя залежить від наступних факторів. Перш за все, орієнтації наповнювача в композиті і його загальної кількості, а також температури в зоні контактної взаємодії і швидкості ковзання. Вивчення характеру і величини коефіцієнта тертя в контактній зоні інструмент-зрізуємий шар композиту є окремою і вкрай складною задачею. В якості першого наближення коефіцієнта тертя прийнята постійна величина, що незалежна від часу.

Коефіцієнт K_{wear} є функцією часу роботи інструменту. Він повинен, перш за все, відображати той факт, що взаємодіюча пара «інструмент-заготовка» з часом повинна як би забувати про етап прироблення, який має високу швидкість зношування. Крім того, необхідно відобразити також факт того, що залежність зносу від навантаження (контактного тиску) характеризується наявністю післядії. Практична реалізація такого підходу була запропонована в роботі [14].

Після деякого періоду роботи інструмент повністю не зноситься і ще може бути використаний, але його форма вже відрізняється від початкової, загостреної форми. Цю обставину необхідно враховувати при розрахунку фізичних, технологічних і постійних величин в співвідношенні (1).

Для забезпечення вимог про реалізацію стаціонарного зносу по закінченню певного інтервалу роботи інструменту (приробітку) і наявності післядії коефіцієнт зношування пропонується представити у вигляді добутку трьох співмножників

$$K_{wear} = K_v \cdot K_{ag} \cdot K_h ,$$

де $K_{ag}(t) = 1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot t/t_0}$. Звідки випливає, що зі збільшенням часу роботи (контактної взаємодії) цей коефіцієнт прагне до 1, тобто в межі при $t \rightarrow \infty$ $K_{ag} \rightarrow 1$. Постійні коефіцієнти визначають тривалість етапу приробітки інструменту – n_{ag} і його форму – k_{ag} . Для коефіцієнта K_h пропонується представлення у вигляді $K_h = e^{-n_h \cdot (t_0 - t)/t_0}$, яке відображає той факт, що залежність зносу від контактної тиску характеризується наявністю післядії і таке уявлення описує обмежену величину зносу, що характерно для ін-

струментів при обробці полімерних композитів. Постійні коефіцієнти мають фізичний зміст планованого часу роботи інструменту в робочому стані – t_0 , n_h – також визначає форму етапу підробітки, як і k_{ag} .

Зі збільшенням часу роботи інструменту після етапу приробітки настає період (етап) сталого зношування, що характеризується постійною швидкістю зношування, яка має свою асимптоту. Коефіцієнт K_v визначає кут нахилу цієї асимптоти. Цей коефіцієнт принципово може залежати від величини контактного тиску і швидкості взаємодії матеріалу і інструменту при різанні, тобто може змінюватися за межами деякого діапазону швидкостей і тисків. Слід очікувати, що найбільш суттєві зміни матимуть місце при малих швидкостях і тисках, або при високих значеннях цих параметрів.

Робота інструменту дуже часто носить дискретний характер, тобто супроводжується перервами в його роботі, коли кожне наступне його застосування характеризується використанням інструменту з уже частково зношеною ріжучою частиною. Фактично це означає зміну (збільшення) зони контакту, що пропонується враховувати модифікацією коефіцієнта K_{ag} виду

$$K_{ag}(t) = 1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t-t_{ac})/t_0},$$

де t_{ac} – акумульований час роботи інструменту.

З огляду на викладене вище, співвідношення, яке описує величину об'ємного зношування вершини інструменту в будь-який момент часу, може бути представлено у вигляді

$$\int_{t_{ac}}^{t_0} dv(t) = \int_{t_{ac}}^{t_0} K_v \cdot \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t-t_{ac})/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0-t)/t_0} \right] \times \\ \times \frac{\mu(t) \cdot F_n(t)}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V(t) \cdot e^{-\frac{Q(t)}{R \cdot T(t)}} dt.$$

Або спростивши модель, поклавши коефіцієнт тертя μ , зусилля різання F_n , відносну швидкість ковзання V , енергію активації Q і температуру T в зоні різання постійними величинами, незалежними від часу взаємодії (зносу) отримаємо

$$v(t_0) - v(t_{ac}) = K_v \cdot \frac{\mu(t_{av}) \cdot F_n(t_{av})}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V(t_{av}) \cdot e^{-\frac{Q(t_{av})}{R \cdot T(t_{av})}} \cdot \\ \int_{t_{ac}}^{t_0} \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t-t_{ac})/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0-t)/t_0} \right] \cdot dt, \quad (2)$$

де для μ , F_n , V , Q та T беруться їх деякі середні значення $\mu(t_{av})$, $F_n(t_{av})$, $V(t_{av})$, $Q(t_{av})$, $T(t_{ac})$. Якщо прийняти постійної ширину ріжучої кромки інструменту, тоді співвідношення (2) можна представити у вигляді

$$[w(t_0) - w(t_{ac})] \cdot b_w = K_s \cdot \int_{t_{ac}}^{t_0} \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot (t-t_{ac})/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0-t)/t_0} \right] \cdot dt,$$

де $w(t_0)$ і $w(t_{ac})$ – площа зношеної поверхні в кінцевий і початковий період часу; коефіцієнт K_v містить

$$K_s = K_v \cdot \frac{\mu(t_{av}) \cdot F_n(t_{av})}{[\tau_{sh}]} \cdot \frac{HV_{fill}}{HV_{tool}} \cdot V(t_{av}) \cdot e^{-\frac{Q(t_{av})}{R \cdot T(t_{av})}}.$$

Без обмежень на загальність міркувань приймемо, що початковий накопичений знос $w(t_{ac})$ дорівнює нулю, тоді

$$w(t_0) = K_s / b_w \cdot \int_0^{t_0} \left[1 + k_{ag} \cdot e^{-n_{ag} \cdot t/t_0} \right] \cdot \left[e^{-n_h \cdot (t_0-t)/t_0} \right] \cdot dt.$$

Після інтегрування одержимо

$$w(t_0) = K_s / b_w \cdot \left[(1 + k_{ag}) \cdot t_0 \cdot e^{-n_h} + \frac{t_0}{n_h} \cdot (e^{n_h} - 1) + \frac{k_{ag} \cdot t_0}{n_h - n_{ag}} \left(e^{n_h - n_{ag}} - 1 \right) \right]$$

Висновок. Надано одне з можливих формулювань закону зношування для опису абразивного зносу вершини ріжучого інструменту при механічній обробці полімерних композиційних матеріалів. Прийнято, що закон зношування носить спадковий характер і має місце лінійна залежність швидкості зношування від швидкості контактної взаємодії та тиску. Напруження зрізу через контактний тиск і коефіцієнт тертя нелінійно залежать від часу роботи інструменту із-за зміни внаслідок зносу геометричних розмірів інструменту і технологічних параметрів обробки виробу.

Численні експериментальні дослідження в області механічної обробки композиційних матеріалів для окремих матеріалів та інструментів, дозволили сформулювати приватні моделі для опису зношування інструменту, зміни його мікрогеометрії в процесі роботи і прогнозування його стійкості.

Для вимірювання поточного зносу і перерахунку в математичних моделях існують значні складності так, як вони включають в себе велику кількість параметрів. Це ускладнює проведення простого технічного контролю зносу ріжучої кромки і передбачення стійкості інструменту.

Зміна геометрії інструменту внаслідок зносу має описуватися простою однопараметричною геометричною моделлю, що дозволяє оцінити спотворення форми ріжучої кромки по задній поверхні інструменту. В якості головного критерію вимірювання зношування інструменту використовувати втрату ім ваги в процесі різання. Створення такої математичної моделі має спиратися на використання адекватного закону зношування, що в сукупності являє собою перспективний напрямок наукових досліджень, володіє новизною і практичною цінністю, і отримає свій подальший розвиток.

Література

1. Солдатенков И.А. Износоконтактная задача с приложениями к инженерному расчету износа. М.: Физматкнига, 2010. 160 с.
2. Хавин Г.Л., Чживень Х. Моделирование микрогеометрии инструмента в процессе его изнашивания при резании композиционных материалов // Різання та інструмент в технологічних системах. 2020. 92. С. 208–224.
3. Abellan-Nebot J, Subiron F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2010. 47. P. 37–57.
4. Leone C., D'Addona D., Teti R. Tool wear modeling through regression analysis and intelligent methods for nickel base alloy machining // CIRP Ann– Manuf. Technology. 2011. 60. N 4. P. 327–331.
5. Hrechuk A., Bushlya V., Saoubi M.R., etc. Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP // Procedia Manufacturing. 2018. 25. P. 294–301.
6. Ramirez C., Poulachona G., Rossia F., etc. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling // Procedia CIRP. 2014. N13. P. 163–168.
7. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009. 49. N15. P. 1185–1196.
8. Seeholzer L., Voss R., Grossenbacher F., etc. Fundamental analysis of the cutting edge micro-geometry in orthogonal machining of the unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // Procedia CIRP. 2018. 7. P. 379–382.
9. Voss R., Henerichs M., Capricano G., etc. Post-Coating Treatment of Cutting Edge for Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // Procedia CIRP. 2016. 46. P. 161–164.
10. Ilescu D., Gehin D., Gutierrez M.E., etc. Modeling and tool wear in drilling of CFRP // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010. 50. P. 204–213.
11. Sheikh-Ahmad J.Y. Machining of Polymer Composites, Springer, 2009.
12. Kalla D., Sheik-Ahmad J., Twomey J. Prediction of Cutting Forces in Helical End Milling Fiber Reinforced Polymers // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2010. 50. P. 882–891.
13. Ning X., Lovell M.R. On the sliding friction characteristics of unidirectional continuous FRP composites // Journal of tribology. 2002. 124(1). P. 5–13.
14. Гавриков М.В., Мазинг Р.И. Применение наследственно-стареющей модели изнашивания осесимметричной контактной задаче // Трение и износ. 1989. 6. С. 981–986.

Bibliography (transliterated)

1. Soldatenkov I.A. Iznosokontaktная zadacha s prilozheniyami k inzhenernomu raschetu iznosa. M.: Fizmatkniga, 2010. 160 p.
2. Khavin G.L., Chzhiven' KH. Modelirovanie mikrogeometrii instrumenta v processe ego iznashivaniya pri rezanii kompozicionnykh materialov // Rizannya ta instrument v tekhnologichnikh sistemakh. 2020. 92. P. 208–224.
3. Abellan-Nebot J, Subiron F. A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models // Int. J. Adv. Manuf. Technology. 2010. 47. P. 37–57.

4. Leone C., D'Addona D., Teti R. Tool wear modeling through regression analysis and intelligent methods for nickel base alloy machining // *CIRP Ann– Manuf. Technology*. 2011. 60. N 4. P. 327–331.
5. Hrechuk A., Bushlya V., Saoubi M.R., etc. Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP // *Procedia Manufacturing*. 2018. 25. P. 294–301.
6. Ramirez C., Poulachona G., Rossia F., etc. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling // *Procedia CIRP*. 2014. N13. P. 163–168.
7. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009. 49. N15. P. 1185–1196.
8. Seeholzer L., Voss R., Grossenbacher F., etc. Fundamental analysis of the cutting edge micro-geometry in orthogonal machining of the unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // *Procedia CIRP*. 2018. 7. P. 379–382.
9. Voss R., Henerichs M., Capricano G., etc. Post-Coating Treatment of Cutting Edge for Drilling Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) // *Procedia CIRP*. 2016. 46. P. 161–164.
10. Iiescu D., Gehin D., Gutierrez M.E., etc. Modeling and tool wear in drilling of CFRP // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2010. 50. P. 204–213.
11. Sheikh-Ahmad J.Y. *Machining of Polymer Composites*, Springer, 2009.
12. Kalla D., Sheik-Ahmad J., Twomey J. Prediction of Cutting Forces in Helical End Milling Fiber Reinforced Polymers // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2010. 50. P. 882–891.
13. Ning X., Lovell M.R. On the sliding friction characteristics of unidirectional continuous FRP composites // *Journal of tribology*. 2002. 124(1). P. 5–13.
14. Gavrikov M.V., Mazing R.I. Primenenie nasledstvenno-stareyushchej modeli iznashivaniya osesimmetrichnoj kontaktnoj zadache // *Trenie i iznos*. 1989. 6. P. 981–986.

УДК 66.045.53

Хавін Г.Л., д.т.н., професор

ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАКОНУ ЗНОШУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ РІЗАННІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПЗИТІВ

Численні експериментальні дослідження в області механічної обробки композиційних матеріалів для окремих матеріалів та інструментів, дозволили сформулювати приватні моделі для опису зношування інструменту, зміни його мікрогеометрії в процесі роботи і прогнозування стійкості. Для вимірювання поточного зносу і перерахунку в математичних моделях існують значні складності так, як вони включають в себе велику кількість параметрів. Це не дозволяє створювати простий технічний контроль зносу ріжучої кромки і передбачення стійкості інструменту. Надане формулювання ізносодатної задачі взаємодії вершини інструменту і матеріалу при точінні армованих композиційних пластиків. Ґрунтуючись на відомих дослідженнях, прийнято, що зношування має місце по задній поверхні інструменту, і супроводжується несиметричним зносом його вершини. Розглядається модель абразивного зношування при ковзанні задньої поверхні вершини інструменту з матеріалом армування полімерного композиту і продуктами руйнування. Передбачається, що закон зношування носить спадковий характер і

має місце лінійна залежність швидкості зношування від швидкості контактної взаємодії та контактного тиску. Напруги зрізу через контактний тиск і коефіцієнт тертя нелінійно залежать від часу роботи інструменту через зміну внаслідок зносу геометричної форми інструменту і технологічних параметрів обробки виробу з часом. Введений коефіцієнт об'ємного зносу є функцією часу роботи інструменту. Він відбиває той факт, що взаємодія пари «інструмент-заготовка» з часом повинна як би забувати про етап приробітки, який має високу швидкість зношування і той факт, що залежність зносу від навантаження (контактного тиску) характеризується наявністю післядії. Одержано спрощене співвідношення закону зносу в припущенні відсутності зміни коефіцієнта тертя, температури і контактного тиску в часі. В кінцевому підсумку для опису закону зношування і передбачення стійкості інструменту необхідне знання ряду емпіричних постійних, значення яких визначаються зміною мікрогеометрії вершини інструменту в процесі взаємодії при обробці різанням.

Ключові слова: зношування інструменту; абразивний знос; різання композитів; геометрія ріжучої кромки; спадково-старіюча модель; закон зношування.

Хавин Г.Л., д.т.н., професор

ФОРМУЛИРОВКА ЗАКОНА ИЗНАШИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ РЕЗАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Многочисленные экспериментальные исследования в области механической обработки композиционных материалов для отдельных материалов и инструментов, позволили сформулировать частные модели для описания износа инструмента, изменения его микрогеометрии в процессе работы и прогнозирования стойкости. Для измерения текущего износа и пересчета в математических моделях существуют значительные сложности так, как они включают в себя большое количество параметров. Это не позволяет осуществлять простой технический контроль износа режущей кромки и предсказания стойкости инструмента. Представлена формулировка износоконтактной задачи взаимодействия вершины инструмента и материала при точении армированных композиционных пластиков. Основываясь на известных исследованиях, принято, что износ имеет место по задней поверхности инструмента, и сопровождается несимметричным изменением геометрии его вершины. Рассматривается модель абразивного износа при скольжении задней поверхности вершины инструмента с материалом армирования полимерного композита и продуктами разрушения. Предполагается, что закон изнашивания носит наследственный характер и имеет место линейная зависимость скорости износа от скорости контактного взаимодействия и давления. Напряжения среза через контактное давление и коэффициент трения нелинейно зависят от времени работы инструмента из-за изменения вследствие износа геометрической формы инструмента и технологических параметров обработки изделия со временем. Коэффициент об'ємного износа является функцией времени работы инструмента. Он отражает тот факт, что взаимодействие пары «инструмент-заготовка» со временем должно как бы забывать об этапе приработки, который имеет высокую скорость износа и тот факт, что зависимость износа от нагрузки (контактного давления) характеризуется наличием последствия. Получено упрощенное соотношение закона износа в предположении отсутствия изменения коэффициента трения, температуры и контактного давления во времени. В конечном итоге для описания закона износа и предсказания стойкости инструмента не-

обходимо знання ряду емпіричних постійних, значення яких определяються изменением микрогеометрии вершины инструмента в процессе взаимодействия при обработке резанием.

Ключевые слова: износ инструмента; абразивный износ; резки композитов; геометрия режущей кромки; наследственно-стареющая модель; закон износа.

Khavin G.L.

FORMULATION OF TOOL WEAR LAW WHEN CUTTING POLYMER COMPOSITES

Numerous experimental studies in the field of mechanical processing of composite materials for individual materials and tools made it possible to formulate particular models for describing tool wear, changing its microgeometry during operation and predicting durability. There are significant difficulties in measuring current wear and recalculation in mathematical models, since they include a large number of parameters. This does not allow for simple technical control of cutting edge wear and predicting tool life. The formulation of the wear-contact problem of the tool tip and the material interaction during turning of reinforced composite plastics is presented. Based on known studies, it is assumed that wear occurs along the flank of the tool, and is accompanied by an asymmetric change in the geometry of its tip. A model of abrasive wear during sliding of a tool tip rear surface with a polymer composite reinforcement material and fracture products is considered. It is assumed that the wear law is hereditary and there is a linear dependence of the wear rate on the rate of contact interaction and pressure. Shear stresses through the contact pressure and the coefficient of friction nonlinearly depend on the operating time of the tool due to the change due to wear in the geometric shape of the tool and the processing parameters of the product over time. The volumetric wear factor is a tool run time function. It reflects the fact that the interaction of the “tool-workpiece” pair with time should, as it were, forget about the running-in stage, which has a high wear rate, and the fact that the dependence of wear on the load (contact pressure) is characterized by the presence of aftereffect. A simplified relationship is obtained for the wear law under the assumption that there is no change in the coefficient of friction, temperature and contact pressure over time. Ultimately, to describe the wear law and predict the tool life, it is necessary to know a number of empirical constants, the values of which are determined by the change in the microgeometry of the tool tip during interaction during cutting.

Keywords: tool wear; abrasive wear; cutting composites; cutting edge geometry; hereditarily aging model; law of wear.

Белінська А.П., к.техн.н., доцент, Варанкіна О.О., к.техн.н., доцент,
Близнюк О.М., д.техн.н., професор, Масалітіна Н.Ю., к.техн.н., доцент,
Кричковська Л.В., д.біол.н., професор

КОНТРОЛЬ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ В ПРОМИСЛОВІЙ БІОТЕХНОЛОГІЇ БЕТА-КАРОТИНУ З *BLAKESLEA TRISPORA*

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: міцеліальний гриб *Blakeslea trispora*, промислова біотехнологія, β-каротин, екстрагенти, технологічні властивості, контроль та керування.

Вступ

Одним з актуальних завдань промислової біотехнології є керування процесом виробництва біологічно активних речовин, зокрема, β-каротину. Продуцентами означеної сполуки можуть служити мікроорганізми, що здатні синтезувати широкий комплекс біологічно активних речовин. Промислові штами гетероталічного міцеліального гриба *Blakeslea trispora*, зокрема КР 74⁺ и КР 86⁻, а також мікроводорість *Dunaliella salina* є надпродуцентами β-каротину. Харчова добавка Е 160aііі (β-каротин мікробіологічний) як можливі побічні продукти містить певні клітинні метаболіти в мінімальній кількості (близько 1 %), що є безпечними для здоров'я [1]. Основною стадією біотехнології виробництва β-каротинвмісної біомаси є ферментація *Blakeslea trispora*, під час якої проходить біосинтез цільової речовини у ферментерах періодичним способом на патоково-екстрактних середовищах [2].

Варто відзначити, що на сьогоднішній день олійні розчини мікробіологічного β-каротину мають певний технологічний недолік – високий вміст первинних продуктів окиснення (пероксиди, гідропероксиди), вторинних продуктів окиснення (альдегіди, кетони), а також вільних жирних кислот [3, 4]. З цієї причини актуальним є питання виробництва олійних концентратів мікробіологічного β-каротину високого ступеню очищення. Рішенню даного питання присвячені численні дослідження [4–6].

Дослідження існуючих рішень проблеми

Сучасні технології виділення β-каротину з біомаси продуцентів полягають в екстрагуванні токсичними органічними розчинниками, зокрема гексаном, що ускладнює використання його в харчових цілях [1, 3, 5].

В роботах [7–10] проведено дослідження з керуванням основних стадій технології отримання β-каротину, що розчинений в клітинних ліпідах біомаси *Blakeslea trispora*. Зокрема, в роботі [7] досліджено технологічні особливості екстракції розчинної і кристалічної форм β-каротину з біомаси соняшникової олією. Недоліком даної технології можна вказати використання досить високої температури (100 °С) процесу екстракції цільової сполуки, яка є досить окси- і термолабільною.

В роботах [11–13] наведено результати досліджень з керуванням основних стадій біотехнології культивування каротиноїдів біомасою мікроводорості *Dunaliella salina*. Зокрема, в роботі [11] обґрунтовано ефективні технологічні параметри технології отримання олійного екстракту β-каротину з біомаси мікроводорості *Dunaliella salina*. Обґрунтовано використання соняшникової олії як екстрагенту, температурний режим

(близько 30 °С) і тривалість екстракції (4 доби). Слабкою стороною даної технології можна вказати велику тривалість процесу екстракції, що є недоцільною з економічної точки зору.

