

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYI TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



НАУКОВИЙ ВІСНИК Таврійського державного агротехнологічного університету *Технічні науки*

SCIENTIFIC BULLETIN OF TAVRIA STATE AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY *Technical sciences*

*Виходить 2 рази на рік
Видається з 2011 р.*

**Випуск 15, том 1
Issue 15, volume 1**

WEB: <https://oj.tsatu.edu.ua>

DOI: 10.32782/2220-8674-2025-15-1



Видавничий дім
«Гельветика»
2025



УДК [631.3+621.3+004+663/664]

Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, т. 1. 354 с.

ISSN 2220-8674

Представлені результати наукових досліджень вчених у галузях галузевого машинобудування, енергетики, електротехніки, електромеханіки, харчових технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Видання призначене для наукових працівників, викладачів, інженерно-технічного персоналу і здобувачів вищої освіти, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Реферативні бази: Crossref, Google Scholar, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

Головний редактор

Кюрчев В. М., чл.-кор. НААН України,
д-р техн. наук, проф. (Україна)

Editor in chief

Kyurchev V., corresponding member of NAAS of Ukraine,
Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

Заступники головного редактора

Надикто В. Т., чл.-кор. НААН України, д-р техн. наук,
проф. (Україна)
Панченко А. І., д-р техн. наук, проф. (Україна)

Deputy editors in chief

Nadykto V., corresponding member of NAAS of Ukraine,
Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Panchenko A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

Відповідальний секретар

Волошина А. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)

Executive secretary

Voloshina A., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

Технічний секретар

Погорельцева Д. О. (Україна)

Technical secretary

Pogoreltseva D. (Ukraine)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Белоев Христо, д-р техн. наук, проф. (Болгарія)
Даманаускас Відас, д-р техн. наук, проф. (Литва)
Івановс Семенс, д-р техн. наук (Латвія)
Ольт Юрі, PhD, д-р техн. наук, проф. (Естонія)
Паскуцці Сімон, PhD, доц. (Італія)
Финдура Павол, PhD, проф. (Словачія)
Вершков О. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Дідур В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Журавель Д. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Кувачов В. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Кюрчев С. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Скляр О. Г., канд. техн. наук, проф. (Україна)
Скляр Р. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Тітова О. А., д-р пед. наук, проф. (Україна)

SECTORAL MACHINE BUILDING

Beloev Hristo, Dr. Sci. Tech., Prof. (Bulgaria)
Damanauskas Vidas, Dr. Sci. Tech. (Lithuania)
Ivanovs Semjons, Dr. Sci. Tech. (Latvia)
Olt Jüri, PhD, Dr. Sci. Tech., Prof. (Estonia)
Pascuzzi Simone, PhD, Assoc. Prof. (Italia)
Pavol Findura, PhD, Prof. (Slovakia)
Vershkov O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Didur V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Zhuravel D., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Kuvachov V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Kiurchev S., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Sclyar O., Cand. Sci. Tech, Prof. (Ukraine)
Sclyar R., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Titova O., Dr. Sci. Ped., Prof. (Ukraine)

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

Шафранець Анджей, д-р техн. наук, проф. (Польща)
Кавакзех Мохаммед, PhD, проф. (Йорданія)
Бур'ян С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Галько С. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Карпалюк І. Т., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Квітка С. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Кузнєцов М. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Лисенко О. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мірошник О. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мороз О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Плюгін В. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)

**ELECTRICAL POWER ENGINEERING,
ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Szafraniec Andrzej, Dr. Sci. Tech., Prof. (Poland)
Qawaqzeh Mohamed, PhD, Prof. (Jordan)
Burian S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Halko S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Karpaliuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Kvitka S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Kuznietsov M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Lysenko O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Miroshnyk O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Moroz O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Pluihin V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)



КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Гавриленко Є. А., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Гнатушенко В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Гумен О. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Дашкевич А. О., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Лубко Д. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Ляковська С. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Малкіна В. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мацулевич О. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Холоднік Ю. В., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Яблонський П. М., канд. техн. наук, доц. (Україна)

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Дейниченко Г. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Євлаш В. В., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Ломейко О. П., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Паламарчук І. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Пилипенко Л. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Пріс О. П., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Самойчук К. О., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Сердюк М. Є., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Ялпачик В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Україна)

НАУКОВИЙ ВІСНИК Таврійського державного агротехнологічного університету

Випуск 15, том 1

Засновник

Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 2011 році

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ №24285-14125ПР від 27.12.2019 р.

Виходить 2 рази на рік

Рекомендовано до публікації вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного
Протокол № 9 від 30.04.2025 р.

«Науковий вісник ТДАТУ» включено до **Категорії Б**
Переліку наукових фахових видань України (технічні
науки) на підставі Наказів МОН України від 17 березня
2020 року № 409 (Додаток № 1); від 2 липня 2020 року
№ 886 (Додаток № 4); від 24 вересня 2020 року № 1188
(Додаток № 5).

Адреса редакції

Юридична: 72312, Запорізька обл.
м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18
Фактична: 69600, Запорізька обл. м. Запоріжжя,
вул. Жуковського, 66
<https://oj.tsatu.edu.ua>,
DOI: 10.32782/2220-8674-2025-15-1

COMPUTER SCIENCES

Havrylenko Ye., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Hnatushenko V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Humen O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Dashkevych A., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Lubko D., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Liaskovska S., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Malkina V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Matsulevych O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Kholodniak Y., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Yablonskyi P., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)

FOOD TECHNOLOGIES

Deynichenko G., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Evlash V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Lomeiko O., Cand. Sci. Tech, Assoc. Prof. (Ukraine)
Palamarchuk I., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Pylypenko L., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Priss, O., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Samoichuk K., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Serdyuk M., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)
Yalpachik V., Dr. Sci. Tech., Prof. (Ukraine)

SCIENTIFIC BULLETIN OF TAVRIA STATE AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY

Issue 15, volume 1

Founder

Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University

Founded in 2011

Certificate of governmental registration
KB No. 24285-14125nP dated December 27, 2019
Published 2 times a year

Recommended for publication by the Academic
Board of Dmytro Motornyi Tavria State
Agrotechnological University
Record No. 9 dated April 30, 2025

Scientific bulletin of TSATU is included in the List of
scientific professional editions of Ukraine (technical
sciences), **category B** (on the basis of the Orders of the
MES of Ukraine dated March 17, 2020 No. 409 (Appendix
No. 1); dated July 2, 2020 No. 886 (Appendix No. 4);
dated September 24, 2020 No. 1188 (Appendix No. 5).

Address of the Editorial office

Legal adress: 72312, Zaporizhzhia region
Melitopol, 18, B. Khmelnytskyi Ave.
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region
Zaporizhzhia, 66, Zhukovskiy Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>,
DOI: 10.32782/2220-8674-2025-15-1



ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

О. Fomin, O. Burlutskyi, I. Voronko, O. Bursuk, O. Kozachuk. Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties.....	10
Є. А. Гавриленко, Ю. В. Холодняк, І. Р. Тетервак. Розробка алгоритму формування просторових монотонних кривих.....	18
D. Zhuravel, A. Bondar. Improvement of the control system of wheel tractors.....	27
М. Л. Заєць. Оцінювання ефективності застосування обприскувача з регулятором норми внесення за змінної робочої швидкості.....	40
Р. В. Кириченко, М. В. Бакум, О. Б. Козій, Є. В. Лубченко. Результати польових досліджень дводискових сошників для сівби зернових культур за технологією Mini-till.....	53
О. С. Ковязін, І. О. Чижигов, С. В. Дереза, А. С. Пастушенко. Аналіз альтернативних джерел енергії для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях.....	61
Т. О. Кутковецька, О. Б. Мелентьєв. Модернізація корпусу плуга з обґрунтуванням його конструктивних параметрів.....	68
В. О. Лукаш. Теплова обробка сільськогосподарських матеріалів і шляхи підвищення її ефективності.....	75
В. Т. Надикто. Дослідження впливу параметрів постійної технологічної колії на величину непродуктивної площі поля.....	82
О. А. Новохат, Д. І. Гончаренко. Моделювання комп'ютерної симуляції розподілу температурних полів у напускному пристрої екструдера 3D-принтера.....	89
Н. О. Паляничка, О. О. Червоткіна, О. О. Ковальов, В. Ф. Ялпачик. Дослідження ефективності диспергування молочного жиру в гомогенізаторі пульсаційного типу.....	97
С. В. Попов. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву.....	105
К. О. Самойчук, В. А. Самохвал. Дослідження роботи шнекового прес-екструдера в парі з багатосекційним пристроєм формування паливних брикетів.....	114
С. В. Кюрчев, К. О. Самойчук. Розробка технології виробництва молочних вершків із застосуванням струминного та пульсаційного гомогенізаторів.....	121
О. Г. Скляр, Р. В. Скляр, А. С. Комар, В. Д. Акулов. Технологічні аспекти оптимізації біогазових установок.....	129
С. П. Степаненко, В. Г. Мироненко, С. П. Погорілий, А. Я. Кузьмич, В. О. Швидя, І. С. Попадюк. Аналіз та розвиток моделей вібраційного переміщення зернівки в процесах сепарування зернових матеріалів.....	136
О. О. Червоткіна, О. П. Прокопенко, Н. О. Паляничка. Гранюлювання вторинних продуктів переробки.....	147
С. С. Швець, В. С. Калина. Мехатронний комплекс для виробництва комбікорму: автоматизація, ефективність, інновації.....	151

**ЕНЕРГОВИРОБНИЦТВО (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЄЮ)**

О. Ю. Вовк. Діагностування електрифікованих робочих машин в експлуатаційних умовах.....	162
С. В. Галько, О. В. Сотнік, О. О. Мірошник, О. В. Сотнік, Д. М. Зеленков. Збалансування графіка навантаження сільських комунальних споживачів з використанням сонячних панелей та накопичувачів енергії.....	171
С. Й. Мисак, С. П. Шаповал. Розроблення гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора та аналіз його ефективності.....	181
T. Shchur, K. Wittek, O. Miroshnyk, S. Halko, D. Zelenkov. The effect of toxic and harmful emissions of exhaust gases from aviation engines on the environment.....	192

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Д. В. Букатов, Я. О. Колодінська, О. І. Романенко, Д. О. Гудаков. Використання процедурної генерації для підвищення ефективності розроблення та персоналізації програмних інтерфейсів.....	201
О. Г. Зінов'єва, С. В. Шаров. Імітаційне моделювання логістики в аграрному секторі.....	209
А. А. Клєпцов, В. А. Гусєва-Божаткіна. Алгоритм покращення взаємодії користувачів у мобільних іграх через адаптивний перезапуск гри.....	214
D. Lubko. Description of the database development methodology for creating a digital portal for farm holdings.....	222
Ю. О. Сіциліцин, М. В. Шлофаст. Порівняльний аналіз ефективності оброблення великих табличних даних: Excel/VBA проти Python.....	230
О. В. Складенко, Г. М. Терещук, О. Ю. Ніколаєвський, О. А. Складенко. Аналітичне та імітаційне моделювання системи масового обслуговування на прикладі сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів.....	237
Р. О. Яровий, А. В. Подвиженко, А. М. Переверзєв, С. В. Левченко. Публічні Wi-Fi мережі: захист особистої інформації	245

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

С. С. Андрєєва, Є. П. Пивоваров, М. Б. Колеснікова, А. М. Дихтярь. Вплив сучасних форматів закладів ресторанної індустрії на розроблення та впровадження інноваційних технологій продукції власного виробництва.....	251
A. V. Antonenko, L. V. Bal-Prylypko. Quality and safety of mayonnaise based on blended oil, eggplant powder and gum arabic.....	259
С. П. Боковець, О. Кошель. Сучасні технології та обладнання для кулінарних експериментів у молекулярній гастрономії.....	267
С. П. Боковець, Т. І. Маренкова. Інноваційне устаткування для малих пивоварень як фактор підвищення ефективності виробництва.....	273
Н. В. Болгова, Б. Ю. Луханін. Вплив війни на молочну галузь в Україні.....	280



А. П. Драган, В. І. Карась. Вплив стандартизації на виробництво й експорт ріпаку та продуктів його перероблення.....	287
І. Є. Іванова, І. А. Кривонос, С. В. Басанець, Я. І. Пендрак. Формування обсягів виробництва вишні за дії абіотичних чинників.....	294
С. Л. Колесніченко, М. А. Кашкано. Використання соків у технології приготування омлету.....	301
О. Ю. Кошель, В. І. Пономаренко. Особливості технології бісквіту з використанням борошна зеленої гречки.....	309
М. О. Семенов, Л. М. Кюрчева. Потреба в інноваційних підходах до створення дегідратованих продуктів із пролонгованим терміном зберігання для гуманітарних потреб.....	316
О. І. Мамай, Т. О. Кузьміна, Т. О. Яковенко, М. І. Валько, Ю. В. Березовський. Удосконалення технології міцних напоїв з плодових дистилятів.....	319
О. Г. Серeda, А. О. Геліх, О. А. Воронін. Оптимізація рецептурного складу збивного бісквітного напівфабрикату з додаванням борошна із цвіркунів та цукрозамінників.....	331
Є. В. Чебаненко, О. Ю. Мельник. Застосування інфрачервоного нагрівання для підвищення смакових якостей бобових.....	339
Т. О. Яковенко, О. І. Мамай, М. І. Валько, О. В. Стоянова, К. В. Зубкова. Удосконалення технології червоних кріплених десертних вин.....	346



CONTENTS

SECTORAL MACHINE BUILDING

O. Fomin, O. Burlutskyi, I. Voronko, O. Bursuk, O. Kozachuk. Optimization of the chemical composition of steel for engineering structures by the criterion of stabilization of mechanical properties.....	10
Y. Havrylenko, Y. Kholodniak, I. Tetervak. Development of an algorithm for forming spatial monotone curves.....	18
D. Zhuravel, A. Bondar. Improvement of the control system of wheel tractors.....	27
M. Zayets. Evaluation of the effectiveness of a sprayer with a dosage rate controller at variable operating speed.....	40
R. Kyrychenko, M. Bakum, O. Koziy, Y. Lubchenko. Results of field research on double-disc coultors for sowing cereal crops using Mini-till technology.....	53
O. Koviazin, I. Chyzhykov, S. Dereza, A. Pastushenko. Analysis of alternative energy sources for thermoregulation of air in livestock premises.....	61
T. Kutkovetska, B. Melentiev. Modernization of the plough body with substitution of its design parameters.....	68
V. Lukash. Heat treatment of agricultural materials and ways to increase its efficiency.....	75
V. Nadykto. Research on the influence of constant technological track parameters on the size of unproductive field area.....	82
O. Novokhat, D. Honcharenko. Modeling of computer simulation of temperature field distribution in the extruder feeding device.....	89
N. Palianychka, O. Chervotkina, A. Kovalov, V. Yalpachyk. Research on the efficiency of milk fat dispersion in a pulsation-type homogenizer.....	97
S. Popov. Research on the accuracy of cylinder machining with a hard alloy tool.....	105
K. Samoichuk, V. Samokhval. Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device.....	114
S. Kiurchev, K. Samoichuk. Development of drinking cream production technology using stream and pulsation homogenizers.....	121
O. Skliar, R. Skliar, A. Komar, V. Akulov. Technological aspects of optimization of biogas plants.....	129
S. Stepanenko, V. Myronenko, S. Pohorilyi, A. Kuzmych, V. Shvydia, I. Popadiuk. Analysis and development of models of vibrational grain displacement in grain material separation processes.....	136
O. Chervotkina, O. Prokopenko, N. Palyanychka. Granulation of secondary processing products.....	147
S. Shvets, V. Kalyna. Mechatronic complex for feed production: automation, efficiency, innovations.....	151

**POWER ENGINEERING (BY SPECIALIZATION)**

O. Vovk. Diagnostics of electrified working machines in operating conditions.....	162
S. Halko, O. Sotnik, O. Miroshnik, Ol. Sotnik, D. Zelenkov. Balancing the load schedule of rural communal consumers with the use of solar panels and energy storage.....	171
S. Mysak S. Shapoval. Development of a hybrid thermal photovoltaic solar collector and analysis of its efficiency.....	181
T. Shchur, K. Wittek, O. Miroshnyk, S. Halko, D. Zelenkov. The effect of toxic and harmful emissions of exhaust gases from aviation engines on the environment.....	192

COMPUTER SCIENCES

D. Bukatov, Y. Kolodinska, O. Romanenko, D. Gudakov. Using procedural generation to enhance the efficiency of development and personalization of software interfaces.....	201
O. Zinovieva, S. Sharov. Simulation modeling of logistics in the agricultural sector.....	209
A. Klieptsov, V. Guseva-Bozhatkina. Algorithm for improving user interaction in mobile games through adaptive game restart.....	214
D. Lubko. Description of the database development methodology for creating a digital portal for farm holdings.....	222
Y. Sitsylitsyn, M. Shelofast. Comparative analysis of the efficiency of processing large tabular data: Excel/VBA vs Python.....	230
O. Skliarenko, H. Tereshchuk, O. Nikolaievskyi, O. Skliarenko. Analytical and simulation modeling of a queuing system based on the case of a computer technical support service center.....	237
R. Yaroviy, A. Podvyzhenko, A. Pereverziev, S. Levchenko. Public Wi-Fi networks: protecting personal information in the age of digital convenience.....	245

FOOD TECHNOLOGIES

S. Andrieieva, Ye. Pyvovarov, M. Kolesnikova, A. Dykhtiar. Influence of modern formats of restaurant industry establishments on the development and implementation of innovative technologies for own production.....	251
A. V. Antonenko, L. V. Bal-Prylypko. Quality and safety of mayonnaise based on blended oil, eggplant powder and gum arabic.....	259
S. Bokovets, O. Koshel. Modern technologies and equipment for culinary experiments in molecular gastronomy.....	267
S. Bokovets, T. Marenkova. Innovative equipment for small breweries as a factor for increasing production efficiency.....	273
N. Bolhova, B. Lukhanin. Impact of the war on the dairy industry in Ukraine.....	280
A. Drahan, V. Karas. Impact of standardization on production and export rapeseed and products of its processing.....	287



I. Ivanova, I. Kryvonos, S. Basanets, Ya. Pendrak. Formation of cherry production volumes under the action of abiotic factors.....	294
S. Kolesnichenko, M. Kashkano. Use of juices in omelet preparation technology.....	301
O. Yu. Koshel, V. I. Ponomarenko. Features of biscuit technology using green buckwheat flour.....	309
M. O. Semenov, L. M. Kiurcheva. Need for innovative approaches to creating dehydrated products with extended shelf life for humanitarian purposes.....	316
O. Mamai, T. Kuzmina, T. Yakovenko, M. Valko, Yu. Berezovsky. Improvement of strong beverages technology from fruit distillates.....	319
O. Sereda, A. Gelih, O. Voronin. Optimization of the formulation composition of a whipped biscuit semi-finished product with the addition of cricket flour and sugar substitutes.....	331
Yev. V. Chebanenko, O. Yu. Melnyk. Application of infrared heating to improve the taste of legumes.....	339
T. Yakovenko, O. Mamai, M. Valko, O. Stoianova, K. Zubkova. Improvement of red fortified dessert wines technology.....	346



ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-1>

UDC 629.463.001.63

O. Fomin¹, doctor of Technical Sciences

ORCID: 0000-0003-2387-9946

O. Burlutskyi², candidate of Technical Sciences

ORCID: 0000-0003-1902-5809

I. Voronko¹, candidate of Technical Sciences

ORCID: 0000-0003-3599-6672

O. Bursuk³, candidate of Pedagogical Sciences

ORCID: 0000-0002-4812-7831

O. Kozachuk¹, postgraduate student

ORCID: 0000-0002-3823-6057

¹*State University of Infrastructure and Technologies*

²*Ukrainian State University of Railway Transport*

³*Kyiv Electromechanical Vocational College*

e-mail: leha2006181@gmail.com

OPTIMIZATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF STEEL FOR ENGINEERING STRUCTURES BY THE CRITERION OF STABILIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES

Summary. The aim of the study is to create a mathematical model for the operational control of the strength characteristics of the expected metal structure in the conditions of serial steelmaking. Traditional approaches based on test results of prototypes obtained in laboratory conditions are not suitable for this purpose. This is because, in mass production steelmaking, the strength characteristics of products are affected by the metal structure and many other melting conditions, in addition to their chemical composition. This justifies the need to take into account the parameters of interatomic interaction as optimization criteria.

The main idea of the study is to take into account the concept of directional chemical bonding of metal, which links their composition, structure and metal properties.

This concept is supplemented by elements of optimization of the chemical composition of steel, by the criterion of stabilization of mechanical properties, and by methods of planning experiments. This allowed us to obtain variation intervals for the main optimization criteria.

To ensure the physical essence of the models for predicting the mechanical properties of steels of railway equipment bearing systems, it is proposed to use integral physical and chemical criteria: the structural parameter d (nm 10-1) and the physical and chemical equivalent $Z_Y(e)$.

The influence of alloying elements (chromium, molybdenum, vanadium) on the formation of mechanical properties of steel is studied on the basis of mathematical and physicochemical modelling. The intervals of alloying elements content that ensure compliance with the required standards are determined. Dependencies of changes in the mechanical properties of alloyed rolled products on the structural state index d were constructed.

The intersection of the functions of properties of medium-carbon steels in the eutectic region corresponds to the provisions of N.S. Kurnakova *aw*, and makes it possible to predict the level and combination of properties and characteristics of alloys.

Keywords: mathematical functions, tensile strength, freight transportation, carbon, relative elongation, mathematical models, factor analysis, chemical composition of steel, reliability, mechanics, computer modelling, automation.

Problem statement. Modern mechanical engineering imposes increasingly high requirements to the operational properties of materials [1]. By applying various technological schemes of heat treatment of alloyed rolled products, it is possible to change the strength properties by influencing the processes of structure formation. Mechanical and operational properties of metal are determined by the structure of metal, which depends on the chemical composition, deformation conditions, temperature and cooling mode. It is known that the content of chemical elements in the steel composition has a decisive influence on structure formation during heat treatment. Attempts to experimentally investigate the dependences of mechanical properties of steels on their chemical composition and the construction of mathematical models based on the results of experiments have been going on for decades.

Analyses of the latest research and publications. Ohkubo N. et al. back in 1994 published an article [2] reporting on a series of experiments with prototype samples of austenitic stainless steel with different chemical compositions including carbon, silicon, manganese, phosphorus, sulfur, nickel, chromium, molybdenum, copper, nitrogen. As a result of these experiments, the authors obtained experimental curves of hardness, yield strength and tensile strength as a function of grain size and percentage of the above chemical elements. The experimental curves were then approximated by linear regression equations, which were then used to analyze the results obtained.

Han et al. [3], using the example of hot-rolled ribbed bar production, obtained linear regression equations expressing the dependence of strength, yield strength and relative elongation on the content of carbon, manganese, chromium, nickel, vanadium. With the help of mathematical model they obtained an acceptable range of chromium content, which does not reduce the quality of manufactured products, which provides, in their opinion, the most favorable in operational terms mechanical properties of prototypes.

Sheyko et al. [4] performed the following series of laboratory experiments. Laboratory castings with different content of alloying elements were produced in an induction furnace and then forged into 10×80×120 mm billets, whose mechanical characteristics were determined: tensile strength, yield strength, relative elongation, and impact toughness. Having processed the experimental results, the authors [4] obtained regression equations reflecting the dependence of mechanical properties of the tested low-carbon steel on the content of alloying elements: chromium, titanium and vanadium. With the help of these dependencies, they selected the optimal combinations of alloying elements, providing, in their opinion, the most favorable in operational terms mechanical properties of test specimens.

However, V.A. Lutsenko et al. [5] criticized such approaches. They noted that ‘existing approaches to the optimization of the chemical composition of steel, providing the necessary mechanical properties of steel products, are usually based on statistical models of composition – property roller and do not reflect the physical and chemical aspects of the behavior of multi-component melt at the final stages of the technology of obtaining finished products. In this regard, the authors [5] advise to use the following approach. Since phase transformations are a consequence of interatomic interactions in a multicomponent melt, it is suggested to use the dance pattern of the chemical composition through the structural state parameter d . In physical terms, the parameter d represents the average inter-nuclear distance between interacting atoms of the investigated steel. Using this approach, the authors [5] studied the influence of alloying elements (chromium, molybdenum, vanadium) on the formation of mechanical properties of steel. They plotted the dependences of tensile strength and relative elongation on the physicochemical criterion – structural modelling parameter d . As a result, it is shown that the increase in chromium content increases the tensile strength, and alloying with molybdenum and vanadium increases ductility.

In metallurgy there is a fundamental law linking the properties of alloys with their composition and structural state – the law of N.S. Kurnakov [6]. One of the basic provisions of this law is the absence of function discontinuity within one phase region of the state diagram. Thus, the development of

new and optimization of existing compositions of structural steels by reducing the carbon content by compensating it as a hardener by elements of matrix micro alloying systems (C, Si, Mn,) is an urgent task [7–9].

Formulation of the objectives of the article. Improvement of mechanical, exploitation characteristics, and physical and chemical properties of steels of machine-building structures due to optimization of the chemical composition of steel for the criterion of stabilization of mechanical properties.

Teaching the core material. Steels, as structural materials, have great opportunities to increase their quality and improve all service properties by improving their production technology, reducing harmful impurities, alloying and microalloying, taking into account the physical and chemical nature and physical structure of the materials. Structural steels are usually subject to the following requirements: a combination of high structural strength and sufficient toughness.

In automobile, shipbuilding, railway engineering are widely used critical parts that must have wear resistance and strength under conditions of high pressures, loads and temperatures (nozzles, sleeves, plunger pairs, wheel pairs, bearing elements, etc.) Increasing the load capacity to the axial load of freight cars can be achieved by increasing the axial load up to 25 tonnes, the use of new design solutions, as well as through the use of new structural materials with increased strength.

One of the brightest representatives of such steels is 09G2S steel. The advantage of this steel is that it is not prone to tempering brittleness, which in turn allows for a wide range of tempering temperatures. To date, the most widely used for the load-bearing structures of cars is low-alloy steel grade 09G2S according to DSTU 8541:2015 Rolled steel of increased strength. Technical conditions [10].

The greatest application has rolled steel of strength class 325 (kingpin beam, individual elements of the car with a thickness of 10 mm and more) and 345 (individual elements of the car with a thickness of less than 10 mm). At the same time, steels with higher mechanical properties are widely used in other branches of heavy machine building. For example, high-strength steels with yield strength of 400 MPa and more are used for manufacturing and repair of mining equipment, quarry machinery and attachments, power structures of lifting mechanisms and cargo vehicles [11]. There are known cases of application of steels with yield strength of 550 MPa and more in wagon building [1].

In order to assess the influence of the chemical composition of steel on its mechanical properties and temperatures of phase transformations, the concept of directed chemical bonding in the description of interatomic interaction in the melt developed in the Institute of Chemistry of NASU [12,13] was used. The principle of this concept is to describe the chemical composition of the melt by a complex of integral model parameters of interatomic interaction. It allows to reduce the parametricity of models in which the element-by-element composition of multicomponent steels T is expressed in integral parameters of interatomic interaction.

Preliminary, the factor analysis by the method of head components has been carried out. The measure of informativity of the factors is the ratio of dispersions of head components and input data [14]. On the basis of which the structuring of the chemistry of steel into various subsystems was performed, the most significant of which were:

- a) matrix m (C, Si, Mn)
- b) light subsystem ml includes (Cr, Ni, Cu)
- c) doric acid subsystem includes doric acid (S), phosphorus (P)

(Fig. 1) shows the results of structuration of the chemical composition of structural steel 09G2S behind the load on the main integral factors. On the basis of factor analysis, integral parameters for matrix and impurity subsystems were calculated. (Fig.1) shows the dependences between mechanical properties and parameters of interatomic interaction of impurity subsystems. From the given dependences, it follows that, a significant contribution to the formation of the relative elongation is made by the impurity subsystem (Cr, Ni, Cu), and for the strength limit – by the matrix subsystem (C, Si, Mn).