Альтернативний варіант рішення питання контролю та керування складу екстрактів β-каротину з біомаси *Blakeslea trispora* викладено в роботі [4]. Обґрунтовано технологічні режими рафінації олійних розчинів β-каротину мікробіологічного, які забезпечують поліпшення його фізико-хімічних показників. Застосування запропонованих технологічних режимів рафінації «β-каротину мікробіологічного в олії» дозволяє збільшити його термін зберігання більш ніж в 2,5 рази.

Таким чином, результати аналізу існуючих наукових розробок свідчать про існування високопродуктивних мікроорганізмів, що дозволяють виробляти мікробіологічний β-каротин, але єдиної думки щодо можливості контролю та керування технологічних показників екстрактів даної біологічно активної харчової добавки не існує. Вибір найбільш прийняттого технічного рішення для кожного окремого об'єкта дослідження може базуватися на результатах, що отримані в досліджуваних модельних системах. Однак, перспективним з точки зору технологічних і економічних аспектів є використання різних видів харчових неполярних екстрагентів для β-каротину, що дозволить комплексно використовувати їх технологічні особливості.

Мета та основні задачі дослідження

Метою даної роботи є контроль процесу екстракції олійних екстрактів β-каротину, який отримують за біотехнологією культивування міцеліального гриба *Blakeslea trispora* для керування його технологічних властивостей. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– дослідити технологічні параметри екстракції β-каротину з біомаси *Blakeslea trispora* рослинними оліями різного жирнокислотного складу і з різним вмістом природних антиоксидантів;

– визначити раціональні параметри екстракції β-каротину з біомаси *Blakeslea trispora* в залежності від складу екстрагентів для керування його технологічними властивостями.

Матеріали та методи досліджень

В експериментах використано зразки біомаси гетероталічного гриба *Blakeslea trispora* IMBF-100019, що депонований в музеї промислових культур Інституту мікробіології і вірусології НАН України. Вирощування грибної біомаси проведено постадійно. Ферментаційна середа включає наступні складові: 4...6 % кукурудзяного екстракту (відповідає концентрації азоту 0,18...0,24 %), 5...7 % патоки (відповідає концентрації вуглеводів 0,15...0,18 %), 0,05...0,06 % дигідрофосфату калію, 2,0...2,2 % кукурудзяної олії. Як джерело вуглеводів використовувались гідролізати житніх або вівсяних висівок (відповідає концентрації цукрів 0,6...0,8 %), як джерело азоту використовували глютен (відповідає концентрації азоту 0,2...0,3 %).

Отриману біомасу *Blakeslea trispora* піддавали сепаруванню та висушуванню за 40 °С. Висушена біомаса *Blakeslea trispora* слугувала сировиною для екстракції β-каротину. Модельну екстракцію β-каротину з біомаси проводили з попередньою гомогенізацією твердої і рідкої фаз (частота обертів леза ножа 6000 хв⁻¹) з постійним перемішуванням (частота обертів мішалки 60 хв⁻¹). Умови проведення процесу: масове співвідношення твердої і рідкої фаз 1 : 3, температура екстракції 40...80 °С, тривалість процесу 30...60 хв.

Визначення β -каротину в біомасі *Blakeslea trispora* та олійних екстрактах проведено згідно з ДСТУ 4305 з використанням спектрофотометра СФ-46 при довжині хвилі 450 нм, в кварцових кюветах з товщиною шару 1 см відносно розчинника – етанолу.

Визначення кислотного числа в біомасі *Blakeslea trispora* та олійних екстрактах проведено згідно з ДСТУ 4350.

Визначення пероксидного числа в біомасі *Blakeslea trispora* та олійних екстрактах проведено згідно з ДСТУ ISO 3960.

Результати дослідження

Досліджено можливість екстракції β -каротину з висушеної біомаси *Blakeslea trispora* харчовими неполярними екстрагентами – рафінованими дезодорованими оліями. Екстракція харчовими оліями дозволяє одночасно з цільовим продуктом вилучати й інші жиророзчинні біологічно активні сполуки, зокрема, поліненасичені жирні кислоти, токофероли, супутні каротиноїди. Для дослідження технологічних параметрів екстракції β -каротину з біомаси *Blakeslea trispora* процес екстракції проведено рослинними оліями різного жирнокислотного складу і з різним вмістом природних антиоксидантів: рафінованими дезодорованими соняшниковою, високоолеїною соняшниковою, кукурudzяною і кунжутною.

Експерименти по визначенню залежності вмісту β -каротину в олійних екстрактах означених рафінованих дезодорованих олій від температури та тривалості екстракції проведено відповідно до плану експерименту. Факторами, що впливають на функцію відгуку – вміст β -каротину в олійних екстрактах ($C_{\beta k}(T, \tau)$, мг/г), прийнято температуру (T , °C) і тривалість процесу (τ , хв.). Результати досліджень вмісту β -каротину в олійних екстрактах означених рафінованих дезодорованих олій від температури та тривалості екстракції представлено на рис. 1–4.

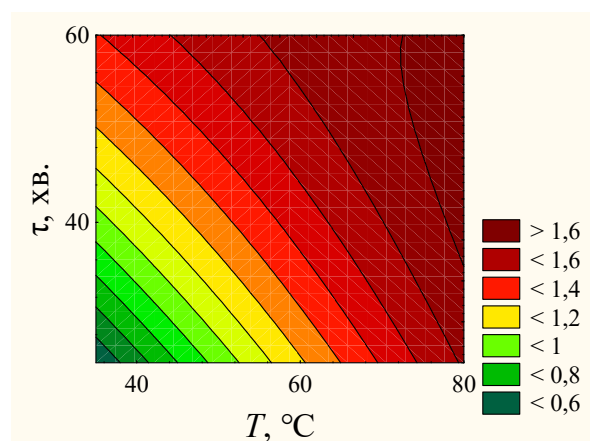


Рисунок 1 – Залежність вмісту β -каротину в олійних екстрактах рафінованої дезодорованої соняшникової олії від температури та тривалості екстракції

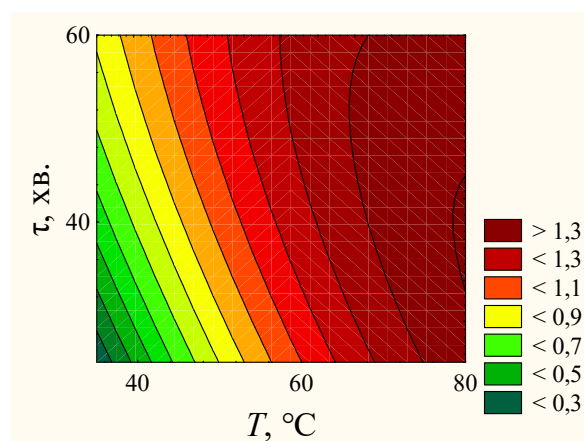


Рисунок 2 – Залежність вмісту β -каротину в олійних екстрактах рафінованої дезодорованої соняшникової високоолеїнової олії від температури та тривалості екстракції

На основі експериментальних досліджень (рис. 1–4) створено статистичні моделі (1–4) залежностей вмісту β -каротину в олійних екстрактах означених рафінованих дезодорованих олій від температури та тривалості екстракції при величині достовірності апроксимації $R^2 > 0,921$. Варто відзначити, що отримані статистичні моделі адекватні для температури процесу 40...80 °C, тривалості процесу 30...60 хв.

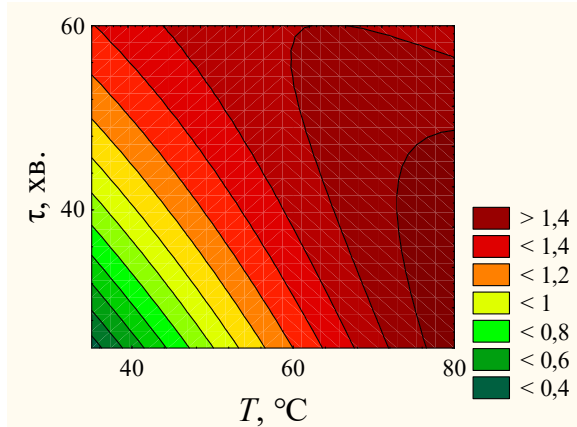


Рисунок 3 – Залежність вмісту β -каротину в олійних екстрактах рафінованої дезодорованої кукурудзяної олії від температури та тривалості екстракції

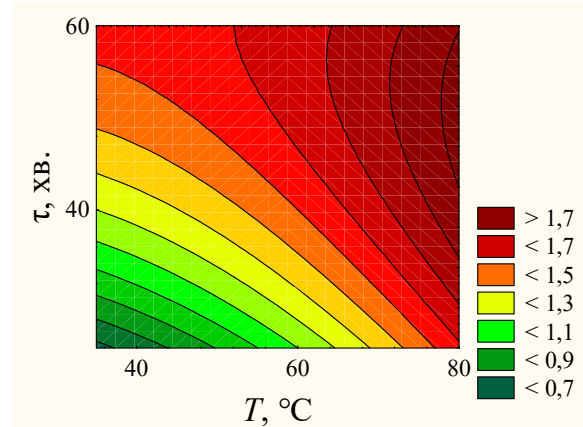


Рисунок 4 – Залежність вмісту β -каротину в олійних екстрактах рафінованої дезодорованої кунжутної олії від температури та тривалості екстракції

$$C_{\beta k}(T, \tau)_s = -2,0875 + 0,0511 \cdot T + 0,0613 \cdot \tau - 0,0001 \cdot T^2 - 0,0005 \cdot T \cdot \tau - 0,0002 \cdot \tau^2; \quad (1)$$

$$C_{\beta k}(T, \tau)_{hos} = -2,925 + 0,0812 \cdot T + 0,0506 \cdot \tau - 0,0004 \cdot T^2 - 0,0004 \cdot T \cdot \tau - 0,0002 \cdot \tau^2; \quad (2)$$

$$C_{\beta k}(T, \tau)_{corn} = -3,1292 + 0,0751 \cdot T + 0,0794 \cdot \tau - 0,0002 \cdot T^2 - 0,0007 \cdot T \cdot \tau - 0,0003 \cdot \tau^2; \quad (3)$$

$$C_{\beta k}(T, \tau)_{ses} = -1,345 + 0,0117 \cdot T + 0,0823 \cdot \tau + 0,0002 \cdot T^2 - 0,0003 \cdot T \cdot \tau - 0,0005 \cdot \tau^2; \quad (4)$$

де $C_{\beta k}(T, \tau)_s$ – вміст β -каротину в олійних екстрактах соняшникової олії, мг/г; $C_{\beta k}(T, \tau)_{hos}$ – вміст β -каротину в олійних екстрактах соняшникової високоолеїнової олії, мг/г; $C_{\beta k}(T, \tau)_{corn}$ – вміст β -каротину в олійних екстрактах кукурудзяної олії, мг/г; $C_{\beta k}(T, \tau)$ – вміст β -каротину в олійних екстрактах кунжутної олії, мг/г; T – температура процесу, °C; τ – тривалість процесу, хв.

За допомогою даних залежностей можна прогнозувати вміст β -каротину в олійних екстрактах біомаси означених рафінованих дезодорованих олій в залежності від температури та тривалості процесу екстракції. З отриманих експериментальних даних видно, що застосування вказаних рафінованих дезодорованих олій практично не впливає на вміст β -каротину в олійних екстрактах біомаси.

Експерименти по визначенню залежності величини кислотного числа олійних розчинів β -каротину в рафінованих дезодорованих оліях від температури та тривалості екстракції проведено відповідно до плану експерименту. Показник кислотне число характеризує вміст вільних жирних кислот в продукті. Факторами, що впливають на функцію відгуку – кислотне число олійного екстракту β -каротину ($AN_{\beta k}(T, \tau)$, мг KOH/г), прийнято температуру (T , °C) і тривалість процесу (τ , хв.). Результати досліджень величини кислотного числа олійних екстрактів β -каротину в означених рафінованих дезодорованих оліях від температури та тривалості екстракції представлено на рис. 5–8.

На основі експериментальних досліджень (рис. 5–8) створено статистичні моделі (5–8) залежностей величини кислотного числа олійних екстрактів β -каротину в означених рафінованих дезодорованих оліях від температури та тривалості екстракції при величині достовірності апроксимації $R^2 > 0,943$. Отримані статистичні моделі адекватні для температури процесу 40...80 °C, тривалості процесу 30...60 хв.

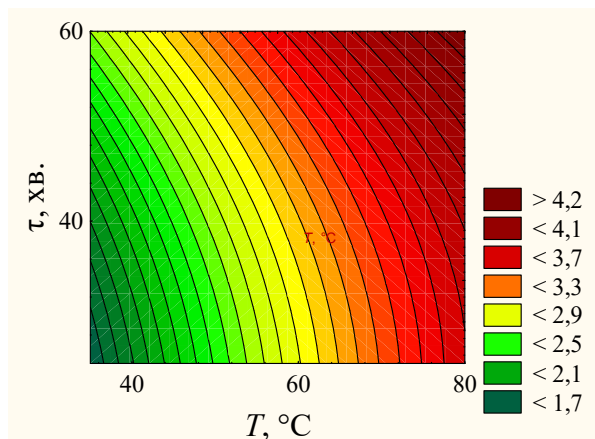


Рисунок 5 – Залежність величини кислотного числа олійних екстрактів β-каротину в рафінованій дезодорованій соняшниковій олії від температури та тривалості екстракції

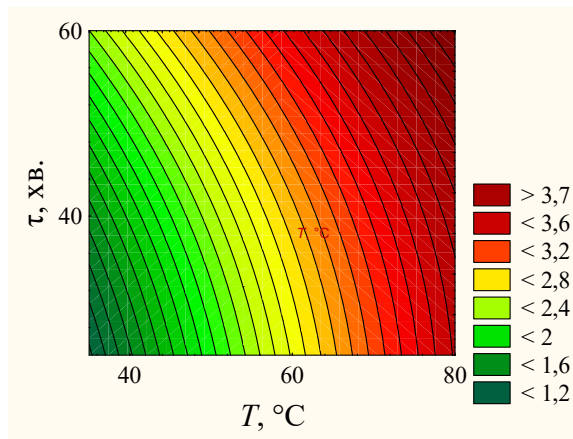


Рисунок 6 – Залежність величини кислотного числа олійних екстрактів β-каротину в рафінованій дезодорованій соняшниковій високоолеїновій олії від температури та тривалості екстракції

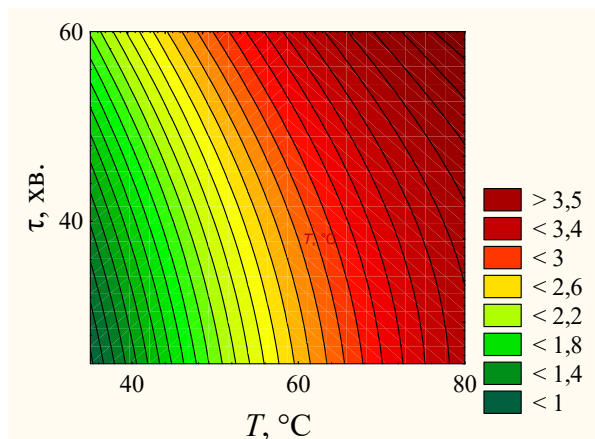


Рисунок 7 – Залежність величини кислотного числа олійних екстрактів β-каротину в рафінованій дезодорованій кукурудзяній олії від температури та тривалості екстракції

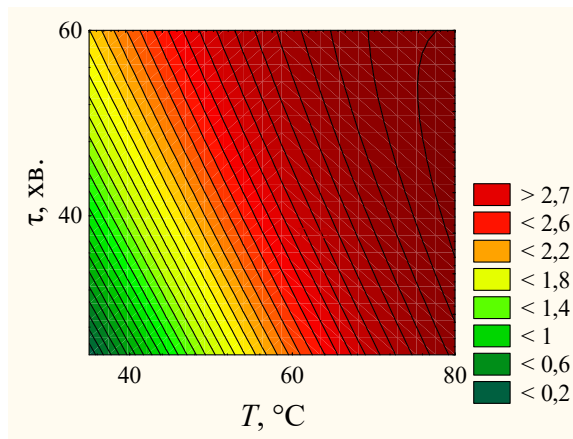


Рисунок 8 – Залежність величини кислотного числа олійних екстрактів β-каротину в рафінованій дезодорованій кунжутній олії від температури та тривалості екстракції

$$AN_{\beta k}(T, \tau)_s = -0,975 + 0,0812 \cdot T - 0,0006 \cdot \tau - 0,0002 \cdot T^2 - 0,0002 \cdot T \cdot \tau + 0,0004 \cdot \tau^2; \quad (5)$$

$$AN_{\beta k}(T, \tau)_{hos} = -1,7222 + 0,0817 \cdot T + 0,0122 \cdot \tau - 0,0002 \cdot T^2 - 0,0003 \cdot T \cdot \tau + 0,0004 \cdot \tau^2; \quad (6)$$

$$AN_{\beta k}(T, \tau)_{corn} = -2,9556 + 0,1258 \cdot T + 0,01 \cdot \tau - 0,0005 \cdot T^2 - 0,0003 \cdot T \cdot \tau + 0,0004 \cdot \tau^2; \quad (7)$$

$$AN_{\beta k}(T, \tau)_{ses} = -7,525 + 0,1871 \cdot T + 0,1294 \cdot \tau - 0,0007 \cdot T^2 - 0,0011 \cdot T \cdot \tau - 0,0004 \cdot \tau^2; \quad (8)$$

де $AN_{\beta k}(T, \tau)_s$ – кислотне число олійних екстрактів β-каротину в соняшниковій олії, мг KOH/г; $AN_{\beta k}(T, \tau)_{hos}$ – кислотне число олійних екстрактів β-каротину в соняшниковій високоолеїнової олії, мг KOH/г; $AN_{\beta k}(T, \tau)_{corn}$ – кислотне число олійних екстрактів β-каротину в кукурудзяній олії, мг KOH/г; $AN_{\beta k}(T, \tau)$ – кислотне число олійних екстрактів β-каротину в кунжутній олії, мг KOH/г; T – температура процесу, °C; τ – тривалість процесу, хв.

Дані залежності дозволяють прогнозувати величину кислотного числа олійних екстрактів β -каротину в обраних рафінованих дезодорованих оліях в залежності від температури та тривалості процесу екстракції. З отриманих експериментальних даних видно, що найбільший вміст вільних жирних кислот спостерігається під час екстрагування з біомаси біологічно активної сполуки соняшниковою олією, мінімального вмісту вільних жирних кислот вдається досягти в екстрактах кукурудзяної і кунжутної олій.

Експерименти по визначенню залежності величини пероксидного числа олійних розчинів β -каротину в рафінованих дезодорованих оліях від температури та тривалості екстракції проведено відповідно до плану експерименту. Величина пероксидного числа характеризує вміст первинних продуктів окиснення ліпідів (пероксидів, гідрпероксидів) в продукті. Факторами, що впливають на функцію відгуку – пероксидне число олійного екстракту β -каротину ($PN_{\beta k}(T, \tau)$, $\frac{1}{2}$ ммоль/кг), прийнято температуру (T , °C) і тривалість процесу (τ , хв.). Результати досліджень величини пероксидного числа олійних екстрактів β -каротину означених рафінованих дезодорованих олій від температури та тривалості екстракції представлено на рис. 9–12.

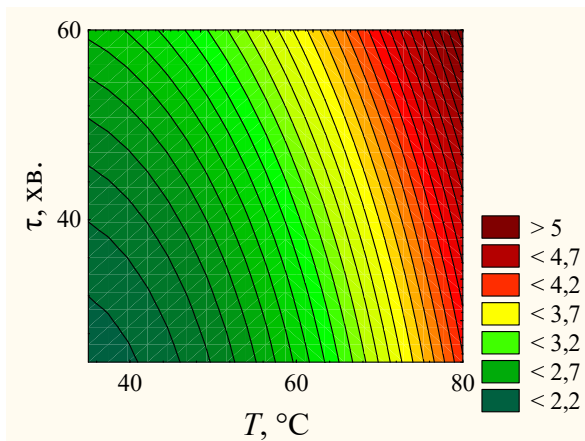


Рисунок 9 – Залежність величини пероксидного числа олійних екстрактів β -каротину в рафінованій дезодорованій соняшниковій олії від температури та тривалості екстракції

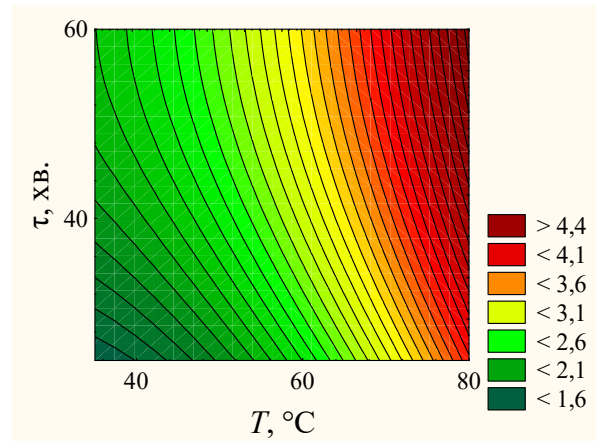


Рисунок 10 – Залежність величини пероксидного числа олійних екстрактів β -каротину в рафінованій дезодорованій соняшниковій високоолеїновій олії від температури та тривалості екстракції

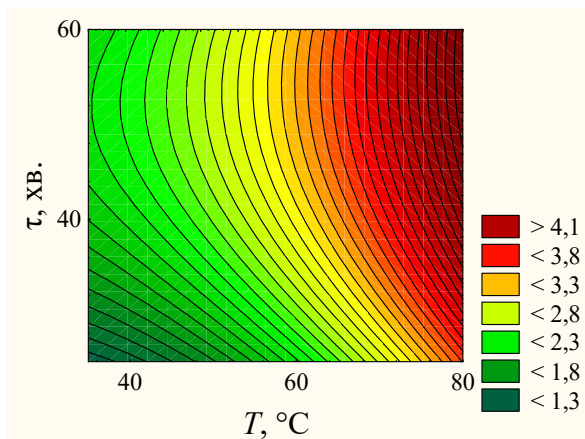


Рисунок 11 – Залежність величини пероксидного числа олійних екстрактів β -каротину в рафінованій дезодорованій кукурудзяній олії від температури та тривалості екстракції

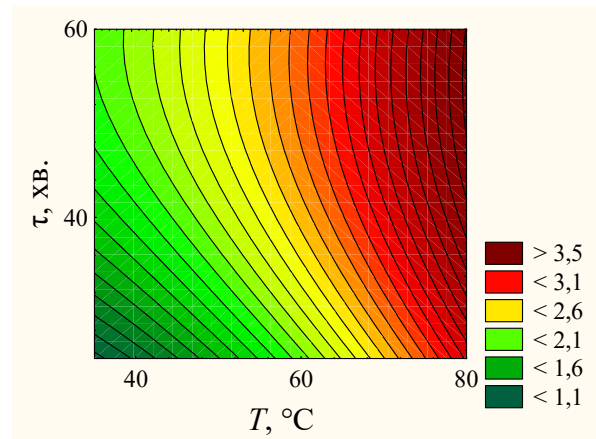


Рисунок 12 – Залежність величини пероксидного числа олійних екстрактів β -каротину в рафінованій дезодорованій кунжутній олії від температури та тривалості екстракції

На основі експериментальних досліджень (рис. 9–12) створено статистичні моделі (9–12) залежностей величини пероксидного числа олійних екстрактів β-каротину в означених рафінованих дезодорованих оліях від температури та тривалості екстракції при величині достовірності апроксимації $R^2 > 0,916$. Отримані статистичні моделі адекватні для температури процесу 40...80 °С, тривалості процесу 30...60 хв.

$$PN_{\beta k}(T, \tau)_s = 3,3639 - 0,0662 \cdot T - 0,0172 \cdot T + 0,0009 \cdot T^2 + 0,0002 \cdot T \cdot \tau + 0,0003 \cdot \tau^2; \quad (9)$$

$$PN_{\beta k}(T, \tau)_{\text{hos}} = 0,9528 - 0,0496 \cdot T + 0,055 \cdot T + 0,0008 \cdot T^2 + 0,0003 \cdot T \cdot \tau - 0,0005 \cdot \tau^2; \quad (10)$$

$$PN_{\beta k}(T, \tau)_{\text{corn}} = -0,925 - 0,0396 \cdot T + 0,1294 \cdot T + 0,0008 \cdot T^2 + 0,0003 \cdot T \cdot \tau - 0,0013 \cdot \tau^2; \quad (11)$$

$$PN_{\beta k}(T, \tau)_{\text{ses}} = -1,4944 + 0,0042 \cdot T + 0,1022 \cdot T + 0,0004 \cdot T^2 - 0,0002 \cdot T \cdot \tau - 0,0008 \cdot \tau^2, \quad (12)$$

де $PN_{\beta k}(T, \tau)_s$ – пероксидне число олійних екстрактів β-каротину в соняшниковій олії, ½ О ммоль/кг; $PN_{\beta k}(T, \tau)_{\text{hos}}$ – пероксидне число олійних екстрактів β-каротину в соняшниковій високоолеїнової олії, ½ О ммоль/кг; $PN_{\beta k}(T, \tau)_{\text{corn}}$ – пероксидне число олійних екстрактів β-каротину в кукурудзяній олії, ½ О ммоль/кг; $PN_{\beta k}(T, \tau)$ – пероксидне число олійних екстрактів β-каротину в кунжутній олії, ½ О ммоль/кг; T – температура процесу, °С; τ – тривалість процесу, хв.

Дані залежності дозволяють прогнозувати величину пероксидного числа олійних екстрактів β-каротину обраних рафінованих дезодорованих олій в залежності від температури та тривалості процесу екстракції. З отриманих експериментальних даних видно, що найбільший вміст первинних продуктів окиснення ліпідів (пероксидів та гідропероксидів) спостерігається під час екстрагування з біомаси біологічно активної сполуки соняшnikовою олією, мінімального вмісту вільних жирних кислот вдається досягти в екстрактах кунжутної олії.

Базуючись на проведених дослідженнях, визначено раціональні параметри екстракції β-каротину з біомаси *Blakeslea trispora* в залежності від складу екстрагентів (рафінованих дезодорованих соняшnikової, високоолеїнової соняшnikової, кукурудзяної і кунжутної олій) для керування технологічними властивостями його розчинів – а саме вмісту β-каротину, величини кислотного і пероксидного чисел.

Висновки

За результатами аналітичного огляду наукової літератури та проведених досліджень зроблено висновки щодо актуальності дослідження екстракції цільових продуктів в біотехнології культивування *Blakeslea trispora*:

– досліджено технологічні параметри екстракції β-каротину з біомаси *Blakeslea trispora* рослинними оліями різного жирнокислотного складу і з різним вмістом природних антиоксидантів: рафінованими дезодорованими соняшnikовою, високоолеїновою соняшnikовою, кукурудзяною і кунжутною. Створено статистичні моделі залежностей вмісту β-каротину в олійних екстрактах означених олій від температури та тривалості екстракції, а також відповідно величини аналітичних чисел, що характеризують вміст вільних жирних кислот та первинних продуктів окиснення ліпідів;

– базуючись на проведених дослідженнях, визначено раціональні параметри екстракції β-каротину з біомаси *Blakeslea trispora* в різних екстрагентах (рафінованих дезодорованих соняшnikової, високоолеїнової соняшnikової, кукурудзяної і кунжутної

олій) для керування технологічними властивостями його розчинів. Доведено, що застосування вказаних рафінованих дезодорованих олій як екстрагентів практично не впливає на вміст β -каротину в олійних екстрактах біомаси. Найбільший вміст вільних жирних кислот спостерігається під час екстрагування β -каротину з біомаси соняшnikовою олією, мінімального вмісту вільних жирних кислот вдається досягти в екстрактах кукурудзяної і кунжутної олій. Найбільший вміст первинних продуктів окиснення ліпідів (пероксидів та гідропероксидів) спостерігається під час екстрагування β -каротину з біомаси соняшnikовою олією, мінімального вмісту вільних жирних кислот вдається досягти в екстрактах кунжутної олії.

Література

1. Borowitzka M.A. 11-Carotenoid Production Using Microorganisms // *Single Cell Oils (Second Edition)*. Microbial and Algal Oils. 2010. P. 225–240.
2. Анацький А.С., Кунщикова Є.О. Вплив ступеня аерації культуральної рідини на біосинтетичну активність грибно́ї культури *blakeslea trispora* // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. 2009. Вип. 17. Т. 2. С. 15–19.
3. Roukas T. Modified rotary biofilm reactor: A new tool for enhanced carotene productivity by *Blakeslea trispora* // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 174. P. 1114–1121.
4. Белінська А.П., Кричковська Л.В., Зекунова Т.І. Розробка технологічних режимів рафінації олійних розчинів β -каротину // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2010. Вип. 38 (2). С. 157–160.
5. He Z., Wang Sh., Yang Yu., Hu J., Wang C., Li H., Ma B. β -Carotene production promoted by ethylene in *Blakeslea trispora* and the mechanism involved in metabolic responses // *Process Biochemistry*. 2017. Vol. 57. P. 57–63.
6. Гагарина Л.В., Евтеєва Н.М., Смурова Л.Л., Бобнева С.М. Влияние масляной основы на стабильность растворенного микробиологического каротина // *Химико-фармацевтический журнал*. 1996. Т. 30, № 6. С.51–56.
7. Кудинова С.П. Разработка технологии получения и фармако-токсикологические исследования бета-каротина: Автореф. дис... докт. биол. наук. Краснодар. 2003. 45 с.
8. Кричковская Л.В. Создание биологически-активных продуктов на основе стабилизированного каротина биотехнологического происхождения: Автореф. дис... докт. биол. наук, Киев. 2003. 36 с.
9. Choudhari Sh., Singhal R. Media optimization for the production of β -carotene by *Blakeslea trispora*: A statistical approach // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, Is. 4, P. 722–730.
10. Jing K., He Sh., Chen T., Lu Y. Enhancing beta-carotene biosynthesis and gene transcriptional regulation in *Blakeslea trispora* with sodium acetate // *Biochemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 114. P. 10–17.
11. Чернова Л.А., Горбань В.Г., Антоненко С.П., Гудвилович И.Н., Боровков А.Б. Получение масляного экстракта каротиноидов из микроводоросли *Dunaliella salina* // *Бюлетень ДНБС*. 2013. Вип. 108. С. 63–69.
12. Nwoba E. G., Rohani T., Raeisossadati M., Vadiveloo A., Bahri P. A. Monochromatic light filters to enhance biomass and carotenoid productivities of *Dunaliella salina* in raceway ponds // *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 340. 125689.
13. Pourkarimi S., Hallajisani A., Alizadehdakhel A., Nouralishahi A., Golzary A. Factors affecting production of beta-carotene from *Dunaliella salina* microalgae // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2020. Vol. 29. 101771.

Bibliography (transliterated)

1. Borowitzka M.A. 11-Carotenoid Production Using Microorganisms // Single Cell Oils (Second Edition). Microbial and Algal Oils. 2010. P. 225–240.
2. Anatskyi A.S., Kunshchikova Ye.O. Vplyv stupenia aeratsii kulturalnoi ridyny na biosyntetychnu aktyvnist hrybnoi kultury blakeslea trispora // Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Biologiya. Ekologiya. 2009. Vyp. 17. T. 2. P. 15–19.
3. Roukas T. Modified rotary biofilm reactor: A new tool for enhanced carotene productivity by *Blakeslea trispora* // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 174. P. 1114–1121.
4. Belinska A.P., Krychkovska L.V., Zekunova T.I. Rozrobka tekhnolohichnykh rezhymiv rafinatsii oliinykh rozchyniv β -karotyну // Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii. 2010. Vyp. 38 (2). P. 157–160.
5. He Z., Wang Sh., Yang Yu., Hu J., Wang C., Li H., Ma B. β -Carotene production promoted by ethylene in *Blakeslea trispora* and the mechanism involved in metabolic responses // Process Biochemistry. 2017. Vol. 57. P. 57–63.
6. Gagarina L.V., Evteeva N.M., Smurova L.L., Bobneva S.M. Vliyanie maslyanoj osnovy na stabil'nost' rastvorenogo mikrobiologicheskogo karotina // Himiko-farmaceuticheskij zhurnal. 1996. T. 30, № 6. P. 51–56.
7. Kudinova S.P. Razrabotka tekhnologii polucheniya i farmako-toksikologicheskie issledovaniya beta-karotina: Avtoref. dis... dokt. biol. nauk. Krasnodar. 2003. 45 p.
8. Krichkovskaya L.V. Sozdanie biologicheskii-aktivnyh produktov na osnove stabilizirovannogo karotina biotekhnologicheskogo proiskhozhdeniya: Avtoref. dis... dokt. biol. nauk, Kiev. 2003. 36 s.
9. Choudhari Sh., Singhal R. Media optimization for the production of β -carotene by *Blakeslea trispora*: A statistical approach // Bioresource Technology. 2008. Vol. 99, Is. 4, P. 722–730.
10. Jing K., He Sh., Chen T., Lu Y. Enhancing beta-carotene biosynthesis and gene transcriptional regulation in *Blakeslea trispora* with sodium acetate // Biochemical Engineering Journal. 2016. Vol. 114. P. 10–17.
11. Chernova L.A., Gorban' V.G., Antonenko S.P., Gudvilovich I.N., Borovkov A.B. Poluchenie maslyanogo ekstrakta karotinoidov iz mikrovodorosli *Dunaliella salina* // Byuleten' DNBS. 2013. Vip. 108. P. 63–69.
12. Nwoba E.G., Rohani T., Raeisossadati M., Vadiveloo A., Bahri P.A. Monochromatic light filters to enhance biomass and carotenoid productivities of *Dunaliella salina* in raceway ponds // Bioresource Technology. 2021. Vol. 340. 125689.
13. Pourkarimi S., Hallajisani A., Alizadehdakhel A., Nouralishahi A., Golzary A. Factors affecting production of beta-carotene from *Dunaliella salina* microalgae // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020. Vol. 29. 101771.

УДК 663.16

Белінська А.П., к.техн.н., доцент, Варанкіна О.О., к.техн.н., доцент,
Близнюк О.М., д.техн.н, професор, Масалітіна Н.Ю., к.техн.н, доцент,
Кричковська Л.В., д.біол.н., професор

КОНТРОЛЬ ТА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ В ПРОМИСЛОВІЙ БІОТЕХНОЛОГІЇ БЕТА-КАРОТИНУ З *BLAKESLEA TRISPORA*

Досліджено технологічні параметри, а саме температуру і тривалість процесу екстракції β -каротину з біомаси міцеліального гриба *Blakeslea trispora* рослинними олі-

ями різного жирнокислотного складу і з різним вмістом природних антиоксидантів: рафінованими дезодорованими соняшниковою, високоолеїною соняшниковою, кукурудзяною і кунжутною. Створено статистичні моделі залежностей вмісту β -каротину в олійних екстрактах означених рафінованих дезодорованих олій від температури та тривалості екстракції, а також величини аналітичних чисел, що характеризують вміст вільних жирних кислот (кислотне число) та первинних продуктів окиснення ліпідів (пероксидне число) від температури та тривалості екстракції.

Визначено раціональні параметри екстракції β -каротину з біомаси *Blakeslea trispora* обраними екстрагентами (рафінованими дезодорованими соняшниковою, високоолеїною соняшниковою, кукурудзяною і кунжутною оліями) для керування технологічними властивостями його розчинів. Доведено, що застосування вказаних рафінованих дезодорованих олій як екстрагентів практично не впливає на вміст цільового продукту в олійних екстрактах біомаси, але впливає на аналітичні числа екстрактів, що характеризують вміст вільних жирних кислот, пероксидів та гідропероксидів. Найбільший вміст вільних жирних кислот спостерігається під час екстрагування β -каротину з біомаси соняшниковою олією, мінімального вмісту вільних жирних кислот вдається досягти в екстрактах кукурудзяної і кунжутної олій. Найбільший вміст первинних продуктів окиснення ліпідів (пероксидів та гідропероксидів) спостерігається під час екстрагування β -каротину з біомаси соняшниковою олією, мінімального вмісту вільних жирних кислот вдається досягти в екстрактах кунжутної олії.

За допомогою отриманих апроксимаційних залежностей можна прогнозувати вміст β -каротину, а також величини кислотного і пероксидного чисел в олійних екстрактах біомаси в означених рафінованих дезодорованих оліях в залежності від температури та тривалості процесу екстракції.

Ключові слова: міцеліальний гриб *Blakeslea trispora*, промислова біотехнологія, β -каротин, екстрагенти, технологічні властивості, контроль та керування.

Белинская А.П., к.техн.н., доцент, Варанкина А.А., к.техн.н., доцент,
Близнюк О.Н., д.техн.н., профессор, Масалитина Н.Ю., к.техн.н., доцент,
Кричковская Л.В., д.биол.н., профессор

КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЭКСТРАКЦИИ В ПРОМЫШЛЕННОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ БЕТА-КАРОТИНА ИЗ *BLAKESLEA TRISPORA*

Исследованы технологические параметры, а именно температура и продолжительность процесса экстракции β -каротина из биомассы мицелиального гриба *Blakeslea trispora* растительными маслами различного жирнокислотного состава и с различным содержанием природных антиоксидантов: рафинированным дезодорированным подсолнечным, високоолеиновым подсолнечным, кукурузным и кунжутным. Созданы статистические модели зависимостей содержания β -каротина в масляных экстрактах указанных рафинированных дезодорированных масел от температуры и продолжительности экстракции, а также величины аналитических чисел, характеризующих содержание свободных жирных кислот (кислотное число) и первичных продуктов окисления липидов (пероксидное число) от температуры и продолжительности экстракции.

Определены рациональные параметры экстракции β -каротина из биомассы *Blakeslea trispora* выбранными экстрагентами (рафинированным дезодорированным подсолнечным, високоолеиновым подсолнечным, кукурузным и кунжутным маслами) для управления технологическими свойствами экстрактов. Доказано, что применение указанных рафинированных дезодорированных масел как экстрагентов практически не

влияет на содержание целевого продукта в масляных экстрактах биомассы, но влияет на аналитические числа экстрактов, характеризующие содержание свободных жирных кислот, пероксидов и гидропероксидов. Наибольшее содержание свободных жирных кислот наблюдается при экстракции β -каротина из биомассы подсолнечным маслом, минимального содержания свободных жирных кислот удается достичь в экстрактах кукурузного и кунжутного масел. Наивысшее содержание первичных продуктов окисления липидов (пероксидов и гидропероксидов) наблюдается во время извлечения β -каротина из биомассы подсолнечным маслом, минимального содержания свободных жирных кислот удается достичь в экстрактах кунжутного масла.

С помощью полученных аппроксимационных зависимостей можно прогнозировать содержание β -каротина, а также величины кислотного и перекисного чисел масляных экстрактов биомассы в указанных рафинированных дезодорированных маслах в зависимости от температуры и продолжительности процесса экстракции.

Ключевые слова: мицелиальный гриб *Blakeslea trispora*, промышленная биотехнология, β -каротин, экстрагент, технологические свойства, контроль и управление.

Belinska A.P., Varankina O.O., Bliznjuk O.M., Masalitina N.Yu., Krichkovska L.V.

CONTROL AND OPERATIONS MANAGEMENT OF EXTRACTION PROCESS IN INDUSTRIAL BIOTECHNOLOGY OF BETA-CAROTINE FROM *BLAKESLEA TRISPORA*

The technological parameters, namely temperature and duration of β -carotene extraction process from the biomass of filamentous fungus *Blakeslea trispora* with vegetable oils of various fatty acid compositions and with various contents of natural antioxidants (refined deodorized sunflower, visio-oleic sunflower, corn and sesame) have been investigated. Statistical models of dependences of β -carotene, as well as analytical numbers, characterizing the content of free fatty acids (acid number) and primary products of lipid oxidation (peroxide number) content, in oil extracts of the specified refined deodorized oils, from temperature and extraction duration have been built.

Rational parameters of β -carotene extraction from *Blakeslea trispora* biomass with selected extractants (refined deodorized sunflower, high oleic sunflower, corn and sesame oils) have been determined for the extracts technological properties control. It has been proven that the use of these refined deodorized oils as extractants practically does not affect the content of the target product in oil extracts of biomass, but it does affect the analytical numbers of extracts characterizing the content of free fatty acids, peroxides and hydroperoxides. The highest content of free fatty acids in β -carotene containing biomass extraction with sunflower oil has been observed. The minimum content of free fatty acids in extracts with corn and sesame oils using has been achieved. The highest content of primary products of lipid oxidation (peroxides and hydroperoxides) during β -carotene containing biomass extraction by sunflower oil has been observed. The minimum content of free fatty acids in extracts with sesame oil using has been achieved.

It is possible to predict β -carotene content, as well as acid and peroxide numbers of oil extracts from biomass in specified refined deodorized oils, depending on temperature and extraction process duration using the obtained approximation dependences.

Keywords: filamentous fungus *Blakeslea trispora*, industrial biotechnology, β -carotene, extractant, technological properties, process control and operations management.

Кричковська Л.В., д.б.н., проф., Лисак П.Ю., аспірант,
Дубоносів В.Л., старший викладач, Грицаєнко Ю.А., аспірант

ЗАСТОСУВАННЯ НАНО І БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ ПРИ СТВОРЕННІ ПРЕПАРАТІВ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Національний технічний університет "ХПІ", м. Харків

Ключові слова: фулерени, шунгіт, гідратовані фулерени, рістстимулюючі препарати, відходи дріжджового виробництва, бродильна рідина, гумінові речовини.

Питання утилізації відходів виробництва і споживання в останні роки набувають вирішального значення для зниження антропогенного впливу на середовище проживання людини. Тому сьогодні у світі глобальним напрямком у галузі використання відходів є перехід до промислової переробки для подальшого використання. На етапі вирощування чистої культури дріжджів знаходяться в ферментерах – 20–22 г., вихід дріжджів на цій стадії становить 70–75 %. Це обумовлює вміст органічних речовин в мелясі, а від кількості дріжджів в середовищі і від тривалості їх перебування в ній залежить кількість органічних речовин, що надходять з клітини в середу. Під час ферментації задають такі поживні речовини: бурякову мелясу, аміачну воду, ортофосфорну кислоту. В якості мікро і макроелементів вводять солі цинку, міді і магнію, а також вітаміни В1, В5, В6 і Н, які є стимуляторами росту [1, 312 с.]. У бродильній рідині після сепарації залишається багато поживних компонентів, що перевищують БПК і ГПК загальних стоків, вміст органічних і 129 мінеральних речовин до 20 г/л, які знаходяться в колоїдальному і розчиненому стані, і не осідають в звичайних умовах. Кількість колоїдів становить приблизно 10 % від загальної кількості розчинених речовин [2, 168 с.]. Стоки після сепарації чистої культури мають коричнево-чорний колір; запах хлібного квасу; низьку прозорість – 0,6–1,9 см по Снелену; кислу реакцію середовища рН-5,0; сухого залишку – 1200–2800 мг/л. В середньому міститься: калію – 480, азоту – 254 і фосфатів – 100 мг/л. відокремлену від дріжджів бродильну рідину з великою кількістю поживних компонентів і продуктів життєдіяльності дріжджів, а також висушений субстрат можна використовувати в якості компонента для виробництва рістстимулюючих препаратів.