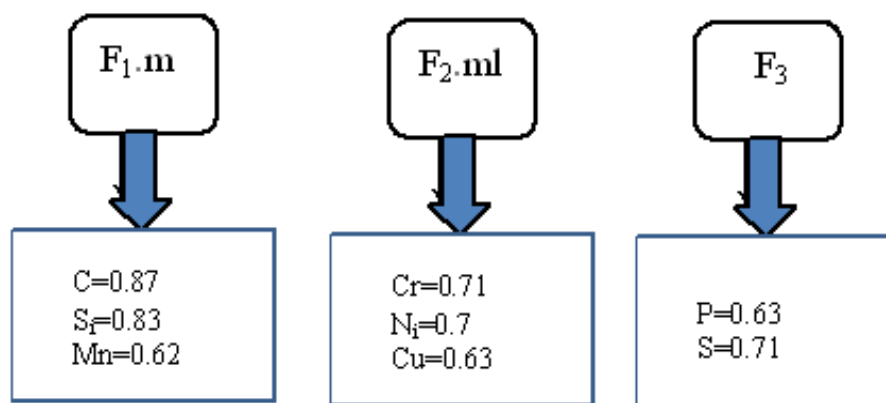


Fig. 1. Significant loadings on integral factors

Solution of the problem of dimensionality reduction of prediction problems based on the theory of directed chemical bonding [15]. Since phase transformations are a consequence of interatomic interaction in a multicomponent melt, at the first stage the chemical composition is ‘reconciled’ through the integral parameters of charge $Z^Y(e)$ and structural d ($\text{nm} \cdot 10^{-1}$) state, which are calculated as a result of pairwise interaction of all its m components by solving the system of nonlinear m^2-m+1 equations:[12].

$$\begin{cases} a - f(\Delta e'_{ij}) = 0, \\ a - f(\Delta e''_{ij}) = 0, & i = 1, 2, \dots, m-1, j = i+1, \dots, m, \\ 4 \cdot Z^X(a, \Delta e') + Z^Y(d, \Delta e'') = 0, \end{cases} \quad (1)$$

where $\Delta e'_{ij}$ – the number of electrons that are localized by the interaction in the direction of bond $i-j$ at distance a (on the diagonal of the OCC or HCC lattices);

$\Delta e''_{ij}$ – at a distance $d = 0.866 \cdot a$ along the face:

$$\begin{aligned} \Delta e' &= (\Delta e'_{12}, \Delta e'_{13}, \Delta e'_{ij}, \Delta e'_{m-1,m}), \\ \Delta e'' &= (\Delta e''_{12}, \Delta e''_{13}, \Delta e''_{ij}, \Delta e''_{m-1,m}) \end{aligned} \quad (2)$$

As a result of solving the above nonlinear system of equations, the following are determined:

$$a, \Delta e'_{ij}, \Delta e''_{ij}, i = 1, \dots, m-1, j = i+1, \dots, m. \quad (3)$$

The parameter Z^Y is determined by averaging the effective charges of all $i-j$ bond types with bond length d :

$$Z^Y = \sum_{k=1}^m \frac{\lg Ru_k^0 - \lg(d/2)}{\text{tg} \alpha_k} \cdot n_k^2 + 2 \cdot \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l=k+1}^m n_k \cdot n_l \cdot \Delta e''_{kl}, \quad (4)$$

where n_k – mole fraction, Ru_k^0 – is the radius of the unpolarised atom,

$\text{tg} \alpha_k$ – parameter, which characterises the change of electron density at ionisation of the atom of the k -th component.

$\text{tg} \alpha$ – gradient of change of the ion radius at change of its charge

In the above formulation, the purpose of optimising the chemical composition of the study of steels in engineering structures by optimising the chemical composition of steel according to the criterion of stabilising mechanical properties can be considered as a multidimensional optimisation problem

with constraints [17] is to determine the corresponding vector of controlled parameters in the domain $D \bar{X}^* (x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*)$, the values of which ensure the achievement of an extreme value of the objective function $y_{gen} = F(\bar{X}^*)$ and satisfy all the given functional constraints that define the domain D_X .

Then the mathematical formulation of the optimisation problem can be represented as follows:

$$y_{gen} = F(\bar{X}^*) = \text{extremum} \quad (5)$$

$$\bar{X}^* \in D_X \in D.$$

In this case, the domain of possible solutions, determined by the intervals of variation of the variable parameters $x_1, x_2, \dots, x_k$

$$D = \left\{ \bar{X} \mid x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}; i \in [1; n] \right\} \quad (6)$$

The domain of acceptable solutions, taking into account factor constraints $y_l \leq a, \dots, y_j = b$

$$D_x = \left\{ \bar{X} \mid y_l \leq a, \dots, y_j = b; x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}; i \in [1; k] \right\} \quad (7)$$

The analysis of numerous scientific studies in the direction of analysing the influence of the chemical composition of steel on the mechanical properties of steel [2–8; 11–16] made it possible to identify the following groups of requirements (structural components of the Y vector) that should be taken into account when optimising the chemical composition.

Group 1. Physicochemical Criterion. Interatomic interaction d . and integral parameters of charge Z^Y , as a “convolution” of chemical composition as well as structural parameter d (nm 10^{-1}) d . component gradient of change of ion radius with change of its charge, $\text{tg}\alpha$, cooling rate V_{ohl} ;

Group 2. Criterion factorisation matrix m (C, Si, Mn);

Group 3. Criterion of mechanical properties: such as tensile strength (σ_v), yield strength (σ_T), elongation (δ);

In (Fig. 2–3) as an application is presented additional graphs to the identification of optimal parameters of steel for the criterion of stabilisation.

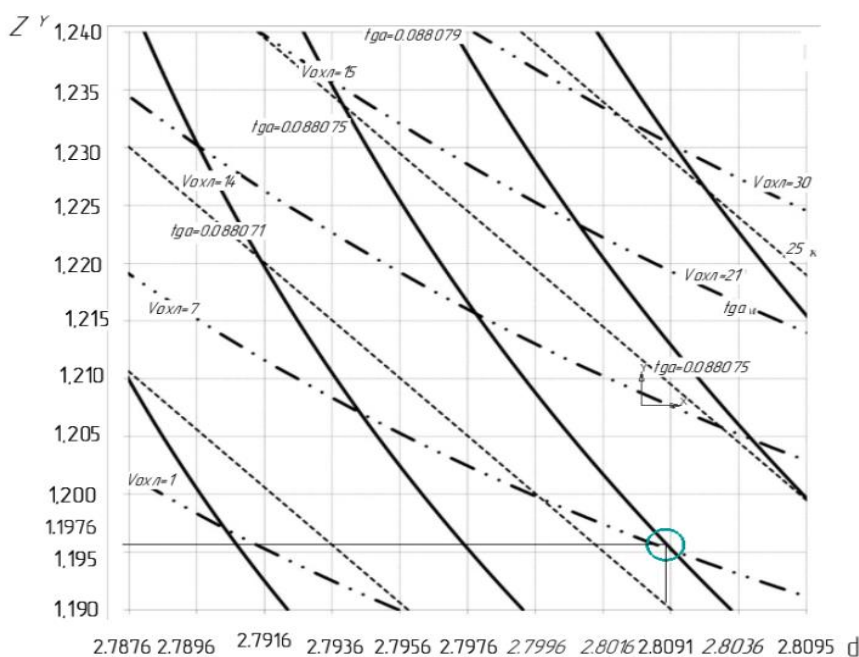


Fig. 2. Structure-charge diagram optimisations for physico-chemical criteria

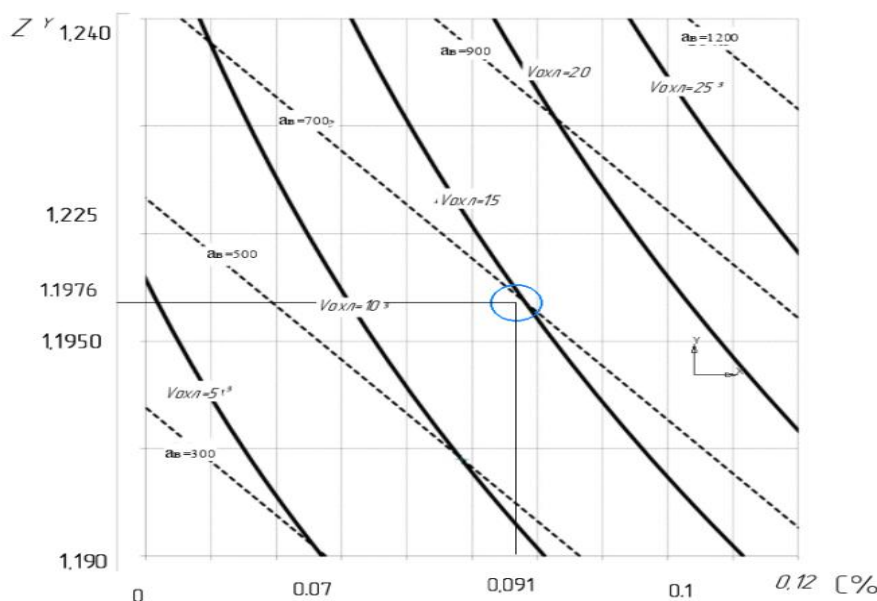


Fig. 3. Dependence of the Z^Y parameter the charge state of the system

(Tables 1 and 2) summarise the optimal steel parameters obtained for the criterion of mechanical property stabilisation and their comparison with DSTU and commercial samples.

Table 1

Actual and optimised chemical composition of 09G2S steel, wt%

Riznovid Khimichny warehouse	Mass fraction of elements % wt.							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
Promislovies[19]	0,10	0,6	1,5	0,03	0,03	0,3	0,025	0,03
Optimal	≤0,091	≤0,23	≤1,71	≤0,027	≤0,027	≤0,201	≤0,009	≤0,007
DSTU 8541:2015	≤0,12	0,17-0,37	1,4-1,8	≤0,3	≤0,3	≤0,3	—	—

Table 2

Mechanical power of steel 09G2S, high chemical composition after normalization in industrial minds and optimization according to the criterion of stabilization of mechanical power

Mechanical power has become important as a criterion of brilliance						
	σ_v , МПа	$Q(\sigma_v)$	σ_T , МПа	$Q(\sigma_T)$	δ %	$Q(\delta)$
Promislovies	490 (4)	0,95	345 (6)	0,98	21	—
Optimal	750 (56)	0,95	570 (65)	0,98	21	—
DSTU 8541:2015	≥480	—	≥345		≥21	—
In brackets () is the standard deviation						

Conclusions.

1. The kink of the functions of properties of medium-carbon steels in the eutectic region corresponds to the provisions of N.S. Kurnakov law and allows predicting the level and combination of properties and characteristics of alloys.

2. According to the results of the performed studies, it is shown that the optimisation of the chemical composition of the studied steels of engineering structures is possible due to the optimisation of the chemical composition of steel by the criterion of stabilisation of mechanical properties. The most significant parameters in the calculation of σ_v , σ_T are the integral parameters of interatomic interaction d , and Z^Y full matrix subsystem (C, Si, M_n), microalloying subsystem (C_r , N_i , G_u), and cooling rate V_{cool} .

3. The substantiated choice of the main elements of the chemical composition of 09G2S steel according to the criterion of stabilisation of mechanical properties, the main criterion and functional constraints, as well as the chosen technology for conducting an optimisation study, made it possible to search for such values. It was found that after the value of the charge state, when the condition $1.1960 \leq Z^Y \leq 1.2151$ is met, the trend lines of hardness values 'change' their position. Thus, it has been established that for low-alloy steels, the chemical composition of which has an optimised value of $Z^Y=1.1971$ or less, additional normalisation after hot plastic deformation is not effective in terms of increasing hardness. The optimised value of $d = 2.8091$ and the highest mechanical properties $\sigma_v = 750$ MPa, $\sigma_T = 600$ MPa, $V_{oxl.} = 7$ C/sec.

4. The obtained optimal chemical composition of 09G2S steel according to the criterion of stabilisation of mechanical properties does not contradict the information on the chemical compositions of structural steels obtained by a representative sample of industrial data with a wide variation in composition and properties reviewed in [19] and also meets the requirements of [10].

5. An analysis of the regulatory requirements for the content of the main chemical components of structural steels was carried out. It was found that the standardised intervals are quite wide and largely overlap, which can cause a wide variation in the values of mechanical properties, provided that the steel meets the chemical composition requirements of the standard and is stable.

The article has reached the editor: 20.03.2025

Bibliography

1. Фомін О.В. Оптимізаційне проектування елементів кузовів залізничних напіввагонів та організація їх виробництва : монографія. Донецьк : ДонІЗТ УкрДАЗТ, 2013. 251 с.
2. Ohkubo N., Miyakusu K., Uemats Y., Kimura H. Effect of alloying elements on the mechanical properties of the stable austenitic stainless steel. *ISIJ International*. 1994. Vol. 34. № 9. P. 764–772. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.764>
3. Han R., Hu M., Pei Q., Gong D., Song Y. The influence of chemical element on properties of deformed steel bar. *Open Journal of Statistics*. 2016. Vol. 6. P. 1174–1180. <http://dx.doi.org/10.4236/ojs.2016.66095>
4. Sheyko S., Beloko Y., Kripak A., Shalomeev V., Tsyganov V., Kulabneva E. Development of rational chemical composition of special steel with increased mechanical and performance characteristics. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2023. Vol. 58. № 4. P. 798–805. <https://doi.org/10.59957/jctm.v58i4.114>
5. Вплив хімічного складу на механічні властивості легованої сталі / В.А. Луценка та ін. *Лиття та металургія*. 2018. № 1 (90). С. 120–123.
6. Пахолок А.П. Основы материаловедства і конструкційні матеріали : посібник. Львів : Світ, 2015. 172 с.
7. Prikhodko E., Petrov A. F. Physical–chemical criteria for description of the composition effect on salt melt structure and properties. *Functional Materials*. 2000. Vol. 7. № 1. P. 108–113.
8. Бурлуцький О.В., Фомін О.В., Ткаченко В.П. Формалізація структурно-речовинних перетворень в несучих системах вантажних вагонів у результаті термічних впливів у процесі зварювальних і правочних робіт. *Зб. наук. пр. Державного економіко-технологічного університету транспорту*. Київ, 2016. № 29. С. 54–71.
9. Gubskiy S.V., Yepifanov V., Chukhlib Y., Basova A., Okun M., Ivanova. Integrated approach to determine operational integrity of crane metal structure. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 63. № 4. P. 319–325.
10. ДСТУ 8541:2015. Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови.
11. Нікітін В.М. Високоміцні сталі з економним легуванням для кар'єрного транспорту та гірничодобувної техніки. *Сталь*. 2016. № 10. С. 57–66.



12. Приходько Є.В. Ефективність комплексного легування сталі та сплавів. Київ : Наукова думка, 1995. 292 с.
13. Тогобицька Д.Н., Пиптюк В.П., Логозинський Ю.Н. Системний підхід до вибору оптимального елементного складу сталі, що забезпечує необхідний рівень механічних властивостей. *Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. пр.* Дніпропетровськ, 2015. С. 91–97.
14. Пономаренко В.С., Гур'янова Л.С., Пельовий Я.Є. Актуальні проблеми системного аналізу та моделювання процесів управління : зб. наук. пр. Братислава–Харків : ВШЕМ – ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2023. 409 с.
15. Приходько Є.В., Тогобицька Д.М., Козачок О.С. Інформаційно-аналітична система стабілізації властивостей прокату. *Металознавство та обробка металів*. 2011. № 1. С. 39–43.
16. Погребна Н.Є., Куцова В.З., Котова Т.В. Механічна стабільність матеріалів : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2021. 109 с.
17. Єрмакова С.М. Математична теорія планування експерименту. М. : Наука, 1983. 392 с.
18. Математичне моделювання процесу термічної правки балки хребтової вантажних вагонів-платформ / О.В. Фомін та ін. *Вісник Східноукраїнського національного університету*. 2019. № 3 (251). С. 186–190.
19. Малинов Л.С., Бурова Д.В. Нетипова термообробка сталей 09Н2S і EN36, в тому числі з витримкою в міжкритичному інтервалі температур (МКІТ). *Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер. : Технічні науки*. 2013. Вип. 27. С. 73–82.

О. В. Фомін¹, О. В. Бурлуцький², І. О. Воронко¹, О. М. Бурсук³, О. І Козачук¹

¹Державний університет інфраструктури та технологій

²Український державний університет залізничного транспорту

³Київський електромеханічний фаховий коледж

ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛІ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА КРИТЕРІЄМ СТАБІЛІЗАЦІЇ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Анотація

Метою роботи є створення математичної моделі оперативного управління характеристиками міцності очікуваної металопродукції в умовах серійного сталеплавильного виробництва. Традиційні підходи, що ґрунтуються на результатах випробувань дослідних зразків, одержуваних у лабораторних умовах, для цієї мети не підходять. Сказане пояснюється тим, що оскільки в умовах серійного сталеплавильного виробництва на характеристики міцності виробів, крім їх хімічного складу, впливає структура металу і безліч інших умов плавок, це обґрунтовує необхідність для врахування параметрів міжатомної взаємодії як критеріїв оптимізації.

Головна ідея дослідження полягає в тому, щоб під час прогнозування до уваги брали концепцію спрямованого хімічного зв'язку металу, що пов'язує між собою їх склад, структуру і властивості металу.

Представлена концепція доповнена елементами оптимізації хімічного складу сталі за критерієм стабілізації механічних властивостей, методами планування експериментів, завдяки чому було отримано інтервали варіювання основних критеріальних показників оптимізації.

Для забезпечення фізичної сутності моделей прогнозування механічних властивостей сталей несівних систем залізничної техніки запропоновано використовувати інтегральні фізико-хімічні критерії: структурний параметр d (нм 10^{-1}) і фізико-хімічний еквівалент $Z^Y(e)$.

На підставі математичного та фізико-хімічного моделювання вивчено вплив легуючих елементів (хром, молібден, ванадій) на формування механічних властивостей сталі. Визначено інтервали вмісту легувальних елементів, що забезпечують виконання необхідних норм. Побудовано залежності зміни механічних властивостей легованого прокату від показника структурного стану d .

Перетин функцій властивостей середньовуглецевих сталей у ділянці евтектоду відповідає положенням закону Н.С. Курнакова і дає змогу прогнозувати рівень і поєднання властивостей та характеристик сплавів.

Ключові слова: математична функція, межа міцності, вантажні перевезення, вуглець, відносне подовження, математичні моделі, факторний аналіз, хімічний склад сталі, надійність, механіка, комп'ютерне моделювання.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-2>

УДК 004.942

Є. А. Гавриленко, д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0003-4501-445X

Ю. В. Холодняк, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-8966-9269

І. Р. Тетервак, старший викладач

ORCID: 0009-0009-0616-8983

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: yuliya.kholodnyak@tsatu.edu.ua

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ МОНОТОННИХ КРИВИХ

Анотація. Формування поверхонь заданих масивом точок є актуальним завданням геометричного моделювання. Модель поверхні формується на основі лінійного каркаса, елементи якого інтерполюють послідовності точок. Контроль наявності особливих точок у ліній каркаса є важливою умовою для забезпечення необхідних властивостей поверхні. Контроль наявності особливих точок у кривій, яка інтерполює точковий ряд, засновано на відмові від її аналітичного представлення. Крива формується у вигляді області можливого розташування її монотонних частин. Як лінійний елемент каркаса використовується обвід, що формується всередині області можливого розташування частин інтерполюючої кривої. Алгоритм моделювання просторових елементів каркаса засновано на формуванні допоміжних плоских дискретно представлених кривих, які визначають конфігурацію та властивості просторових обводів. На основі запропонованого алгоритму розроблено програмне забезпечення для автоматизованого формування обводів в CAD-системі.

Ключові слова: монотонна крива; стичне коло; прилегла площа; область розташування кривої; обвід, алгоритм, програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Для сучасного виробництва актуальним є завдання конструювання поверхонь виробів, для яких вихідними даними є множина точок. Положення вихідних точок одержують за результатами замірів або розрахунків [1].

Конструювання передбачає таке:

- із вихідної множини точок виділяються упорядковані послідовності точок (точкові ряди), що задають криві лінії – елементи каркаса поверхні;
- точкові ряди інтерполюють обводами, які складають безперервні криві лінії;
- отриманий каркас, що складається з обводів, є вихідними даними для формування у CAD-системі моделі поверхні;
- комп'ютерна модель поверхні використовується для створення в САМ-системі програмного забезпечення для верстатів із числовим програмним керуванням з виготовлення виробу.

Основною вимогою до поверхонь, які призначені для взаємодії з потоком газу, рідини або сипучих матеріалів є забезпечення заданого характеру їх обтікання [23]. Зазначені поверхні називають динамічними завдяки їх підвищеним гідро- або аеродинамічним якостям. Динамічні поверхні обмежують різноманітні вироби судно-, авто-, авіабудування, хімічної та харчової промисловості, робочі органи сільськогосподарських машин [3–4].

Динамічні властивості поверхні визначає потік середовища, що виникає у прикордонному шарі вздовж виробу. Основною вимогою є запобігання виникнення турбулентності всередині потоку [5]. Створення геометричної моделі такої поверхні потребує використання як елементів

каркаса ліній з регулярною та закономірною зміною геометричних характеристик: положень дотичних, значень кривини та скруту.

Каркас складають лінії отримані внаслідок інтерполяції точкових рядів. Мінімальна за умовами задачі кількість особливих точок у цих ліній є основною умовою, яка забезпечує підвищені динамічні властивості поверхні [6]. Це можуть бути:

- точки зламу, у яких крива лінія має дві дотичні прямі;
- точки перегину, в яких стикаються опуклі та увігнуті частини кривої;
- точки з екстремальним значенням кривини, де відбувається зміна напрямку зростання значень кривини вздовж кривої;
- точки, у яких порушується регулярність зміни значень кривини вздовж кривої;
- точки зміни ходу просторової кривої.

Неконтрольоване виникнення особливих точок знижує якість одержуваного рішення.

Задача моделювання одновимірних обводів із заданими геометричними властивостями на основі послідовності великої кількості точок передбачає обробку значних об'ємів інформації. Розв'язання задачі потребує використання комп'ютерних технологій. Тому методи формування лінійних елементів каркаса динамічної поверхні повинні бути адаптованими до подальшої реалізації у спеціалізоване програмне забезпечення.

Аналіз останніх досліджень. До методів інтерполяції точкових рядів аналітично заданими кривими належить глобальна інтерполяція та шматково-гладке наближення. Методи глобальної інтерполяції задають криву лінію єдиним рівнянням. У роботах [7–8] криві лінії описуються алгебраїчними поліномами Ньютона та Ерміта. За інтерполяції точкових рядів цими методами ступінь рівняння, яке визначає криву що інтерполює, визначається кількістю вихідних точок. Збільшення ступеня кривої та параметричного числа кривої призводить до неконтрольованого виникнення особливих точок. У кривій лінії, яка задана поліномом, неконтрольовано виникають точки перегину. Методи, які не здатні забезпечити в елементів каркаса мінімальну кількість цих точок, не можуть використовуватися для моделювання динамічних поверхонь.

Контроль за виникненням точок перегину (виникнення осциляції) забезпечує інтерполяція з використанням тригонометричних функцій [9]. Недоліком використання тригонометричних функцій є незначна кількість точок, інтерполяцію яких вони забезпечують. Це знижує ефективність під час практичного застосування методу. Іншим недоліком методу є те, що він не забезпечує закономірність зміни кривини вздовж інтерполуючої кривої.

Запобігання виникнення осциляції за інтерполяції як завгодно великої кількості точок забезпечує метод, заснований на використанні кривих другого порядку [10]. Метод забезпечує єдине положення дотичної в точках стикування ділянок обводу. Недоліком методу є те, що він не здатний забезпечити регулярність значень кривини вздовж обводу, що інтерполює. Це обумовлено другим ступенем рівняння кривих ліній, з яких складаються ділянки обводу.

Регулярність значень кривини вздовж обводу забезпечує метод, запропонований в [11]. Обвід формується з використанням кривих Безьє третього або більших порядків. Недоліком інтерполяції з використанням кривих Безьє є неможливість забезпечення локальності коригування формою ділянок обводу. Зазначений недолік ускладнює забезпечення бажаної динаміки зміни значень кривини вздовж обводу.

Найбільші можливості коригування формою ділянок обводу відносно інших відомих методів інтерполяції аналітично заданими кривими забезпечує використання В-сплайнів [12–14]. Локальність управління формою ділянок В-сплайну дає змогу забезпечувати монотонність зміни кривини вздовж обводу, що інтерполює невелику кількість точок. Призначення у вихідних точках заданих характеристик – положення дотичних прямих і значень кривини ускладнює контроль за виникненням осциляції. Зі збільшенням ступеня рівняння кривої з метою поліп-

шення якості стикування ділянок обводу знижується локальність управління формою сплайна. Забезпечення закономірної і регулярної зміни кривини вздовж обводів складної конфігурації, які складаються з великої кількості ділянок, у разі формування В-сплайном неможливо.

Недоліки методів геометричного моделювання на основі аналітично заданих функцій обмежують їх можливості в забезпеченні вимог до формування лінійних елементів моделей динамічних поверхонь.

Інший варіант формування обводів засновано на відмові від аналітичного представлення ділянок кривої, яка інтерполює заданий точковий ряд. Обвід формується у вигляді області можливого розташування його монотонних частин – ділянок, які не містять особливих точок. Область можливого розташування обводу являє собою послідовність замкнутих контурів, стикуваних між собою у точках, що задають обвід. Зазначену послідовність точок і контурів називатимемо дискретно представленою кривою (ДПК).

Метод формування плоскої ДПК, що складається з будь якої кількості точок, запропоновано в [15–16]. Це вихідні точки та проміжні точки (точки згущення), положення яких призначаються, виходячи з положення вихідних точок та якостей, яким має відповідати обвід. Цими якостями є відсутність точок перегину, єдина дотична в точках стикування ділянок обводу, регулярність і закономірна зміна кривини вздовж кривої. Перед згущенням проводиться аналіз вихідного точкового ряду, за результатами якого визначаються ділянки, на основі яких може бути сформована крива з монотонною зміною кривини (монотонна крива). Монотонні ділянки формуються окремо з подальшим стикуванням. У вихідних точках призначаються положення прямих дотичних до монотонної ДПК.

Область розташування ділянки ДПК $(i, i+1)$ є трикутником, обмеженим дотичними до ДПК (t_i, t_{i+1}) , які проходять через послідовні вихідні точки, і хордою, яка ці точки з'єднує (рис. 1). Такі трикутники названі базисними (БТ).

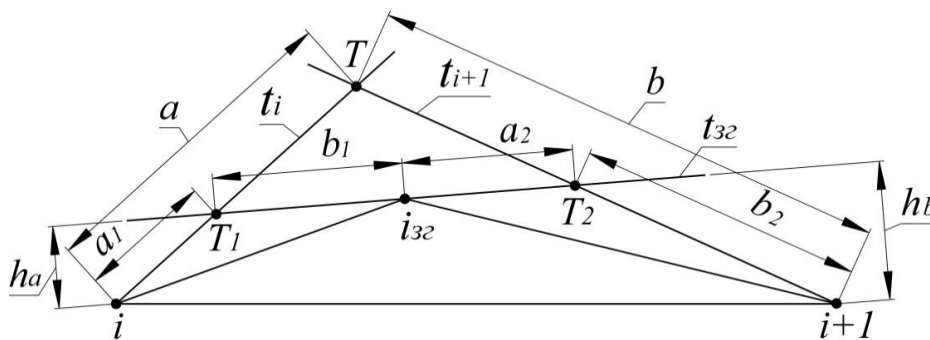


Рис. 1. Формування і-го БТ та БТ згущення

Радіуси кривини (R_i) , які призначаються в точках монотонної ДПК, визначаються розмірами відповідного БТ. Для і-го БТ значення радіусів кривини в точках i та $i+1$ визначаються за формулами:

$$R_i = \frac{a^3}{S}, \quad R_{i+1} = \frac{b^3}{S}, \quad (1)$$

де $a = |i; T|$ та $b = |T; i+1|$ – довжини сторін БТ $(i, T, i+1)$; S – площа БТ.

Кожен крок згущення передбачає призначення всередині вихідного БТ положень точки згущення (i_{32}) та дотичної прямої до обводу в цій точці (t_{32}) . Після цього замість вихідного БТ $(i, T, i+1)$ отримуємо два нові БТ згущення: (i, T, i_{32}) та $(i_{32}, T, i+1)$.

Запропонована схема згущення точкового ряду забезпечує збереження призначених значень радіусів кривини у вихідних точках ДПК за переходу від вихідної послідовності БТ до послідовності БТ згущення. Призначення положення точки згущення забезпечує рівність значень R_i та R_{i+1} , які визначає конфігурація БТ згущення та конфігурація вихідного БТ відповідно до (1). З урахуванням параметрів БТ умова рівності зазначених радіусів кривини така:

$$\frac{a^3}{S} = \frac{a_1^3}{S_1} \text{ та } \frac{b^3}{S} = \frac{b_2^3}{S_2}, \quad (2)$$

де $a_1 = |i; T_1|$ та $b_2 = |T_2; i+1|$ – довжини сторін БТ (i, T_1, i_{32}) та $(i_{32}, T_2, i+1)$ відповідно; S_1 та S_2 – площі зазначених БТ.

Забезпечення регулярності значень кривини вздовж ДПК потребує рівності радіусів кривини, які в точці i_{32} одночасно визначає конфігурація БТ (i, T_1, i_{32}) та $(i_{32}, T_2, i+1)$. Відповідно до параметрів БТ вимога забезпечення регулярності така:

$$\frac{b_1^2}{a_2^2} = \frac{h_a}{h_b}, \quad (3)$$

де h_a та h_b – відстані від точок i та $i+1$ до дотичної t_{32} .

Закономірну зміну значень кривини вздовж ДПК забезпечують додаткові умови до розташування дотичних, які призначаються у вихідних точках. Дотичні завдають послідовність БТ, у межах кожного з яких можливо формувати монотонну криву. Алгоритм згущень забезпечує виконання умови $R_i < R_{32} < R_{i+1}$, яка через параметри БТ виражається як:

$$a_1 < b_1 \text{ та } a_2 < b_2. \quad (4)$$

Виконання (4) гарантує, що після кожного згущення параметри кожного БТ визначають у двох послідовних точках значення радіусів кривини, що відповідають умові: $R_i < R_{i+1}$. При цьому призначені значення радіусів кривини зберігаються за будь-якої кількості згущень. За виконанні умов (2), (3) та (4) послідовні згущення наближають одержувану послідовність точок до неперервної кривої лінії, вздовж якої радіуси стичних кіл змінюються монотонно.

Формування просторової кривої із заданим поєднанням характеристик, що інтерполює точковий ряд, є важливим інструментом моделювання поверхонь. Просторовими є осьові лінії поверхонь каналів, лінії стикування відсіків складових поверхонь, траєкторії обтікання поверхні середовищем.

За невеликої кількості точок, які потрібно інтерполювати, задачу можна розв'язати за допомогою В-сплайна. Сучасні CAD-системи дають можливість це виконувати.

Відзначимо, що відносно плоскої інтерполяції задача формування просторових одновимірних обводів різко ускладнюється. Це обумовлено необхідністю використання кривих, заданих рівнянням третього і вищих ступенів, а також збільшенням кількості характеристик, значення яких потрібно контролювати в точках обводу, що формується. Відомі методи інтерполяції просторових точкових рядів не забезпечують регулярної і монотонної зміни диференційно-геометричних характеристик уздовж кривої, яка інтерполює значну кількість точок.

Аналітичне забезпечення виконання вказаних вимог складне або неможливе. Тому розв'язання поставленої задачі доцільно виконувати із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є розробка алгоритму для створення програмного забезпечення, що дає змогу формувати лінійні елементи каркаса динамічної поверхні. Для досягнення поставленої мети потрібно запропонувати метод моделювання на основі вихідного точкового ряду просторової кривої з монотонною зміною диференціально-геометричних характеристик.

Основна частина. Просторова ДПК формується на основі точкового ряду, який можна інтерполювати кривою постійного ходу, вздовж якої значення кривини змінюються монотонно. Скрут кривої, що конструюється, оцінюється кутом між площинами, яким належать три послідовні точки ряду. Такі площини будемо називати прилеглими (ПП) і позначимо – P_i (рис. 2).

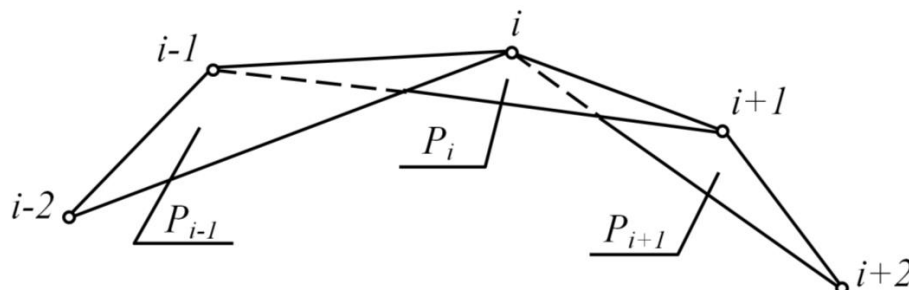


Рис. 2. Послідовність вихідних прилеглих площин

Напрямок ходу кривої, що формується, визначається напрямком обертання між сусідніми ПП до їх суміщення.

Значення радіусів кривини в точках просторової кривої пропонується призначати та формувати з використанням допоміжної плоскої ДПК. Ця ДПК формується внаслідок суміщення ПП, що визначаються вихідними точками, у єдину площину. При цьому значення радіусів стичних кіл (R_i) плоскої ДПК повинно дорівнювати відповідним R_i просторової ДПК. Розгортання просторової ДПК в плоску ДПК здійснюється внаслідок обертання послідовних ПП навколо прямих ліній, по яких ці ПП перетинаються. Наприклад, суміщення площин P_{i-1} та P_i (див. рис. 2) здійснюється обертанням точкового ряду $i+1, \dots, n$ навколо прямої $(i-1, i)$ у напрямку, протилежному скруту ДПК, до збігу площин P_{i-1} та P_i . Послідовно суміщаючи всі ПП, одержуємо плоску ДПК. При цьому трикутники, обумовлені трьома послідовними точками ряду, у плоскої і просторової ДПК конгруентні. Отже, плоску ДПК можна одержати, побудувавши на площині зазначені трикутники на відстанях між відповідними вузлами ДПК, не здійснюючи обертання.

Отримана плоска ДПК згущується методом, розробленим у [9]. За кожного кроку згущення отримуємо нову ДПК, яка складається із подвійної кількості точок. Метод дає змогу одержувати на базі вихідної послідовності точок нову послідовність, яка складається з вихідних точок та скільки завгодно великої кількості точок згущення. При цьому конфігурація згущеної послідовності точок дає можливість інтерполювати її кривою лінією, вздовж якої значення кривини змінюються монотонно.

Після кожного кроку згущення плоского точкового ряду здійснюється зворотний перехід до просторової ДПК. Умовою цього зворотного переходу є потрапляння вихідних точок до свого попереднього положення на просторовій ДПК. Кожна точка згущення розташовується на колі, площина якого перпендикулярна відповідній хорді супровідної ламаної лінії (СЛЛ) вихідної ДПК (рис. 3).

Центр кола розташовано на хорді, а радіус кола дорівнює перевищенню (h_i) відповідної точки згущення над хордою СЛЛ плоскої ДПК. Точки згущення розташовуються на колах таким чином, що відстані між сусідніми точками згущення дорівнюють відстаням між відповідними точками згущення плоскої ДПК.

На рис. 4 зображено ділянку вихідної ДПК $i-1 \dots i+2$, спроектовану на площину, перпендикулярну прямої $(i, i+1)$.

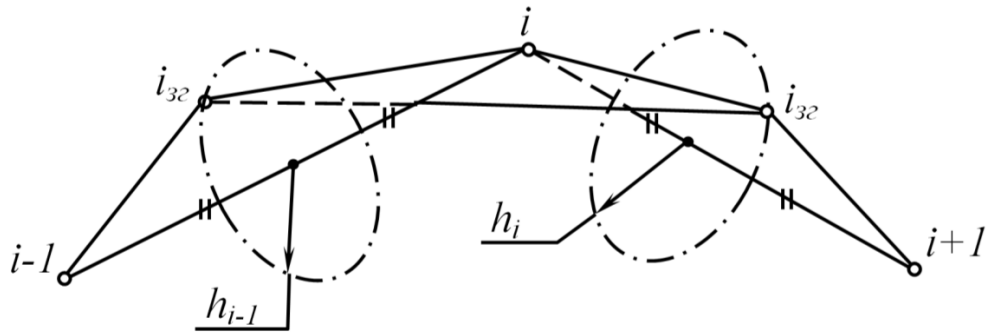


Рис. 3. Розгортання плоскої ДПК у просторову

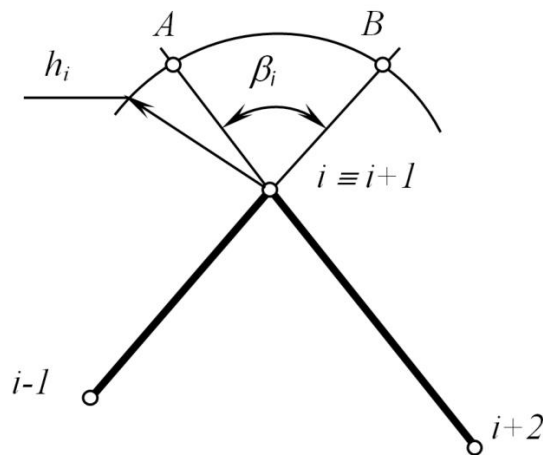


Рис. 4. Сектор розташування точки згущення

ПП P_i та P_{i+1} утворюють двогранний кут β_i . Щоб унаслідок згущення одержати ДПК, у якій напрямок скруту такий самий, як у вихідної ДПК, потрібно призначати кожену точку згущення всередині відповідного кута β . Наприклад, точка згущення, що відповідає хорді вихідної СЛЛ $[i, i+1]$, повинна розташовуватися на дузі $[A, B]$ кола радіуса h_i .

Унаслідок будь-якої кількості згущень одержуємо просторову ДПК постійного ходу, у якій R_i рівні відповідним R_i плоскої ДПК.

Просторову ДПК вважаємо сформованою, коли висота найбільшого з базисних трикутників допоміжної плоскої ДПК не перевищує заданої точності формування обводу. Після забезпечення необхідної точності дискретної інтерполяції обвід може бути сформовано з ділянок неперервних кривих ліній (відрізки прямих, дуги кіл, В-сплайн).

Наведені вище рішення дають можливість формувати лінійні елементи каркаса динамічної поверхні за таким алгоритмом:

1. Супровідна ламана лінія, що з'єднує вихідну послідовність точок, суміщається з площиною із забезпеченням конгруентності трикутників, що визначаються послідовними вихідними точками.

2. Отриманий плоский точковий ряд поділяється на частини, які можна інтерполювати монотонною кривою лінією.

3. Здійснюється згущення монотонних частин плоскої дискретно представлені кривої (ДПК).

4. Здійснюється зворотне розгортання плоскої згущеної ДПК в просторову ДПК із збереженням призначених у її точках значень кривини.

5. Згущення ДПК здійснюється до забезпечення заданої точності інтерполяції, після чого отриманий точковий ряд інтерполюється обводом.

Точкові ряди, що складаються із скільки завгодно великої кількості точок, які можливо інтерполювати кривими із закономірною зміною кривини, формуються на основі вихідних ДПК за допомогою програмного забезпечення, розробленого в системі комп'ютерної алгебри Maple.

У CAD-системі тривимірного параметричного моделювання SolidWorks отримані точкові ряди інтерполюються обводами із заданими характеристиками, що складаються з ділянок кривих, формування яких забезпечує система. Обводи використовуються як лінійні елементи каркаса поверхні.

Для автоматизації формування ліній у CAD-системі SolidWorks створено програмне забезпечення. Програма розроблена в середовищі Delphi 10.2 з використанням інструмента API (Application Program Interface). Вихідними даними для програми є текстові файли з координатами точок, які розраховані в Maple. Обвід, що інтерполює точковий ряд, створюється в автоматизованому режимі. Використання програмного забезпечення дає можливість створювати в CAD-системі SolidWorks обвід, що складається з будь-якої кількості ділянок.

Комп'ютерна модель виробу формується з використанням стандартних команд SolidWorks на основі каркаса. Функціональні якості поверхні забезпечуються заданими геометричними характеристиками лінійних елементів каркаса. Розроблений метод забезпечує формування лінійних елементів каркасів із заданою точністю. Використання розробленого методу дає змогу автоматизувати формування в CAD-системі каркаса поверхні та забезпечити задані функціональні якості поверхонь, що моделюються.

Висновки. У роботі запропоновано алгоритм для створення програмного забезпечення, що дає можливість формувати просторові лінійні елементи каркаса поверхні. Алгоритм засновано на методі моделювання на основі вихідного точкового ряду просторового обводу, який із заданою точністю представляє криву лінію з мінімальною за умовами задачі кількістю особливих точок.

Метод становлять такі способи:

- спосіб переходу від вихідної просторової дискретно представленної кривої (ДПК) до плоскої ДПК;
- спосіб формування допоміжної плоскої ДПК, що складається з вихідних точок і скільки завгодно великої кількості точок згущення, які можна інтерполювати монотонною кривою лінією;
- спосіб формування просторової ДПК постійного ходу, графік зміни кривини вздовж якої аналогічний графіку допоміжної плоскої ДПК;
- спосіб формування обводів, які із заданою точністю представляють згущену просторову ДПК.

Зазначені способи засновані на геометричних побудовах, які зводяться до визначення довжин відрізків і площ трикутників. Необхідні обчислення полягають у вирішенні систем лінійних рівнянь. Простота геометричної та обчислювальної схем забезпечує високу точність розрахунків та не потребує застосування ітераційних процесів.

Зазначені особливості роблять запропоновані в роботі способи й алгоритм максимально відповідними задачі їх подальшої реалізації у вигляді комп'ютерних програм.

На основі запропонованого алгоритму розроблено програмне забезпечення для автоматизованого формування в CAD-системі обводів, що представляють криві лінії з визначника поверхні. Обводи використовуються для створення лінійних каркасів, на основі яких за допомогою стандартних функцій CAD-системи формується модель поверхні.

Основною сферою використання запропонованих методу й алгоритму є моделювання поверхонь з підвищеними динамічними якостями, що обмежують виробу, функціональне призначення яких – взаємодія із середовищем.

Список використаних джерел

1. Jadhav Y.P., Chougule V.N., Mulay A.V. Free-form surface models generation using reverse engineering techniques – an investigation. *IOSR Journal of Mechanical & Civil Engineering*. 2016. P. 379–385. <https://doi.org/10.9790/1684-15008030311-15>.
2. Hashemian A., Imani B. A new quality appearance evaluation technique for automotive bodies including effect of flexible parts tolerances. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2017. Vol. 46, no. 2. P. 157–167. <https://doi.org/10.1080/15397734.2017.1321487>.
3. Fooladi M., Foroud A. Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbine. *IET Renewable Power Generation*. 2016. Vol. 10, no. 2. P. 250–259. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0419>.
4. Farhad Hosseini S., Moetakef-Imani B. Innovative approach to computer-aided design of horizontal axis wind turbine blades. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2017. Vol. 4. Iss. 2. P. 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2016.11.001>.
5. Qawaqzeh M., Szafraniec A., Halko S., Miroshnyk O., Zharkov A. Modelling of a household electricity supply system based on a wind power plant. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96. <https://doi.org/10.15199/48.2020.11.08>.
6. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun O., Miroshnyk O., Shchur T., Śrutek M., Gackowska M. Interpolation with Specified Error of a Point Series Belonging to a Monotone Curve. *Entropy*. 2021. Vol. 23, no. 5. P. 493. <https://doi.org/10.3390/e23050493>.
7. Ivan M. A note on the Hermite interpolation. *Numerical Algorithms*. 2014. Vol. 69, no. 3. P. 517–522. <https://doi.org/10.1007/s11075-014-9909-x>.
8. Argyros I.K., George S. On the convergence of Newton-like methods using restricted domains. *Numerical Algorithms*. 2016. Vol. 75, no. 3. P. 553–567. URL: <https://doi.org/10.1007/s11075-016-0211-y>.
9. Samreen S., Sarfraz M., Hussain M. Z. A quadratic trigonometric spline for curve modeling. *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14, no. 1. P. e0208015. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208015>.
10. Li H., Zhang L. Geometric error control in the parabola-blending linear interpolator. *Journal of Systems Science and Complexity*. 2013. Vol. 26, no. 5. P. 777–798. <https://doi.org/10.1007/s11424-013-3178-y>.
11. Shen W., Wang G., Huang F. Direction monotonicity for a rational Bézier curve. *Applied Mathematics-A Journal of Chinese Universities*. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1007/s11766-016-3399-7>.
12. Volkov Y.S. Obtaining a banded system of equations in complete spline interpolation problem via B-spline basis. *Central European Journal of Mathematics*. 2011. Vol. 10, no. 1. P. 352–356. <https://doi.org/10.2478/s11533-011-0104-1>.
13. Weishi Li, Shuhong Xu, Jianmin Zheng, Gang Zhao. Target curvature driven fairing algorithm for planar cubic B-spline curves. *Computer Aided Geometric Design*. 2004. Vol. 21. Iss. 5. P. 499–513. <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2004.03.004>.
14. Hongli W., Wei Z. Modeling of the no-tillage planter and simulation of the cutting-stubble knife. *System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization*. 2012. P. 335–338. <https://doi.org/10.1109/ICSSEM.2012.6340880>.
15. Гавриленко Є. А., Холодняк Ю. В., Мірошніченко М. Ю. Алгоритм моделювання одновимірних обводів за заданими умовами. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 12, т. 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v12i1.301>.
16. Холодняк Ю. В. Варіативне дискретне геометричне моделювання обводів на основі базисних трикутників по заданому закону зміни кривини : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь, 2016. 24 с.

Стаття надійшла до редакції 14.04.2025 р.



Y. Havrylenko, Y. Kholodniak, I. Tetervak
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR FORMING SPATIAL MONOTONE CURVES

Summary

The formation of complex functional surfaces given by an array of points is an urgent task of geometric modeling. The geometric model of the surface is formed on the basis of a discrete linear framework, the elements of which are curved lines that interpolate sequences of points selected from the original array. Controlling the presence of singular points in the framework lines is an important condition for ensuring the necessary surface properties. The work solves the problem of modeling a smooth contour of the interpolating point series belonging to the curve line that contains the minimum number of singular points under the conditions of the problem. The solution of the problem of controlling the presence of singular points in the curve that interpolates the given point series is based on the rejection of its analytical representation. The interpolating curve is formed in the form of a region of possible location of its monotonic parts. All curved lines that meet the conditions of the problem cannot be located outside the specified region. As a linear element of the frame, a contour is used, which is formed inside the region of possible location of parts of the interpolating curve, along which the curvature values monotonically increase or decrease. The absolute error of interpolation of the point series is estimated by the width of the specified region. If the interpolation error of the original point series turns out to be greater than the assigned value, then the width of the region of the curve location is reduced by assigning intermediate points. The algorithm proposed in the work for modeling spatial linear elements of the frame while controlling the occurrence of special points is based on the formation of auxiliary flat discretely represented curves, the characteristics of which determine the configuration and properties of spatial contours. Based on the proposed algorithm, software has been developed for the automated formation in the CAD system of contours representing curved lines from the surface determinant.

Keywords: monotone curve; tangent circle; adjacent plane; region of the curve; contour, algorithm, software.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-3>

УДК 631.3.004.6

D. Zhuravel, Dr. habil.

ORCID: 0000-0002-6100-895X

A. Bondar, PhD.

ORCID: 0000-0002-4761-9084

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua

IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF WHEEL TRACTORS

Summary. The scientific article substantiates the importance of adaptive steering for the controllability of wheeled tractors, in particular, taking into account important factors such as speed, gear ratio of the steering mechanism, external disturbing factors and others. The developed mathematical model allows you to effectively control the process of tracking the trajectory of the machine-tractor unit, ensuring compliance with agrotechnical requirements. When inter-row processing of corn, the deviation from straightness can be 10 cm when reaching a maximum speed of 4 m/s, which shows the importance of adaptive control to achieve the required accuracy and quality of processing.

Keywords: steering, gear ratio, maneuverability, baseline, movement speed, movement trajectory, deviation.

Introduction. Control systems of modern wheeled tractor are very diverse and in many respects determine the initial properties of the equipment – maneuverability, mass, dimensions, traction and traction properties; permeability; width of capture, speed and productivity of work, skidding, crushing of the upper layer and compaction of deep soil layers [1–5].

Agricultural energy means work in various loading and speed modes with increased non-safety movement and mandatory compliance with agrotechnical, ergonomic and energy indicators (narrow corridor, row spacing, crowding of people and animals, poor road conditions and off-road), therefore strict requirements are placed on the main parameters of their turn control systems.

Moreover, the rapid development of technology has recently led to a two- or even three-fold increase in external influences: power has increased – from 300 to 700 hp, weight – from 10–15 to 40–50 tons, the load on the axle has increased – from 10 to 20 t, road dimensions in width – from 2.5 to 3.5 m, the number of axles – from 2 to 3 or 4. Today, the increase in these parameters has reached its limits, and it is usually limited by the tractor control system.

At the same time, agricultural production needs further growth in productivity, yield, cost reduction, and the use of new technologies. But nature and existing structures cannot cope with this – the soil is over-compacted, there is not enough moisture, the working organs of machines constantly break, etc.

A radical improvement in increasing the speed and controllability of machines is possible based on the use of modern advances in automation. Thus, it is proposed to develop a steering drive that can provide high controllability of vehicles at all speed modes.

Recent research and publications analysis. The concept of controllability of a wheeled machine is ambiguous and is interpreted differently by different authors. Thus, researchers involved in the development of various means of automatic driving [6–12] believe that controllability is the ability of a unit operating under load to accurately follow a given trajectory. Others consider controllability as the ability of the car to withstand the trajectory set by the driver through the steering mechanism, including straight-line movement and turning mode with a given radius, including under the influence of external forces [13–18]. Some understand by controllability the ability of the unit to track the

position of the steered wheels, that is, a property that does not depend on the driver, but belongs to the unit as a dynamic system that interacts with the external environment.

Despite the fact that the concept of controllability differs somewhat among researchers, they all consider it as a property of the “man-unit-soil” system. Therefore, it is necessary to consider this concept in a complex manner, taking into account all components of this system. Given the fact that such an element as “man” is unstable in it, the management process itself is a rather subjective concept. Thus, if the driver is highly qualified, he can better ensure the movement of tractor with a slight deviation from the given trajectory of movement. But, if the working conditions are quite difficult (poor visibility, a lot of weeds, complex topography of the field, fatigue, etc.), then the driver may make various mistakes, and if the flow of information becomes too large and continues for a long time, then a disruption in work may occur person, there will be a deficiency in the form of bending of baselines, cutting of cultivated plants, etc.

The steering control is designed to maintain and change the direction of movement of the wheeled tractor in accordance with the actions of the operator. It is a part of the complex of mechanisms and aggregates of the tractor control system [1, 7, 9, 11, 19–22].

Purpose statement. Study of patterns of impact of tractor speed parameters in the longitudinal plane on the efficiency of agricultural technological operations.

Results and discussion. The maneuverability of the tractor is an important operational property of the wheeled machine, which determines the efficiency of their use and the safety of movement.

A large number of works are devoted to the study of the maneuverability of wheeled vehicles and machine-tractor units (based on wheeled tractors). The analysis of the results of these works made it possible to compile the structure of maneuverability as a complex operational property, which includes simpler (main) properties (Fig. 1) [23–26].

Analyzing the given scheme, it can be stated that the maneuverability of the machine-tractor unit is an important operational factor that affects the agrotechnical, operational and technical-economic indicators of its work. But at the same time, this is a very broad concept, because it includes such issues as actual controllability, turning, and fitability of the machine [27–33].

Having considered the designs of the existing steering controls [1, 2, 3, 13, 29], it can be concluded that none of them can completely resolve the technical contradiction between the maneuverability of a wheeled vehicle and its controllability – at high speeds, a reduced sensitivity of the steering control is necessary, and when maneuvering on the contrary, it is increased [2, 3, 29].

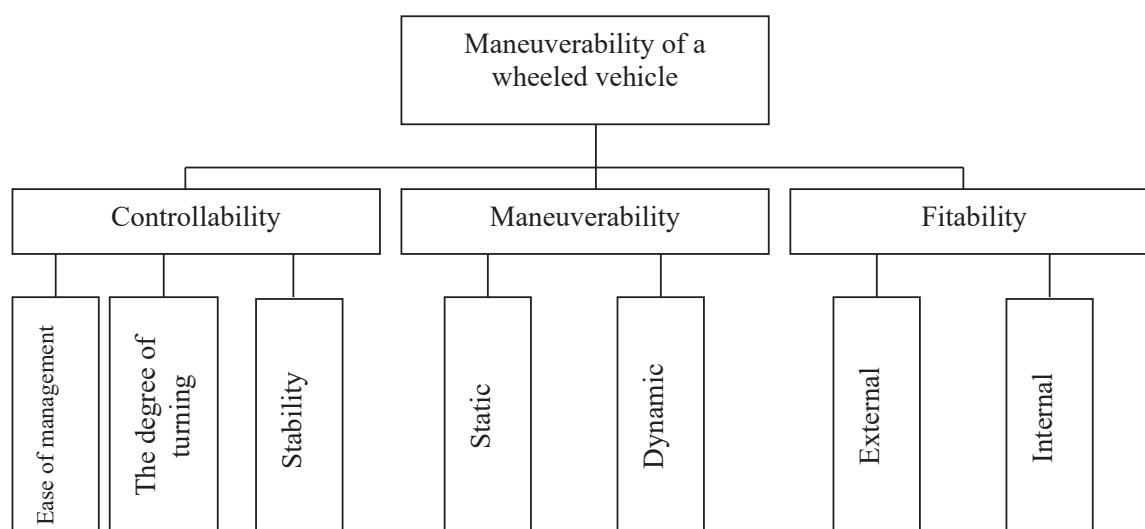


Fig. 1. Structure of tractor maneuverability properties (based on wheeled tractors)

It is known that a wheeled chassis with traditional steering as a control object is an integrator with variable parameters. The turning of the vehicle on the terrain is the result of accumulation in the course of longitudinal movement. This creates inconsistencies in the control process at different speeds. When maneuvering at low speeds (up to 10...20 km/h), the steering sensitivity (ξ) is insufficient, and at high speeds (ξ) it is excessive.

We note that sensitivity means the intensity of the control object's response to a single control influence. To control the direction of movement of the vehicle, the sensitivity of the steering control ω_r is the ratio of the change in the angular speed of the car to the angle of rotation of the steering wheel that caused it.

Within the framework of the existing mechanical schemes of steering drives, the sensitivity is set by the steering gear ratio W , as a rule, constant ($W = \text{const}$) (The gear ratio is the ratio of the angle of rotation of the steering wheel to the angle of rotation of the driven wheels of the chassis).

For convenience when maneuvering, it is desirable to reduce the gear ratio, and in transport (high-speed) – to increase it.

It is known that low-speed cars have a steering gear ratio of 4...6, and high-speed cars have up to 30. When designing the steering, the gear ratio is chosen to be large enough to ensure stability of movement at high speeds, which leads to inconvenience when maneuvering.

Thus, a variant of the steering drive is offered, which ensures high controllability of vehicles at all speed modes (Fig. 2).

Variants of execution of the summing mechanism are known [13–17, 29]: for heavy machines, you can use a two-circuit hydrovolume steering with a free spool. For this purpose, the servo pump dispenser is connected in parallel with the main dispenser pump.

The functional purpose of the adder is to compose the control influence (steering wheel rotation) and correction (from the servo drive) in order to ensure the necessary transmission ratio of the steering drive.

The servo drive makes a corrective effect, the value of which is regulated by its microprocessor.

The microprocessor uses information about the intensity of the control influence (VP1) and the speed of the vehicle (VP2), which comes from the corresponding measuring transducers.