Біологічна активність структурованої фулереноподібної води не викликає сумніву [3, 28с.; 4, 55с.]. У той же час практично відсутні дані щодо впливу структурованої води на рослинні організми.

З метою профілактики та оздоровлення шунгіти використовуються при водочищенні і водопідготовці. Шунгіти здійснюють сорбцію, переводять токсичні речовини в осад, мають бактерицидні властивості, забезпечують очищення води від нафтопродуктів і фенолів, діоксинів, продуктів гідролізу деревини [5, 128с.; 6, 91с.]. Їх питома поверхня – до 30м/г. сумарний обсяг пор – 0,05–0,15 см³/см³, ефективний радіус – 30–100А. Є вказівки на бактерицидні властивості шунгіта, що сприяють знищенню бактеріальних клітин (кишкової палички, холерного вібріона), низькомолекулярних домішок, органіки, сполук фосфору, отрутохімікатів, патогенних сапрофітів, яєць глистів, найпростіших. У літературі є відомості і про бактерицидну дію фулеренів [7, 152с.]. Ці дані дозволяють припустити бактерицидну дію вищеназваних вуглецевмісних-шунгітів і гідратованих фулеренів щодо патогенної мікрофлори сільськогосподарських рослин.

Мета роботи – дослідження біологічної активності препаратів на основі гуматів з використанням фулереновмісної води і відходів дріжджового виробництва на ріст озимої пшениці.

Як відомо, розробка препаратів регуляції росту рослин набуває широкого поширення як за кордоном, так і в Україні. Але багато з цих препаратів розроблені на основі синтетичних похідних, що викликає певний сумнів у правильності їх широкого застосування. В даний час увагу вчених все більше привертає природна сировина, яка поряд з біологічною активністю, не шкідливо по відношенню до рослини або його насіння. [8, 191с.; 9,372 с.; 10, 521с.]. На основі концентрованої шунгітової води (настояної 3-5 днів на шунгіті) готували зразки препарату, активність яких відчували при вирощуванні зерен пшениці. Зразки на основі гумінового препарату (типу MAPC), що володіє стимулюючими властивостями, ми готували з використанням структурованої води, отриманої за допомогою шунгітового порошку і гідратованих фулеренів. Крім того, ми вводили до складу препарату концентровану відсепаровану бродильну рідину після вирощування чистої культури штаму *Saccharomyces cerevisiae*. Дріжджова клітина містить 27–35 % сухої речовини, яка складається на 85–90 % з органічних і на 10–15 % з неорганічних речовин. Вміст білка і азотовмісних речовин досягає 65 %, з них 88 % – високомолекулярні білки і 12 % складають амінокислоти. Азотовмісні речовини являють собою 70 % альбумінів і 30 % нуклеопротейнів. Нуклеопротейни в свою чергу, розщеплюючись, утворюють піримідини, пурини і амінокислоти. Так само дріжджова клітина містить 10–25 % вуглеводів. Багато біологічно активні речовини залишаються в складі виробничих відходів дріжджів, а можуть бути використані в якості біологічно активних добавок [11, 1862с.; 12, 1362с.].

Методи досліджень: у дослідженнях використовували препарат на основі гумінових речовин, ПЕГ 1500 і 400, бурштинової кислоти і фулереновмісної води, приготованих в певному співвідношенні в лабораторних умовах. Також був приготований розчин препарату на основі гідратованого фулерену і біологічно активних компонентів, які містяться у відходах дріжджового виробництва. Біологічну активність препарату досліджували методом зважування на 7-денних проростках озимої пшениці, вирощеної в чашках Петрі на однаковій суміші для вирощування. Контрольний зразок суміші для вирощування готували на водопровідній кип'яченій воді.

Результати та обговорення: отримані дані достовірно підтверджують певний рістстимулюючий вплив досліджених зразків препаратів. Обидва сорти пшениці проявили практично однакову силу схожості, яка на 23 % перевищувала цей показник у контролі. Більш ефективним виявилось не просто вирощування, а замочування насіння пшениці. Отримані проростки були висіяні в ґрунт. Аналіз результатів отриманого врожаю показав деяке збільшення маси колоса частіше за рахунок збільшення кількості повноцінних зерен в ньому. При будь-яких варіантах розведення структурованої води результати збільшення врожайності були практично однакові. Цей феномен може бути пояснений тим, що при розведенні присутні в структурованій воді фулерени продовжують нарощувати свою активність за типом ланцюгової реакції.

При дослідженні продуктивності зерен пшениці різних сортів, оброблених зразками препарату, було відзначено збільшення врожайності обох сортів порівняно з контрольним як мінімум на 10 % (табл. 1) гумінові препарати, приготовані на основі структурованої фулереновмісної води (ФВВ) і БАВ випробовували при розведенні води в 2,3,4 і 5 разів. Враховуючи незначні відмінності в показниках, отриманих на обох сортах, дані наводимо тільки по одному сорту пшениці.

Таблиця 1 – Вплив препарату з фулеренами і БАВ на врожайність пшениці

Умови	Кількість зерен в колосі	Маса 1000 зерен, г	Урожайність, ц/га
Контроль	32 ± 0,5	36,4 ± 3,1	47,9 ± 3
ФВВ+БАВ – 2 рази	36±1,4	37,0 ± 2,5	58,7 ± 3
ФВВ+БАВ – в 3 рази	35 ± 1,5	36,7 ± 2,3	57,3 ± 3
ФВВ+БАВ – в 4 рази	36 ± 1,6	36,5 ± 1,7	56,9 ± 3
ФВВ+БАВ – в 5 раз	35 ± 1,8	36,2 ± 1,9	55,8 ± 3

Отримані в експерименті дані підтверджують не тільки високу біологічну ефективність гуміновмісного препарату, але і регулюючу дію фулереновмісної води, яка стала основою при приготуванні рістстимулюючого препарату.

Збільшення врожайності можна пояснити і присутністю в розчинах продуктів відходів виробництва дріжджів, так як вони містять значну кількість мікроелементів. Дріжджі містять в собі багато вітамінів і мінералів, в тому числі цинк, хром, залізо, магній, фолієву кислоту, біотин і В-вітаміни, так необхідних для росту будь-якого рослинної сировини. (табл. 2)

Таблиця 2 – Вміст у сухій речовині дріжджових відходів мінеральних речовин, мг/кг

Хімічні елементи	Номер зразку			M±m
	1	2	3	
Fe	651,7	668,3	653,1	657,7±6,06
Cu	18,6	18,3	18,5	18,5±0,12
Co	0,05	0,05	0,05	0,05±0,005
Mn	13,2	13,3	13,1	13,2±0,11
Zn	143,0	143,1	142,2	143,0±1,20
K	3067	3080,2	3074,5	3073,9±6,23
Ca	3,78	3,56	3,83	3,72,3±0,12
Mg	1,16	1,17	1,16	1,16±0,007
P	0,21	0,23	0,22	0,22±0,01

З даних таблиці випливає, що продукт, отриманий з відходів хлібних дріжджів на основі штаму *Saccharomyces cerevisiae*, являє собою субстрат, багатий макро- і мікроелементами і в поєднанні з іншими компонентами, введеними до складу препарату, роблять істотне рістстимулюючу дію на прикладі накопичення білка (табл. 3).

У складі «Гумір-1» тільки фулерени, в складі «Гумір» і БАВ у вигляді відходів дріжджового виробництва. З даних таблиці можна зробити висновок про більш активне зростання насіння при обробці їх препаратом, до складу якого вводили і відходи дріжджового виробництва, отриманого з штаму *Saccharomyces cerevisiae*. Проведені експерименти дають підставу припустити про можливість створення цілого ряду рістстимулюючих препаратів при використанні як відомих стимуляторів, так і нових, в тому числі відходів харчових виробництв.

Таблиця 3 – Вміст білка в зразках ярової пшениці при обробці насіння різними методами

Варіант	Вміст білку в зразку яр. пшениці, %
Гумір	14,00
Гумір-1	13,07
Фул. вода	13,05
Мокрий контроль с відходами дріжджів	13,26
Повтор	
Сухий контроль	12,70
Мокрий контроль с відходами дріжджів	12,68
Фул. вода	12,49
Вимпін	12,61
Гумір	12,96
Гумір-1	12,71

Висновки. Застосування гуміновмісних препаратів, приготованих на основі фулереновмісної води і відходів дріжджового виробництва на основі штаму *Saccharomyces cerevisiae*, призводило до збільшення врожайності пшениці в середньому на 10 %. Вирощування насіння ярової пшениці із застосуванням розроблених препаратів на основі фулеренів і відходів дріжджового виробництва (штам *Saccharomyces cerevisiae*) призводило також до збільшення накопичення білка в зрілому насінні.

Література

1. Луговая Н.П. Исследование качественного состава культуральной жидкости, образующейся при производстве дрожжей [Текст] / Н.П. Луговая, И.В. Требухин //Иновационные технологии в пищевой промышленности / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по продовольствию. – Минск, 2015.– С. 310–313.
2. Nout, M. J. R. Encyclopedia of Food Safety 3, 168 (2014).
3. Калинин Ю.К. Углеродсодержащие шунгитовые породы и их практическое использование: Дис..док. тех. наук.– М. – 2002. – 154 с.
4. Рысьев О.А. Шунгит – камень здоровья.– СПб:ТЕССА – 2001.– 128 с.
5. Далматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение – СПб.:СПбГПУ. – 2003 – 344 с.
6. Андриевский Г.В., Ключков В.К. Гидратированные фуллерены как универсальные биоантиоксиданты и роль в этом особых упорядоченных структур воды. //Сб. Тезисов УП Междун. Симп. «Биологические механизмы старения». Харьков. – 2006. – С. 91–92.
7. Пиотровский Л.Б., Киселев О.И. Фуллерены в биологии. Санкт-Петербург. 2005. – 256 с.
8. Salam, A.M.; Quave, C.L. Opportunities for plant natural products in infection control. *Curr. Opin. Microbiol.* 2018, 45, 189–194.
9. Моргун В.В., Яворська В.К., Драговоз І.В. Проблема регуляторів росту у світі та її вирішення в Україні //Фізіологія і біохімія культурних рослин. – 2002.– 34, №5. – С. 371–376.
10. Нечаев, А. . Пищевая химия / А.П. Нечаев [и др.]. – 6-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Гиорд, 2015. – 672 с.

11. Physiological Response of Wheat to Foliar Application of Zinc and Inoculation with some Bacterial Fertilizers. Ebrahim, Mohsen K. H.; Aly, Magda M. Botany Department, Faculty of Science, Tanta University, Tanta, Egypt. Journal of Plant Nutrition (2004), 27(10), 1859–1874.

12. Trie K., Nakamura Y., Ohigashi H., Tokuyama H., Yamago S., Nakamura E. // Biosci. Biotechnol. Biochem. 1996. – 60. – P. 1359–1365.

Bibliography (transliterated)

1. Lugovaja N.P. Issledovanie kachestvennogo sostava kul'tural'noj zhidkosti, obrazujushhejsja pri proizvodstve drozhzhej [Tekst] / N.P. Lugovaja, I.V. Trebuhin //Innovacionnye tehnologii v pishhevoj promyshlennosti / Nauch.-prakt. centr Nac. akad. nauk Belarusi po prodovol'stviju. – Minsk, 2015.– P. 310–313.

2. Nout, M. J. R. Encyclopedia of Food Safety 3, 168 (2014).

3. Kalinin Ju.K. Uglerodsoderzhashhie shungitovyje porody i ih prakticheskoe ispol'zovanie: Dis..dok. teh. nauk.– M. – 2002. – 154 p.

4. Rys'ev O.A. Shungit – kamen' zdorov'ja.– SPb:TESSA – 2001. – 128 p.

5. Dalmatov V.Ju. Ul'tradispersnye almazy detonacionnogo sinteza. Poluchenie, svojstva, primenenie – SPb.:SPbGPU. – 2003 – 344 p.

6. Andrievskij G.V., Klochkov V.K. Gidratirovannye fullereny kak universal'nye bioantioksidanty i rol' v jetom osobyh uporjadochennyh struktur vody. //Sb. Tezisev UP Mezhdun. Simp. «Biologicheskie mehanizmy starenija». Har'kov. – 2006. – P. 91–92.

7. Piotroskij L.B., Kiselev O.I. Fullereny v biologii. Sankt-Peterburg. 2005. – 256 p.

8. Salam, A.M.; Quave, C.L. Opportunities for plant natural products in infection control. Curr. Opin. Microbiol. 2018, 45, 189–194.

9. Morgun V.V., Javors'ka V.K., Dragovoz I.V. Problema reguljatoriv rosta u sviti ta i'i' vyrishennja v Ukrai'ni //Fiziologija i biohimija kul'turnyh roslyn. – 2002.– 34, №5. – P. 371–376.

10. Nechaev, a. P. Pyshevaja hymja / A. P. Nechaev [y dr.]. — 6-e yzd. pererab. t dop. – SPb.: Gyord, 2015. – 672 p.

11. Physiological Response of Wheat to Foliar Application of Zinc and Inoculation with some Bacterial Fertilizers. Ebrahim, Mohsen K. H.; Aly, Magda M. Botany Department, Faculty of Science, Tanta University, Tanta, Egypt. Journal of Plant Nutrition (2004), 27(10), 1859–1874.

12. Trie K., Nakamura Y., Ohigashi H., Tokuyama H., Yamago S., Nakamura E. // Biosci. Biotechnol. Biochem. 1996. – 60. – P. 1359–1365.

УДК 634.1:634.037.104

Кричковська Л.В., д.б. н., проф., Лисак П.Ю., аспірант,
Дубоносов В.Л., старший викладач, Грицаєнко Ю.А., аспірант

ЗАСТОСУВАННЯ НАНО І БІОТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИРОВИНИ ПРИ СТВОРЕННІ ПРЕПАРАТІВ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Стаття присвячена розгляду питання про можливість застосування фуллереновмісної води в складі гуміновмісних ростостимулюючих препаратів для сільського господарства з додаванням відходів дріжджового виробництва. Зовсім недавно проблеми економіки та екології сприймали як протилежні. В даний час виникла необхідність взаємообумовленого і взаємовигідного поєднання економічних і екологічних інтересів, що стало основою для проведення даного дослідження. Аналіз стічних вод підприємства,

що виробляє дріжджі показує наявність великої кількості хімічних і органічних речовин, які становлять певну небезпеку для навколишнього середовища, але представляє корисність після переробки відходів для використання в сільському господарстві. Найбільша кількість речовин знаходиться у відходах, після етапу виробництва чистої культури. В експерименті показано, що застосування структурованої води в поєднанні з біологічно активними відходами виробництва хлібних дріжджів, отриманими на основі штаму *Saccharomyces cerevisiae* збільшують врожайність зернових культур. Виходячи зі встановленого факту широкого і універсального спектра біологічної активності водно-вуглецевої структури гідратованих фулеренів, за даними патентної та науково-технічної літератури, вони широко не випробовувалися як регулятори росту рослин. Нами буде досліджено взаємодію речовин зі структурованою фулеренами водою, досліджено вплив поверхнево-активних речовин на утворення та стабільність емульгованих гуматів з плівко утворювачами, адгезивні властивості компонентів, вплив концентрованої бродильної рідини дріжджів відсепарованої після стадії вирощування чистої культури хлібопекарських дріжджів, випробувано вплив як фулереноподібної структури-шунгіту природного походження так і гідратованих фулеренів - високостабільних дрібнодисперсних водних розчинів нативних фулеренів (мають властивості ліофобних молекулярно-колоїдних систем) на врожайність зернових, захист вегетуючих рослин. Результатом роботи буде обґрунтування принципів методології застосування наноструктурних речовин для використання в біотехнологіях багатофункціональних високоефективних препаратів для сільського господарства з біологічно активними добавками.

Ключові слова: фулерени, шунгіт, гідратовані фулерени, ростостимулюючі препарати, відходи дріжджового виробництва, бродильна рідина, гумінові речовини.

Кричковская Л.В., д.б.н., проф., Лысак П.Ю., аспирант,
Дубонос В.Л., старший преподаватель, Грицаенко Ю.А., аспирант

ПРИМЕНЕНИЕ НАНО И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ ПРИ СОЗДАНИИ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Статья посвящена рассмотрению вопроса о возможности применения фуллерен-содержащей воды в составе гуминосодержащих ростостимулирующих препаратов для сельского хозяйства с добавлением отходов дрожжевого производства. Совсем недавно проблемы экономики и экологии воспринимали как противоположные. В настоящее время возникла необходимость взаимообусловленного и взаимовыгодного сочетания экономических и экологических интересов, что явилось основой для проведения данного исследования. Анализ сточных вод предприятия, производящего дрожжи показывает наличие большого количества химических и органических веществ, которые представляют определенную опасность для окружающей среды, но представляет полезность после переработки отходов для использования в сельском хозяйстве. Наибольшее количество веществ находится в отходах, после этапа производства чистой культуры. В эксперименте показано, что применение структурированной воды в сочетании с биологически активными отходами производства хлебных дрожжей, полученными на основе штамма *Saccharomyces cerevisiae* увеличивают урожайность зерновых культур. Исходя из установленного факта широкого и универсального спектра биологической активности водно-углеродной структуры гидратированных фуллеренов, по данным патентной и научно-технической литературы, они широко не испытывались как регуляторы роста растений. Нами будет исследовано взаимодействие веществ со структурированной фуллеренами водой, исследовано влияние поверхностно-активных веществ на образование и стабильность емульгированных гуматов с пленкообразователями, адгезивные свойства компонентов, влияние концентрированной бродильной жидкости дрожжей

отсепарированной после стадии выращивания чистой культуры хлебопекарных дрожжей, испытано влияние как фуллереноподобной структуры – шунгита природного происхождения так и гидратированных фуллеренов – высокостабильных мелкодисперсных водных растворов нативных фуллеренов (имеют свойства лиофобных молекулярно-коллоидной систем) на урожайность зерновых, защиту вегетирующих растений. Результатом работы будет обоснование принципов методологии применения наноструктурных веществ для использования в биотехнологиях многофункциональных высокоэффективных препаратов для сельского хозяйства с биологически активными добавками.

Ключевые слова: фуллерены, шунгит, гидратированные фуллерены, ростостимулирующие препараты, отходы дрожжевого производства, бродильная жидкость, гуминовые вещества.

Krichkovskaya L.V., Lysak P.Y., Dubonosov V.L., Gritsayenko Y.A.

THE USE OF NANO AND BIOTECHNOLOGICAL RAW MATERIALS IN THE CREATION OF DRUGS FOR AGRICULTURE

The article is devoted to the consideration of the possibility of using fullerene-containing water as part of humic growth-stimulating preparations for agriculture with the addition of yeast production waste. More recently, the problems of the economy and the environment were perceived as opposite. Currently, there is a need for a mutually dependent and mutually beneficial combination of economic and environmental interests, which was the basis for this study. The analysis of the wastewater of the yeast-producing enterprise shows the presence of a large number of chemical and organic substances that pose a certain danger to the environment, but are useful after processing waste for use in agriculture. The largest number of substances is found in waste, after the stage of production of pure culture. The experiment shows that the use of structured water in combination with biologically active waste from the production of bread yeast obtained on the basis of the *Saccharomyces cerevisiae* strain increases the yield of grain crops. Based on the established fact of a wide and universal spectrum of biological activity of the water-carbon structure of hydrated fullerenes, according to patent and scientific and technical literature, they have not been widely tested as plant growth regulators. We will investigate the interaction of substances with water structured with fullerenes, the effect of surfactants on the formation and stability of emulsified humates with film-forming agents, the adhesive properties of the components, the effect of concentrated yeast fermentation liquid separated after the stage of growing a pure culture of baking yeast, the effect of both a fullerene-like structure – shungite of natural origin and hydrated fullerenes – highly stable finely dispersed aqueous solutions of native fullerenes (have the properties of lyophobic molecular colloidal systems) on grain yield, protection of vegetative plants. The result of the work will be the substantiation of the principles of the methodology for the application of nanostructured substances for use in biotechnologies of multifunctional highly effective drugs for agriculture with biologically active additives.

Keywords: fullerenes, shungite, hydrated fullerenes, growth-stimulating drugs, yeast production waste, fermentation liquid, humic substances.

Масалітіна Н.Ю., к.техн.н, доцент, Близнюк О.М., д.техн.н, професор,
Белінська А.П., к.техн.н., доцент, Варанкіна О.О., к.техн.н., доцент,
Кричковська Л.В., д.біол.н., професор

ДОСЛІДЖЕННЯ АМІЛОЛІТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ КУЛЬТУРАЛЬНОЇ
РІДИНИ В БІОТЕХНОЛОГІЇ СИМБІОТИЧНИХ КУЛЬТУР
MEDUSOMYCES GISEVII ТА *ORYZAMYCES INDICI*

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: симбіонт *Medusomyces Gisevii*, симбіонт *Oryzomyces Indici*, чайний гриб, культуральне середовище, культивування, метаболіти, амілолітична активність.

Вступ

Дисбіотичні порушення якісного і кількісного складу мікрофлори організму і її функцій, викликані різними причинами, як і раніше залишаються однією з провідних і найбільш важко вирішуваних проблем сучасної медицини. Порушення балансу мікробної екосистеми кишечника викликає зниження антагоністичної і метаболічної активності мікроорганізмів, що проявляється в порушенні травлення і всмоктування їжі, синтезу вітамінів, ферментів, амінокислот, зниження загальної резистентності та розвитку запальних процесів. В результаті цього виникають вторинні ускладнення, серед яких на перший план виступають порушення імунітету і метаболізму [1–3].