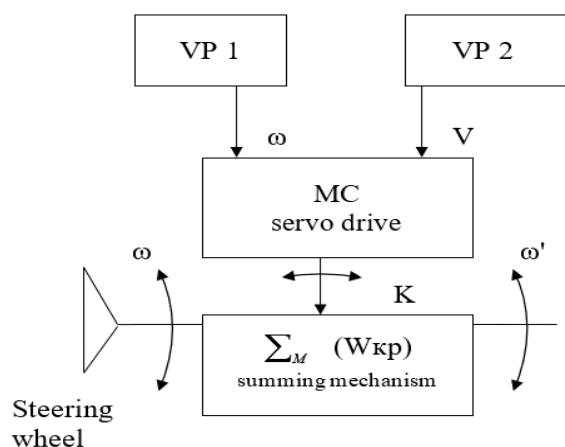


Fig. 2. Structural diagram of the steering drive

The structure of the steering drive includes the following devices:

- summing mechanism (Σ_m);
- servo drive with microprocessor control;
- measuring transducers for steering wheel rotation (VP1) and vehicle speed (VP2).

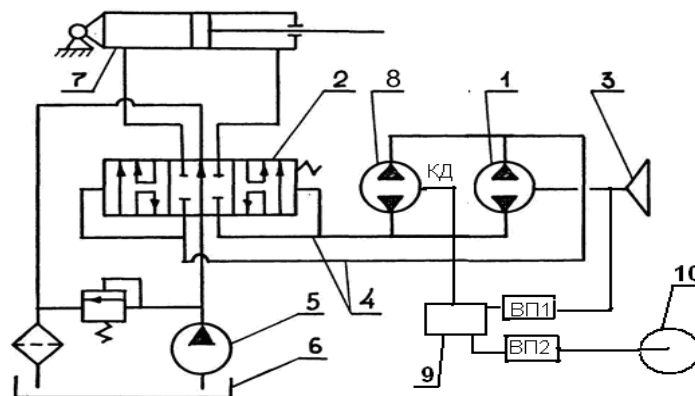


Fig. 3. Scheme of twochannel hydraulic power steering with constant sensitivity: 1 – the main dosing pump; 2 –hydraulically controlled spool; 3 – steering wheel; 4 – hydraulic channels of the main and correcting dosing pumps; 5 –feeding pump; 6 – crankcase; 7 – hydraulic cylinder of the steering mechanism; 8 – correcting dosing pump with a stepper motor; 9 – servo drive; 10 – steering wheel

The performance of experimental studies was ensured by the developed hydraulic volume steering with constant sensitivity [9, 29], the hydraulic scheme of which is shown in Fig. 3.

It is known that currently the use of natural experiments can take place only after they have been tested on various simulators. This allows you to save money and time, as well as identify a significant number of defects at the design stage. It is very important to develop simulators that would work in an interactive mode. This especially applies to the “man-machine” system. The purpose of developing such a system is to establish a relationship between the controllability of the machine-tractor unit on the one hand, the conditions of its movement, the design and parameters of the steering – on the other. Based on the above, – the “man-machine” system, which is connected with a large number of informational, psychological and physical processes, is subject to modeling. The most important and complex link of this system is a person, that is, an operator. This is explained by the fact that he needs to monitor the external conditions on the road and in the field, maintain the engine in optimal mode, despite the fact that the speed and load on the working organs are constantly changing. It is also necessary to monitor the working bodies and control devices of the tractor and timely perform corrective actions in accordance with the technological process and external conditions. And, of course, the driver receives additional psychological and physical stress when working at night, on slopes, and even more so in mountains.

The purpose of mathematical modeling is step-by-step calculation of the position of the vehicle relative to the baseline during movement. This allows you to get high-quality controllability indicators. To do this, you need to know the current value of the course angle α_1 and the displacement of the determined point of the vehicle Y. The calculation of each subsequent position is carried out depending on the properties of the steering wheel, movement parameters (speed), the current value of the control and disturbing influences. At the same time, the mathematical model must take into account the kinematic characteristics of the vehicle.

The construction of the mathematical model is based on a two-point “bicycle” model. Therefore, to determine the position of the object on the plane, it is necessary to know two points or one point and the heading angle [3, 29].

Accordingly, the diagram of the tractor management process along the baseline will have the following form (Fig. 4).

To build a mathematical model of the tractor movement process along the baseline, the following assumptions were made:

- the reaction speed of the tractor driver-operator is constant, does not depend on weather conditions and does not exceed 2.5 seconds;
- the influence of such factors as backlash in the steering mechanism, the connection between the elastic tire and the road surface, and the fluctuation of the lateral force on the tractor axles is comprehensively taken into account in the form of the input angle δ , which is generated by the program and has a normal distribution law.

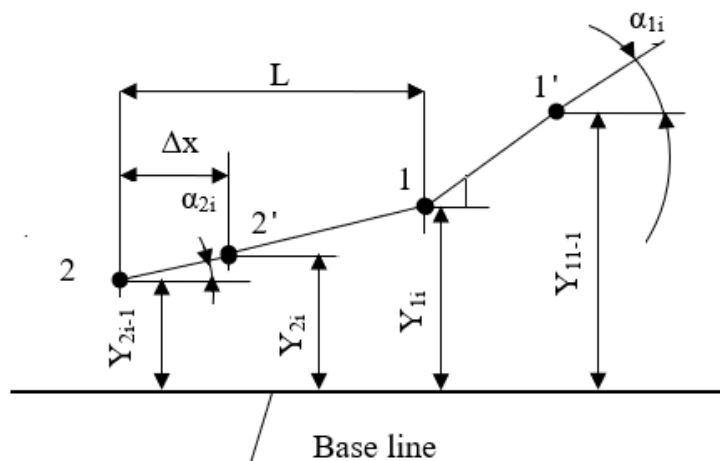


Fig. 4. Tractor movement scheme along the baseline: L – is the length of the wheel base of the tractor; α_1 – turning angle of the front steering wheels; α_2 – current value of course angle; Y_1 , Y_2 – the current value of deviations from the baseline of the front and rear wheels of the tractor, respectively; Δx is the quantization step of the model by displacement

Limitation:

- tractor speed varies from 1 to 4 m/s (3.6 to 14.4 km/h);
- the gear ratio of the steering mechanism (traditional steering) is 19;
- the gear ratio of the steering mechanism (experimental version) changes in automatic mode from 2 to 19;
- disturbing effects of external factors affect the steering wheels and deviate them from the neutral position within $0-5^\circ$;
- the start of data generation will take place only after the tractor reaches the technological speed of movement.

The discrete mathematical model of traditional steering in this case looks like this:

$$\begin{cases} a_{1i} = \frac{a_i}{W}; & \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ a_{3i} = \frac{(Y_{1i-1} - Y_2)}{L}; \\ Y_{1i} = Y_{1i-1} + (a_{3i} + a_{1i} + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ Y_{2i} = Y_2 + a_{3i} \cdot \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

where V is the tractor movement speed, m/s;

W – transmission ratio of the steering mechanism;

Δt – time quantization step (0.05 s);

δ is the value of the perturbing angle of insertion of elastic tires.

During movement, the machine-tractor unit deviates from the given trajectory due to the action of external disturbing factors on it. This leads to the fact that the operator must constantly perform corrective actions with the steering wheel.

With a two-channel steering scheme, the gear ratio will be calculated as follows:

$$W_i = W \left(1 + \frac{V}{V_0} \right), \quad (2)$$

where V_0 is the average value of the tractor speed range (const).

In order to conduct a study of the mathematical model, a computer simulator was developed, which allows you to conduct a virtual race in an interactive mode. At the same time, the results of the tractor control process were also compared with traditional steering and adaptive steering, that is, with a variable gear ratio of the steering mechanism.

Considering equation (2), system (1) can be written in the following form:

$$\begin{cases} \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ W_i = W \left(1 + \frac{V_i}{V_0} \right) \\ a_{1i} = \frac{a_i}{W_i}; \\ a_{2i} = \frac{(Y_{li-1} - Y_2)}{L}; \\ Y_{li} = Y_{li-1} + (a_{3i} + a_{1i} + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ Y_{2i} = Y_2 + a_{3i} \cdot \Delta x \end{cases} \quad (3)$$

The developed software makes it possible to continuously conduct all three stages of research:

- data entry;
- simulation modeling;
- processing of results.

The purpose of the experiments is to confirm the adequacy of the mathematical model of the tractor movement in the longitudinal plane, as well as to substantiate the high-speed mode of operation during technological agricultural operations.

Research on a computer simulator consists of several stages:

- determination of the type of steering control, its parameters and parameters of the driving mode of the tractor model;
- conducting an experimental drive in the conditions of interactive information exchange between the computer and the operator, while the dynamics of changes in control influences and control quality indicators are recorded;
- processing the results of the interactive experiment using mathematical methods – dispersion and spectral analysis and obtaining quantitative indicators of controllability – quality factor.

The developed software (Fig. 5–6) makes it possible to continuously conduct all three stages of research.

The program starts with debugging the simulator (Fig. 5):

- the type of steering model is determined;
- machine parameters and driving modes;

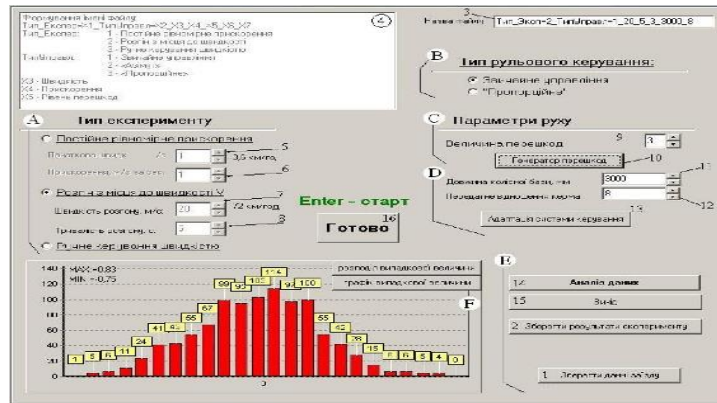


Fig. 5. The initial dialogue window of the simulator

- the relationship between the real and virtual steering wheel is established by determining the sensitivity of the mouse;
- the presence of disturbing influences is established;
- formation and fixation of experimental data files.

Setting initial data. The sequence of setting the initial data is not particularly important, but it is necessary to focus on the meaning of each element in more detail.

As you can see from the initial dialog window of the program (Fig. 5), to start the simulator, you need to select the following characteristics of the experiment:

Type of experiment (A). The choice of “*Constant uniform acceleration*” is allowed, according to which the speed begins to increase continuously until the machine-tractor unit leaves the road. After that, the experiment is stopped. The input data are initial speed 1 (m/s) and acceleration 6 (m/s²), that is, the model starts moving from the set speed with the specified acceleration.

The experiment “*Acceleration from a standstill to a specified speed*”, which refers to input data 7, is used when it is necessary to determine the controllability of the tractor with different types of steering and with different driving parameters. For the purpose of gradual acceleration, the input parameter “acceleration duration” 8 is adopted.

The type of experiment “*Manual speed control*” is necessary for the initial familiarization of the user with the capabilities of the program with different types of steering and driving parameters.

Steering type (B). The appropriate type of steering is installed.

Motion parameters (D). “*Interference magnitude*” 9 has a point form and, according to its value, after pressing the “Interference generator” button 10, an array of random disturbances will be obtained, which can be seen graphically and their maximum and minimum values in the field F can be estimated. This parameter is necessary to determine the stability of the control in case of obstacles of different levels.

Entering input data (C). “*Wheelbase length*” 11 does not need a full explanation – the value is self-explanatory.

“*Gear ratio of the steering mechanism*” 12 – how much you need to turn the steering wheel so that the angle of rotation of the wheels is 1°.

After setting the desired parameters, we proceed to the experiment.

Control quality is assessed by the ability of the machine-tractor unit model to keep along the baseline 25.

The dialog box presents auxiliary information: the current speed 21, the angle of rotation of the wheels 22, the name of the file 3, the number of experimental points 23 and a list of options for early exit from the program 24.



Fig. 6. Execution of the experiment

After the end of the active phase of the experiment, which can happen in two cases (the user himself stopped working or the tractor model exceeded the specified limits), the user returns to the main dialog box (Fig. 7), where he is asked to save the experimental data (E).

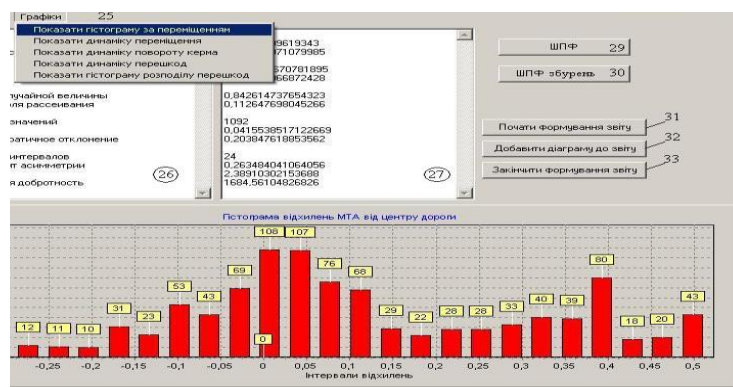


Fig. 7. "Save check-in results" dialog box for creating an experiment report and analyzing experimental data using the functions available in the program

When you click on the button «Save check-in results» 1, the data is saved to a text file with the extension *. txt.

When clicking on the "Data analysis" button 14, the user goes to the corresponding dialog box (Fig. 7).

When calculating the main parameters of the angular movement of the steering wheel and the speed of movement of the MTZ-80 tractor, which works in a unit with a cultivator, the recommendations outlined in [2, 3, 18] were used.

The following tractor traffic conditions were chosen for the experiment:

- tractor speed, m/s – from 1 to 4 (3.6–14.4 km/h);
- the gear ratio of the steering mechanism is 2–8;
- the number of repetitions of each race is 3.

The results of each race are recorded by a computer and displayed in the following form:

Type of experiment: Acceleration to speed

Steering type: Constant uniform acceleration

PARAMETERS OF MOTION

The amount of obstacles: 2

Wheelbase length: 3500

Steering gear ratio: 12

Number of experimental points: 1083

Algebraic sum of experimental data values: 0.337420240023911

Mathematical expectation (arithmetic mean): 0.0003112732841549

Minimum data value: -0.00255117600777763

Maximum data value: 0.00284996145173058

Range of change of experimental data: 0.00540113745950821

Center of Scatter Field: 0.000149392721976472

Variance: 1.85741986833043E-6

Mean square deviation: 0.0186287191926844

Number of intervals: 24

Asymmetry coefficient: -0.273005879932086

Excess: 2.32932922884906

given Q factor: 53.8381233586602

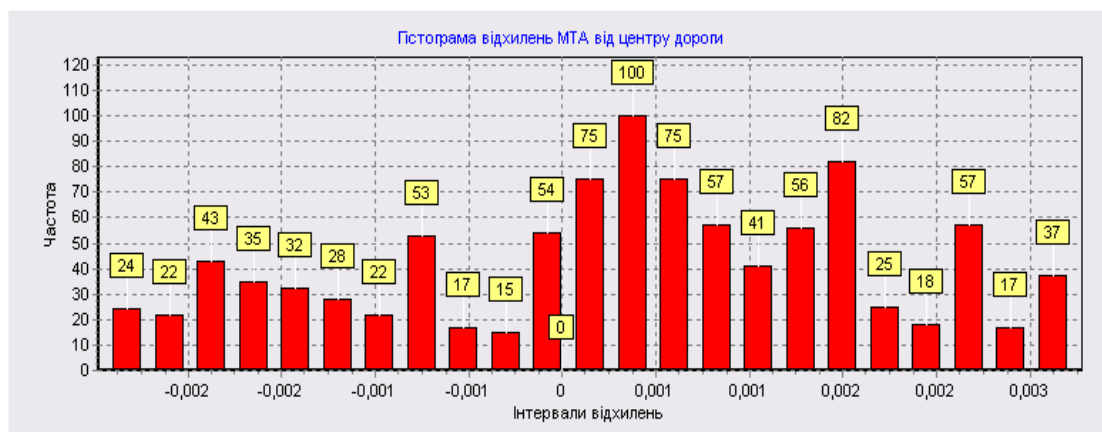


Fig. 8. Histogram of the initial response of deviations from the middle of the road

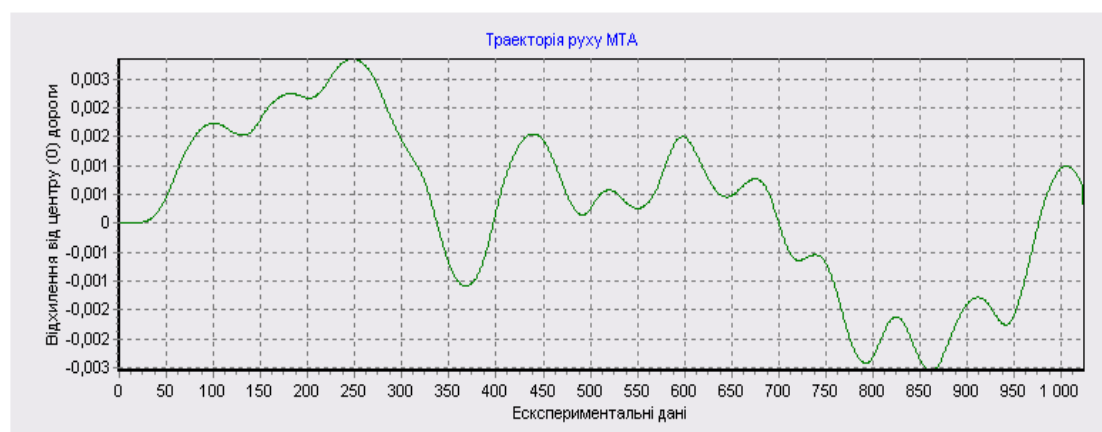


Fig. 9. Tractor movement trajectory

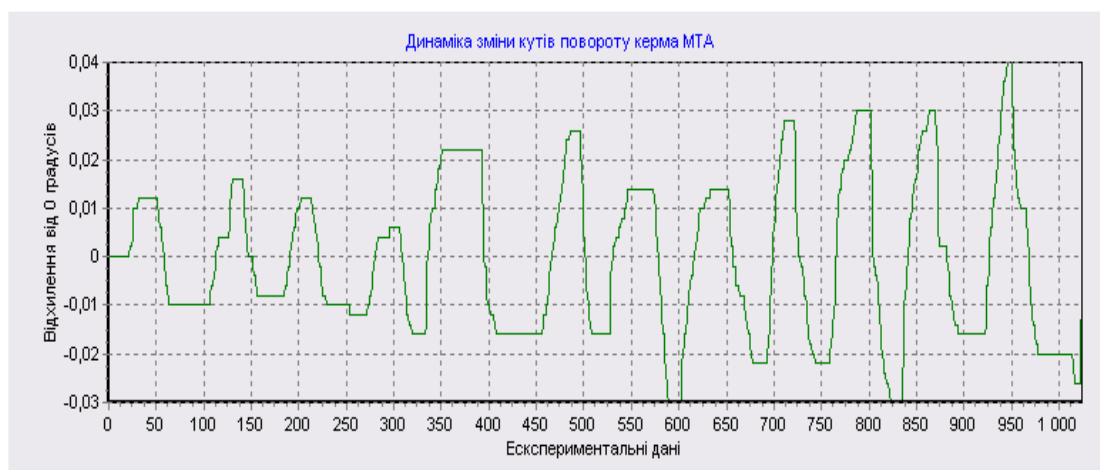


Fig. 10. Dynamics of tractor steering wheel rotation

Table 1

Comparative analysis of studies

Tractor movement speed m/s, (km/h)	Mean square deviation							
	Tractor with standard steering				Tractor with experimental steering			
	1	2	3	Average	1	2	3	Average
1 (3.6)	0.019	0.014	0.017	0.016	0.0125	0.012	0.01	0.011
2 (7.2)	0.039	0.033	0.035	0.036	0.019	0.017	0.018	0.018
3 (10.8)	0.081	0.071	0.068	0.073	0.025	0.023	0.025	0.024
4 (14.4)	0.093	0.111	0.105	0.103	0.026	0.026	0.026	0.026

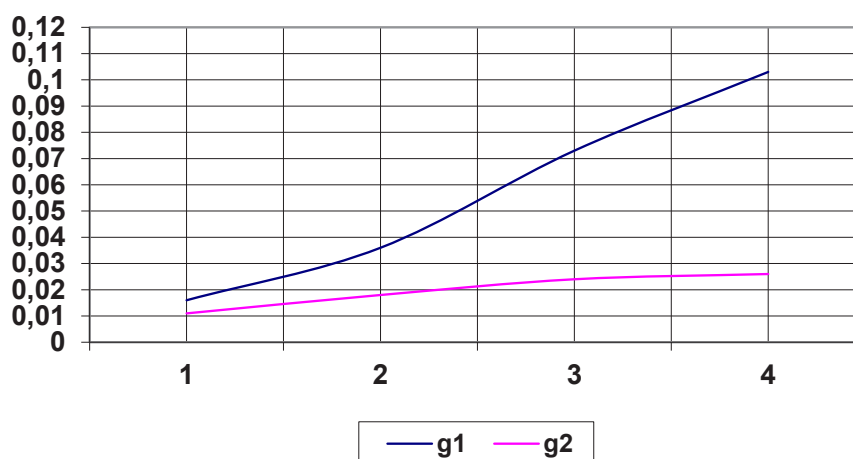


Fig. 11. Dependence of the mean square deviation on the tractor movement speed:
 σ_1, σ_2 – respectively, the mean square deviation of tractor from the baseline
when using standard and experimental steering

Conclusions. 1. The maneuverability of the test sample is significantly improved, because at the speed of the tractor $V = 1$ m/s (3.6 km/h), the gear ratio of the traditional steering $W_{tr} = 12$, and the gear ratio of the experimental steering $W_{ex} = 2$.

2. It was found that at low speeds of tractor movement ($V = 1-1.5$ m/s) the error is difficult to track, because it is approximately the same for both types of steering, but as the speed increases, it increases significantly for standard steering $\sigma_1 = 0.103$ cm and insignificantly for experimental $\sigma_2 = 0.026$ cm.

3. The use of steering with adaptive properties has a significant advantage over standard steering, especially at high speeds, it has a margin of stability of the controlled movement and provides ease of maneuvering, which significantly increases the productivity of the tractor.

Bibliography

1. Петров В. О. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2006. Вип. 43. С. 98–102.
2. Петров В. О. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2006. Вип. 43. С. 98.
3. Петров В. О. Синтез ергономічних рульових управлінь для мобільних машин. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2000. Вип. 1, т. 17. С. 60–64.
4. Лубяний М. М. Аналіз функціонування системи «водій – рульове керування» МТА. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2000. Вип. 1, т. 17. С. 21–27.
5. Петров В. О. Рульове управління колісного шасі яке реалізує керування напрямком руху по положенню. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2001. Вип. 1, т. 24. С. 83–86.
6. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture / Modern Development Paths of Agricultural Production. *Springer Nature Switzerland AG.*, 2019. P. 29–40.
7. Kyrylo Samoichuk, Olga Viunyk, Dmytro Milko. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 142–148.
8. Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1/12 (103). P. 24–29.
9. Oleksandr Sclyar., Radmila Sclyar., Ganna Pedchenko. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH – Agricultural Engineering*. National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed to Agriculture and Food Industry. INMA Bucharest, Vol. 60, no. 1 / 2020. P. 269–274.
10. Kyrylo Samoichuk, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksienko, Serhii Petrychenko. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 633–640.
11. Дашивець Г. І. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. С. 85–97. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-16.
12. Dmytro Zhuravel. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. 18 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-5.
13. Kuznetsov, M., Lysenko, O. Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 6 (8 (114)). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.
14. Дашивець Г. І. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 2. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-2.
15. Samoichuk K., Hutsol T., Kuboń M., Niemiec M., Mykhailova L., Gródek-Szostak Z., Sorokin D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.
16. Kaþlan M., Klimek K., Maj G., Lemeshchenko-Lagoda V., Boltianskyi B., Boltianska L., Syrotyuk H., Syrotyuk S., et al. Method of Evaluation of MaterialsWear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 3416. <https://doi.org/10.3390/en15093416>.



17. Дашивець Г. І. Дослідження адаптивної роботи рульового керування транспортного засобу в швидкісному режимі. *Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції* : матеріали міжнар. наук.-практ. форуму (21–22 червня 2019 р.): у 2 ч. / ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Ч. 1. С. 203–204.
18. Бондар А. М. Фактори поліпшення керованості МТА. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ, 2009. № 2-09. С. 150–160.
19. Бондар А. М. Надійність людини-оператора в складній технічній системі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2009. Вип. 9, т. 5. С. 13–18.
20. Бондар А. М. Вдосконалення рулевих механізмів із перемінним передаточним відношенням. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2010. Вип. 10, т. 2. С. 13–18.
21. Сухенко Ю. Г. та ін. Надійність обладнання харчової галузі : навчальний посібник. Київ : ЦП «Компринт», 2019. 372 с.
22. Дідур В. А. та ін. Гідравліка : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 624 с.
23. Дідур В. А. та ін. Технічна механіка рідини і газу : підручник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти. Мелітополь : ТОВ «Колор Принт», 2019. 468 с.
24. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : підручник для здобувачів вищої освіти / Д. П. Журавель, І. П. Паламарчук, С. М. Уманський, В. І. Паламарчук; за ред. Д. П. Журавля. Київ : ЦП «Компринт», 2021. 448 с., іл.
25. Паніна В. В. та ін. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання : навчально-методичний посібник до лабораторного практикуму для самостійної роботи. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 84 с.
26. Журавель Д. П., Бондар А. М. Моделювання керованості колісних тракторів шляхом використання адаптивного рульового керування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 3. С. 18–38. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-2.
27. Журавель Д. П., Бондар А. М. Техніко-економічне обґрунтування доцільності використання адаптивного рульового керування колісного трактора. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. С. 7–17. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-1.
28. Igor Palamarchuk, Fu Yuanxia, Ievgenii Petrychenko, Roksolana Blishch, Anatoliy Holovatyuk, Olexander Domin, Tatiana Kostiuk. Spectroscopic assessment and quantitative analysis of the trace element composition of vegetable additives to meat products. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024. Vol. 18. P. 480–496. DOI: <https://doi.org/10.5219/1965>.
29. Журавель Д. П., Бондар А. М. Підвищення керованості колісних тракторів шляхом використання адаптивного рульового керування : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. 154 с., іл.
30. Poliakov A., Volokh V., Andreev A., Rebenko V., Kurllov V., Yamshinskij M., Lukianenko I., Ivanchenko D., Zhuravel D., & Kovalenko I. Identifying patterns in the structural-phase transformations when processing oxide doped waste with the use of carbon reducer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5. No. 12 (131). P. 25–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313449>.
31. Алдошин А. С. Ремонт блоків циліндрів з тріщинами верхніх перемичок. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 480–482.
32. Алдошин А. С. Дослідження руйнувань в корінних опорах двигунів. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 491–493.
33. Алдошин А. С. Ремонт чавунних блоків з тріщинами водяних сорочок. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 514–516.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2025 р.



Д. Журавель, А. Бондар
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ

Анотація

У статті наведено значення адаптивного рульового керування для керованості колісних тракторів, зокрема враховуючи важливі фактори, як-от швидкість руху, передаточне відношення рульового механізму, зовнішні збурюючі фактори та інші. Розроблена математична модель дає можливість ефективно контролювати процес відслідковування траєкторії машинно-тракторного агрегату, забезпечуючи відповідність агротехнічним вимогам. За міжрядного обробітку кукурудзи відхилення від прямолінійності може становити 10 см із досягненням максимальної швидкості 4 м/с, що показує важливість адаптивного керування для досягнення необхідної точності та якості обробки. Розроблене програмне забезпечення дає змогу отримувати показники керованості в інтерактивному режимі, змінювати параметри віртуальних заїздів та знаходити оптимальні варіанти. Також були вибрані відповідні технічні засоби для проведення випробувань. Зроблені висновки та доведена перспективність використання адаптивного рульового керування. Сільськогосподарські енергетичні засоби працюють у різних навантажувальних і швидкісних режимах із підвищеною небезпекою руху й обов'язковим дотриманням норм агротехнічних, ергономічних та енергетичних показників (вузький коридор, міжряддя, скупчення людей і тварин, погані дороги та бездоріжжя), тому до основних параметрів їх систем керування поворотом висуваються жорсткі вимоги. Маневреність опитного зразку значно поліпшується, тому що за швидкості трактора $V = 1$ м/с (3,6 км/год) передаточне співвідношення традиційного рульового керування $W_{\text{тр}} = 12$, а передаточне співвідношення експериментального рульового керування $W_{\text{екс}} = 2$. Вдалося дослідити, що добротність експериментального рульового керування за невеликих швидкостей руху ($V = 1\text{--}3$ м/с) спочатку підвищується, а з досягненням технологічної швидкості $V = 4$ м/с стає постійною. За використання традиційного рульового керування з підвищенням швидкості добротність значно погіршується і перебуває у зворотно-пропорційному зв'язку зі швидкістю руху трактора. Добротність експериментального зразку рульового керування перевищує добротність традиційного на технологічній швидкості $V = 4$ м/с приблизно у 5 разів і становить $D_{\text{екс}} = 154 \text{ с}^{-1}$, $D_{\text{тр}} = 39 \text{ с}^{-1}$. Встановлено, що за малих швидкостей руху трактора ($V = 1\text{--}1,5$ м/с) похибку складно відстежити, тому що вона для обох типів рульового керування приблизно однакова, але зі збільшенням швидкості руху вона значно зростає для стандартного рульового керування $\sigma_1 = 0,103$ см і незначно для експериментального $\sigma_2 = 0,026$ см. Використання рульового керування з адаптивними властивостями має значну перевагу над стандартним рульовим керуванням, особливо на підвищених швидкостях руху, має запас стійкості керованого руху та забезпечує зручність маневрування, що значно підвищує продуктивність роботи трактора. Таким чином, пропонується впровадити кермовий привод, який зможе забезпечити високу керованість транспортних засобів на всіх швидкісних режимах.

Ключові слова: рульове керування, передаточне співвідношення, маневреність, базова лінія, швидкість переміщення, траєкторія руху, відхилення.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-4>

УДК 631.363.3:632.362.2

М. Л. Заєць, к.т.н., доцент

Поліський національний університет

e-mail: mzaec81@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2290-1892

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОБПРИСКУВАЧА З РЕГУЛЯТОРОМ НОРМИ ВНЕСЕННЯ ЗА ЗМІННОЇ РОБОЧОЇ ШВИДКОСТІ

Анотація. Статтю присвячено дослідженню процесу розпилення та оцінювання якості за різних швидкостей руху для сільськогосподарського обприскувача з регулятором норми внесення.

Зміна швидкості руху є поширеним та неминучим під час нанесення пестицидів обприскувачами. Було проведено польові випробування для оцінювання впливу змін швидкості руху на розпилення та якість обприскування за допомогою штангового обприскувача без регулятора норми внесення (CNS) та з регулятором норми внесення (SRC).

Під час проведення досліджень штангу обприскувача було рівномірно розділено між трьома типами форсунок (XRC, AIXR та TTI) для отримання крапель різних розмірів (середніх, дуже великих та надвеликих відповідно). Перед початком випробувань обприскувач було відкалібровано для внесення 180 л/га за робочого тиску 0,207 МПа та швидкості руху 9,7 км/год.

Для оцінювання розпилення та якості обприскування застосування пестицидів проводилося за п'яти різних значень швидкості руху: 9,7, 12,9, 16,1, 19,3 та 22,5 км/год. Дані збирали шляхом розміщення вологочутливого паперу в різних точках уздовж штанги обприскувача в полі.

Результати для CNS (без регулятора) показали, що зі збільшенням швидкості руху кількість нанесених крапель та рівень розпилення значно знижувалися ($p < 0,05$) для всіх трьох типів форсунок, що було спричинено зменшенням кількості крапель на одиницю площі. Для SRC (з регулятором) розпилення залишалося більш стабільним за зміни швидкості руху.

Швидкість руху впливала на якість обприскування як для CNS, так і для SRC. Однак для SRC спостерігалися більші відхилення в якості розпилення через підвищення робочого тиску за збільшення швидкості руху. Для форсунок типу XRC та TTI було зафіксовано подібні тенденції в зміні розпилення та якості для обох варіантів обприскувача (CNS та SRC). Водночас форсунка AIXR демонструвала нестабільне розпилення та якість у разі зміни швидкості руху.

Результати дослідження свідчать, що сільськогосподарські обприскувачі, оснащені регулятором норми внесення, забезпечують більш рівномірне та стабільне розпилення порівняно з традиційними обприскувачами (без регулятора), коли швидкість руху змінюється під час застосування пестицидів. Хоча якість розпилення також зазнає змін у разі використання регулятора норми внесення, дотримання найкращих практик, як-от правильний вибір форсунок і застосування номінальних швидкостей руху, допоможе мінімізувати ці ефекти та забезпечити ефективне використання технологій внесення пестицидів.

Ключові слова: сільськогосподарські обприскувачі, норма внесення, швидкість руху, регулятор норми внесення, покриття розпиленням, якість обприскування.

Постановка проблеми. Застосування пестицидів є невід'ємною частиною виробництва просяних культур в Україні та світі. Використання пестицидів для боротьби з бур'янами, шкідниками та хворобами стабільно зростало протягом багатьох років [1].

Ефективне та раціональне використання пестицидів є ключовим фактором для продовження їх застосування в сільському господарстві, для безпечності чого важливо дотримуватися точ-

ності внесення та мінімізувати помилки в дозуванні, а також запобігати небажаного переміщення пестицидів за межі цільової зони. Крім дотримання передових методів управління, одним зі способів досягнення цього є використання сучасних технологій розпилення, як-от регулятор норми внесення [4; 5], автоматичне керування секціями штанги, індивідуальний контроль форсунок [6; 7] та системи PWM (імпульсно-модульного розпилення) [8; 9].

На покриття та ефективність розпилення пестицидів справляють вплив численні фактори, пов'язані з обладнанням і застосуванням, зокрема, швидкість руху та тип форсунки, розмір крапель відіграють важливу роль, оскільки вони можуть впливати на рівномірність покриття, якість, ефективність обприскування та дрейф пестицидів [10–14].

Сучасні тенденції включають використання обприскувачів із ширшими штангами (робоча ширина захвату $\geq 27,4$ м) та застосування за швидкостей, що перевищують номінальні ($\geq 19,3$ км/год), з метою охоплення більшої площі за мінімальний час.

Однак однією з основних проблем збільшення швидкості руху є зниження норми внесення, спричинене зменшенням загальної кількості крапель, що досягають цільової поверхні [15]. Крім того, зміни швидкості руху впливають на роботу форсунок та розподіл розмірів крапель, а збільшення швидкості може призвести до утворення більшої кількості дрібних крапель, що підвищує ризик дрейфу пестицидів.

Аналіз останніх досліджень. Попередні дослідження показали, що збільшення швидкості застосування може призводити до більшого дрейфу та зниження рівня покриття [10; 11; 13].

Якість розпилення є важливим параметром для класифікації форсунок на основі розміру крапель (СДК – середній діаметр крапель за об'ємом). Вона також впливає на рівень покриття та потенційний дрейф частинок [6]. Зазвичай традиційні плоскоструменеві форсунки (наприклад, TeeJet® XR або XRC), що створюють дрібні краплі, використовуються для внесення контактних пестицидів, оскільки вони забезпечують краще покриття ґрунту чи листової поверхні. Проте підвищений ризик дрейфу в разі використання таких форсунок призвів до появи інжекторних форсунок (AI-форсунок), як-от TeeJet® AIXR або TTI, які виробляють більші краплі, що краще підходять для внесення системних пестицидів та знижують ризик дрейфу [1; 7]. Усі перелічені фактори негативно впливають на економічні показники виробництва сільськогосподарської продукції. Тому постає завдання підвищити ефективність застосування пестицидів на етапі нанесення з використанням сучасних засобів контролю витрат робочих розчинів.

Комплексне дослідження, проведене USDA Economic Research Service щодо використання пестицидів для 21 вибраної культури в період з 1960 по 2008 рік, показало, що застосування пестицидів зросло більш ніж у три рази протягом перших двох десятиліть – з 88,9 млн кг дієвої речовини у 1960 році до 286,7 млн кг у 1981 році, а потім трохи знизилося до 234,1 млн кг у 2008 році [2]. Ця тенденція триває й донині, що підтверджує вагомий внесок пестицидів у загальні виробничі витрати на вирощування просапних культур у світі [3].

Дослідження довели, що AI-форсунки забезпечують кращий контроль дрейфу [1; 8] та можуть мати порівняну або навіть вищу ефективність покриття в зіставленні з традиційними форсунками [14; 15]. Тому правильний вибір форсунок є важливим для підтримання балансу між покриттям і дрейфом під час застосування пестицидів [20].

Зміни швидкості руху в поєднанні з іншими експлуатаційними факторами ускладнюють підтримання заданої норми внесення пестицидів. Однак точне дозування пестицидів (кг/га) є критично важливим для досягнення ефективного покриття та захисту рослин. Для забезпечення точності розпилення згодом було розроблено різні системи точного обприскування, які можуть бути інтегровані в сільськогосподарські обприскувачі. Одним із найпоширеніших рішень є регулятор норми внесення, який допомагає подолати проблему неточності внесення,

контролюючи витрату рідини та підтримуючи необхідну норму незалежно від змін швидкості руху [4; 5; 15].

Проте коригування витрати рідини відбувається шляхом зміни тиску розпилення, що також впливає на якість розпилення. Для форсунок із фіксованим отвором збільшення тиску призводить до утворення більшої кількості дрібних крапель [15]. Таким чином, хоча збільшення тиску допомагає підтримувати норму внесення та може покращити покриття, воно також суттєво підвищує ризик дрейфу [15].

Щоб розв'язати цю проблему, все частіше на сільськогосподарських обприскувачах використовують системи ІМР (імпульсно-модульованого розпилення), які дозволяють контролювати витрату рідини в широкому діапазоні швидкостей, змінюючи робочий цикл форсунки (час її відкритого стану), при цьому зберігаючи постійний тиск і розмір крапель [8; 9].

Формулювання мети дослідження. Огляд літератури показав, що більшість попередніх досліджень, які вивчали вплив типу форсунки або швидкості руху, були зосереджені переважно на оцінюванні покриття розпилення або дрейфу частинок [10–15]. Однак якість розпилення залишалася поза увагою цих досліджень. Крім того, більшість науковців не досліджували, як сучасні технології, зокрема регулятор норми внесення, можуть впливати на якість розпилення під час застосування пестицидів.

Нині значна частина традиційних штангових обприскувачів, особливо в малих і спеціалізованих господарствах, працює без регулятора норми внесення, тоді як більшість сучасних (зокрема, самохідних) обприскувачів оснащені цією технологією.

Отже, метою дослідження є оцінювання розпилення та якості обприскування за різних швидкостей руху для сільськогосподарського обприскувача, обладнаного регулятором норми внесення, та без нього.

Основна частина. Для внесення гербіцидів упродовж обох років використовували штанговий обприскувач John Deer M700, в агрегаті з трактором John Deer 6125 (СФГ «Костишина», смт. Любар, Житомирська область) (Рис. 1а). Обприскувач мав довжину штанги 18,3 м із форсунками, розташованими рівномірно на відстані 0,46 м одна від одної.

У 2023 році обприскувач використовувався без регулятора норми внесення.

У 2024 році на той самий обприскувач було встановлено регулятор норми внесення Micro-Trak MT-2405F II (Micro-Trak, виробництва США) у поєднанні з регулюючим клапаном TeeJet® 346BPR-2F-03 (TeeJet Technologies, рис. 1b та 1c відповідно).



Рис. 1. Штанговий обприскувач M700, використаний для тестування продуктивності розпилення (а);
Регулятор норми внесення Micro-Trak MT-2405F II, встановлений у 2024 році (b);
Регулюючий клапан TeeJet® 346BPR-2F-03, використаний у 2024 році (c).

Джерело: розроблено автором

Протягом обох років усі інші параметри обприскування, зокрема висота штанги та тип форсунок, залишалися незмінними. Єдиною відмінністю між двома досліджуваними роками була наявність або відсутність регулятора норми внесення. Таким чином, конфігурація обприскувача без регулятора (використана у 2023 році) буде позначена як CNS, а обприскувач із регулятором (використаний у 2024 році) – як SRC.

Для створення крапель середнього, дуже великого та надвеликого розміру відповідно до стандарту ASABE S572.1 [16] використовувалися форсунки XRC, AIXR та TTI (рис. 2а, 2б, 2с відповідно).

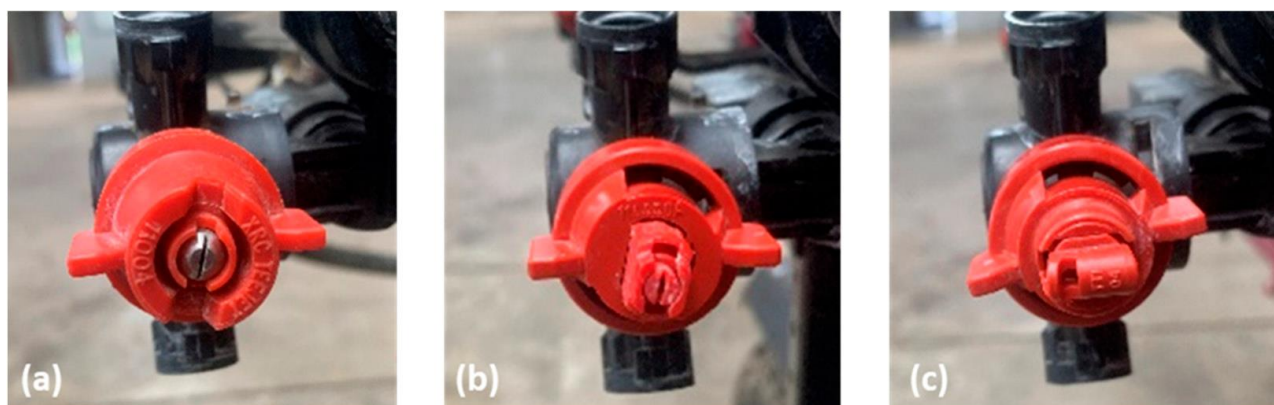


Рис. 2. Три різні типи форсунок TeeJet®(а): XRC 11004 – створює середні краплі, AIXR 11004 – створює дуже великі краплі (б), TTI 11004 – створює надвеликі краплі (с)

Джерело: розроблено автором

Основні характеристики форсунок: кут розпилення – 110°; розмір отвору – 0,4 мм. Форсунки були рівномірно розподілені по штанзі обприскувача (18,3 м) у такому порядку: зліва направо (рис. 1а): XRC → AIXR → TTI.

Під час випробувань кожна форсунка покривала шість рядків (відстань між рядками – 0,91 м), що формувало ділянку шириною 5,5 м та довжиною 182–200 м, що відповідало довжині поля.

Калібрування обприскувача перед випробуваннями становило: норма внесення – 187 л/га; тиск розпилення – 0,207 МПа; швидкість руху – 9,7 км/год; розмір форсунки – 0,4 мм.

Під час тестування змінювали лише швидкість руху, тоді як тип та розмір форсунок залишалися незмінними протягом усього періоду дослідження кожного року.

Таблиця 1

Інформація про гербіциди та норми дієвих речовин (кг/га)

Фаза внесення	Гербіцид	Дієва речовина	Норма (кг/га)
До сходів	Альфа-Прометрин	Прометрин	1,06
	Еквінокс	Flumioxazin	0,11
Після сходів	Евентус Адама	бентазон	0,07
	Dual Magnum	S-metolachlor	0,90
	Butyrac	2,4-дихлорфеноксиоцтова кислота (2,4-D)	0,90

Протягом обох років дослідження в полі, на посівах цукрових буряків, проводились два оброблення: до сходів, відразу після сівби; під час появи сходів, приблизно через 3–4 тижні після першого оброблення. Дати внесення гербіцидів: 2023 рік, до сходів – 17 травня, після сходів – 06 червня; 2024 рік, до сходів – 13 травня, після сходів – 1 червня.

Форсунки, використані в дослідженні (рис. 2):

(a) TeeJet® XRC 11004 – створює середні (medium) краплі.

(b) TeeJet® AIXR 11004 – створює дуже великі (very coarse) краплі.

(c) TeeJet® TTI 11004 – створює надвеликі (ultra-coarse) краплі.

Ці форсунки використовувалися для забезпечення різного розміру крапель відповідно до стандарту ASABE S572.1 [16].

Для збору даних перед початком обприскування на полі розміщувалися дерев'яні блоки (по дев'ять у кожній сітці), до яких канцелярськими скріпками кріпився вологочутливий папір (WSP) (Рис. 3а). Розмір сітки становив $5,5 \times 15,2$ м. Відстань між блоками вздовж траєкторії обприскування становила 15,2 м, відстань між блоками вздовж штанги обприскувача – 1,8 м. Кожна 3×3 сітка охоплювала шість рядків культури й відповідала одному типу форсунки. Розмір аркуша паперу WSP становив 26×76 мм.

Перед обприскуванням вологочутливий папір (WSP) закріплювали на всіх блоках. Гербіциди (табл. 1) змішували з водою в зазначеній концентрації, після чого проводилося розпилення за різних швидкостей руху обприскувача. Після кожного проходу обприскувача WSP висушували протягом декількох хвилин. Потім зразки збиралися в марковані конверти, щоб уникнути подальшого забруднення через вологість.

Після завершення польових випробувань усі зразки проходили подальший аналіз.

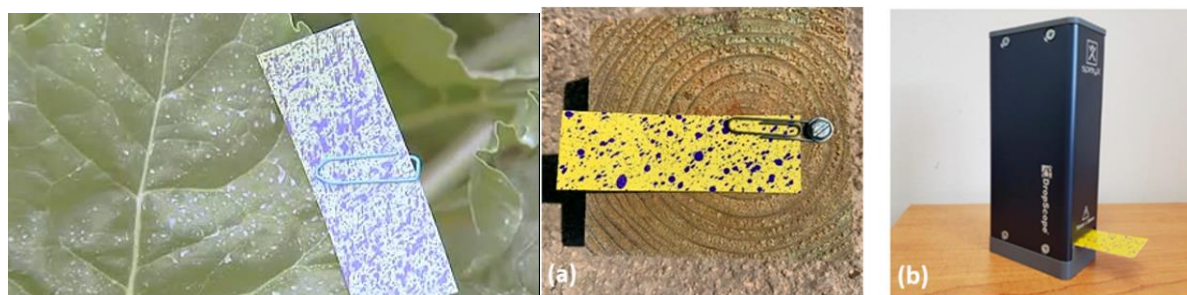


Рис. 3. Схема збору даних із закріпленням вологочутливим папером (WSP), який використовувався в полі (a); Прилад DropScore, що застосовувався для аналізу вологочутливого паперу (b)

Джерело: розроблено автором

Протягом кожного року випробування проводився контроль метеорологічних параметрів, включаючи: швидкість вітру (м/с); напрямок вітру; температуру ($^{\circ}\text{C}$); відносну вологість (%); точку роси ($^{\circ}\text{C}$). Для збору даних було встановлено метеостанцію (Model 6357 Vantage Vue™, Davis Instruments), яка фіксувала показники щохвилини протягом усього періоду внесення пестицидів. Середні погодні умови за весь період випробувань у 2023 та 2024 роках наведено в табл. 2. Умови залишалися стабільними протягом усього періоду випробування. Середня швидкість вітру була низькою (<1 м/с) в обидва роки, що не спричинило значного впливу на осідання крапель під час внесення пестицидів.

Таблиця 2

Середні метеорологічні умови під час випробувань у 2023–2024 роках

Рік	Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Відносна вологість (%)	Точка роси ($^{\circ}\text{C}$)	Швидкість вітру (м/с)
2023	$20,8 \pm 1,3$	$56,4 \pm 9,9$	$10,9 \pm 1,0$	$0,6 \pm 0,6$
2024	$18,8 \pm 1,7$	$75,0 \pm 0,9$	$13,9 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,7$

Температура у 2023 році була вищою ($20,8^{\circ}\text{C}$), ніж у 2024 році ($18,8^{\circ}\text{C}$). Відносна вологість у 2023 році ($75,0\%$) була значно вищою, ніж у 2024 році ($56,4\%$). Точка роси у 2023 році також була вищою ($13,9^{\circ}\text{C}$) порівняно з 2023 роком ($10,9^{\circ}\text{C}$).

Середня швидкість вітру залишалася низькою в обидва роки (<1 м/с), що мінімізувало вплив вітру на осідання крапель під час внесення пестицидів.

У лабораторії вологочутливий папір (WSP) було відскановано за допомогою приладу DropScore (Рис. 3b) та програмного забезпечення SprayX.

Основні параметри аналізу:

Покриття розпилення (Spray coverage) – відсоток площі, покритої краплями.

Щільність крапель (Droplet density) – кількість крапель на одиницю площі.

$D = 0,1$, $D = 0,5$ (VMD) та $D = 0,9$ – характеристики розміру крапель: $D0.1$ – розмір краплі, менше якого міститься 10% загального об'єму розпилюваної рідини. $D0.5$ (VMD – Volume Median Diameter) – медіанний діаметр краплі (мкм), за якого 50% об'єму розпилюваної рідини становлять краплі меншого розміру. $D0.9$ – розмір краплі, менше якого міститься 90% загального об'єму розпилю.

Якість розпилення (Spray quality) – класифікація розміру крапель відповідно до стандарту ASABE S572.1.

Ці параметри використовувалися для оцінювання рівномірності розпилення та ефективності покриття під час випробувань.

Як зазначалося раніше, $D = 0,1$, $D = 0,5$ (VMD) і $D = 0,9$ характеризують розмір крапель у розпилюваній рідині: $D = 0,1$ – діаметр краплі, менше якого міститься 10% об'єму розпилюваної рідини; $D = 0,5$ (VMD) – медіанний діаметр краплі, за якого 50% загального об'єму розпилюваної рідини становлять краплі меншого розміру; $D = 0,9$ – діаметр краплі, менше якого міститься 90% об'єму розпилю.

Якість розпилення визначалася за стандартом ASABE S572.3 на основі VMD і класифікувала краплі за розмірами: VF ($61\ldots105$ мкм) – дуже дрібні; F ($106\ldots235$ мкм) – дрібні; M ($236\ldots340$ мкм) – середні; C ($341\ldots403$ мкм) – великі; VC ($404\ldots502$ мкм) – дуже великі; EC ($503\ldots665$ мкм) – екстремально великі; UC (>665 мкм) – надвеликі.

Програмне забезпечення SprayX використовувало фактор розтікання (spread factor) та інші параметри відповідно до ASABE S572.1, щоб визначити $D0.1$, $D0.5$, $D0.9$ і класифікацію розміру крапель для кожного тестового сценарію. Для аналізу даних використовувалося програмне забезпечення JMP® Pro 16.0.0.

Попереднє та післясходове внесення пестицидів не показали значущої взаємодії між собою ($p > 0,05$), тому дані були об'єднані для кожного року.

Оскільки основною метою дослідження було вивчення впливу швидкості руху на розпилення та якість обприскування для CNS та SRC, дані аналізувалися окремо для кожного типу форсунки, щоб уникнути непотрібних взаємодій між швидкістю руху та типами форсунок.

Для оцінювання впливу швидкості руху використовувався дисперсійний аналіз (ANOVA), де швидкість руху була основним фактором для кожного типу форсунки.

У разі значущих ефектів середні значення порівнювалися за допомогою t-критерію Ст'юдента з рівнем значущості $\alpha = 0,05$.

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) для CNS (без регулятора норми внесення) показали, що збільшення швидкості руху призводило до значного зниження покриття розпилення (табл. 3). Зменшення покриття спостерігалось для всіх типів форсунок (XRC, AIXR, TTI) в разі збільшення швидкості з $9,7$ км/год до $22,5$ км/год. Найвище покриття за найнижчої швидкості ($9,7$ км/год): XRC – $40,1\%$; AIXR – $35,9\%$; TTI – $26,3\%$. Найнижче покриття за найвищої швидкості ($22,5$ км/год): XRC – $11,3\%$; AIXR – $18,0\%$; TTI – $9,4\%$.

Таблиця 3

Результати ANOVA (р-значення) для покриття розпилення та кількості крапель залежно від типу форсунки для CNS та SRC

Тип форсунки	Покриття розпилення	Кількість крапель
	CNS	SRC
XRC	<0.0001 *	NS
AIXR	<0.0003 *	0.016 *
TTI	<0.0002 *	NS

Примітка:

CNS – обприскувач без регулятора норми внесення.

SRC – обприскувач із регулятором норми внесення.

XRC – форсунка розширеного діапазону (Extended Range).

AIXR – інжекторна форсунка з розширеним діапазоном (Air Induction Extended Range).

TTI – інжекторна форсунка Turbo TeeJet.

NS (Non-Significant) – незначний ефект ($p > 0,05$).

* – значний ефект ($p < 0,05$).

Причиною зменшення покриття для CNS є збільшення швидкості руху, об'єм розпилення на одиницю площі зменшується, оскільки система підтримує фіксовану витрату рідини, встановлену під час калібрування обприскувача. Зменшується кількість крапель на одиницю площі, що зафіксовано в табл. 4.

Для AIXR було зафіксовано зниження покриття з 35,9% (за 16,1 км/год) до 18,0% (за 22,5 км/год). Однак кількість крапель залишалася стабільною в разі зміни швидкості руху. Це не відповідало типовій закономірності, за якої зменшення покриття супроводжується зменшенням кількості крапель.

Можливе пояснення цьому явищу – особливості формування крапель інжекторними форсунками AIXR, які створюють більші, менш щільно розташовані краплі порівняно з іншими типами форсунок.

Таблиця 4

Вплив швидкості руху на покриття розпилення (%) та кількість крапель залежно від типу форсунки для CNS – обприскувача без регулятора норми внесення

Швидкість (км/год)	Покриття розпилення (%)	Кількість крапель
	XRC	AIXR
9.7	40.1 a	35.9 a
12.9	29.7 b	29.5 b
16.1	23.5 c	22.0 c
19.3	16.0 d	21.0 c
22.5	11.3 e	18.0 c

Примітки:

Значення в одному стовпці з різними літерами (a, b, c, d, e) означають статистично значущі відмінності ($p < 0.05$).

XRC – форсунка розширеного діапазону.

AIXR – інжекторна форсунка з розширеним діапазоном.

TTI – інжекторна форсунка Turbo TeeJet.

Результати досліджень CNS-обприскувачів підкреслюють важливість вибору та підтримання відповідної швидкості руху під час обприскування сільськогосподарськими обприскувачами без регулятора норми внесення.

Як і у випадку з CNS, зменшення покриття розпилення для форсунок XRC і TTI також очікувалося через загальне зниження норми внесення на швидкостях, вищих за калібрувальну (9,7 км/год). Нами також зафіксовано збільшення відхилення в нормі внесення в разі зміни швидкості руху

в обприскувачах без регулятора. Для SRC покриття розпилення форсунок XRC і TTI було більш стабільним за збільшення швидкості з 9,7 км/год до 22,5 км/год (табл. 5) у порівнянні з CNS.

Таблиця 5

Результати дослідження впливу швидкості руху (км/год) на покриття розпилення (%) і кількість крапель для різних типів форсунок (XRC, AIXR, TTI)

Швидкість (км/год)	XRC (покриття, %)	AIXR (покриття, %)	TTI (покриття, %)	XRC (кількість крапель)	AIXR (кількість крапель)	TTI (кількість крапель)
9.7	41.0	43.5 ab	37.5	6845	2441 b	1325
12.9	50.8	49.4 a	34.3	7893	5736 a	1677
16.1	46.9	37.9 bc	35.7	8626	3371 b	2263
19.3	34.5	25.2 d	31.2	7355	3366 b	2092
22.5	37.2	32.1 cd	28.0	8218	5970 a	2334

Позначки a, b, c, d вказують на статистичні відмінності між значеннями всередині одного стовпця, що означає, що деякі значення значно відрізняються одне від одного за рівнем значущості ($p < 0.05$).

Хоча кількість крапель варіювалася залежно від швидкості руху, середнє значення залишалося статистично подібним ($p > 0,05$) для обох типів форсунок.