В останні роки серед різноманітних засобів боротьби з дисбактеріозом пріоритет віддається пробіотичним препаратам нового покоління. Саме тому для створення подібних препаратів принципове значення має підбір екологічно чистої, нешкідливої та недорогой сировини, яка містить речовини, що володіють як пробіотичною, так і широкою патогенетичною дією. В цьому відношенні особливу увагу привертає природний мікробний симбіонт *Medusomyces Gisevii* (чайний гриб) та *Oryzomyces Indici* (рисовий гриб), зокрема як їх зооглея, так і культуральна рідина *Medusomyces gisevii* та *Oryzomyces Indici*, чий багатий, полікомпонентний склад цілком може забезпечити вищевказані вигоди. Наявність в структурі зооглеї харчових волокон бактеріальної целюлози та висока концентрація біологічно активних речовин потенційно можуть забезпечити пробіотичний ефект [4–6]. Присутні в зооглеї у великій кількості оцтовокислі бактерії і дріжджі можуть бути активаторами неспецифічної і імунобіологічної реактивності організму. Клітинні стінки дріжджів є найсильнішим імуномодулятором, а оцтовокислі бактерії *Gluconacetobacter xylinus* виробляють гетерополісахарид ацетоксан, який посилює опірність організму до бактеріальних і вірусних інфекцій [7–10].

Крім того, в останні роки розширюються можливості використання мікроорганізмів як біотехнологічних джерел промислово важливих ферментів. Зокрема амілази привертають увагу дослідників завдяки їх технологічній важливості й економічній вигідності. Амілази становлять близько 30 % світової продукції ферментів. Вони характеризуються широким спектром застосування в різних галузях, в тому числі, таких як клінічна, медична і аналітична хімія, фармацевтична, промисловість. Разом із ліпазами і/або протеазами, амілази можуть бути використані для лікування травних розладів, при панкреатитах, циститних фіброзах, діабеті типу I і/або типу II [4, 11]. На сьогодні за ко-

рдоном описано близько 200 поліферментних лікарських засобів, що застосовують для поліпшення травлення, зокрема при диспепсії, гастриті, діареї. Наприклад, препарат сомілаза, який містить ліполітичний і амілолітичний ферменти і використовується для поліпшення травлення. Ефективну лікувальну й лікувально-профілактичну дію справляють засоби, до складу яких входить амілаза, і які використовують у стоматології. Культуральна рідина *Medusomyces Gisevii* в залежності від субстрату живильного середовища може використовуватися як функціональний напій для профілактики та лікування широкого спектра шлунково-кишкових та інших захворювань [4–6, 12].

Відомо, що продуцентами амілаз є мікроміцети (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*) і бактерії (*Bacillus*). В ході дослідження культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici*, які представляють собою симбіотичні культури, що складаються з різних видів дріжджів, оцтовокислих та лактобактерій, виявлено високу амілолітичну активність, що дозволяє розглядати їх як перспективні джерела амілази [4, 13, 14].

Для першого етапу дослідження на основі теоретичних передумов до створення ефективних пробіотичних препаратів в якості сировини були обрані природні мікробні симбіонти *Medusomyces Gisevii* (чайний гриб) та *Oryzomyces Indici*, з яких готувалася експериментальна серія біологічно активної субстанції.

Medusomyces Gisevii є симбіотичне співтовариство мікроорганізмів, що складається переважно з різних видів бактерій і дріжджів. При цьому дріжджі і оцтовокислі бактерії вступають в симбіотичні відносини вже в першу добу спільного культивування, використовуючи в життєдіяльності свої метаболіти [1–3, 15]. Оцтово-кислотні бактерії (*Acetobacter xylinum*, *Acetobacter aceti*, *Acetobacter pasteurianus*, *Gluconobacter oxydans*) та дріжджі (*Saccharomyces sp.*, *Zygosaccharomyces sp.*, *Torulopsis sp.*, *Pichia sp.*, *Bre anomyses sp.*) є основними мікроорганізмами, що представляють симбіотичне співтовариство чайного гриба. Варіація його складу може бути пов'язана з географічними, кліматичними та культурними умовами, а також залежить від типів диких дріжджів і бактерій, які існують локально [1–4].

Полікультура *Oryzomyces Indici* представляє собою асоціативний консорціум різних таксономічних груп мікроорганізмів *Zygosaccharomyces fermentati Naganishi*, *Pichia membranaefaciens Hansen*, *Lactobacillus paracasei subsp. paracasei*, *Leuconostoc mesenteroides subsp. dextranicum*, *Acetobacter aceti*. Саме така комбінація мікроорганізмів дозволяє отримувати культуральну рідину шляхом зброджування вуглеводних субстратів, яка максимально збагачена біологічно цінними речовинами. Це досягається за рахунок того, що впродовж еволюції мікроорганізми консорціуму «навчилися» асимілювати продукти метаболізму одне одних. Крім того, продукти метаболізму *Leuconostoc mesenteroides subsp. Dextranicum* та *Acetobacter Aceti* відповідають за формування зооглеї в тому вигляді в якому вона є й виконують захисну функцію [3–5].

Мета та основні задачі дослідження

У даній роботі об'єктами дослідження була культуральна рідина *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici*. Предметом дослідження – амілолітична активність та фізико-хімічні показники культуральної рідини симбіонтів. Метою роботи є визначення оптимальних умов життєдіяльності симбіотичних культур для синтезу амілолітичних ферментів. Для досягнення мети були вирішені наступні задачі: визначити показники активної та титрованої кислотності; дослідити приріст біомаси в залежності від типу субстрату; вивчити вплив температури на життєдіяльність консорціуму мікроорганізмів *Oryzomyces Indici* та *Medusomyces Gisevii*; в лабораторних умовах дослідити амілолітичну активність *Oryzomyces Indici* та *Medusomyces Gisevii* у різних середовищах культиви-

вування.

Матеріали та методи досліджень

Дослідження виконані в лабораторних умовах на відкаліброваному сертифікованому обладнанні з використанням стандартизованих реактивів і загальноприйнятих методик.

Видовий склад *Medusomyces Gisevii* дуже різноманітний і залежить від умов, місця і часу культивування. Складовими частинами симбіонту *Medusomyces Gisevii* є: культуральна рідина, зооглея (лат. *zoogloea* – біоценоз, колонії мікроорганізмів що мають загальну гелеподібну або слизову капсулу), мезоглея (наповнена водою сполучна тканина, основу якої складає білок колаген) та осад.

Культуральна рідина складається з поживних субстратів, продуктів життєдіяльності мікроорганізмів і окремих бактерій, які перемішуються в об'ємі за рахунок дифузії, тому в ній містяться органічні і неорганічні кислоти, білки, ліпіди, вуглеводи, вітаміни, ферменти, пігменти, нуклеїнові кислоти, азотисті основи, етанол та ін. Спектр органічних кислот дуже широкий, і в його складі можна виділити, перш за все, оцтову, глюконову, лимонну, щавлеву, молочну, та яблучну кислоти. Завдяки тому, що в процесі культивування симбіонту живильне середовище насичується етанолом і оцтовою кислотою, створюються умови для формування природного захисту симбіотичного спільноти від обмінення сторонньою мікрофлорою.

У культуральній рідині визначається активність амілаз, кислих і нейтральних протеаз, а також високий вміст вітамінів С і Р, які проявляють антиоксидантні властивості [5, 6].

Культивування симбіонту здійснювалося в лабораторних умовах на рідкому поживному середовищі, приготовленому наступним чином: в киплячу воду об'ємом 1 л додавали 100 г цукру до повного його розчинення, потім в цей розчин на 20 хвилин поміщали марлевий мішечок, що містить 10 г чорного чаю, після чого охолоджували його природним шляхом до кімнатної температури (24–26 °С). У скляну ємність з отриманим середовищем вносили культуру *Medusomyces Gisevii* в кількості 1% від загального об'єму живильного середовища (10 мл). Ємність накривали чотиришаровою марлевою серветкою, що забезпечує доступ кисню, необхідного для нормальної життєдіяльності бактерій симбіонту. Культивування проводили в стаціонарному стані за температури 24–26 °С.

Культуральну рідину полікультури *Oryzomyces Indici* отримували аналогічно. Як культуральне середовище для *Oryzomyces Indici* використовували 10 % цукровий розчин з додаванням сухого винограду, а також сироватку з додаванням сухого винограду та суміш води з молоком (10 % молока).

Оскільки основним продуктом ферментації при культивуванні *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici* являються органічні кислоти, то контроль розвитку культури здійснювався за величиною титруємої кислотності. Активна кислотність визначалася потенціометричним методом на стаціонарному рН-метрі. Вимірювання загальної кислотності проводили титруванням стандартним розчином NaOH (0,1 N) в присутності фенолфталеїну. Для визначення амілолітичної активності використовували метод, який заснований на гідролізі крохмалю ферментами амілолітичного комплексу до декстринів різної молекулярної маси в нашій модифікації [3–6].

Результати дослідження

В якості досліджуваного об'єкта виступала культуральна рідина *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici*. Були отримані зразки на різних етапах культивування, яке

здійснювали протягом чотирьох місяців при різній температурі за класичною методикою на живильному середовищі. Культуральна рідина складається з кип'яченої питної води, сахарози (5–15 %) та екстракту чорного чаю (0,1 %) для *Medusomyces Gisevii*. *Oryzomyces Indici* було досліджено у різних середовищах культивування. Для зразка № 1 було обрано середовище – вода «Роганська» без газу з додаванням 5 % сахарози та сухого винограду, для зразку № 2 – вода «Рай Оленівка» з додаванням 5 % сахарози та сухого винограду, для зразку № 3 – сироватка з додаванням сухого винограду, для зразку № 4 – вода з додаванням 5 % сахарози та 10 % молока.

Зважаючи на те, що кислотність є однією з найважливіших ознак, які характеризують стан життєдіяльності досліджуваної культури, та вирішальною з точки зору органолептичних якостей, за узагальнений критерій закінчення стадії бродіння вибрано показник кислотності при контрольованому зниженні вмісту сухих речовин.

В процесі бродіння відбуваються складні біохімічні перетворення, головними з яких є ферментативний каталіз. Встановлено, що початковою стадією зброджування суслу консорціумом *Medusomyces Gisevii* є інверсія сахарози до глюкози та фруктози під дією інвертази дріжджів з наступним спиртовим зброджуванням одержаного інвертного цукру в етанол, діоксид вуглецю та ін. продукти. В подальшому оцтовокислі бактерії споживають етанол з утворенням оцтової кислоти [1–4].

Загальну кислотність культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* визначали для зразків № 1 (концентрація сахарози 10 %), № 2 (концентрація сахарози 5 %), № 3 (концентрація сахарози 5 %) та № 4 (концентрація сахарози 15 %) протягом сорока діб. Залежність рН від часу культивування зразків № 1, № 2, № 3 та № 4 представлено на рис. 1.

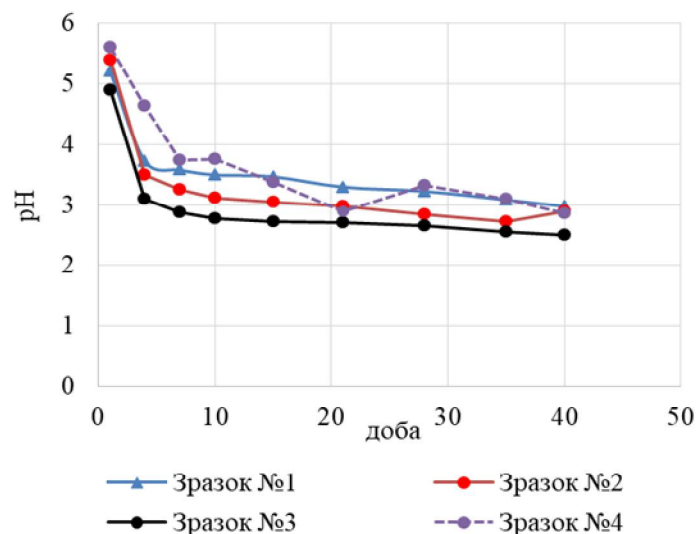


Рисунок 1 – Залежність рН від часу культивування *Medusomyces Gisevii*:

1 – середовище на основі води «Моршанська»; 2 – середовище на основі води «Рай-Оленівка»; 3 – середовище на основі сироватки; 4 – середовище на основі води (90 %) та молока (10 %)

На рис. 1 показані криві зміни рН від часу культивування *Medusomyces Gisevii*. Видно, що для всіх зразків протягом всього часу культивування *Medusomyces Gisevii* спостерігається зниження величин рН, що обумовлено накопиченням в культуральному середовищі органічних кислот, і перш за все, оцтової кислоти.

Загальна кислотність культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* на протязі 40 діб плавно зменшувалась в результаті синтезу продуктів життєдіяльності *Medusomyces*

Gisevii для всіх досліджуваних зразків. Для зразків №2 та №3 виявлено більш різке зниження рН на четверту добу культивування, порівняно із для зразками №1 та №4. Це свідчить про те, що оптимальна концентрація сахарози для нарощування біомаси *Medusomyces Gisevii* становить 5 %, оскільки зростання концентрації кислот відбувається швидше із збільшенням маси симбіонту.

Визначення активної кислотності культурального середовища *Oryzomyces Indici* проводили протягом восьми діб культивування. Залежність рН від часу культивування зразків № 1, № 2, № 3 та № 4 представлено на рис. 2.

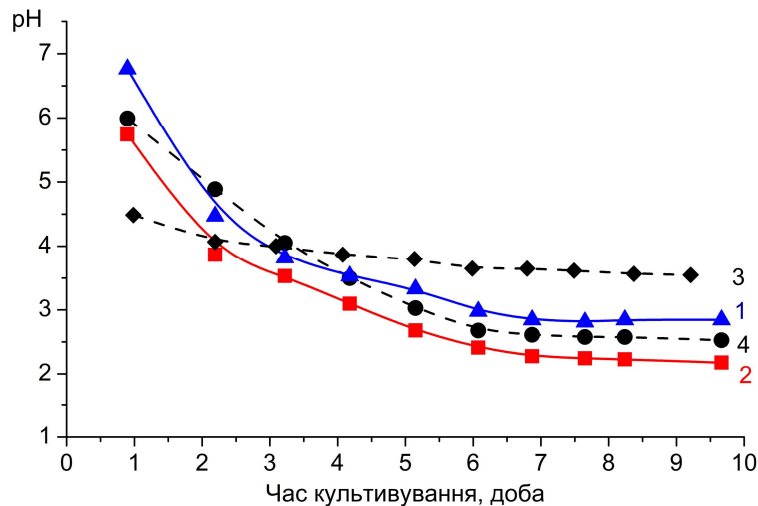


Рисунок 2 – Залежність рН від часу культивування *Oryzomyces indicі*:

- 1 – середовище на основі води «Моршанська»; 2 – середовище на основі води «Рай-Оленівка»;
3 – середовище на основі сироватки; 4 – середовище на основі води (90 %) та молока (10 %)

Активна кислотність рисового гриба на протязі семи діб плавно зменшувалась в результаті синтезу продуктів життєдіяльності *Oryzomyces Indici*. Таке активне накопичення кислот обумовлено розвитком ацидофільних мікроорганізмів (молочнокислих і оцтовокислих бактерій), що здатні ферментувати вуглеводи з утворенням органічних кислот.

Для нормального росту і розвитку полікультури потрібне живильне середовище, яке могло б задовольняти потреби симбіотичної спільноти.

Для вибору оптимальних термінів культивування для нарощування достатнього об'єму біомаси зооглеї дослідження проводились в десятикратних повторях. У 5 ємностях об'ємом 1 л зі стандартною живильним середовищем одночасно засівали культуру чайного гриба за стандартною методикою [3–5].

Основними критеріями при виборі оптимальних термінів культивування зооглеї були її фізичні і мікроскопічні характеристики: маса і товщина зооглеї, сформованість матриці, що оцінювалися візуально по щільності (частоті) целюлозних волокон в полі зору мікроскопа, а також загальна кількість життєздатних мікроорганізмів консорціуму, що знаходяться безпосередньо в тілі зооглеї. Облік результатів проводили на 2, 6, 15, 20 та 27 добу культивування. Зооглею використовували для всіх видів досліджень тільки з однієї ємності, щоб уникнути додаткової мікробної контамінації.

В дослідженні *Medusomyces Gisevii* використовувалась сахароза різної концентрації для виявлення залежності маси зооглеї від концентрації сахарози. Залежність приросту біомаси від концентрації сахарози представлена на рис. 3.

Результати дослідження, що приведені на рис. 3, свідчать, що концентрація са-

харози 5 % є найбільш доцільною, оскільки дає максимальний приріст маси зооглеї *Medusomyces Gisevii*. Подальше збільшення концентрації сахарози зменшує приріст маси. За концентрації 15 % спостерігався мінімальний приріст маси зооглеї.

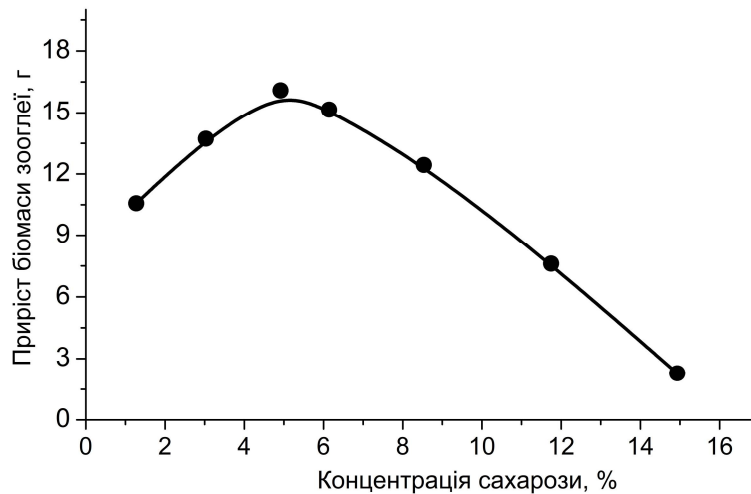


Рисунок 3 – Залежність приросту біомаси *Medusomyces Gisevii* від концентрації сахарози

В результаті дослідження було встановлено, що *Oryzomyces Indici* розвивається не тільки в середовищах, що містять водний розчин сахарози, але й в середовищах на молочній основі, тобто таких, що містять лактозу. Було встановлено, що внесення у поживне середовище лактози (концентрація молока 10 %) сприяє прискореному зростанню біомаси. Це можна використовувати на стадії отримання інокуляту.

Залежність приросту біомаси від концентрації сахарози представлено на рис. 4.

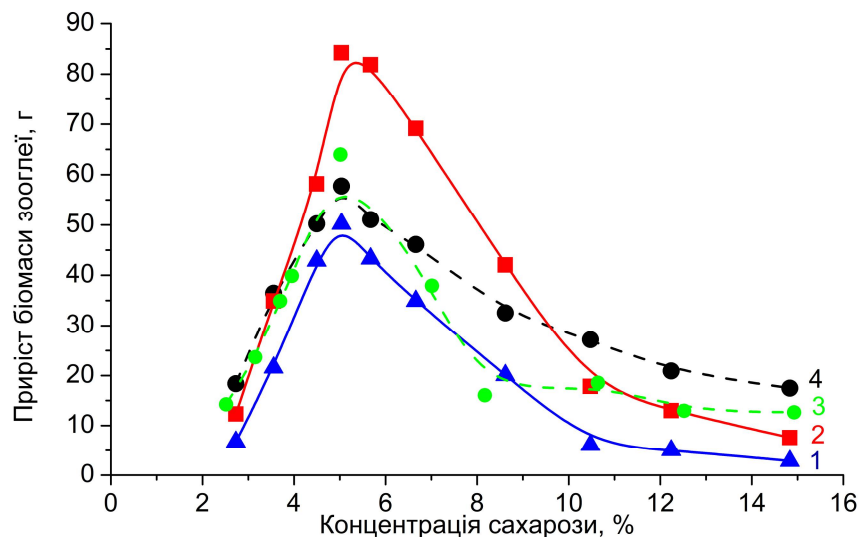


Рисунок 4 – Залежність приросту біомаси зооглеї *Oryzomyces Indici* від концентрації сахарози:
 1 – середовище на основі води «Роганська»; 2 – середовище на основі води «Рай-Оленівка»;
 3 – середовище на основі сироватки; 4 – середовище на основі води (90 %) та молока (10%)

На сироватці приріст біомаси становить в середньому з 22 г до 91 г. В молоці з 32 г – до 84 г. Це пов'язано з наявністю в зооглеї молочнокислих бактерій. Але сам гриб стає дрібним і пухким. На воді приріст біомаси становить з 34 г – до 36 г на воді «Ро-

ганська» та з 15 г – до 36 г на воді «Рай-Оленівка». На воді максимальна маса спостерігається на четверту добу культивування; у сироватці маса зростає на сьому добу; у молоці максимальна маса становить на третю добу культивування.

При дослідженні впливу води з різним хімічним складом, відібраної з різних джерел та обробленої різними способами, на процес зброджування суслу культурою *Medusomyces Gisevii* встановлено загальну тенденцію негативного впливу жорсткості на динаміку бродіння, що свідчить про необхідність підготовки води для культивування консорціуму.