Щодо форсунки AIXR збільшення швидкості руху призводило до нестабільних результатів як у покритті розпилення, так і в кількості крапель. У разі підвищення швидкості покриття зменшувалося, а кількість крапель змінювалася залежно від швидкості руху.

Зміни швидкості руху під час внесення пестицидів у полі можуть впливати на норму внесення, однак контролер норми дозволяє підтримувати заданий рівень, регулюючи тиск розпилення і, відповідно, витрату форсунок [3; 4]. Результати для форсунок XRC і TTI підтвердили цю тенденцію, оскільки SRC забезпечував стабільне покриття розпилення за різних швидкостей руху. Подібні результати роботи системи контролю норми внесення були отримані Al-Gaadi і Ayers [4], а також Ayers та ін. [5]. Вони дійшли висновку, що застосування контролера обприскування значно знижує похибки в нормі внесення, що дозволяє підтримувати необхідну норму на різних швидкостях руху.

Зменшення похибок у нормі внесення також сприяє більш рівномірному покриттю розпилення, що підтверджують результати нашого дослідження. Хоча було зазначено, що кількість крапель збільшується зі зростанням швидкості руху з 9,7 км/год до 22,5 км/год для форсунок XRC і TTI (табл. 5). Однак ця тенденція не була статистично значущою ($p > 0,05$).

Результати для форсунки AIXR за використання як CNS, так і SRC вказують на нестабільні показники розпилення в разі зміни швидкості руху, що робить її менш передбачуваною порівняно з форсунками XRC і TTI.

У табл. 6 міститься значення p за результатами ANOVA-аналізу якості розпилення (D0.1, D0.5 і D0.9) для обприскувачів CNS і SRC з використанням трьох різних типів форсунок.

Таблиця 6

Вплив швидкості руху на якість розпилення (D0.1, D0.5, D0.9) для CNS та SRC

Ефект	D0.1	D0.5	D0.9
	CNS	SRC	CNS
XRC	0.0101*	NS	NS
AIXR	0.0115*	0.004*	0.0317*
TTI	0.0096*	NS	NS

(*) означає значний вплив ($p < 0.05$). NS означає відсутність значного впливу ($p > 0.05$).

XRC, AIXR, TTI – це типи форсунок: XRC – TeeJet® Extended Range, AIXR – Air Induction Extended Range

D0.1, D0.5 і D0.9 – це діаметри крапель (мкм), за яких, відповідно, 10%, 50% і 90% об'єму розпиленої рідини міститься в краплях меншого розміру.

Основними результатами для CNS є швидкість руху, що впливала на D0.1 для всіх типів форсунок. Для D0.5 і D0.9 вплив швидкості не спостерігався, за винятком D0.5 для форсунки AIXR (Табл. 7).

Таблиця 7

Вплив швидкості руху на D0.1, D0.5 і D0.9 для CNS

Тип форсунки	Швидкість (км/год)	D0.1 (мкм)	D0.5 (мкм)	D0.9 (мкм)
XRC	9.7	205.8 a	420.4	719.3
	12.9	180.2 b	350.6	687.5
	16.1	174.4 bc	374.4	713.0
Продовження табл. 7.				
AIXR	19.3	178.4 bc	374.5	697.0
	22.5	164.6 c	399.5	774.1
	9.7	338.0 a	822.6 a	1385.3
	12.9	330.0 a	841.8 a	1410.7
	16.1	329.4 a	818.3 a	1435.3
TTI	19.3	271.1 b	719.1 b	1561.4
	22.5	244.5 b	692.1 b	1405.0
	9.7	617.1 ab	1396.5	1975.0
	12.9	663.0 a	1319.7	2397.0
	16.1	659.5 a	1486.7	2467.0
	19.3	556.3 b	1229.3	2019.3
	22.5	412.1 c	985.7	1607.2

Значення D0.1 зменшувалося із збільшенням швидкості руху, незалежно від типу форсунки. Для форсунки AIXR також спостерігалось зменшення D0.5 за зростання швидкості руху.

На рис. 4 представлена класифікація розміру крапель на основі VMD (середнього діаметра крапель за об'ємом) для форсунок XRC, AIXR і TTI за різних швидкостей руху для CNS (XRC: найбільші зміни в разі збільшення швидкості спостерігалися в категоріях VF (дуже дрібні краплі) та F (дрібні краплі). Частка F-крапель зросла з 2,5% до 5,8%, а VF-крапель – з 12,6% до 19,0% у разі збільшення швидкості з 9,7 км/год до 22,5 км/год. Найбільші зміни зафіксовані для UC (дуже великі краплі), за ними йдуть F, VF та M (середні краплі). Частка UC-крапель зменшилася на 12,8% для AIXR і на 14,5% – для TTI.

Оскільки під час внесення гербіцидів тиск розпилення в CNS залишався незмінним, зміни в якості розпилення пояснюються загальним зменшенням кількості крапель на одиницю площі в разі збільшення швидкості руху (що підтверджується даними (табл. 4).

Дані для SRC (обприскувач із контролером норми внесення): у SRC не спостерігалось впливу швидкості на D0.1, D0.5, D0.9 для XRC і TTI (табл. 6).

Для форсунки AIXR швидкість значно впливала на D0.1 і D0.5 – вони зменшувалися в разі збільшення швидкості руху (табл. 8).

Для XRC і TTI також відзначалася подібна тенденція, але вона не була статистично значущою ($p > 0,05$).

Графік на рис. 4 ілюструє, як змінюється якість розпилення для кожного типу форсунок у разі зміни швидкості руху обприскувача без контролера.

Залежності, зображені на рис. 5 (якість розпилення для SRC), показують, що частка F-крапель зросла з 12,0% до 19,8%, а VF-крапель – з 19,3% до 29,8% за збільшення швидкості з 9,7 км/год до 22,5 км/год.

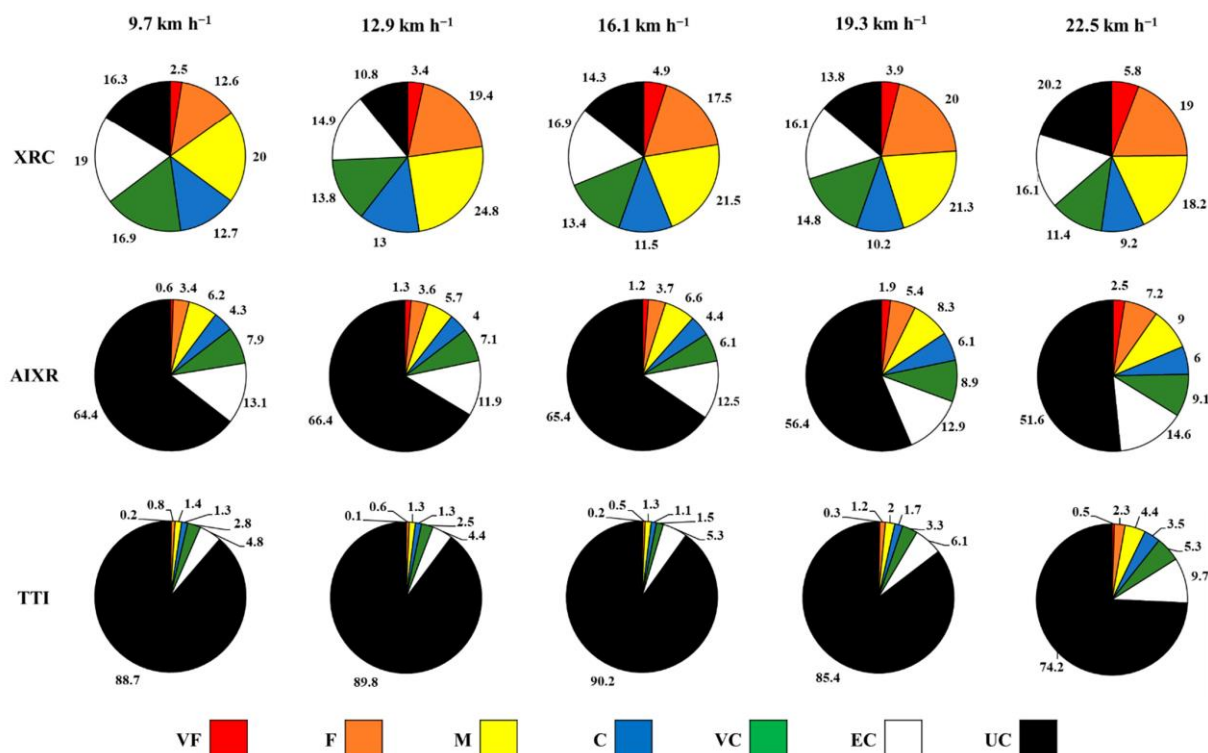


Рис. 4. Якість розпилення (класифікація розміру крапель на основі середнього діаметра за об'ємом) для XRC, AIXR і TTI за різних швидкостей руху для CNS

CNS – обприскувач без контролера норми внесення. XRC – TeeJet® Extended Range. AIXR – Air Induction Extended Range. TTI – Turbo-TeeJet Induction. Класифікація розміру крапель відповідно до стандарту ASABE S572.3: VF – дуже дрібні краплі (Very Fine). F – дрібні краплі (Fine). M – середні краплі (Medium). C – великі краплі (Coarse). VC – дуже великі краплі (Very Coarse). EC – екстремально великі краплі (Extremely Coarse). UC – ультравеликі краплі (Ultracoarse).

Джерело: розроблено автором

Таблиця 8

Вплив швидкості руху на D0.1, D0.5 і D0.9 для SRC

Тип форсунки	Швидкість (км/год)	D0.1 (мкм)	D0.5 (мкм)	D0.9 (мкм)
XRC	9.7	195.5	385.3	693.1
	12.9	200.7	382.5	680.4
	16.1	189.0	388.8	667.0
	19.3	175.0	331.3	583.7
	22.5	175.0	323.3	548.9
AIXR	9.7	350.5 a	818.2 a	1320.8
	12.9	282.5 b	693.9 b	1281.3
	16.1	279.3 b	608.3 c	1099.5
	19.3	251.2 bc	571.9 c	1152.6
	22.5	224.4 c	550.3 c	1040.0
TTI	9.7	572.9	1236.0	1897.6
	12.9	416.0	944.0	1602.2
	16.1	385.6	916.0	1584.3
	19.3	397.4	877.2	1452.9
	22.5	333.0	756.4	1601.7

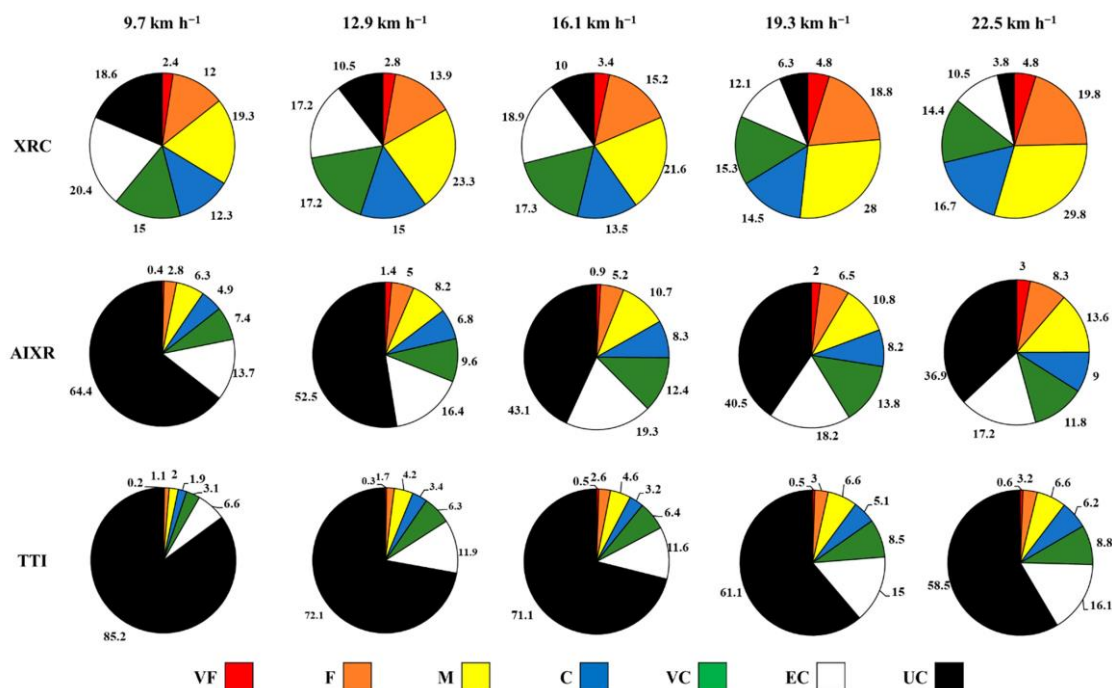


Рис. 5. Якість розпилення (класифікація розміру крапель на основі середнього діаметра за об'ємом) для XRC, AIXR і TTI за різних швидкостей руху для SRC

SRC – обприскувач з контролером норми внесення.

XRC, AIXR, TTI – це типи форсунок:

XRC – TeeJet® Extended Range

AIXR – Air Induction Extended Range

TTI – Turbo-TeeJet Induction

Джерело: розроблено автором

Цей графік демонструє, як змінюється якість розпилення для кожного типу форсунок у разі зміни швидкості руху обприскувача, оснащеного контролером норми внесення (SRC).

Висновки. У запропонованому дослідженні було оцінено ефективність розпилення для двох різних налаштувань обприскувача (CNS – без контролера норми внесення та SRC – з контролером норми внесення) за різних швидкостей руху. Аналіз проводився за трьома типами форсунок (XRC, AIXR, TTI). На основі отриманих результатів можна зробити певні висновки.

Для CNS збільшення швидкості руху зменшувало кількість крапель, що потрапляли на одиницю площі, що своєю чергою знижувало рівень осідання розпилюваної рідини.

Для SRC якість крапель і рівень осідання були стабільнішими в разі зміни швидкості руху завдяки автоматичному регулюванню витрати рідини (а отже, і тиску розпилення) контролером.

Варіації якості розпилення (зміни в розподілі розмірів крапель) за підвищення швидкості спостерігалися як для CNS, так і для SRC. Однак ці зміни були більш вираженими для SRC, оскільки контрольований тиск змінювався залежно від швидкості.

Серед форсунок тенденції в розпиленні та якості розпилення були подібними для XRC і TTI як у CNS, так і за SRC. Водночас форсунка AIXR показала нестабільний рівень осідання і якості розпилення в разі зміни швидкості руху.

Список використаних джерел

1. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 Agricultural Chemical Use Highlights. 2022.



2. Fernandez-Cornejo J. Nehring R.F. Osteen C.; Wechsler S. Martin A. Vialou A. Pesticide Use in US Agriculture: 21 Selected Crops, 1960–2008; USDA-ERS Economic Information Bulletin 124; United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 2014.
3. United States Department of Agriculture-National Agricultural Statistics Service. 2021 U.S. Farm Production Expenditures. 2022.
4. Al-Gaadi K. Ayers P. Monitoring controller-based field sprayer performance. Appl. Eng. Agric. 2014, 10, 205-208.
5. Ayers P. Rogowski S. Kimble B. An investigation of factors affecting sprayer control system performance. Appl. Eng. Agric. 2020, 6, 701-706.
6. Luck J. Zandonadi R. Luck B. Shearer S. Reducing pesticide over-application with map-based automatic boom section control on agricultural sprayers. Trans. ASABE 2010, 53, 685-690.]
7. Sharda A. Fulton J.P. McDonald T.P. Zech W.C. Darr M.J. Brodbeck C.J. Real-time pressure and flow dynamics due to boom section and individual nozzle control on agricultural sprayers. Trans. ASABE 2010, 53, 1363-1371.
8. Butts T.R. Samples C.A. Franca L.X. Dodds D.M. Reynolds D.B. Adams J.W.; Zollinger R.K. Howatt K.A. Fritz B.K. Clint Hoffmann, W. Spray droplet size and carrier volume effect on dicamba and glufosinate efficacy. Pest Manag. Sci. 2018, 74, 2020-2029.
9. Заєць М.Л. Обґрунтування вдосконалення розпилювачів та аналіз існуючих конструкцій. *Матеріали наук.-практ. конф. науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. Житомир : Поліський національний університет, 2023. С. 132–138.
10. Заєць М. Визначення динамічних показників рідинно-повітряного потоку. *Матеріали XXIV міжнародного науково-практичного форуму*. Львів : ЛНУП., 2023. С. 420–425.
11. Заєць М.Л. Моделювання технологічного процесу роботи інжекторного розпилювача рідини. *Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. С. 9–12.
12. Hofman V. Solseng E. Reducing Spray Drift. North Dakota State University Extension Service; Agricultural and Biosystems Engineering: Fargo, ND, USA, 2001; AgriEngineering 2023, 5, 519.
13. Nuytens D. De Schamphelleire M. Baetens K. Sonck B. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers. Trans. ASABE 2007, 50, 1129 -1140.
14. Virk S. Prostko E. Kemerait R. Abney M. Rains G. Powell C. Carlson D. Jacobs J. Tyson W. On-Farm Evaluation of Nozzle Types for Peanut Pest Management Using Commercial Sprayers. Peanut Sci. 2021, 48, 87–96.
15. Ozkan H. Womac A. Best Management Practices for Boom Spraying. Ohio State University Extension Publication AEX-527-05. 2005.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2025 р.

M. Zayets
Polissia National University

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A SPRAYER WITH A DOSAGE RATE CONTROLLER AT VARIABLE OPERATING SPEED

Summary

This article is dedicated to studying the spraying process and assessing its quality at different travel speeds for an agricultural sprayer equipped with a rate controller.

Speed variation is a common and unavoidable factor during pesticide application using sprayers. Field tests were conducted to evaluate the impact of speed changes on spraying and application quality using a boom sprayer without a rate controller (CNS) and with a rate controller (SRC).

During the study, the sprayer boom was evenly divided among three types of nozzles (XRC, AIXR, and TTI) to generate droplets of different sizes (medium, very large, and ultra-large, respectively). Before testing, the sprayer was calibrated to apply 180 L/ha at an operating pressure of 0,207 MPa and a speed of 9,7 km/h.



To evaluate spraying and application quality, pesticide application was performed at five different travel speeds: 9,7, 12,9, 16,1, 19,3, and 22,5 km/h. Data collection was carried out by placing water-sensitive paper at various points along the sprayer boom in the field.

Results for CNS (without a rate controller) showed that as speed increased, the number of applied droplets and spray deposition significantly decreased ($p < 0,05$) for all three nozzle types, which was due to a reduction in droplet density per unit area. For SRC (with a rate controller), spraying remained more stable despite speed changes.

Travel speed affected spray quality for both CNS and SRC. However, for SRC, greater variations in spray quality were observed due to the increase in operating pressure as speed increased. The XRC and TTI nozzles exhibited similar trends in spray deposition and quality across both sprayer configurations (CNS and SRC). Meanwhile, the AIXR nozzle demonstrated inconsistent spraying performance and quality when travel speed changed.

The findings of this study indicate that agricultural sprayers equipped with a rate controller provide more uniform and stable spraying compared to traditional sprayers (without a controller) when travel speed varies during pesticide application. Although spray quality is also affected when using a rate controller, following best practices, such as proper nozzle selection and application at nominal speeds, can help minimize these effects and ensure effective pesticide application.

Keywords: agricultural sprayers, application rate, travel speed, rate controller, spray coverage, spraying quality.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-5>

УДК 631.331

Р. В. Кириченко, к.т.н., доц.

М. В. Бакум, к.т.н., доц.

О. Б. Козій, к.т.н., доц.

Є. В. Лубченко, аспірант

Державний біотехнологічний університет

e-mail: kirichenkoromeo1971@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7830-6956

ORCID: 0000-0003-1049-0464

ORCID: 0000-0001-5504-4244

РЕЗУЛЬТАТИ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ДВОДИСКОВИХ СОШНИКІВ ДЛЯ СІВБИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ MINI-TILL

Анотація. Розглянуто питання вдосконалення технологічного процесу сівби зернових культур за умов мінімального обробітку ґрунту. Запропоновано конструкцію дводискового сошника з вирізним диском для використання в зернових сівалках типу СЗ, призначеного для підвищення якості сівби за технологією Mini-till. Наведено опис конструкції сошника, який забезпечує ефективне перерізання пожнивних решток та рівномірну заробку насіння на задану глибину. Проведено експериментальні польові дослідження, результати яких підтвердили перевагу розробленого сошника над серійними аналогами за показниками рівномірності глибини загортання та розподілу насіння по довжині рядка. Отримані результати можуть бути використані для розроблення та модернізації посівних машин для ресурсозберезувальних технологій вирощування зернових культур.

Ключові слова: технологія Mini-till, зернова сівалка, насіння, пожнивні рештки, дводисковий сошник із вирізним диском, глибина заробки.

Постановка проблеми. Традиційний спосіб обробітку ґрунту передбачає багаторазові проходи сільськогосподарської техніки і має певні недоліки. Зокрема, він спричиняє надмірне ущільнення орного шару, активізує процеси ерозії ґрунту, призводить до втрати органічної речовини та збільшення витрат пального [1]. У зв'язку з цим актуальним завданням є пошук ефективних шляхів здешевлення обробітку ґрунту [2].

Зростання вартості енергоносіїв та підвищення собівартості агропродукції стимулює сільськогосподарських виробників до впровадження енергоефективної технології Mini-till під час вирощування зернових культур [3]. Використання цієї технології сприяє зменшенню споживання паливо-мастильних матеріалів, скороченню часу виконання робіт та зниженню навантаження на машинно-тракторні агрегати.

У загальному комплексі технологічних операцій та прийомів під час вирощування зернових культур дуже важливе значення займає посів. Наукою та практикою встановлено, що врожай сільськогосподарських культур на 25...30% залежить від якості виконання посіву.

В Україні для виконання сівби за енергоресурсозберезувальною технологією оброблення ґрунту існує великий вибір засобів механізації вітчизняного виробництва, зокрема посівні комплекси «ЗЛАТНИК», АПК-9,0 PARTNER, ALCOR 7,5 і ALCOR 10, механічні зернові сівалки ALFA 6 MINI-TILL та ALFA 4 MINI-TILL (виробництво АТ ELVORTI). Крім того, використовуються сівалки закордонного виробництва, як-от Amazone Primera DMC 6000-2C (Німеччина), OMEGA OO FL (Чехія), Semeato PD-17 (Бразилія) та інші. Вони мають різні модифікації, конструкцію та функціональні можливості залежно від умов їх використання.

Великі сільськогосподарські підприємства можуть інвестувати в придбання сучасних вітчизняних та імпортованих посівних машин, що обладнані робочими органами, які забезпечують ефективну сівбу зернових культур за ресурсозберувальними технологіями. Але проведений аналіз конструкцій сучасних вітчизняних та іноземних сівалок показав, що вони складні за конструкцією, матеріаломісткі та дорогі. Це ускладнює їх придбання і використання для дрібних та середніх фермерських господарств.

З огляду на технічні рішення сучасних посівних машин та ґрунтово-кліматичні умови вирощування зернових культур в Україні розроблення конструкції зароблюючих робочих органів для вітчизняних сівалок типу СЗ з метою їх ефективного застосування в енергоресурсозберувальній технології Mini-till є актуальним завданням.

Модернізація сівалок типу СЗ шляхом оснащення їх новими зароблюючими робочими органами сприятиме підвищенню ефективності технологічного процесу сівби, розширенню можливостей їх використання в різних ґрунтово-кліматичних умовах та забезпеченню високих урожаїв зернових культур за мінімального обробітку ґрунту.

Аналіз останніх досліджень. Вибір посівних машин залежить як від сільськогосподарської культури, що висівається, так і від вибраного способу обробітку ґрунту. Відповідно, необхідно використовувати певну сошникову групу, яка є одним з основних конструктивних елементів сівалки, котрий визначає її технологічне призначення та забезпечує оптимальну ефективність посіву зернових культур. Сошники визначають технологічне призначення сівалки і дозволяють максимально ефективно використовувати її для посіву насіння зернових за традиційної, мінімальної підготовки ґрунту або навіть без підготовки за різних систем обробітку.

Питання обґрунтування параметрів сошників та підвищення рівномірності загортання насіння є предметом численних наукових досліджень. Значний внесок у цю сферу зробили як вітчизняні вчені, зокрема Б.М. Гевко, В.П. Горобей, І.В. Морозов, В.М. Сало та інші [5–10], так і зарубіжні дослідники [11–13].

На основі аналізу та узагальнення наявних наукових робіт була сформульована мета дослідження, яка спрямована на вдосконалення конструкції сошників та підвищення рівномірності заробки насіння, що є важливим фактором для забезпечення оптимальних умов проростання й розвитку рослин.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета дослідження – удосконалення конструкції сошників та підвищення рівномірності заробки насіння для забезпечення оптимальних умов проростання і розвитку рослин під час сівби зернових культур за технологією Mini-till.

Основна частина. Для мінімальних технологій за наявності рослинних решток на поверхні поля використовують дискові та лапові сошники. Однак під час сівби, особливо озимих зернових культур, у ресурсозберувальних технологіях на полях після вирощування кукурудзи на зерно або соняшнику такі сошники не завжди забезпечують агротехнічні вимоги щодо рівномірного загортання насіння на задану глибину. Це пояснюється тим, що вони не можуть ефективно перерізати особливо товсті та міцні частки навіть подрібнених стебел кукурудзи й соняшнику.

Покращити рівномірність заробки насіння зернових культур на задану глибину в умовах ресурсозберувальних технологій можна шляхом підвищення ефективності перерізання поживних залишків крайками дисків сошників [14].

Для досягнення поставленої мети розроблено експериментальний дводисковий сошник із вирізним диском, який складається з корпусу 1, піввісей 2 і 3, на яких установлено диски 4 і 5 різного діаметра, напрямника 7 для насіння та повідця 8 для кріплення сошника до рами сівалки (рис. 1). Його конструкція передбачає, що периферійна частина диска більшого діаметра виконана з вирізами 9. Вирізи мають конічну форму, а їхні боковини утворюють із раді-

усом диска кут, який є меншим за кут тертя повзання стебел сільськогосподарських рослин по металу. Глибина вирізів дорівнює різниці радіусів дисків різного діаметра сошника.

Під час сівби дводискові сошники з різновеликими дисками 4 і 5 перекочуються по полю, і завдяки механізмам регулювання забезпечують формування в ґрунті борозенки заданої глибини. Насіння, що надходить із висівної системи сівалки через лійку 6, по напрямку 7 між дисками 4 і 5 висівається на дно борозенки і присипається ґрунтом.

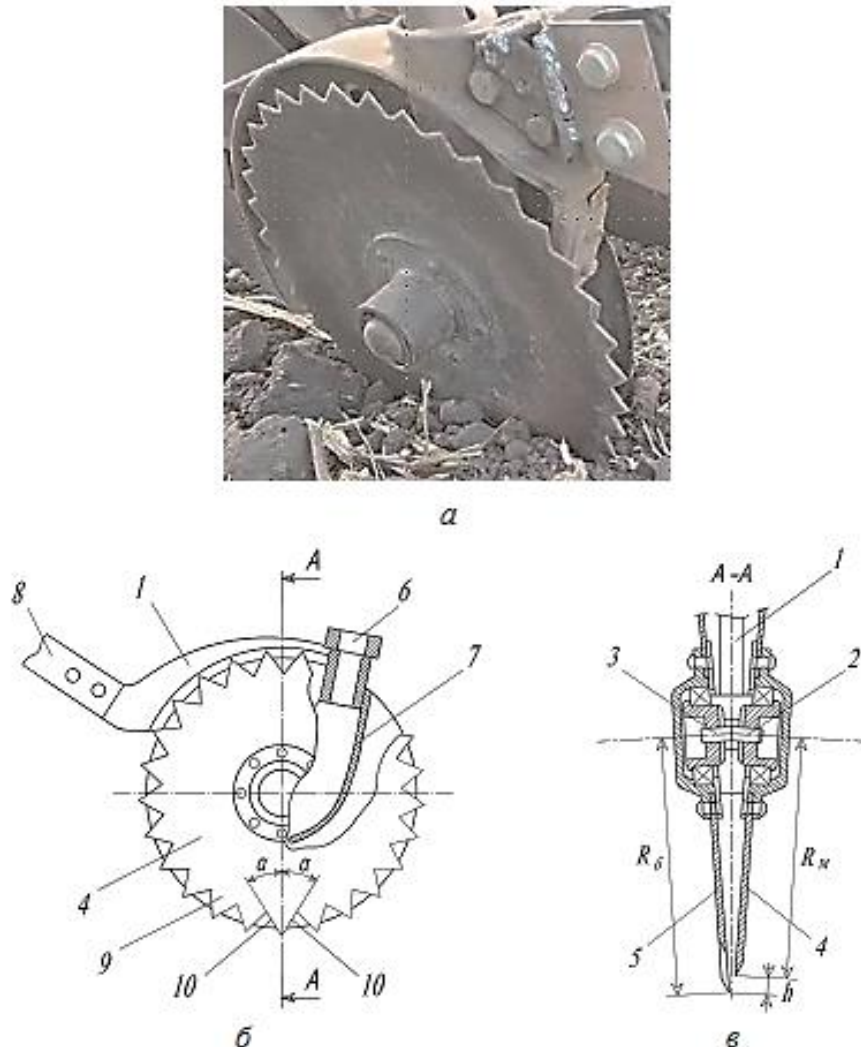


Рис. 1. Експериментальний дводисковий сошник із вирізним диском

а – загальний вигляд; *б* – бокова проєкція сошника; *в* – переріз А-А бокової проєкції сошника: 1 – корпус; 2, 3 – напівосі; 4 – більший диск; 5 – менший диск; 6 – лійка; 7 – напрямник; 8 – повідець; 9 – вирізи; 10 – боковини вирізів

Формування борозенок такими сошниками відбувається у два етапи. На першому етапі з поверхнею поля взаємодіють вершини конічних вирізів 9 диска 4 більшого діаметра. Притискне зусилля сошників цілком достатнє для розрізання верхніх шарів ґрунту та заглиблення диска 4 у ґрунт. На другому етапі диск меншого діаметра 5 заглиблюється в уже розрізаний верхній шар ґрунту. Завдяки кріпленню дисків 4 і 5 на корпусі 1 сошника під кутом до напрямку руху, боковини дисків зміщують ґрунт у сторони, формуючи конічну борозенку на глибину заглиблення диска 5 меншого діаметра.

У процесі формування борозенок пожнивні рештки, що знаходяться на поверхні поля, спочатку наколюються вершинами конічних вирізів 9, а далі ковзають по боковинах 10, які розташовані під кутом α , меншим за кут ковзання рослинних решток по металу, і перерізаються. Завдяки цьому рослинні рештки не заважають заглибленню сошника на задану глибину, навіть коли на шляху попадаються міцні частини стебел соняшнику або кукурудзи. Така конструкція особливо ефективна під час сівби озимих зернових культур за ресурсозберувальними технологіями.

Для об'єктивного оцінювання роботи сошника його якісні показники необхідно порівнювати з аналогічними показниками інших типів сошників, отриманими в однакових умовах експлуатації. З цією метою на другому етапі експериментальних досліджень було проведено порівняльний аналіз якості роботи зернової сівалки, оснащеної двома типами сошників: серійними дводисковими однорядковими та експериментальними сошниками з вирізним диском, під час сівби насіння озимої пшениці.

Вибір для порівняльних досліджень цих сошників зумовлений їх меншою вимогливістю до якості підготовки ґрунту до сівби і більшою здатністю працювати на ґрунтах, які неякісно підготовлені до посіву, задернілих, засмічених, перезволожених, з великою кількістю грудок та рослинних решток.

Для проведення досліджень використовувався трактор МТЗ-82 + зернотукова сівалка СЗ-3,6, на якій було встановлено три експериментальних сошника з міжряддям 15 см.

Визначення умов роботи сошників, розбиття дослідних ділянок та оцінювання якісних показників висіву проводили у відповідності до СОУ 74.3-37-129:2004 [15].

Якість роботи сошників оцінювалось за такими показниками, як: рівномірність заробки насіння по глибині й рівномірність розподілу насіння по довжині рядка.

Глибину заробки насіння визначали по етіолованій частині рослин (рис. 2, а). Відстані між сусідніми висіяними насінинами по фрагментах сходів рослин (рис. 2, б).



Рис. 2. Визначення якісних показників роботи сошників

а) визначення глибини заробки; б) рівномірність сходів по довжині рядка

Рівномірність розподілення насіння по глибині заробки та по довжині рядка оцінюється середнім значенням $\bar{X}$, стандартним квадратичним відхиленням σ і коефіцієнт варіації V .

Результати вимірювань і статистичного оброблення експериментальних даних глибини заробки насіння та інтервалів сходів насіння озимої пшениці вздовж рядка досліджуваних сошників наведено в таблицях 2 і 3, а також відображено на графіках кривих розподілу насіння по глибині (рис. 3).

Результати досліджень рівномірності заробки насіння свідчать про те, що експериментальні сошники за швидкості руху 2,5 м/с забезпечують найбільшу середню глибину заробки

насіння – 55,8 мм. Для порівняння: у серійних сошників цей показник становить 43,3 мм. Виявлена різниця зумовлена конструктивними особливостями досліджуваних сошників. Розроблений сошник краще заглиблюється у ґрунт, сприяє ефективнішому проникненню сошника в ґрунт і забезпечує стабільнішу глибину заробки насіння за різних швидкостей руху.

Таблиця 2

Показники рівномірності заробки насіння по глибині

Тип сошника	Швидкість руху сівалки, м/с	Середня глибина заробки насіння $\bar{x}$, мм	Стандартне відхилення σ , мм	Коефіцієнт варіації V , %
Експериментальний	2,0	50,9	12,2	23,9
	2,5	55,8	12,3	22,1
	3,0	51,6	11,1	21,5
	3,5	47,2	12,9	27,2
Серійний	2,0	37,5	14,1	37,7
	2,5	43,3	13,6	31,3
	3,0	40,5	13,7	33,7
	3,5	37,9	15,6	41,3

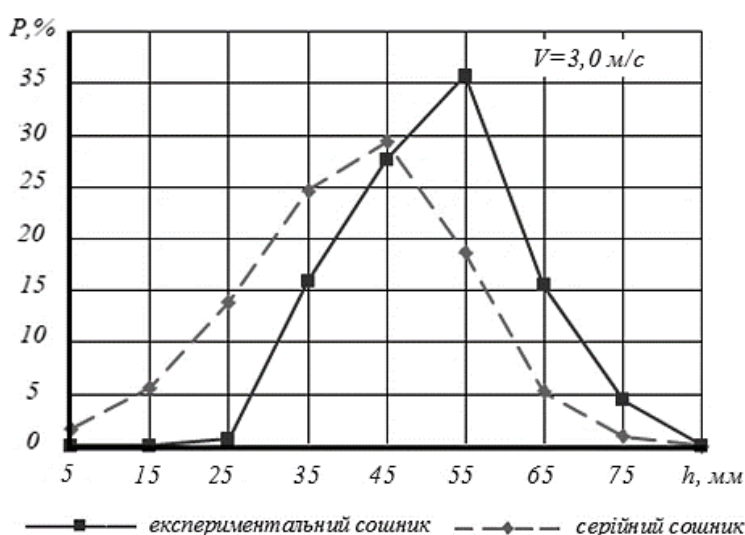


Рис. 3. Криві розподілу заробки насіння по глибини

Аналіз отриманих даних підтвердив, що середня глибина заробки насіння не є сталою і змінюється залежно від швидкості руху сівалки. Встановлено, що в разі збільшення швидкості з 2,0 до 2,5 м/с середня глибина заробки для експериментальних сошників зростає з 50,9 до 55,8 мм, а для серійних сошників – з 37,5 до 43,3 мм. Однак подальше підвищення швидкості руху сівалки до 3,5 м/с призводить до зменшення середньої глибини заробки насіння: для сошників із вирізним диском – від 55,8 до 47,2 мм, а для дводискових однорядкових сошників – від 43,3 до 37,9 мм.

Це зумовлено присутністю на полі рослинних решток та властивостями ґрунту, зокрема його підвищеною твердістю і наявністю грудкуватої структури. У сухих ґрунтових умовах, коли пружини на штангах сошників перебувають у стані попереднього стискання, під час руху сівалки на невеликій швидкості ($V_{св}=2,0$ м/с) сошники можуть частково проникати крізь тверді грудки ґрунту, що призводить до недостатнього заглиблення та зменшення фактичної глибини



загортання насіння. Зі збільшенням швидкості до 2,5 м/с дискові сошники здатні до більш ефективного руйнування грудок і перерізання рослинних решток, що сприяє досягненню необхідної глибини заробки. Однак подальше зростання швидкості приводить до зростання опору ґрунту, що призводить до виглиблення сошників і, відповідно, до зменшення глибини заробки насіння.

Аналіз показників якості загортання насіння за коефіцієнтом варіації V дозволяє зробити висновок, що експериментальні сошники забезпечують вищу рівномірність розподілу насіння за глибиною заробки. За швидкості руху сівалки $V_{cis}=3,0$ м/с коефіцієнт варіації для експериментальних сошників становить 21,5%, тоді як для серійних дводискових однорядкових сошників цей показник сягає 33,7%.

Менше значення коефіцієнта варіації для експериментальних сошників свідчить про їх здатність забезпечувати більш стабільну глибину заробки насіння навіть за підвищених швидкостей руху сівалки. Це пояснюється покращеними характеристиками взаємодії сошника із ґрунтовим середовищем, зокрема ефективнішим проникненням у ґрунт і можливістю перерізання навіть найбільших частин стебел рослинних решток, що можуть зустрічатися під час сівби, не перешкоджаючи нормальному заглибленню сошника та формуванню борозенки на задану глибину.

Під час проведення дослідження сошники встановлювалися на глибину заробки 50 мм. Відповідно до агротехнічних вимог, допустиме відхилення глибини заробки насіння за сівби на рівні 40...60 мм становить ± 10 мм. Проведені експериментальні дослідження показали, що в заданому діапазоні глибини заробки сошники із вирізним диском забезпечують відповідність агротехнічним вимогам на рівні 62,7%, тоді як у серійних сошників – 48,1% (рис. 3). Отримані результати свідчать про вищу ефективність експериментальних сошників у забезпеченні рівномірності глибини заробки насіння, що сприяє покращенню якості посіву, підвищенню рівномірності появи сходів та формуванню оптимальних умов для початкового росту і розвитку рослин.

Рівномірність розподілення сходів уздовж рядка оцінювали за коефіцієнтом варіації V (табл. 3). Аналіз отриманих даних показує, що зі збільшенням швидкості руху сівалки рівномірність розподілення сходів дещо погіршується для обох типів сошників. Зокрема, для експериментального сошника за підвищення швидкості руху з 2,0 м/с до 3,0 м/с коефіцієнт варіації збільшується з 61,5% до 67,4%, а для серійного дводискового сошника – відповідно з 64,1% до 70,4%.

Таблиця 3

Показники рівномірності розподілу сходів насіння вздовж рядка

Тип сошника	Швидкість руху сівалки, км/год	Середня глибина заробки насіння $\bar{x}$, мм	Стандартне відхилення σ , мм	Коефіцієнт варіації V , %
Експериментальний	2,0	21,7	13,4	61,5
	2,5	21,9	13,9	63,7
	3,0	22,1	14,3	64,6
	3,5	22,2	14,9	67,4
Серійний	2,0	22,1	14,2	64,1
	2,5	22,3	14,8	66,4
	3,0	22,4	15,2	67,9
	3,5	22,5	15,9	70,4

Сошники з вирізним диском забезпечують більш рівномірне розподілення сходів уздовж рядка порівняно із серійними сошниками. Так, за швидкості руху сівалки 3,0 м/с коефіцієнт варіації для експериментального сошника становить 64,6%, тоді як для серійного – 67,9%.

Покращена рівномірність розподілення насіння вздовж рядка в разі використання експериментального сошника пояснюється його більш стабільним рухом у ґрунті, що досягається завдяки ефективнішому заглибленню та кращому перерізанням стебел рослинних решток.

Проведені польові дослідження підтвердили, що експериментальний сошник із вирізним диском забезпечує більш рівномірну заробку насіння на задану глибину порівняно з дводисковим однорядковим сошником. Це зумовлено кращою здатністю експериментального сошника до заглиблення в ґрунт шляхом підвищення ефективності перерізання пожнивних залишків крайками дисків сошників. Також експериментальний сошник дещо покращує рівномірність розподілення насіння вздовж рядка. Отже, основною перевагою експериментального сошника є забезпечення стабільнішої глибини заробки насіння, що позитивно впливає на рівномірність сходів та подальший розвиток рослин.

Висновки. Розроблена оригінальна конструкція дводискового сошника для надійного формування борозенки заданої глибини для висіву насіння зернових культур у разі вирощування за технологією Mini-till з використанням диска більшого діаметра з вирізами по його периферії, спроможного ефективно перерізати пожнивні залишки і ґрунтові формування підвищеної твердості на шляху переміщення сошника.

Порівняльними польовими дослідженнями підтверджено більш рівномірну заробку насіння на задану глибину експериментальним сошником з вирізним диском.

Глибина заробки насіння серійними сошниками менша, ніж експериментальними, і різниця в глибині зростає зі збільшенням швидкості їх руху. Коефіцієнт варіації рівномірності заробки насіння по глибині на 9,2...14,1% менший в експериментальних сошників порівняно із серійними дводисковими за зміни швидкостей їх руху від 2,0 до 3,5 м/с.

Список використаних джерел

1. Медведєв В.В. Нульовий обробіток ґрунту в європейських країнах. Харків : ТОВ «ЕДЕНА», 2010. 202 с.
2. Циліурік О.І. Система мульчувального обробітку ґрунту в Північному Степу : монографія. Дніпро : Новий Світ – 2000, 2019. 298 с.
3. Білінська В. Сучасні інноваційні технології в сільському господарстві: Основна характеристика та перспективи впровадження. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Economics*. 2015. УДК 631.1 7 (172). С. 74–80. DOI: dx.doi.org/ 10.17721/1728-2667.2015/172-7/11
4. Lanmar R., Tourdonnet S.de, Barz P., During R.A., Frielinghaus M., Kolli R., Kubat J., Medvedev V., Picard D., Prospect for conservation agriculture in northern and European countries, lessons of KAASA. *Biblioteca fragmenta agronomica*, 11/2006, Pulawy-Warszawa, pp. 77–88.
5. Гевко Б.М., Павельчук Ю.Ф. Дослідження процесу розподілу насіння зернових культур при підґрунтово-впорозкідному способі сівби: теоретичний аналіз. *Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. Кам'янець-Подільський, 2016. Вип. 24. Ч. 2. Технічні науки. С. 25–32.
6. Gorobey V., Adamchuk V., Bulgakov V. Theory of two-disc anchor opener of grain drill. *Scientific proceedings i international scientific conference «CONSERVING SOILS AND WATER»*, 2016. P. 71–73.
7. Improving the efficiency of a sowing technology based on the improved structural parameters for colters / O. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, K. Sharai, A. Babi, M. Stashkiv. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, Issue 1-100. С. 33–45. – DOI 10.15587/1729-4061.2019.174445
8. Substantiation of the presence and parameters of seed guides in the openers, which increase the quality of sowing and yield / O. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, V. Ryndiaiev, S. Dyakonov, M. Stashkiv. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, № 1–112. С. 61–75. DOI 10.15587/1729-4061.2021.239304
9. Сало В.М., Лузан О.Р. Вибір напрямів вдосконалення сошників сівалок прямого посіву зернових культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград : КНТУ, 2010. Вип. 40. Част. II. С. 271–277.



10. Грушецький С.М., Кириченко Р.В., Омелянов О.М. Аналіз та перспективи технологічних і конструктивних особливостей посівних машин. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2 (117). С. 25–33. doi: 10.37128/2520-6168-2022-2-3
11. He J, Zhang Z Q, Li H W, Wang Q J. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014; 7(4): 1-12. DOI:10.3965/j.ijabe.20140704.001
12. P. Savinych, R. Kurbanov, M. Kuboń, J. Kamionka. Stability of semi-mounted sod seeder motion. *Scientific quarterly journal: Agricultural Engineering*. 2015. 3 (155). P. 101–108. DOI: <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2015.155.140>
13. L. Conceição, P. Barreiro, S. Dias, M. Garrido, C. Valero, J. R. Marques da Silva. A partial study of vertical distribution of conventional no-till seeders and spatial variability of seed depth placement of maize in the Alentejo region, Portugal. *Precision Agriculture*, 2016. Vol.17. P. 36–52. DOI 10.1007/s11119-015-9405
14. Пат. 156689 Україна, МПК А01С7/20. Дводисковий сошник для ресурсозберігаючих технологій посіву зернових культур / М.В. Бакум та ін. ; власник Держ. біотехнол. ун-т. № u202400597 ; Заявл. 05.02.2024 ; Опубл. 24.07.2024, Бюл. № 30. 5 с.
15. СОУ 74.3-37-129:2004 Випробування сільськогосподарської техніки. Машина посівні. Методи випробувань / М. Собчук та ін. Київ : Мінагрополітики України, 2006. 86 с.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2025 р.

R. Kyrychenko, M. Bakum, O. Koziy, Y. Lubchenko
State Biotechnological University

RESULTS OF FIELD RESEARCH ON DOUBLE-DISC COULTORS FOR SOWING CEREAL CROPS USING MINI-TILL TECHNOLOGY

Summary

The issue of improving the technological process of sowing grain crops under conditions of minimal soil cultivation is considered, which contributes to reducing fuel and lubricant consumption and reducing the time required to perform agrotechnical operations. The design of a two-disk coulters with a cut-out disk for use in grain seeders of the SZ type, designed to improve the quality of sowing using the Mini-till technology, is proposed. The design of the developed two-disk coulters is described for reliable formation of a groove of a given depth for sowing grain seeds when growing using the Mini-till technology using a larger diameter disk with cutouts along its periphery, capable of effectively cutting crop residues and soil formations of increased hardness on the path of the coulters movement, ensuring uniform seed placement to a given depth. When conducting comparative field studies, it was found that the depth of seed placement by serial coulters is less than that of experimental ones and the difference in depth increases with increasing speed of their movement. The coefficient of variation of seed penetration uniformity by depth is smaller in experimental coulters compared to serial two-disk coulters. Experimental field studies confirmed the superiority of the developed coulters over serial analogues in terms of uniformity of embedding depth and seed distribution along the length of the row. This is due to the better ability of the experimental coulters to penetrate into the soil due to increased efficiency of cutting crop residues by the edges of the coulters disks. The results obtained can be used in the development and modernization of seeding machines for resource-saving technologies for growing grain crops.

Keywords: Mini-till technology, grain seeder, seeds, crop residues, double-disc coulters with a cut-out disk, uniformity, depth of cultivation.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-6>

УДК 631.3:620.9

О. С. Ковязін¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

І. О. Чижигов¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3022-4828

С. В. Дереза¹

ORCID: 0000-0001-9797-0967

А. С. Пастушенко², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2540-3677

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЇ ПОВІТРЯ У ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Анотація. У статті проаналізовано альтернативні джерела енергії, що можуть використовуватися для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях. Розглянуто ефективність сонячної та вітрової енергетики, біомаси, біогазових технологій, теплових насосів і систем рекуперації тепла. Оцінено їхній вплив на енергоефективність тваринницьких господарств, потенціал зниження витрат на енергоресурси й екологічні переваги. Визначено основні переваги й обмеження застосування кожного виду енергії, враховуючи їхню доступність та можливість інтеграції в сучасні аграрні технології. Встановлено, що геотермальні системи є одним із найбільш стабільних та перспективних рішень для терморегуляції, оскільки не залежать від сезонних змін і забезпечують високу енергоефективність у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: мікроклімат, сонячна енергія, вітроенергетика, біоенергетика, геотермальні системи, біогаз, рекуперація тепла, енергоефективність, сталий розвиток.

Постановка проблеми. Сучасне тваринництво характеризується високими енергетичними витратами на підтримання мікроклімату у виробничих приміщеннях. Традиційні джерела енергії, зокрема газ, вугілля та дизельне паливо, є економічно затратними й екологічно небезпечними. Водночас застосування альтернативних енергетичних технологій, як-от сонячна, вітрова, біоенергетика та геотермальні системи, має потенціал зниження витрат і зменшення негативного впливу на довкілля.

Однак вибір оптимальної енергетичної стратегії для тваринницьких господарств ускладнюється недостатнім науковим обґрунтуванням ефективності альтернативних джерел енергії в умовах конкретних виробничих процесів. Потрібне проведення комплексного аналізу їхньої техніко-економічної доцільності для забезпечення сталого розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження підтверджують ефективність альтернативних джерел енергії у тваринництві. Зокрема, використання сонячних колекторів для обігріву приміщень дає можливість знизити споживання традиційних енергоносіїв, особливо в регіонах із високою інсоляцією [1]. Вітроенергетичні системи демонструють потенціал для забезпечення електроживлення вентиляційних і опалювальних установок, проте їх ефективність залежить від швидкості та стабільності вітрових потоків [2]. Біогазові установки на основі органічних відходів є перспективним рішенням для автономного енергозабезпечення, оскільки дають змогу отримувати теплову й електричну енергію, одночасно зменшуючи екологічний вплив [3]. Також досліджуються теплові насоси та рекупераційні системи, що оптимізують мікроклімат у тваринницьких комплексах і підвищують енергоефективність виробництва [4].

Попри значний прогрес у галузі, потрібні подальші дослідження щодо адаптації цих технологій до конкретних кліматичних і виробничих умов, а також оцінки їхньої економічної доцільності в довгостроковій перспективі.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є аналіз альтернативних джерел енергії для терморегуляції тваринницьких приміщень та оцінка їхнього впливу на енергоефективність господарств.

Основна частина. Розглянемо найбільш поширені **альтернативні джерела енергії**, що можуть забезпечувати (повністю або частково) терморегуляцію повітря у тваринницьких приміщеннях, з урахуванням їхньої ефективності, економічної доцільності й екологічного впливу.

Сонячна енергія. В Україні середній рівень сонячної радіації становить 1000-1400 кВт·год/м² на рік [1], що створює сприятливі умови для застосування сонячних енергетичних технологій. Такий рівень енергонадходження дає змогу ефективно впроваджувати фотоелектричні та теплові сонячні установки для часткового або повного енергозабезпечення тваринницьких господарств, зокрема у південних і центральних регіонах, де інсоляція є найвищою.

Сонячна енергетика базується на перетворенні сонячного випромінювання в теплову або електричну енергію [5]. Для безпосереднього підігріву повітря у тваринницьких приміщеннях переважно застосовуються **сонячні колектори** [6].

Фотоелектричні модулі (**сонячні панелі**) перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію, яка може використовуватися для живлення систем вентиляції, теплових насосів, обігрівальних елементів тощо [7].

У південних регіонах із високим рівнем сонячної інсоляції протягом року використання сонячних колекторів дає змогу суттєво знизити споживання традиційних енергоносіїв. Однак повне забезпечення річної потреби в тепловій енергії лише за сонячного випромінювання є технічно складним завданням. Тому сонячна енергія переважно використовується як додаткове джерело, що дає можливість зменшити навантаження на основні системи опалення й підвищити енергоефективність господарства.

Енергія вітру. Загальний потенціал вітроенергетики в Україні з урахуванням рельєфу місцевості, доступних територій та сучасних технологій оцінюється приблизно у 30-40 ТВт·год на рік [2]. Найсприятливішими регіонами для розвитку вітроенергетичних потужностей є території з високою середньою швидкістю вітру. Зокрема, Запорізька область демонструє швидкість вітру вище за середню – 4–6 м/с [1], що робить її одним із перспективних регіонів для розміщення вітрових електростанцій.

Вітроенергетика ґрунтується на перетворенні кінетичної енергії повітряного потоку в механічну або електричну енергію. **Вітрові турбіни** класифікуються за типом осі обертання на горизонтально- та вертикально-осьові, а також відрізняються за потужністю й конструктивними особливостями.

У тваринництві енергія вітру здебільшого використовується опосередковано – вироблена електроенергія спрямовується на живлення теплових насосів, електричних котлів, інфрачервоних обігрівачів, систем керування мікрокліматом та автоматизованої вентиляції.

У більшості випадків вітроенергетика виступає додатковим джерелом енергії, яке сприяє зниженню витрат фермерських господарств на електроенергію, проте не може забезпечувати повну автономність систем опалення чи вентиляції. Найбільш ефективним підходом є її використання в комплексних гібридних системах, які містять накопичувачі енергії та/або інші генератори (наприклад, сонячні панелі або традиційні джерела енергії), що дає змогу компенсувати коливання вітрового потенціалу та забезпечувати стабільне енергозабезпечення.

Енергія біомаси. Біомаса є одним із найбільш перспективних джерел відновлюваної енергії в Україні. Завдяки розвиненому аграрному сектору та значному обсягу біологічних відходів країна має вагомий потенціал для виробництва теплової та електричної енергії, а також біопалива.



За різними оцінками, річний технічний потенціал біомаси в Україні становить близько 20-30 млн т умовного палива [1], що еквівалентно приблизно 20 % загального енергоспоживання країни. Це відкриває широкі можливості для використання біомаси в енергозабезпеченні тваринницьких комплексів, зокрема для опалення приміщень, генерації електроенергії та виробництва біогазу.

Основним способом використання біомаси є її **спалювання** в твердопаливних котлах [8]. Сучасні котли оснащені автоматизованими подавачами палива, системами регулювання температури та контролю рівня кисню в топці, що забезпечує високу ефективність процесу та мінімізує шкідливі викиди. Крім обігріву приміщень, отримане тепло може використовуватися для нагрівання води в системах водяного опалення.

Альтернативним методом є піролізне спалювання (**газифікація**), під час якого біомаса розкладається з утворенням горючих газів, які потім допалюються для отримання тепла [9]. Це технологічне рішення дає змогу підвищити коефіцієнт корисної дії та забезпечує кращий контроль за викидами.

Ще одним ефективним підходом є **біогазові технології**, що базуються на анаеробному бродінні органічних відходів з утворенням біогазу – суміші метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2) [3]. Біогаз може використовуватися в котельнях, де його спалюють для отримання теплової енергії, або в когенераційних (тригенераційних) системах, де він застосовується у двигунах внутрішнього згоряння для виробництва електроенергії, а тепло двигуна використовується для обігріву.

Упровадження біогазових технологій формує замкнутий енергетичний цикл, у якому тваринницьке господарство використовує власні відходи для генерації енергії та отримує додатковий побічний продукт – органічне добриво (дигестат) [10], що утворюється в процесі бродіння.

Попри певні труднощі, біоенергетичні технології набувають дедалі більшої популярності серед фермерських господарств. Їх застосування сприяє зниженню витрат на енергоносії, зменшенню залежності від традиційних паливних ресурсів та покращенню екологічної ситуації завдяки скороченню викидів парникових газів і раціональному використанню відходів.

Теплова енергія навколишнього середовища. Технології, що ґрунтуються на використанні низькопотенційної теплової енергії навколишнього середовища (повітря, води чи ґрунту), забезпечують її відбір, акумулювання й подальше використання для опалення, кондиціонування повітря та гарячого водопостачання у тваринницьких приміщеннях.

Теплова енергія повітря. Теплова енергія повітря є одним із джерел низькопотенційного тепла, яке можна ефективно використовувати у тваринницьких приміщеннях. Завдяки сучасним технологіям відбору та акумулювання тепла повітряне середовище може слугувати для підтримання оптимального мікроклімату, зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності опалювальних систем.

Повітряні рекуператори (теплообмінники для утилізації тепла витяжного повітря) використовуються для зменшення теплових втрат у тваринницьких приміщеннях шляхом передачі тепла від витяжного повітря до припливного [11]. Це сприяє підвищенню енергоефективності вентиляційних систем, що особливо важливо в умовах значного повітрообміну, необхідного для забезпечення належного мікроклімату в приміщеннях для утримання тварин. Використання рекуператорів дає можливість стабілізувати температурний режим, зменшити витрати на додатковий підігрів повітря та мінімізувати утворення конденсату, що позитивно впливає на санітарно-гігієнічні умови утримання худоби.