Було порівняно два зразки води («Роганська» та «Рай-Оленівка»), на якій проводилось культивування досліджуваного консорціума та виявлено, що гриб має кращі фізико-хімічні та органолептичні показники на воді «Рай-Оленівка». Оскільки вода «Рай-Оленівка» – слабомінералізована, гідрокарбонатна, складного катіонного складу (в основному магнієво-кальцієво-натрієва), рН = 7,3, сухий залишок 0,025 %, твердість 6,2, містить кремнієву кислоту і органічні речовини, які сприятливо впливають на біосинтетичні та метаболічні процеси рисового гриба *Oryzomyces Indici*.

Оптимальна концентрація сахарози для нарощування біомаси *Oryzomyces Indici* становить 5 %. Однак зростання пригнічується за умови зростання концентрації вуглеводів в середовищі.

Проведені дослідження впливу температури на життєдіяльність *Medusomyces Gisevii* показали, що підвищення температури від 17 до 30°C при культивуванні призводить до зниження рівня активної кислотності в обернено пропорційній залежності. Зниження рівня активної кислотності свідчить про утворення таких метаболітів, як оцтова, янтарна, глюконова, молочна та яблучна кислоти. Концентрація кислот зростає прямо пропорційно підвищенню температури культивування в досліджуваному діапазоні.

Температурним оптимумом для симбіотичної культури *Oryzomyces Indici* є значення 25 ± 5 °C. Підвищення температури більше 25 °C призводить до часткового термічного лізису дріжджової мікрофлори полікультури. Наслідком чого стає мікробний дисбаланс полікультури, що призводить до змін в кінцевому елементному складі культуральної рідини. Крім того, при подальшому культивуванні полікультура *Oryzomyces Indici* «розпадається» на окремі мікроорганізми. В свою чергу зниження температури від 20 °C до 18 °C призводить до інгібування процесів, що проходять в клітинах мікроорганізмів, що в свою чергу подовжує час культивування. А зниження температури нижче 18 °C призводить до інактивації клітинних процесів окремих мікроорганізмів, що у подальшому веде до загибелі консорціуму мікроорганізмів *Oryzomyces Indici*.

Встановлено, що *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici* симбіотичні культури як аеробних, так і анаеробних мікроорганізмів, то для його нормальної життєдіяльності необхідний доступ до кисню. Це пов'язано з тим, що більшість процесів ферментації, що відбуваються при культивуванні чайного гриба, є аеробними.

На першій стадії розвитку (3–4 добу) *Medusomyces Gisevii* споживає кисень, розчинений у культуральній рідині, а після утворення на поверхні рідини суцільної плівки споживання кисню грибом починає відбуватися з повітря. Якщо не має доступу кисню, гриб не здатний повноцінно розвиватися, він починає газуватися, на ньому може утворюватися цвіль.

При недостатці кисню *Oryzomyces Indici* не здатний повноцінно розвиватися, на ньому може утворюватися цвіль, він стає слизьким та починає спливати.

Визначення амілолітичної активності культуральної рідини полікультур проводили методом, що заснований на гідролізі крохмалю ферментами амілолітичного ком-

плексу до декстринів різної молекулярної маси. Амілолітична активність характеризує здатність амілолітичних ферментів каталізувати гідроліз крохмалю до декстринів і виражається числом одиниць зазначених ферментів в 1 г препарату [6].

За одиницю амілолітичної активності прийнята здатність ферменту при певних значеннях температури, рН та часу гідролізу до декстринів різної молекулярної маси 1 г крохмалю, що становить 30 % крохмалю, введеного в реакцію [6].

Ступінь гідролізу крохмалю (С) визначають за різницею оптичної густини контрольного розчину і розчину, що аналізується. Ступінь гідролізу крохмалю (С) обчислюють за формулою (1):

$$C = 0,1 \cdot (D_1 - D_2) / D_1, \quad (1)$$

де D_1 – оптична густина контрольного розчину; D_2 – оптична густина аналізованого розчину; 0,1 – маса крохмалю, взятого на аналіз, г.

Розрахунок амілолітичної активності в пробі (АС) обчислювали за формулою (2):

$$AC = 1000 \cdot (5,885 \cdot C + 0,001671) / \Pi, \quad (2)$$

де 5,885; 0,001671 – коефіцієнти розрахункового рівняння, що отримані при математичній обробці експериментальних даних залежності маси гідролізованого крохмалю від маси ферменту, взятого для аналізу в перерахунку на 1 с дії ферменту; С – коефіцієнт, що характеризує ступінь гідролізу крохмалю; Π – маса ферментного препарату з урахуванням розведення, яка взята для випробування, мг; 1000 – коефіцієнт перерахунку мг в г.

Результати визначення амілолітичної активності культуральної рідини *Medusomyces Gisevii*, представлені в табл. 1. Порівняння амілолітичної активності досліджуваних зразків культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* представлено на рис. 5.

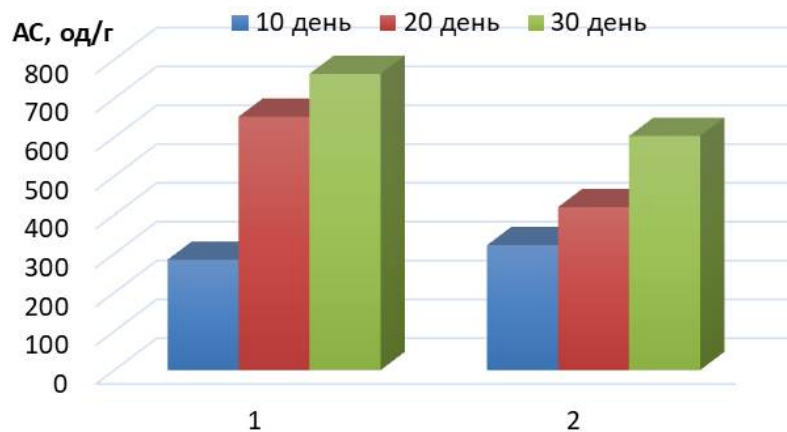


Рисунок 5 – Порівняння амілолітичної активності досліджуваних зразків культуральної рідини *Medusomyces Gisevii*: 1 – зразок № 1, 2 – зразок № 2

Дослідження динаміки зміни амілолітичної активності культуральної рідини чайного гриба свідчить, що амілолітична активність закономірно зростає з десятої по тридцять добу культивування до 763,5 од/г (зразок № 1) та 603,6 од/г (зразок № 2).

Таблиця 1 – Результати дослідження амілолітичної активності культуральної рідини *Medusomyces Gisevii*

Термін культивування	Зразок № 1			Зразок № 2			Контрольна проба
	D ₂	C	АС, од/г	D ₂	C	АС, од/г	D ₁
10	0,25	0,0218	259,9	0,23	0,0281	334,4	0,32
	0,23	0,0281	334,4	0,23	0,0281	334,4	
	0,25	0,0218	259,9	0,24	0,025	297,6	
Сумарне значення Σ	0,243	0,0239	284,7	0,23	0,0271	322,13	
20	0,16	0,05	591,8	0,2	0,0375	444,7	
	0,13	0,0594	702,2	0,19	0,0406	481,5	
	0,14	0,0563	665,4	0,23	0,0281	334,4	
Сумарне значення	0,143	0,0552	653,1	0,206	0,0354	420,2	
30	0,11	0,0656	775,7	0,13	0,059	697,8	
	0,12	0,0625	738,9	0,18	0,044	521,2	
	0,11	0,0656	775,7	0,16	0,05	591,8	
Сумарне значення Σ	0,11	0,0646	763,5	0,156	0,051	603,6	

Амілолітична активність культуральної рідини *Oryzomyces Indici* представлена на рис. 6 для різних середовищ культивування.

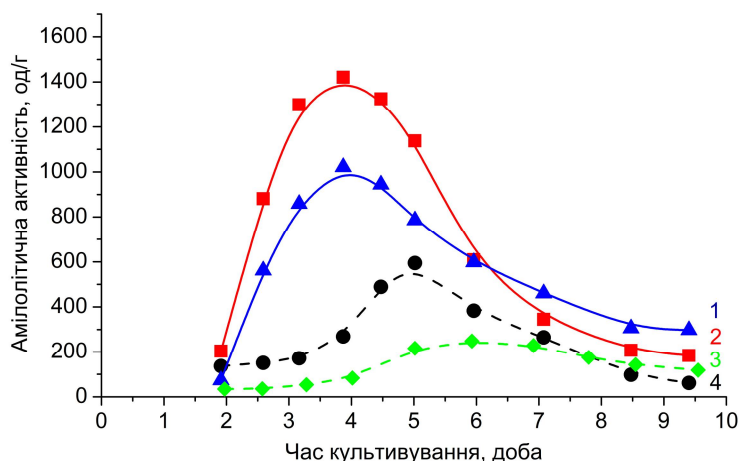


Рисунок 6 – Порівняння амілолітичної активності досліджуваних зразків культуральної рідини *Oryzomyces Indici*: 1 – середовище на основі води «Моршанська», негазована; 2 – середовище на основі води «Рай-Оленівка»; 3 – середовище на основі сироватки; 4 – середовище на основі води (90 %) та молока (10 %)

Результати дослідження, свідчать, що культуральна рідина *Oryzomyces Indici* 1-го і 2-го зразка, де основа культурального середовища складає вода, амілолітична активність зростає з 2-х по 4-ту добу культивування до 941,2 од/г (зразок №1) та 1386,1 од/г (зразок №2), з 5-х по 7 добу культивування АС зменшується до 250,2 од/г (зразок №1)

та 171,47 од/г (зразок №2). Для 3-го зразка, де основа культурального середовища складає сироватка, амілолітична активність починає зростати з 4–5-ї доби культивування до 249,2 од/г, а на 7–8-му добу культивування амілолітична активність зменшується до 171,5 од/г. Для четвертого зразку (культуральне середовище на основі суміші, що містить 90 % води та 10% молока) амілолітична активність зростає з третьої по п'яту добу культивування до 573,9 од/г, а на восьму добу культивування амілолітична активність зменшується до 87,6 од/г.

Висновки

За результатами аналітичного огляду наукової літератури та проведених досліджень фізико-хімічних показників культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici* встановлена оптимальна температура для життєдіяльності симбіонтів яка становить 25–30 °С. Проведені дослідження впливу аеробних умов свідчать, що дефіцит кисню в живильному середовищі може сприяти зниженню дихальної та метаболічної активності симбіонту, що супроводжується пригніченням спільної діяльності мікроорганізмів. Встановлена оптимальна концентрація сахарози для нарощування біомаси *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici*, яка становить 5 %, оскільки зростання біомаси пригнічується із зростанням концентрації вуглеводів в середовищі, концентрація сахарози 15 % та вище не рекомендується для застосування. Дослідження загальної кислотності середовища культивування *Oryzomyces Indici* протягом 7 днів та кислотності середовища культивування *Medusomyces Gisevii* протягом 40 днів показали, що кислотність плавно зменшується в результаті синтезу продуктів життєдіяльності консорціуму. Визначено, що сироватка та середовище культивування вода «Рай-Оленівка» є найбільш доцільним за складом середовищем для нарощування біомаси *Oryzomyces Indici*. Досліджена динаміка зміни амілолітичної активності культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici*. Результати дослідження свідчать про те, що культуральна рідина полікультур проявляє високу амілолітичну активність, що дозволяє вважати інокулят перспективною біотехнологічною сировиною як джерела амілази.

Таким чином, запропонований режим культивування та склад поживних середовищ дозволяє отримати культури *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici* з високими ростовими показниками та одержати продукт високої якості.

Література

1. Goh W.N., Rosma A., Kaur B., Fazilah A., Karim A.A., Rajeev B. Fermentation of black tea broth (Kombucha): I. Effects of sucrose concentration and fermentation time on the yield of microbial cellulose // International Food Research Journal. 2012. Vol. 19 (1). P. 109–117.
2. Lee K.Y., Buldum G., Mantalaris A., Bismarck A. More than meets the eye in bacterial cellulose: biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites // Macromol. Biosci. 2014. Vol. 14 (1). P. 10–32.
3. Рогожин Ю.В., Рогожин В.В. Использование кондуктометрического метода для контроля за продуктивностью *Medusomyces gisevii* // Стратегические направления развития АПК стран СНГ: тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул, 2017. С. 518–520.

4. F. De Filippis, A. D. Troise, P. Vitaglione, and D. Ercolini, Different temperatures select distinctive acetic acid bacteria species and promotes organic acids production during Kombucha tea fermentation // *Food Microbiology*. 2018. Vol. 73. P. 11–16.
5. S. Chakravorty, S. Bhattacharya, A. Chatzinotas, W. Chakraborty, D. Bhattacharya, and R. Gachhui. Kombucha tea fermentation: microbial and biochemical dynamics // *International Journal of Food Microbiology*. 2016. Vol. 220. P. 63–72.
6. E. Ivanisova, K. Menhartova, M. Terentjeva, and L. Godocikova. Kombucha tea beverage: microbiological characteristic, antioxidant activity, and phytochemical composition // *Acta Alimentaria*. 2019. Vol. 48. no. 3. P. 324–331.
7. Жумабекова К.А., Жумабекова Б.К. Получение высокоактивной ассоциации «чайного гриба» из природных штаммов микроорганизмов // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2-11. С. 2374–2376.
8. Chu S., Chen C. Effects of origins and fermentation time on the antioxidant activities of kombucha // *Food Chemistry*. 2006. № 98. P. 502–507.
9. Гладышева Е.К. Изучение биосинтеза бактериальной целлюлозы культурой *Medusomyces Gisevii* J. Lindau на средах с различной начальной концентрацией глюкозы // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2-1. С. 13–17.
10. Добрыня Ю. М., Аванесян С.С., Бондарева Н.И. Динамика амилолитической активности культуральной жидкости *Medusomyces Gisevii* (чайного гриба) в процессе культивирования // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 3. – Режим доступа: <https://scienceeducation.ru/ru/article/view?id=18777>.
11. Battikh H., Bakhrouf A., Ammar E. Antimicrobial effect of Kombucha analogues LWT // *Food Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 47, № 1. – P. 71–77.
12. Jayabalan R., Marimuthu S., Swaminathan K.. Changes in content of organic acids and tea polyphenols during kombucha tea fermentation // *Food Chemistry*. 2007. Vol. 102, №1. P. 392–398.
13. Загребельний Д.Є., Масалітіна Н.Ю., Близнюк О.М. Дослідження біотехнології накопичення метаболітів *Oryzomyces Indici* та впливу їх на організм людини // В кн.: XIV Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців», 01–04 грудня 2020 року / за ред. проф. Є.І. Сокола. Харків : НТУ «ХП», 2020. С. 359.
14. Гугніна Ю.О., Масалітіна Н.Ю., Близнюк О.М. Дослідження біотехнологічних властивостей тибетського гриба // В кн.: XIV Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців», 01–04 грудня 2020 року / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – С. 365.
15. Андрощук Д.Р., Масалітіна Н.Ю. Дослідження біотехнології життєдіяльності природного симбіонту *Oryzomyces Indici* в різних середовищах культивування для її застосування у молочній промисловості // В кн.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХІХ міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020, 28–30 жовтня 2020 р.: Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХП». С. 113.

Bibliography (transliterated)

1. Goh W.N., Rosma A., Kaur B., Fazilah A., Karim A.A., Rajeev B. Fermentation of black tea broth (Kombucha): I. Effects of sucrose concentration and fermentation time on the yield of microbial cellulose // *International Food Research Journal*. 2012. Vol. 19 (1). P. 109–117.
2. Lee K.Y., Buldum G., Mantalaris A., Bismarck A. More than meets the eye in bacterial cellulose: biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites // *Macromol. Biosci.* 2014. Vol. 14 (1). P. 10–32.
3. Rogozhin Yu.V., Rogozhin V.V. Ispolzovanie konduktometričeskogo metoda dlya kontrolya za produktivnostyu *Medusomyces gisevii* // Tr. XVI Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. «Strategičeskie napravleniya razvitiya APK stran SNG». Barnaul, 2017. P. 518–520 (in Russian).
4. F. De Filippis, A. D. Troise, P. Vitaglione, and D. Ercolini, Different temperatures select distinctive acetic acid bacteria species and promotes organic acids production during Kombucha tea fermentation // *Food Microbiology*. 2018. Vol. 73. P. 11–16.
5. Chakravorty S., Bhattacharya S., Chatzinotas A., Chakraborty W., Bhattacharya D., Gachhui R. Kombucha tea fermentation: microbial and biochemical dynamics // *International Journal of Food Microbiology*. 2016. Vol. 220. P. 63–72.
6. E. Ivanisova, K. Menhartova, M. Terentjeva, and L. Godocikova. Kombucha tea beverage: microbiological characteristic, antioxidant activity, and phytochemical composition // *Acta Alimentaria*. 2019. Vol. 48. no. 3. P. 324–331.
7. Zhumabekova K.A., Zhumabekova B.K. Poluchenie vysokoaktivnoj asociacii «čajnogo griba» iz prirodnyh shtammov mikroorganizmov // *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015. № 2-11. P. 2374–2376 (in Russian).
8. Chu S., Chen C. Effects of origins and fermentation time on the antioxidant activities of kombucha // *Food Chemistry*. (2006). № 98. P. 502–507.
9. Gladysheva Ye.K. Izucheniye biosinteza bakterial'noy tsellyulozy kul'turoy *Medusomyces Gisevii* J. Lindau na sredakh s standartnoy kontsentratsiyey glyukozy // *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2015. № 2-1. P. 13–17 (in Russian).
10. Dobrynja J.M., Avanesjan S.S., Bondareva N.I., Timchenko L.D., Rzhepakovskij I.V., Simechjova E.I. Dinamika amiloliticheskoy aktivnosti kul'tural'noy zhidkosti *Medusomyces Gisevii* (čajnogo griba) v protsesse kul'tivirovaniya // *Modern problems of science and education*. 2015. №3 (in Russian).
11. Battikh H., Bakhrouf A., Ammar E. Antimicrobial effect of Kombucha analogues LWT // *Food Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 47, № 1. – P. 71–77.
12. Jayabalan R., Marimuthu S., Swaminathan K. Changes in content of organic acids and tea polyphenols during kombucha tea fermentation // *Food Chemistry*. 2007. Vol. 102, №1. P. 392–398.
13. Zagrebel'niy D.Ê., Masalítina N.Yu., Bliznjuk O.M. Rassmotreniye biotekhnologiy nakopleniya metabolitov *Oryzomyces Indici* i ikh ispol'zovaniya na organizm lyudey // V kn.: KHIV Mezhdunarodnaya nauka-praktika konferents-magnív i aspirantív «Teoreticheskiye i nauchnyye issledovaniya / issledovaniya 2020 goda». prof. Ê.Í. Sokola. Kharkív: NTU «KHPÍ», 2020. P. 359 (in Ukrainian).

14. Gugnina Yu.O., Masalitina N.Yu., Bliznjuk O.M. Rassmotreniye biotekhnologicheskikh vlastnykh svoystv tibetskogo griba // V kn .: KHIV Mezhdunarodnaya nauka-praktichna kon-ferentsiya magistrantiv i aspirantiv «Teoreticheskiye i praktichnyye issledovaniya molodozhi na-ukovtsivnyaya», 01–04 / dekabr' 2020 goda. prof. È.Í. Sokola. - Kharkiv: NTU «KHPI», 2020. P. 365. (in Ukrainian).

15. Androshchuk D.R., Masalitina N.Yu. Doslidzhennya biotekhnolohiyi zhyttyediyal'nosti pryrodnoho simbiontu *Oryzomyces Indici* v riznikh seredovyscha kul'tivuvannya dlya ee za-Stosuvannya u molochniy promislivosti // V kn .: Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: tezy dopovidey KHXXKH mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsyyi MicroCAD-2020, zhovtnya 2020. ch. II. / Za red. prof. Sokola YE.I. Kharkiv: NTU «KHPI». P. 113. (in Ukrainian).

УДК 541.127: 542.943

УДК 579.852.11.222

Масалітіна Н.Ю., к.техн.н, доцент, Близнюк О.М., д.техн.н, професор,
Белінська А.П., к.техн.н., доцент, Варанкіна О.О., к.техн.н., доцент,
Крічковська Л.В., д.техн.н, професор

ДОСЛІДЖЕННЯ АМІЛОЛІТИЧНОЇ АКТИВНОСТІ КУЛЬТУРАЛЬНОЇ РІДИНИ В БІОТЕХНОЛОГІЇ СИМБІОТИЧНИХ КУЛЬТУР *MEDUSOMYCES GISEVII* ТА *ORYZAMYCES INDICI*

На підставі аналізу літературних джерел встановлено, що природні симбіонти *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici* є цінним біотехнологічними об'єктами. Актуальним є пошук способів впливу на нього з метою отримання тих чи інших продуктів його життєдіяльності. На даний час є актуальним пошук мікроорганізмів продуцентів ферментів, в тому числі амілази. Одним з перспективних в цьому плані біооб'єктів є природні мікробні симбіонти *Medusomyces Gisevii* (чайний гриб) і *Oryzomyces Indici*, які завдяки неідентичності мікробіологічного складу та різних умов вирощування можуть мати різний компонентний склад метаболітів. Проведено дослідження амілолітичної активності культуральної рідини *Medusomyces Gisevii* і *Oryzomyces Indici* з різними термінами культивування. Вирощування гриба здійснювалося в лабораторних умовах за класичною методикою. Встановлена оптимальна концентрація сахарози для нарощування біомаси *Medusomyces Gisevii* та *Oryzomyces Indici*, яка становить 5 %. Концентрація сахарози 15 % та вище не рекомендується для застосування через пригнічення зростання біомаси із зростанням концентрації вуглеводів в культуральному середовищі. Встановлено, що дані симбіонти починають проявляти амілолітичну активність вже на 7-8-му добу культивування в стандартному живильному середовищі, середовищі з додаванням 10% молока і середовищі на основі сироватки. З плином часу амілолітична активність підвищується. Однак інтенсивність метаболізму мікроорганізмів, критерієм якої є співвідношення загальної і екзогенної амілази, найбільш виражена на ранніх термінах культивування. Встановлено, що культуральна рідина полікультур проявляє високу амілолітичну активність. Даний факт дозволяє вважати інокулят *Medusomyces Gisevii* і

Oryzomyces Indici перспективною біотехнологічною сировиною як джерела фермента амілази.

Ключові слова: симбіонт *Medusomyces Gisevii*, симбіонт *Oryzomyces Indici*, чайний гриб, культуральне середовище, культивування, метаболіти, амілолітична активність.

Масалитина Н.Ю., к.техн.н., доцент, Близнюк О.Н., д.техн.н., професор,
Белинская А.П., к.техн.н., доцент, Варанкина А.А., к.техн.н., доцент,
Кричковская Л.В., д.техн.н., професор

ИССЛЕДОВАНИЯ АМИЛОЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КУЛЬТУРАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В БИОТЕХНОЛОГИИ СИМБИОТИЧЕСКИХ КУЛЬТУР *MEDUSOMYCES GISEVII* ТА *ORYZAMYCES INDICI*

На основании анализа литературных источников установлено, что природные симбионты *Medusomyces Gisevii* и *Oryzomyces Indici* являются ценными биотехнологическими объектами. Актуальным является поиск способов воздействия на него с целью получения тех или иных продуктов его жизнедеятельности. В настоящее время представляется актуальным поиск микроорганизмов продуцентов ферментов, в том числе амилазы. Одним из перспективных в этом плане биообъектов является природный микробный симбионт *Medusomyces Gisevii* (чайный гриб) и *Oryzomyces Indici*, которые благодаря неидентичности микробиологического состава и различным условиям выращивания могут иметь различный компонентный состав метаболитов. Проведены исследования амилаолитической активности культуральной жидкости *Medusomyces Gisevii* и *Oryzomyces Indici* с различными сроками культивирования. Выращивание гриба осуществлялось в лабораторных условиях по классической методике. Установлена оптимальная концентрация сахарозы для наращивания биомассы *Medusomyces Gisevii* и *Oryzomyces Indici*, которая составляет 5%. Концентрация сахарозы 15% и выше не рекомендуется для применения из-за подавления роста биомассы с ростом концентрации углеводов в культуральной среде. Установлено, что данные симбионты начинают проявлять амилаолитическую активность уже на 7–8-е сутки культивирования в стандартной питательной среде, среде с добавлением 10% молока и среды на основе сыворотки. С течением времени амилаолитическая активность повышается. Однако интенсивность метаболизма микроорганизмов, критерием которой является соотношение общей и экзогенной амилазы, наиболее выражена на ранних сроках культивации. Установлено, что культуральная жидкость поликультур проявляет высокую амилаолитическую активность. Данный факт позволяет считать инокулят *Medusomyces Gisevii* и *Oryzomyces Indici* перспективным биотехнологическим сырьем как источник фермента амилазы.

Ключевые слова: симбионт *Medusomyces Gisevii*, симбионт *Oryzomyces Indici*, чайный гриб, культуральная среда, культивирование, метаболиты, амилаолитическая активность.

Masalitina N.Yu., Bliznjuk O.M., Belinska A.P., Varankina O.O., Krichkovska L.V.

**RESEARCH OF AMYLOLYTIC ACTIVITY OF CULTURAL
LIQUIDS IN BIOTECHNOLOGY OF SYMBIOTIC CROPS
*MEDUSOMYCES GISEVII AND ORYZAMYCES INDICI***

Based on the literature review found that the natural symbionts *Medusomyces gisevii* and *Oryzomyces indici* biotechnology are a valuable objects. It is urgent to find ways to impact on it in order to obtain these or other products of its life activity.

At present, it is urgent to search for microorganisms producing enzymes, including amylase. One of the most promising in terms of biological objects is a natural microbial symbiont *Medusomyces Gisevii* (tea fungus) and *Oryzomyces Indici*, which, thanks to the not identical, microbiological composition and different growing conditions may have a different composition of metabolites. Studies of the amylolytic activity of the culture liquid *Medusomyces Gisevii* and *Oryzomyces indici* with different cultivation periods have been carried out. Cultivation of the fungus was carried out in the laboratory according to the classic method. The optimal concentration of sucrose for *Medusomyces Gisevii* and *Oryzomyces Indici* biomass growth was set at 5%. Sucrose concentration of 15% and above is not recommended for use due to inhibition of biomass growth with increasing concentration of carbohydrates in the culture medium. It is established that these symbionts start to show the amylolytic activity already on the 10th day of cultivation cultivation in standard nutrient medium, medium supplemented with 10 % milk and serum-based medium and stores it in the course of the experiment (30 days). Over time the amylolytic activity increases. However, the intensity of metabolism of the microorganisms, the criterion of which is the ratio of the total and exogenous amylase is most pronounced in the early stages of cultivation. It was found that the culture medium of polycultures shows high amylolytic activity. This fact allows us to consider the *Medusomyces Gisevii* and *Oryzomyces Indici* inoculum as a promising biotechnological raw material source of amylase enzyme.

Keywords: symbiont *Medusomyces Gisevii*, symbiont *Oryzomyces Indici*, tea fungus, the culture fluid, cultivation, metabolites, the amylolytic activity.

Кійко С.Г.¹, д. техн. н., голова правління, Дейнега Л.Ю.², ст. викладач, Басанець М.І.², студент, Камєнський Д.В.², студент, Діденко А.Є.², студент

¹ *ПрАТ Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь»*

² *Національний університет «Запорізька політехніка»*

УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ ПРОЄКТІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ МАРКОВЦА

Ключові слова: енергозбереження; сучасна портфельна теорія; методи оптимізації; диверсифікація; ребалансування; портфель проєктів; коефіцієнт Шарпа; волатильність портфелю.

Оптимізація інвестиційного портфеля є одним із поширених, типових і значимих фінансових завдань, яке виникає в практиці ресурсного забезпечення, енергозбереження, інвестування. Її рішення дозволяє знайти найбільш ефективний спосіб вкладення інвестором свого капіталу в акції декількох компаній. Основними принципами формування інвестиційного портфеля є надійність і дохідність активів, їх стабільне зростання і висока ліквідність. Метою оптимізації портфеля цінних паперів є формування такого портфеля цінних паперів, який би відповідав вимогам інвестора, підприємства, як по прибутковості, так і щодо можливого ризику, що досягається шляхом розподілом цінних паперів в портфелі.

Основне завдання портфельного інвестування – поліпшити умови інвестування, додавши сукупності цінних паперів такі інвестиційні характеристики, які недосяжні з позиції окремо взятого цінного паперу, і можливі тільки при їх комбінації.

Для промислових об'єктів в Україні в сучасних умовах існують суттєві проблеми, які пов'язані із фінансуванням енергозберігаючих заходів, вибором оптимальних способів вкладення коштів в інвестиційні проєкти з підвищення енергоефективності, відсутністю інформаційних систем та недосконалістю організаційно-економічного механізму забезпечення енергозбереження на промислових підприємствах. Для запобігання фінансових втрат при формуванні сукупності енергозберігаючих заходів (портфелів проєктів) потрібна розробка та вдосконалення методів оцінки ефективності програм енергозбереження, які враховують широкий вибір у використанні джерел інвестицій, призначених для їх реалізації.

Оскільки методи управління портфелями проєктів енергозбереження в основному розглядають методи оптимізації витрат на ці проєкти, то для розв'язання даної задачі доречно розглянути саме методи оптимізації інвестиційних портфелів. Роблячи таке узагальнення, потрібно враховувати специфіку предметної області та використовувати лише ті методи оптимізації, які дозволяють залишатися в заданих предметною областю обмеженнях.

Узагальнення до більш широкої теми дозволяє використовувати багато напрацьованих та теоретичних матеріалів в більш загальній сфері.

Портфельні інвестиції – інвестиції у цінні папери та різноманітні фінансові активи за кошти на фондовому ринку. Портфельна оптимізація – процес створення портфелю фінансових активів, для яких портфель має певні значення деяких параметрів. Зазвичай, власник портфелю бажає мінімізувати ризики та максимізувати віддачу [1].

Під інвестиційним портфелем розуміють декілька інвестиційних об'єктів – активів. Зазвичай для створення фінансового портфелю використовуються різноманітні активи різних компаній. Для усіх активів у інвестиційному портфелі власник отримує прибуток через певний проміжок часу. Цей прибуток у портфельній теорії називається віддачою.

Основним сценарієм отримання віддачі є зростання ринкової вартості акцій. Врахування можливості падіння вартості активів у портфелі є ризиком інвестування. Для створення надійнішого портфеля використовують різноманітні стратегії, вибір стратегії залежить від результату, якого хоче досягти інвестор.

До ключових елементів та стратегій створення ефективного інвестиційного портфелю належать:

- диверсифікація;
- ребалансування;
- активне управління портфелем;
- пасивне управління портфелем.

Розподіл активів базується на тому, що різні типи активів не є залежними один від одного. Одні активи є більш стабільними, інші – більш мінливими. Різноманітність таких активів у портфелі і дозволяє зберігати баланс та захищає від ризику. Основною проблемою інвестицій є те, що неможливо послідовно правильно прогнозувати, які активи принесуть прибуток, а які навпаки приносять збитки [2]. Диверсифікація вирішує цю проблему. Диверсифікація – розподіл інвестицій у дуже різні активи. Зазвичай вона здійснюється стосовно різних класів цінних паперів, різних галузей економіки, різних географічних регіонів [3]-[4]. Ребалансування використовується для відновлення балансу у розподілі вартості активів, з яких складається портфель [5]. Воно передбачає продаж цінних паперів з високою ціною та використання цих грошей у цінних паперах з нижчою ціною. Потрібно проводити ребалансування один раз у певний проміжок часу. При чому, цей проміжок часу не повинен бути занадто довгим чи занадто коротким. Занадто довгий проміжок часу для проведення ребалансування змінить початкове співвідношення ризику і віддачі. Занадто короткий проміжок часу для проведення ребалансування не дозволить інвестору отримати максимальний прибуток у секторах ринку з високим потенціалом. Активне управління портфелем передбачає швидку купівлю та продаж акцій на різні терміни, намагаючись перевершити деякий фондовий індекс. Для прийняття рішень про купівлю та продаж акцій використовують не лише менеджерів фондів або брокерів, але й поглиблені дослідження ринку, короткострокові прогнозування, зміни у політиці та навіть деякі неекономічні та неполітичні новини, що можуть вплинути на деякі компанії. Врахування такої великої кількості даних дозволяє отримувати більший прибуток, ніж пропонуються відомими індексними корзинами, проте такий підхід до керування портфелем включає додатковий ризик. Пасивне управління портфелем (або управління індексними фондами) має на меті повторити віддачу конкретної індексної корзини. Це досягається за рахунок купівлі тих самих акцій, що перераховані в індексі, з використанням тієї самої ваги (алокції), що використовується в індексі. Віддача від пасивного управління портфелем нижча, ніж віддача від активного управління, проте пасивне управління має значно нижчий ризик.

Враховуючи основні принципи інвестиційної теорії, задачею портфельного інвестування є формування інвестиційного портфелю з відомими частками певних активів для максимізації віддачі та мінімізації ризику. Для вирішення даної проблеми було обрано методу лауреата нобелівської премії з економіки Гарі Марковіца, відомої як сучасна портфельна теорія [6]. Це теорія фінансових інвестицій, у межах якої за допомо-

гою статистичних методів здійснюють якомога вигідніший розподіл ризику портфеля цінних паперів і оцінювання доходу, складовими елементами її є оцінювання активів, прийняття інвестиційних рішень, оптимізація портфеля, оцінювання отриманих результатів. З математичної точки зору задача з формування оптимального портфеля є задачею оптимізації квадратичної функції (пошук мінімуму) при лінійних обмеженнях аргументів функції. Цей клас задач є добре дослідженим та виділено найефективніші алгоритми.

Метою роботи є дослідження основних концепцій сучасної портфельної теорії та розробка програмного забезпечення для оптимізації портфельних інвестицій.

Гарі Марковіц створив теорію, яка дозволяє інвестору математично балансувати терпимість до ризику та очікування винагороди, що призводить до ідеального портфеля.

Ця теорія базувалася на двох основних концепціях:

- мета кожного інвестора – максимізувати прибутковість для будь-якого рівня ризику;
- ризик можна зменшити, диверсифікувавши портфель за допомогою окремих, не пов'язаних між собою цінних паперів.

Сучасна портфельна теорія (СПТ) працює, припускаючи, що інвестори не схильні до ризику, віддаючи перевагу портфелю з меншим ризиком для певного рівня прибутковості. Згідно з цим припущенням, інвестори будуть здійснювати інвестиції з високим ризиком лише тоді, коли вони можуть розраховувати на більшу винагороду [7].

Наприклад, “Раціональному інвестору” пропонується вибрати між двома інвестиціями: інвестицією А та інвестицією В. Очікується, що вартість обох зростатиме на 6 відсотків щороку. Однак інвестиція В вважається вдвічі більш мінливою, ніж інвестиція А, тобто її вартість коливається удвічі більше, ніж коливання вартості інвестиції А. СПТ пропонує, щоб раціональний інвестор завжди вибирав менш мінливий актив, в даному випадку інвестицію А, якщо обидва варіанти забезпечують рівноцінну очікувану прибутковість.

Загальний ризик портфеля обчислюється на основі функції дисперсії кожного активу разом із кореляцією між кожною парою активів. Кореляції активів впливають на загальний ризик портфеля, формулюючи менше середньоквадратичне відхилення, ніж можна було б знайти у зваженій сумі.

Згідно з аналізом СПТ – (або аналізом дисперсії, аналізом середньоквадратичного відхилення) – інвестор може мати актив із високим ризиком, індексний фонд або цінний папір, доки ці ризикові інвестиції будуть мінімізовані всіма базовими активами. Сам портфель збалансований таким чином, що загальний ризик є нижчим, ніж деякі основні інвестиції. Ризик визначається як діапазон, в якому ціна активу в середньому буде змінюватися, але Марковіц поділяє ризик на дві наступні категорії:

– систематичний ризик: це стосується ринкових ризиків, які неможливо зменшити за рахунок диверсифікації, або можливості того, що весь ринок та економіка покажуть збитки, що негативно впливають на інвестиції. Важливо зазначити, що СПТ не претендує на можливість пом'якшити цей тип ризику, оскільки він притаманний цілому ринку або сегменту ринку;

– несистематичний ризик: також називається специфічним ризиком, несистематичний ризик характерний для окремих акцій, тобто він може бути диверсифікований у міру збільшення кількості запасів у вашому портфелі.

У добре диверсифікованій комбінації активів ризик кожного активу дуже мало сприяє загальному ризику портфеля. Швидше, коваріація між окремими активами визначає більшу частину загального ризику портфеля [8].

Отже, інвестори можуть зменшити індивідуальний ризик активів, комбінуючи диверсифікований портфель активів.

Хоча вигоди від диверсифікації очевидні, інвестори повинні визначити рівень диверсифікації, який найкраще їм підходить. Це можна визначити за допомогою так званої ефективної межі, графічного представлення всіх можливих комбінацій ризикових цінних паперів для оптимального рівня прибутковості з урахуванням певного рівня ризику [8]-[13]:

- на кожному рівні прибутковості інвестори можуть створити портфель, що пропонує мінімально можливий ризик;
- для кожного рівня ризику інвестори можуть створити портфель, що пропонує найвищу віддачу.

Будь-який портфель, що потрапляє за межі ефективної межі, вважається неоптимальним з однієї з двох причин: він несе занадто великий ризик щодо його прибутку або занадто малу віддачу щодо його ризику. Портфель, який лежить нижче ефективної межі, не забезпечує достатньої прибутковості порівняно з рівнем ризику. Портфелі, знайдені праворуч від ефективної межі, мають вищий рівень ризику для визначеної норми прибутку.

У кожному пункті "Ефективної межі" інвестори можуть побудувати принаймні один портфель з усіх доступних інвестицій, що характеризує очікуваний ризик і дохід, що відповідає цій точці. Портфель, розміщений у верхній частині кривої, є ефективним, оскільки дає максимальну очікувану дохідність для даного рівня ризику.

Ефективна межа пропонує наочну демонстрацію потужності диверсифікації. Не існує єдиної ефективної межі, оскільки інвестори можуть змінювати кількість та характеристики активів відповідно до своїх потреб.

На рисунку 1 [8] проілюстроване поняття ефективної межі.



Рисунок 1 – Ілюстрація поняття ефективної межі [8]

Отже, ключові особливості сучасної портфельної теорії:

- СПТ стверджує, що можна створити ідеальний портфель, який забезпечить інвестору максимальну віддачу, взявши на себе оптимальну кількість ризику;

– СПТ була розроблена економістом Гаррі Марковіцем у 1950-х; його теорії оточують важливість портфельів, ризик, диверсифікацію та зв'язки між різними видами цінних паперів;

– зокрема, СПТ виступає за диверсифікацію цінних паперів та класів активів;

– СПТ заявляє, що акції стикаються як із систематичним ризиком – ринковими ризиками, такими як процентні ставки та спад, так і з несистематичним ризиком – специфічними для кожної акції проблемами, такими як зміни в управлінні або поганий обсяг продажів;

– правильна диверсифікація портфеля не може запобігти систематичному ризику, але може зменшити, якщо не усунути, несистематичний ризик.

Оптимізація портфелю реалізована з врахуванням важливих метрик та формул:

– дисперсія активу та нестабільність активу;

– коваріація та кореляція активів;

– очікувана прибутковість активу та портфеля;

– дисперсія портфеля;

– коефіцієнт Шарпа.

Дисперсія активу – важливий індикатор, що відображає як може коливатися прибуток від інвестиції у даний актив.

Нестабільність активу вимірюється як середньоквадратичне відхилення акцій компанії. Фактично, це просто корінь квадратний з дисперсії активу [14].

Дисперсія активу розраховується за формулою [15]:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (1)$$

де x_i – прибутковість активу за i -й період часу; \bar{x} – середнє значення прибутковості активу; n – кількість екземплярів вибірки (кількість днів/місяців/періодів часу).

Коваріація вимірює залежність між прибутковістю двох окремих активів. Більш загально, коваріація вимірює взаємодію двох випадкових величин. Для сфери інвестицій це міра, що враховує дисперсію індивідуальних значень дохідності цінного паперу та силу зв'язку між змінами дохідності даного цінного паперу та інших.

Позитивна коваріація означає, що віддачі двох активів прямо пропорційні, негативна коваріація означає, що віддачі двох активів обернено пропорційні.

Ця міра може приймати необмежені значення, на відміну від свого стандартизованого родича, кореляції. Інтерпретувати коваріацію дещо важко за рахунок великих чисельних значень, тому найчастіше для оцінки зв'язку між активами використовують коефіцієнт кореляції.

Коефіцієнт кореляції лежить в інтервалі від -1 до 1. Значення -1 та 1 означає сильну лінійну залежність, але у різних напрямках, значення ближче до 0 означає відсутність лінійної залежності.

Розрахування коваріації та кореляції відбувається за наступними формулами [15]:

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum (R_x - \bar{R}_x)(R_y - \bar{R}_y)}{n-1}; \quad (2)$$

$$\text{cor}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (3)$$

де R_x, R_y – значення прибутковості активів; n – розмір вибірки (кількість місяців); \bar{R}_x та \bar{R}_y – середні значення прибутковості активів; σ_x та σ_y – середньоквадратичні відхилення активів.

Очікувана прибутковість активу вимірюється як середнє арифметичне прибутковості за певний період, найчастіше за останній рік.

Очікувана прибутковість портфелю вираховується як сума добутків ваги активу на його індивідуальну очікувану прибутковість [15]:

$$R_p = \sum w_i R_i, \quad (4)$$

де R_p – очікувана прибутковість портфелю; w_i – вага i -го активу в портфелі; R_i – очікувана прибутковість i -го активу в портфелі.

Дисперсія портфелю використовується як міра ризику в побудованій моделі. Висока дисперсія (волатильність) означає високий ризик для набору активів у портфелі [15].

$$\sigma^2 = \sum w_i^2 \sigma_i^2 + \sum \sum w_i w_j \sigma_i \sigma_j \text{cov}(i, j), \quad (5)$$

де w_i та w_j – ваги активів у портфелі; σ_i та σ_j – середньоквадратичне відхилення; $\text{cov}(i, j)$ – коваріація активів.

Коефіцієнт Шарпа вимірює, скільки надлишкової віддачі отримується за додаткову нестабільність при зберіганні більш ризикованого активу. Загалом, вище значення коефіцієнта Шарпа вказує на кращі та вигідніші інвестиції. Таким чином, якщо порівнювати два портфелі з подібними профілями ризику, враховуючи всі інші рівні, було б краще інвестувати в портфель із вищим коефіцієнтом Шарпа [16].

Розрахування коефіцієнту Шарпа проводиться за формулою [15]:

$$\frac{R_p - R_f}{\sigma_p}, \quad (6)$$

де R_p – віддача портфелю; R_f – безризикова ставка; σ_p – волатильність портфелю.

Для програмної реалізації портфельної оптимізації було обрано мову програмування Python. Ця мова дуже широко використовується для обробки даних та їх візуалізації. Більше того, мова програмування надає можливість використовувати алгоритми квадратичної оптимізації функції з лінійними обмеженнями, не реалізуючи алгоритм самостійно, дозволяючи сфокусуватись саме на даних та їх обробці [8]–[13]. Для оптимізації було використано функцію `minimize` бібліотеки `scipy.optimize`. Дана функція дозволяє задати початкові значення для аргументів, які вона буде оптимізувати.

Програмний застосунок надає можливість завантажувати вхідний файл зі щоденною ціною на акції обраних компаній; генерувати графіки для візуалізації процесу

обробки даних; оптимізувати інвестиційний портфель, складений із акцій обраних компаній, використовуючи функції оптимізації за коефіцієнтом Шарпа та волатильністю.

Перелік файлів програми:

portfolio.py – файл з основними методами оптимізації та зчитування даних;

main.py – файл з графічним інтерфейсом користувача;

get_data.py – файл для завантажування даних акцій компаній з мережі Інтернет.

Вхідні дані – файл .csv, де стовпчики – задана компанія, рядки – щоденна ціна на акції обраних компаній.

Вихідні дані – графічне відображення методів оптимізації інвестиційних портфелів.

Для тестування реалізованих методів оптимізації використовувалися дані акцій таких енергетичних компаній:

- China Petroleum & Chemical Corporation (SNP);
- Royal Dutch Shell (RDSA.AS);
- Роснафта (ROSN.ME);
- British Petroleum (BP);
- Exxon Mobil Corporation (XOM).

Дані були взяті за період з 01.01.2013 по 25.12.2020 з ресурсу finance.yahoo.com за допомогою бібліотеки Python pandas_datareader [17].

Під випадковою генерацією портфелів розуміється випадковий розподіл активів у портфелі таким чином, щоб сумарна вага усіх активів становила 1.

Очевидно, що випадкова генерація активів не гарантує оптимального результату, саме тому для випадкового згенерованих портфелів потрібно проводити фільтрації та обробки. Попри такий важливий недолік, у випадкової генерації портфелів наявні дуже важливі переваги: випадкова генерація портфелів часто дозволяє згенерувати велику кількість портфелів, не потребуючи даних про розподіл з індексних фондів; згенеровані портфелі можна використовувати для математичної оптимізації, кожного разу створюючи нові умови для мінімізації чи максимізації функції за заданими обмеженнями.

З випадково згенерованих портфелів було обрано найкращі за коефіцієнтом Шарпа та за мінімізацією волатильності портфелю.

На рисунку 2 зображено результат випадкової генерації портфелів.

Віддача, скоригована на ризик, уточнює віддачу інвестиції, вимірюючи, наскільки сильно ризик пов'язаний з її прибутком. Може існувати ціла низка різних методів вираження коригування ризику, і коефіцієнт Шарпа є одним із них.

Оптимізація шляхом максимізації коефіцієнту Шарпа полягає у тому, щоб максимізувати надлишкову віддачу, при цьому не сильно підвищуючи ризики. Оскільки функції оптимізації здебільшого саме на мінімізацію функції, для реалізації даного методу було використано негативний коефіцієнт Шарпа і мінімізовано його значення.

Для того, щоб оптимізація спрацювала враховуючи обмеження предметної області, потрібно задати деякі лінійні обмеження. Єдиним обмеженням в тестовому випадку є сума ваг усіх активів портфелю, її значення завжди має дорівнювати одиниці. Для цього було встановлено рівний розподіл активів у портфелі. Також було проведено декілька тестів з використанням згенерованих портфелів.

На рисунку 3 зображено портфель з максимальним коефіцієнтом Шарпа серед випадково згенерованих портфелів, та портфель з оптимізованим максимальним коефіцієнтом Шарпа.

Іншим методом оптимізації було визначено мінімізацію волатильності портфелю. Для оптимізації даної функції було накладено такі самі обмеження, як і на максимі-

зацію коефіцієнту Шарпа. Сума ваг усіх активів має бути рівною одиниці. Завдяки використанню функцію minimize з бібліотеки scipy.optimize можна було регулювати початкові значення ваг активів у портфелі і встановлювати значення з випадково згенерованих портфелів.

На рисунку 4 зображено портфель з мінімальною волатильністю з випадково згенерованих портфелів та портфель з мінімізованою волатильністю.

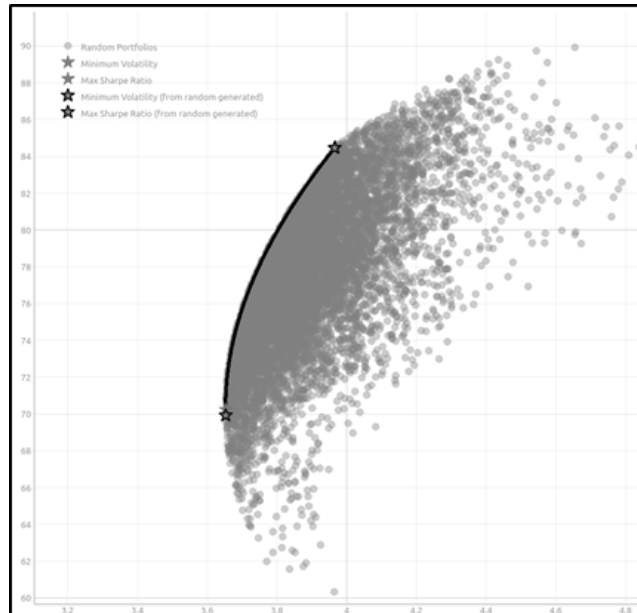


Рисунок 2 – Випадкова генерація портфелів

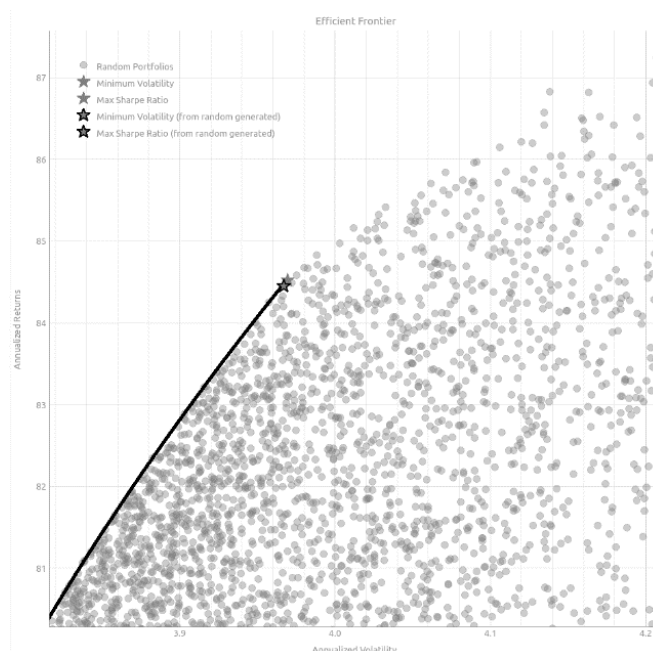


Рисунок 3 – Максимальний та оптимізований коефіцієнти Шарпа

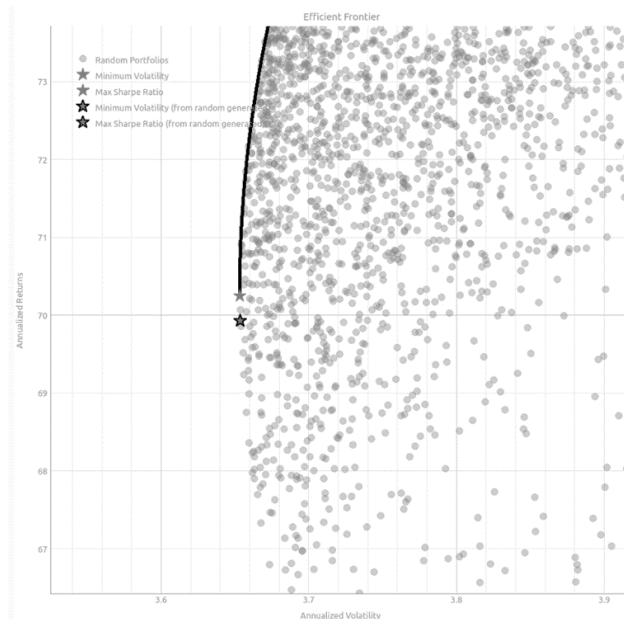


Рисунок 4 – Мінімальна та оптимізована волатильність портфельів

Висновки. В даній роботі досліджена актуальна задача оптимізації фінансового портфелю будь-яких активів, що дозволяє в тому числі використовувати розроблене програмне забезпечення для оптимізації управління портфелями проектів енергозбереження.

За результатами дослідження розроблено програмний застосунок, який дозволяє завантажити дані, згенерувати випадкові портфелі та оптимізувати їх шляхом максимізації коефіцієнту Шарпа та мінімізації волатильності портфелю. Графічними результатами програми є графіки, що дозволяють оператору краще оцінити ситуацію та програмно створений портфель.

Програма була протестована на даних про акції енергозберігаючих компаній, проте через брак даних та через фінансову кризу у галузі енергозбереження у 2020 році, дані не дозволяють повністю продемонструвати функціонал розробленого продукту. Програма також була добре протестована на даних про технологічні компанії.

Розроблена система надає можливість отримати оптимальний розподіл активів у фінансовому портфелі

Література

1. Хадарцев, О.В. Портфельні теорії управління фінансовими інвестиціями: навчальний посібник [Текст] / О.В. Хадарцев. – Полтава: ПолтНТУ, 2018. – 94 с.
2. Льовкін В.М. Методи та засоби прийняття інвестиційних рішень в умовах невизначеності [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 01.05.04 / Льовкін Валерій Миколайович ; Харківський нац. ун-т радіоелектроніки – Харків, 2013. – 20 с.
3. Буренин, А.Н. Управление портфелем ценных бумаг [Текст] / А.Н. Буренин. – М. : Научно-техническое общество имени академика С.И. Вавилова, 2008. – 440 с.
4. Матвеев, А.А. Модели и методы управления портфелями проектов [Текст] / А.А. Матвеев, Д.А. Новиков, А.В. Цветков. – М. : ПМСОФТ, 2005. – 206 с.
5. Rebalancing [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.investopedia.com/terms/r/rebalancing.asp>.

6. Брігхем, Є.Р. Основи фінансового менеджменту: Пер. з англ. / Є.Р. Брігхем.— К.: Вазако, 1997.— 1000 с.
7. Камінський, А.Б. Моделювання фінансових ризиків : Монографія [Текст] / А.Б. Камінський. – К. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2006. – 304 с.
8. Harry Markowitz's Modern Portfolio Theory: The Efficient Frontier [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.guidedchoice.com/video/dr-harry-markowitz-father-of-modern-portfolio-theory/>.
9. Markowitz's Efficient Frontier in Python [Part 1/2] [Electronic resource]. – Access mode: <https://medium.com/python-data/efficient-frontier-in-python-34b0c3043314>.
10. Efficient Frontier & Portfolio Optimization with Python [Part 2/2] [Electronic resource]. – Access mode: <https://medium.com/python-data/efficient-frontier-portfolio-optimization-with-python-part-2-2-2fe23413ad94>.
11. Efficient Frontier Portfolio Optimisation in Python [Electronic resource]. – Access mode: <https://towardsdatascience.com/efficient-frontier-portfolio-optimisation-in-python-e7844051e7f>.
12. Automating Portfolio Optimization and Allocation using Python [Electronic resource]. – Access mode: <https://towardsdatascience.com/automating-portfolio-optimization-using-python-9f344b9380b9>.
13. Portfolio Optimization with Python using Efficient Frontier with Practical Examples [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.machinelearningplus.com/machine-learning/portfolio-optimization-python-example/#6-fundamental-terms-in-portfolio-optimization>.
14. Variance & Standard Deviation [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/science-fair/variance-and-standard-deviation>.
15. Portfolio Optimization with Python using Efficient Frontier with Practical Examples [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.machinelearningplus.com/machine-learning/portfolio-optimization-python-example/#6-fundamental-terms-in-portfolio-optimization>.
16. Вітлінський, В.В. Аналіз, моделювання та управління економічним ризиком: Навч.-метод. посібник для самост. вивч. дисц. [Текст] / В.В. Вітлінський, П.І. Верченко. – К. : КНЕУ, 2000. – 292 с.
17. Yahoo Finance – Stock Market Live, Quotes, Business & Finance News [Electronic resource]. – Access mode: <https://finance.yahoo.com/>.

Bibliography (transliterated)

1. Hadarcev, O.V. (2018). Portfel'ni teorii' upravlinnja finansovymy investycijamy: navchal'nyj posibnyk. Poltava: PoltNTU, 94.
2. L'ovkin, V.M. (2013). Metody ta zasoby pryjnattja investycijnyh rishen' v umovah nevyznachenosti: dissertation abstract ... candidate of technical sciences: 01.05.04 / Kh.: KhNURE, 20.
3. Burenin, A.N. (2008). Upravlenie portfelem cennyh bumag. M.: Nauchno-tehnicheskoe obshhestvo imeni akademika S.I. Vavilova 440.
4. Matveev, A.A., Novikov D.A., Cvetkov A.V. (2005). Modeli i metody upravlenija portfeljami proektov. M.: PMSOFT, 206.

5. Rebalancing [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.investopedia.com/terms/r/rebalancing.asp>.
6. Brigham, Je. R. (1997). Osnovy finansovogo menedzhmentu. K.: Vazako, 1000.
7. Kamins'kyj, A.B. (2006). Modeljuvannja finansovyh ryzykiv : Monografija. K. : Vydavnycho-poligrafichnyj centr «Kyiv's'-kyj universytet», 304.
8. Harry Markowitz's Modern Portfolio Theory: The Efficient Frontier [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.guidedchoice.com/video/dr-harry-markowitz-father-of-modern-portfolio-theory/>.
9. Markowitz's Efficient Frontier in Python [Part 1/2] [Electronic resource]. – Access mode: <https://medium.com/python-data/efficient-frontier-in-python-34b0c3043314>.
10. Efficient Frontier & Portfolio Optimization with Python [Part 2/2] [Electronic resource]. – Access mode: <https://medium.com/python-data/efficient-frontier-portfolio-optimization-with-python-part-2-2-fe23413ad94>.
11. Efficient Frontier Portfolio Optimisation in Python [Electronic resource]. – Access mode: <https://towardsdatascience.com/efficient-frontier-portfolio-optimisation-in-python-e7844051e7f>.
12. Automating Portfolio Optimization and Allocation using Python [Electronic resource]. – Access mode: <https://towardsdatascience.com/automating-portfolio-optimization-using-python-9f344b9380b9>.
13. Portfolio Optimization with Python using Efficient Frontier with Practical Examples [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.machinelearningplus.com/machine-learning/portfolio-optimization-python-example/#6-fundamental-terms-in-portfolio-optimization>.
14. Variance & Standard Deviation [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/science-fair/variance-and-standard-deviation>.
15. Portfolio Optimization with Python using Efficient Frontier with Practical Examples [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.machinelearningplus.com/machine-learning/portfolio-optimization-python-example/#6-fundamental-terms-in-portfolio-optimization>.
16. Vitlins'kyj, V.V., Verchenko, P.I. (2000). Analiz, modeljuvannja ta upravlinnja ekonomichnym ryzykom: Navch.-metod. posibnyk dlja samost. vyvch. dysc. K. : KNEU, 292.
17. Yahoo Finance – Stock Market Live, Quotes, Business & Finance News [Electronic resource]. – Access mode: <https://finance.yahoo.com/>.

УДК 004.9; 519.816

Кійко С.Г., д. техн. н., голова правління, Дейнега Л.Ю., ст. викладач, Басанець М.І., студент, Каменський Д.В., студент, Діденко А.С., студент

УПРАВЛІННЯ ПОРТФЕЛЯМИ ПРОЕКТІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ МАРКОВІЦА

Метою роботи було: виявити, дослідити та порівняти методи управління портфелями проектів енергозбереження та розробити програмне забезпечення для оптимізації портфельних інвестицій за допомогою декількох методів. Розглянуто ключові елементи та стратегії створення ефективного інвестиційного портфелю: диверсифікація, ребалансування, активне управління портфелем, пасивне управління портфелем.

Враховуючи основні принципи інвестиційної теорії, задачею портфельного інвестування є формування інвестиційного портфелю з відомими частками певних активів для максимізації віддачі та мінімізації ризику. Для вирішення даної проблеми було обрано методика Гарі Марковича, відомої як сучасна портфельна теорія. Це теорія фінансових інвестицій, у межах якої за допомогою статистичних методів здійснюють якомога вигідніший розподіл ризику портфеля цінних паперів і оцінювання доходу, складовими елементами її є оцінювання активів, прийняття інвестиційних рішень, оптимізація портфеля, оцінювання отриманих результатів. З математичної точки зору задача з формування оптимального портфеля є задачею оптимізації квадратичної функції (пошук мінімуму) при лінійних обмеженнях аргументів функції.

Проаналізовані методи оптимізації портфелів проектів енергозбереження з врахуванням специфіки предметної області. За результатами аналізу обрано методи пошуку максимального коефіцієнта Шарпа та мінімальної волатильності з випадково згенерованих портфелів.

Розроблено програмний застосунок, що дозволяє завантажити дані, згенерувати випадкові портфелі та оптимізувати їх обраними методами. Реалізовано також графічне відображення результатів оптимізації портфелів. Програма була протестована на даних про акції енергозберігаючих компаній. Побудовані програмою графіки дозволяють оператору краще оцінити створений портфель проекту енергозбереження.

Ключові слова: енергозбереження; сучасна портфельна теорія; методи оптимізації; диверсифікація; ребалансування; портфель проектів; коефіцієнт Шарпа; волатильність портфелю.

Кийко С.Г., д. техн. н., предс. правління, Дейнега Л.Ю., ст. преподаватель,
Басанец М.И., студент, Каменский Д.В., студент, Диденко А.Е., студент

УПРАВЛЕНИЕ ПОРТФЕЛЯМИ ПРОЕКТОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МАРКОВИЦА

Целью работы было: выявить, исследовать и сравнить методы управления портфелями проектов энергосбережения и разработать программное обеспечение для оптимизации портфельных инвестиций с помощью нескольких методов. Рассмотрены ключевые элементы и стратегии создания эффективного инвестиционного портфеля: диверсификация, ребалансирование, активное управление портфелем, пассивное управление портфелем.

Учитывая основные принципы инвестиционной теории, задачей портфельного инвестирования является формирование инвестиционного портфеля с известными частями определенных активов для максимизации отдачи и минимизации риска. Для решения данной проблемы была выбрана методика Гарри Марковица, известная как современная портфельная теория. Это теория финансовых инвестиций, в рамках которой с помощью статистических методов осуществляют как можно выгоднее распределение риска портфеля ценных бумаг и оценку дохода, составляющими элементами ее является оценка активов, принятие инвестиционных решений, оптимизация портфеля, оценка полученных результатов. С математической точки зрения задача по формированию оптимального портфеля является задачей оптимизации квадратичной функции (поиск минимума) при линейных ограничениях аргументов функции.

Проанализированы методы оптимизации портфелей проектов энергосбережения с учетом специфики предметной области. По результатам анализа выбраны методы поиска максимального коэффициента Шарпа и минимальной волатильности из случайно сгенерированных портфелей.

Разработан программное приложение, позволяющее загрузить данные, сгенерировать случайные портфели и оптимизировать их выбранными методами. Реализовано также графическое отображение результатов оптимизации портфелей. Программа была протестирована на данных об акциях энергосберегающих компаний. Построенные программой графики позволяют оператору лучше оценить созданный портфель проекта энергосбережения.

Ключевые слова: энергосбережение; современная портфельная теория; методы оптимизации; диверсификация; ребалансирование; портфель проектов; коэффициент Шарпа; волатильность портфеля.

Kiyko S.H., Deineha L.Y., Basanets M.I., Kamienskyi D.V., Didenko A.E.

PORTFOLIO MANAGEMENT OF ENERGY SAVING PROJECTS BASED ON THE MARKOVITS THEORY

The goal of the work was to identify research and compare methods of portfolio management of energy saving projects and to develop software for optimizing portfolio investments using several methods. The key elements and strategies of creating an effective investment portfolio are considered: diversification, rebalancing, active portfolio management, passive portfolio management.

Given the basic principles of investment theory, the task of portfolio investment is to form an investment portfolio with known shares of certain assets to maximize returns and minimize risk. To solve this problem, the method of Harry Markowitz, known as modern portfolio theory, was chosen. This is the theory of financial investment, in which statistical methods are used to make the most profitable risk distribution of the securities portfolio and income valuation, its components are asset valuation, investment decisions, portfolio optimization, evaluation of results. From a mathematical point of view, the problem of forming an optimal portfolio is the problem of optimizing a quadratic function (finding the minimum) with linear constraints on the arguments of the function.

Methods of optimization of portfolios of energy saving projects taking into account the specifics of the subject area are analyzed. According to the results of the analysis, the methods of finding the maximum Sharpe's ratio and the minimum volatility from randomly generated portfolios were chosen.

A software application has been developed that allows you to download data, generate random portfolios and optimize them with selected methods. A graphical display of portfolio optimization results has also been implemented. The program was tested on data on shares of energy saving companies. The graphs built by the program allow the operator to better assess the created portfolio of the energy saving project.

Keywords: energy saving; modern portfolio theory; optimization methods; diversification; rebalancing; project portfolio; Sharpe's ratio; portfolio volatility.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

3'2021

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 07.12.2020 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–60.
Зам. № 170. 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.