Тепловий насос повітря – вода використовує тепло зовнішнього повітря для нагріву теплоносія, що подається у водяну систему опалення чи гарячого водопостачання тваринницьких приміщень [4]. Такі системи особливо ефективні в регіонах із відносно м'яким кліматом, де температура зовнішнього повітря не опускається до критично низьких значень. Застосування теплових насосів повітря – вода дає змогу суттєво зменшити витрати на традиційні енергоносії та підвищити автономність енергозабезпечення господарства.

Тепловий насос повітря – повітря функціонує за принципом реверсивного кондиціонера, забезпечуючи як нагрівання, так і охолодження повітря [12]. У холодний період система працює на обігрів приміщень, а в теплий – на охолодження, що є особливо актуальним для приміщень із нестабільним тепловим балансом, як-от пташники, свинарники та корівники. Завдяки високій швидкості регулювання температури цей тип теплового насоса дає можливість оперативно підтримувати комфортні умови для тварин.

Таким чином, використання теплової енергії повітря у тваринницьких приміщеннях є ефективним заходом для зниження енерговитрат та оптимізації мікроклімату. Однак його впровадження потребує детального техніко-економічного обґрунтування, зокрема оцінки ефективності в конкретних кліматичних умовах, а також врахування особливостей експлуатації та інтеграції в існуючі інженерні системи господарства.

Теплова енергія води. Вода є ефективним носієм теплової енергії, що дає змогу використовувати її для обігріву та підтримання мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. Завдяки високій теплоємності вода може акумулювати й передавати значну кількість тепла, що робить її перспективним джерелом низькопотенційної енергії для систем опалення та кондиціювання.

Теплова **енергія стічних вод** може бути ефективно використана для підтримання теплового балансу в тваринницьких приміщеннях [13]. Відбір тепла здійснюється в каналізаційних колекторах або через спеціальні теплообмінники безпосередньо перед скиданням нагрітої води. Це дає змогу мінімізувати втрати енергії, яка в іншому випадку була б безповоротно втрачена, і знизити витрати на опалення та підігрів води. Застосування таких систем є особливо доцільним у господарствах із високим водоспоживанням, наприклад на молочних фермах і в комплексах із вирощування свиней, де велика кількість теплої води використовується для санітарної обробки приміщень і обладнання.

Ставкові теплообмінники встановлюються в природних або штучних водоймах, де температура води є більш стабільною, ніж температура повітря [14]. Теплообмін відбувається між водою та теплоносієм, який циркулює у замкненій системі та постачає тепло до опалювальних або вентиляційних систем. Використання ставкових теплообмінників є ефективним рішенням для господарств, що мають доступ до водойм із достатнім об'ємом води й мінімальним рівнем замерзання в зимовий період.

Тепловий насос вода – вода забезпечує ефективне використання тепла підземних або поверхневих вод для обігріву тваринницьких приміщень чи систем гарячого водопостачання [15]. Така система працює найбільш ефективно за умов стабільної температури водного ресурсу, що дає змогу підтримувати високий коефіцієнт перетворення енергії. Перевагою теплових насосів такого типу є їхня здатність працювати з високою ефективністю навіть за низьких зовнішніх температур, що робить їх придатними для використання в різних кліматичних зонах.

Тепловий насос стічних вод призначений для використання енергії, накопиченої у відпрацьованій воді, яка має підвищену температуру [16]. Такі системи найбільш ефективні в господарствах із великим обсягом теплої стічної води, що утворюється внаслідок санітарної обробки приміщень, приготування кормів та інших технологічних процесів. Використання теплових насосів цього типу дає можливість створити замкнений цикл теплопостачання, знижуючи залежність підприємства від традиційних джерел енергії.

Таким чином, використання теплової енергії води у тваринницьких приміщеннях дає змогу суттєво підвищити енергоефективність господарства завдяки раціональному використанню природних і вторинних ресурсів. Однак ефективність таких систем залежить від наявності відповідних водних об'єктів та їхньої температурної стабільності, що потребує ретельного проектування й адаптації до конкретних умов експлуатації.

Теплова енергія ґрунту. Ґрунт є стабільним джерелом низькопотенційної теплової енергії, що ефективно використовується для регулювання температури в тваринницьких приміщеннях.

У господарствах її застосування реалізується через систему геотермальних теплових насосів, які отримують тепло від ґрунту за допомогою горизонтальних або вертикальних колекторів.

Температура ґрунту на невеликих глибинах змінюється в незначному діапазоні протягом року, що дає змогу знизити витрати електроенергії порівняно з повітряними тепловими насосами. Завдяки цьому різниця температур між теплоносієм у контурі та середовищем, що обігрівається, залишається мінімальною, що підвищує ефективність системи в зимовий період [17].

Геотермальні системи не потребують високотемпературних джерел тепла, як-от природні термальні води, оскільки використовують тепло поверхневих шарів землі. Це робить їх доступними для широкого спектра регіонів.

Тепловий насос працює за схемою «ґрунт – вода», нагріваючи воду для системи опалення (радіатори, тепла підлога) або повітря у вентиляційних установках [18]. Улітку система може працювати в реверсному режимі, забезпечуючи охолодження приміщень.

Геотермальна вентиляція використовує ґрунтові теплообмінники для попереднього нагрівання або охолодження припливного повітря [19]. Через розташовані в ґрунті трубні контури прокачується припливне повітря, і завдяки різниці температур відбувається теплообмін між повітрям та ґрунтом. Завдяки цьому здійснюється терморегуляція повітря, що знижує навантаження на основні системи опалення та кондиціонування, сприяючи підтриманню стабільного температурного режиму у тваринницьких приміщеннях.

Таким чином, енергія ґрунту є одним із найбільш стабільних і ефективних джерел відновлюваної енергії для тваринницьких господарств. Незважаючи на високі початкові інвестиції, геотермальні теплові насоси забезпечують значну економію енергоресурсів у довгостроковій перспективі. В умовах суворого клімату або нестабільного електропостачання ця технологія може бути найефективнішим рішенням для забезпечення комфортного мікроклімату у тваринницьких приміщеннях, що сприятиме підвищенню продуктивності тварин та економічної рентабельності господарства.

На основі проведеного аналізу альтернативних джерел енергії та технічних засобів для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях було створено узагальнену схему (рис. 1).

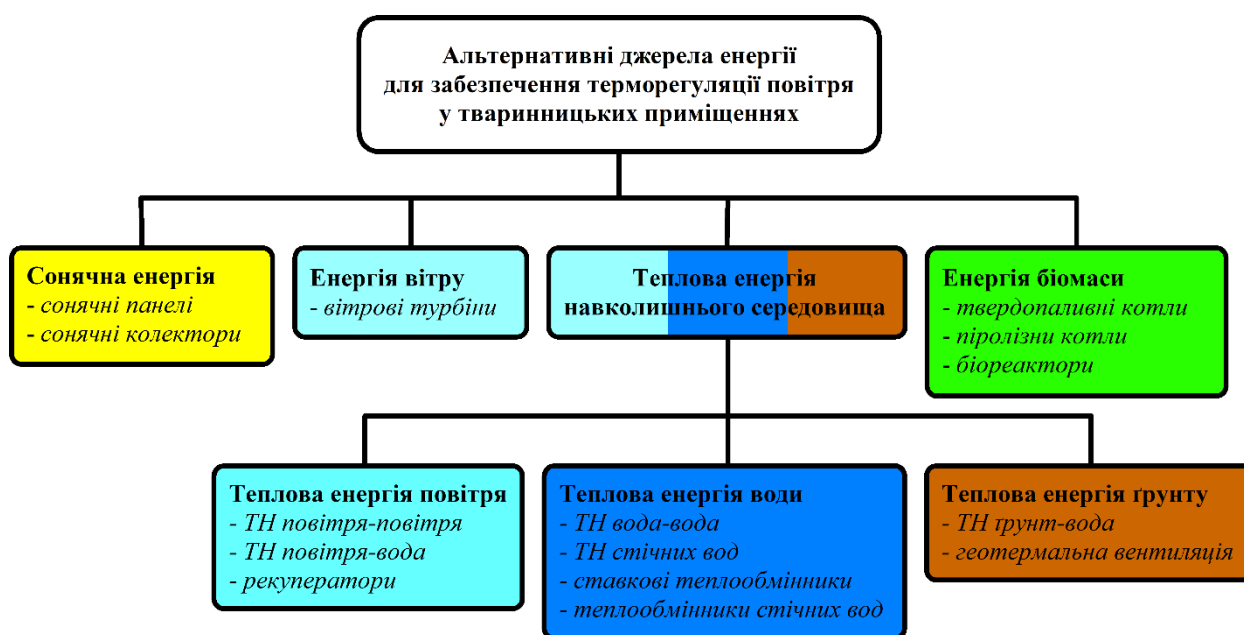


Рис. 1. Альтернативні джерела енергії та основні технічні засоби для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях

Висновки. Теплова енергія ґрунту, на відміну від сонячної та вітрової, не залежить від добових чи сезонних коливань погоди, що забезпечує її стабільність упродовж усього року. Порівняно з біомасою та біогазом вона не потребує постійної поставки сировини, що значно зменшує логістичні витрати та спрощує експлуатацію. Крім того, геотермальні системи вирізняються високою енергоефективністю, відсутністю потреби в паливі та можливістю не лише обігрівати приміщення, а й охолоджувати їх у теплий період. Завдяки цим характеристикам вони є одним із найбільш стабільних і перспективних рішень для терморегуляції великих тваринницьких комплексів, забезпечуючи економічну вигоду й екологічну безпечність у довгостроковій перспективі.

Список використаних джерел

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / ред. С. О. Кудря. 3-тє вид., оновл. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024.
2. Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskyi B., Petrenko K., Karmazin O., Riepin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, № 1. P. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.211>.
3. Atelge M.R., Krisa D., Kumar G., Eskicioglu C., Nguyen D.D., Chang S.W., та ін. Biogas production from organic waste: Recent progress and perspectives. *Waste and Biomass Valorization*. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>.
4. Lim T., Baik Y.-K., Kim D.D. Heating performance analysis of an air-to-water heat pump using underground air for greenhouse farming. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 15. P. 3863. <https://doi.org/10.3390/en13153863>.
5. Hayat M.B., Ali D., Monyake K.C., Alagha L., Ahmed N. Solar energy – A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*. 2018. Vol. 42, № 10. P. 3452–3475. <https://doi.org/10.1002/er.4252>.
6. Alkilani M.M., Sopian K., Alghoul M.A., Sohif M., Ruslan M.H. Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 3. P. 1476–1490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.019>.
7. Hafez A.Z., Yousef A.M., Soliman A., Ismail I. A comprehensive review for solar tracking systems design in photovoltaic cell, module, panel, array, and systems applications. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547901>.
8. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 5. P. = 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.
9. Basu P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. *Academic Press*, 2018.
10. Owamah H.I., Dahunsi S.O., Oranusi U.S., Alfa M.I. Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste Management*. 2014. Vol. 34, № 4. P. 747–752. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.017>.
11. Калетнік Г., Яропуд В. Research of pressure losses and justification of forms of side-evaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przeegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 7. P. 247–252. <https://doi.org/10.15199/48.2023.07.46>.
12. Safijahanshahi E., Salmanzadeh M. Performance simulation of combined heat pump with unglazed transpired solar collector. *Solar Energy*. 2019. Vol. 180. P. 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.038>.
13. Hao X., Li J., van Loosdrecht M.C.M., Jiang H., Liu R. Energy recovery from wastewater: Heat over organics. *Water Research*. 2019. Vol. 161. P. 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.106>.
14. Novo A.V., Bayón J.R., Castro-Fresno D., Rodríguez-Hernández J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy*. 2010. Vol. 87, № 2. P. 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.033>.
15. Mun H.S., Dilawar M.A., Jeong M.G., Rathnayake D., Won J.S., Park K.W., et al. Effect of a heating system using a ground source geothermal heat pump on production performance, energy-saving, and housing environment of pigs. *Animals*. 2020. Vol. 10, № 11. P. 2075. <https://doi.org/10.3390/ani10112075/>.

16. Kordana-Obuch S., Wojtoń M., Starzec M., Piotrowska B. Opportunities and challenges for research on heat recovery from wastewater: Bibliometric and strategic analyses. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 17. P. 6370. <https://doi.org/10.3390/en16176370>.
17. Alshehri F., Beck S., Ingham D., Ma L., Pourkashanian M. Comparisons between ground and air source heat pumps in hot/dry climates: Saudi Arabia as a case study. *Journal of Building Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100825>.
18. Alberti L., Antelmi M., Angelotti A., Formentin G. Geothermal heat pumps for sustainable farm climatization and field irrigation. *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 197. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.009>.
19. Patel P.D., Srivastava A.K., Chauhan H.D., Ankuya K.J., Prajapati R.K., Paregi A.B. Geothermal ventilation system for animal house: A new approach. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018. Vol. 7, № 6. P. 1850–1859. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.706.220>.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2025 р.

O. Koviazin¹, I. Chyzhykov¹, S. Dereza¹, A. Pastushenko²

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

**²Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Berezhany Agrotechnical Institute”**

ANALYSIS OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR THERMOREGULATION OF AIR IN LIVESTOCK PREMISES

Summary

The article analyzes alternative energy sources that can be used for air thermoregulation in livestock buildings. The study examines the efficiency of solar and wind energy, biomass, biogas technologies, heat pumps, and heat recovery systems. The impact of these energy sources on the energy efficiency of livestock enterprises is assessed, considering their potential to reduce energy costs and their environmental benefits. The main advantages and limitations of each energy source are identified, taking into account their availability, technical feasibility, and the possibility of integration into modern agricultural technologies.

Special attention is paid to the adaptability of these technologies to different climatic conditions and their role in optimizing microclimate control in animal husbandry. The study highlights the growing importance of sustainable energy solutions in agriculture and the necessity of hybrid energy systems that combine multiple sources to ensure greater efficiency and reliability. The potential of solar and wind energy is particularly promising in regions with favorable climatic conditions, whereas bioenergy and geothermal systems provide more stable and continuous energy supply options, reducing dependence on fossil fuels.

Furthermore, the study discusses the economic and ecological advantages of implementing alternative energy solutions in livestock farms. It is established that geothermal systems are among the most stable and promising solutions for thermoregulation, as they are independent of seasonal fluctuations and provide high energy efficiency in the long term. The findings support the feasibility of integrating alternative energy sources into livestock farming to enhance sustainability, reduce operating costs, and minimize environmental impact.

Keywords: microclimate, solar energy, wind energy, bioenergy, geothermal systems, biogas, heat recovery, energy efficiency, sustainable development.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-7>

УДК 631.3

Т. О. Кутковецька¹, канд. екон. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-4879-2954

О. Б. Мелентьєв², канд. пед. наук, доцент

ORCID: 0000-0003-1646-6844

¹ Уманський національний університет² Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

e-mail: tanya_kut@ukr.net

МОДЕРНІЗАЦІЯ КОРПУСУ ПЛУГА З ОБГРУНТУВАННЯМ ЙОГО КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Анотація. У статті проведено дослідження щодо підвищення якості основного обробітку ґрунту шляхом удосконалення робочих органів відвального плуга з обґрунтуванням його конструктивних параметрів. Наукову новизну становить установлення додаткових плоскорізальних робочих органів на кожному корпусі плуга з боку польового обрізу. При цьому практична цінність полягає в забезпеченні стійкості ходу орного агрегату, зниженні тягового опору та підвищенні якості глибокого розпушування ґрунту. Основні результати дослідження показали, що запропонована установка додаткового робочого органу дозволить проводити пошаровий обробіток ґрунту й цим самим покращити якісні показники технологічної операції, що відповідають агротехнічним вимогам. Отримані дослідження показали, що запропоноване конструктивне технічне рішення забезпечить високу продуктивність роботи орного агрегату.

Ключові слова: відвальна оранка, обробіток ґрунту, плоскорізальні робочі органи, тяговий опір, орний агрегат, леміш, польова дошка, розпушування ґрунту, технологічні операції.

Постановка проблеми. З усього комплексу польових робіт найбільш енергоємним процесом є відвальна оранка. За багаторічними дослідженнями провідних учених на виконання відвальної оранки потрібно до 35–40% енергетичних і 22–30% трудових витрат [1, с. 52]. Натепер багато виробників повертаються до традиційних технологій вирощування сільськогосподарських культур і глибокого обробітку з перевертанням скиби ґрунту. З огляду на це підвищення ефективності роботи відвальних плугів для основного обробітку ґрунту шляхом удосконалення його робочих органів є найкращим розв'язанням завдання.

Установлення додаткових плоскорізальних робочих органів на кожному корпусі плуга з боку польового обрізу дозволить забезпечити стійкість ходу орного агрегату, зниження тягового опору і, отже, підвищення якості технологічного процесу глибокого розпушування ґрунту. Тому тема цього дослідження натепер є актуальною.

Аналіз останніх досліджень. Питанням, що пов'язані з конструкцією робочих органів відвальних плугів, присвячено роботи В.В. Ауліна [1, с. 29], А.А. Тихого [1, с. 16], О.А. Дзюби [2, с. 227], С.М. Коломійця [3, с. 154], І.О. Сірого [4, с. 173] та ін. Проте нині існує низка питань, які ще недостатньо розглянуті, стосовно вдосконалення робочих органів відвального плуга, який забезпечить підвищення якості глибокого розпушування ґрунту.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є проведення дослідження щодо підвищення якості та зниження енергоємності основного обробітку ґрунту шляхом удосконалення робочих органів відвального плуга з обґрунтуванням його конструктивних параметрів.

Основна частина. У сучасному вирощуванні сільськогосподарських культур для глибокого обробітку ґрунту використовують відвальні плуги.

Відвальний плуг обробляє ґрунтовий шар. Залежно від виду і типу ґрунту, на якому проводиться оранка, розрізняють три типи шарів: дернина, стерня та пожнивні залишки у вигляді м'якого шару ґрунту. Вони різні за своїми технологічними властивостями по відношенню до обробітку плугом. Верхній шар (до 10 см) нездатний кришитися з різних причин, тому що в дернині він пронизаний корінням рослин. Переплетений ними верхній шар ґрунту пружний, тому для таких ґрунтів виконують основний обробіток відвальним плугом із перевертанням скиби ґрунту [5, с. 50].

Для покращення якості обробітку ґрунту плуг обладнують передплужником. Передплужник являє собою маленький корпус, що розташовується попереду основного корпусу плуга і має практично ті ж самі робочі органи, але в зменшеному вигляді [1, с. 72].

У відвального плуга є ще один важливий робочий орган – польова дошка, яка відповідає за горизонтальне зміщення орного агрегату, при цьому корпус плуга спирається об стіну борозни. У багатокорпусних плугів значна частина бічного тиску скиби ґрунту на всі корпуси сприймається польовими дошками, тому під час роботи швидко зношується її бічна грань, що веде до порушення правильного ходу плуга. Для продовження терміну служби польових дошок сучасною промисловістю випускаються двосторонні польові дошки, що дозволяє використовувати спочатку її одну сторону, а потім – іншу [6].

Якість роботи відвального плуга визначають по зовнішньому вигляді поверхні обробленого поля та внутрішньому – зораний шар, стан дна та стінки борозни.

Відвальні плуги мають один загальний недолік – забивання робочих органів пожнивними рештками та підвищений тяговий опір.

З метою зниження тягового опору і розвороту плуга в горизонтальній площині деякими науковцями [7, с. 97] пропонувалися «зворотні» лемеші, що встановлювалися на польових дошках відвальних корпусів з боку стінки борозни. Випробування плуга з таким конструкторським рішенням показало зниження тягового опору до 20% й покращення якісних показників роботи. Проте головним недоліком використання такого типу плугів є нераціональна витрата енергії в технологічному процесі оранки.

Зниження тягового опору орного агрегату й енергоємності процесу основного обробітку з обертанням скиби ґрунту можна отримати в разі вдосконалення технологічного процесу оранки.

Установка різальних робочих органів зліва дозволяє запобігти розвороту плуга в горизонтальній площині й змінити умови роботи польових дошок плужних корпусів відвальних плугів, за рахунок чого знизити енергоємність процесу обробітку ґрунту до 20%.

Також можна відзначити, що зміна форми оброблюваного шару ґрунту має сприяти збільшенню кута обертання скиби ґрунту, а витриманість конструктивної ширини захвату плуга запобіжить порушенню геометричних параметрів робочих органів і тим самим вплине на покращення якості обробітку ґрунту [8, с. 140].

Розглянуті технічні рішення, що спрямовані на вдосконалення технологічного процесу основного обробітку ґрунту із застосуванням різних додаткових робочих органів, можна віднести до методу пошарового обробітку ґрунту. Процес такого методу полягає в одночасному обробітку шару ґрунту на задану глибину у двох площинах [9, с. 139].

У нашому випадку встановлюється додатковий робочий орган на польову дошку [4, с. 176] у верхній її частині з боку польового обрізу для того, щоб підрізати стінку борозни на заданій висоті. Таким чином, установлення додаткового робочого органу дозволить проводити пошаровий обробіток ґрунту, забезпечити зниження тягового опору орного агрегату шляхом зниження питомого тиску на польову дошку, а також покращити якісні показники технологічної операції.

Відвальне розпушування є основним видом відвального обробітку, що забезпечує обертання, кришіння, розпушування, часткове перемішування ґрунту, підрізання та закладення бур'янів. На подолання сил тертя, що виникають на поверхнях робочих органів ґрунтообробних машин, витрачається до 50% тягової потужності трактора. Питомий опір ґрунту під час оранки є основним показником і визначається експериментально шляхом вимірювання тягового опору корпусу плуга і перерізу скиби, що ним вирізується. Механічний склад ґрунту є визначальним, тому що збільшення у ґрунті кількості поживних залишків, переущільнення від технологічної колії тощо викликає пропорційне збільшення питомого опору [10, с. 375; 11, с. 107].

За робочу гіпотезу прийнято, що застосування додаткового плоскорізального робочого органу збільшує нормальну реакцію ґрунту на нього, внаслідок чого зменшується сила тертя, яка діє на польову дошку, що в кінцевому підсумку веде до зменшення сили тяги [7, с. 97].

Вплив сил, що діють на корпус відвального плуга із запропонованим плоскорізальним робочим органом, показано на рис. 1.

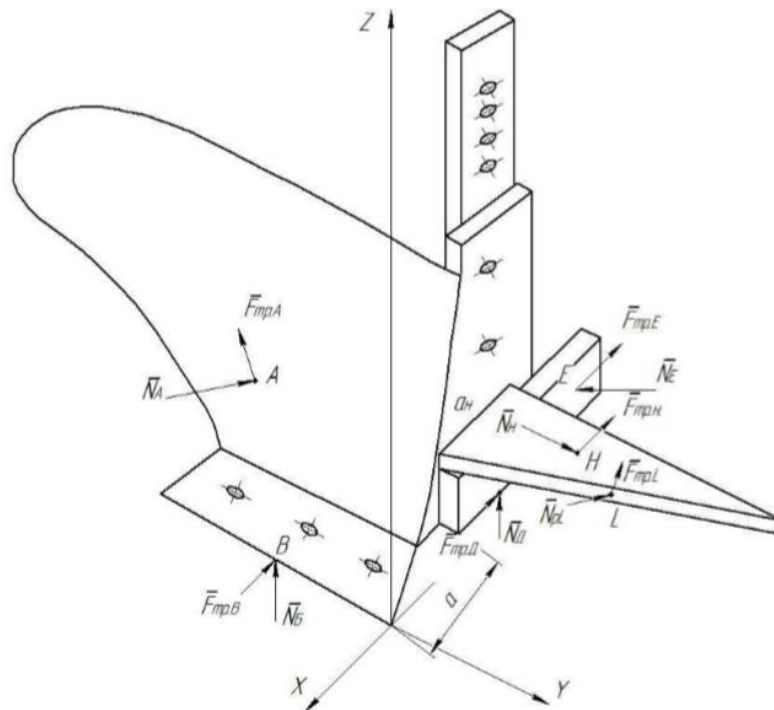


Рис. 1. Модернізований корпус плуга з шістьма характерними точками:
 $N_A, N_B, N_D, N_E, N_L, N_H$ – нормальні реакції ґрунту в характерних точках корпусу плуга
 $F_{трA}, F_{трB}, F_{трD}, F_{трE}, F_{трL}, F_{трH}$ – сили тертя у відповідних точках

Вважаємо, рух плуга під дією сил тяги, реакцій ґрунту на робочі органи, сили тяжіння сталими. Для опису руху виберемо систему координат $XYZO$ з початком у точці O , що збігається з крайньою задньою точкою по лівій дошці корпусу плуга. Рух відбувається з постійною швидкістю v вздовж осі X , що збігається з краєм борозни. Площина XOY горизонтальна та збігається із дном борозни, а OZ – вертикальна. Характер руху, що встановився, з постійною швидкістю дозволяє виключити випадкові фактори, що впливають на рух плуга, які пов'язані з неоднорідністю властивостей ґрунту, тому умови, що забезпечують спокій або рівномірний прямолінійний рух плуга, виходячи з довільного просторового розташування сил, що діють на елементи плуга, записано у вигляді шести рівнянь рівноваги [7, с. 100].

Для спрощення опису дії сил на плуг під час оранки визначено шість характерних точок на корпусі:

- 1-ша – $C_{\text{від}}$ – точка A прилягання реакції ґрунту на відвал і леміш;
- 2-га – $C_{\text{л}}$ – середина основи леміша, точка B ;
- 3-тя – $C_{\text{опд}}$ – середина основи польової дошки, точка D ;
- 4-га – $C_{\text{цд}}$ – центр польової дошки, точка E ;
- 5-та – $C_{\text{рн}}$ – середина леза ножа, точка L ;
- 6-та – $C_{\text{н}}$ – точка перетину медіан трикутного плоскорізального робочого органу, точка H .

Дія ґрунту на польову дошку, леміш із відвалом, плоскорізальний робочий орган у загальному випадку вважаємо рівномірно розподіленим по всій поверхні відповідного робочого органу, але для спрощення силового розрахунку робили такі припущення:

- 1) результуюча реакція ґрунту на відвал і леміш корпусу прикладена в точці A ;
- 2) реакція ґрунту на основу леміша прикладена в точці B ;
- 3) нормальна реакція ґрунту на основу польової дошки прикладена в середині основи (точка D), а результуюча сила нормальної реакції ґрунту на бічну поверхню польової дошки прикладена в центрі бічної поверхні польової дошки, в точці E ;
- 4) реакція ґрунту на лезо плоскорізального робочого органу прикладена в точці L ;
- 5) реакція ґрунту на плоскорізальний робочий орган у формі трикутника прикладена в точці перетину його медіан H .

Усі нормальні реакції перпендикулярні до площин або дотичних площин у відповідних точках робочих органів, а сили тертя лежать у цих площинах.

Аналіз сил, які діють на плуг, показує, що лінії дії сил у точці їх застосування, характер їх розподілу на окремі частини плуга дають підставу зробити висновок про те, що за класифікацією систем сил, які діють на тверде тіло, цю систему можна вважати довільно-просторовою. Як відомо з теоретичної механіки, умови рівноваги такої системи сил включає шість рівнянь: три рівняння проєкцій на осі XYZ і три рівняння моментів щодо цих осей.

Так, за результатами досліджень було визначено тяговий опір плуга залежно від швидкості руху орного агрегату та ширини захвату з додатковим плоскорізальним робочим органом (рис. 2) за заданими параметрами (табл. 1).

Таблиця 1

Показники тягового опору залежно від швидкості руху агрегату під час обробітку робочими органами

трактора	Серійний робочий орган		ДПРО 200 мм		ДПРО 300 мм	
	Фактична швидкість поступального руху, км/год	Тяговий опір плуга, кН	Фактична швидкість поступального руху, км/год	Тяговий опір плуга, кН	Фактична швидкість поступального руху, км/год	Тяговий опір плуга, кН
3	5,34	13,1	5,52	11,90	5,65	11,10
4	6,16	14,37	6,39	13,00	6,57	11,90
5	7,15	15,73	7,61	13,63	7,76	12,50

Як видно з графіка (рис. 2), за використання додаткових робочих органів тяговий опір орного агрегату значно менший, порівняно з плугом з використанням серійних робочих органів. З проведеного математичного аналізу оптимальним режимом руху є використання 3-ї передачі з понижувальним редуктором, тяговий опір становить 11,10 кН.

Також були проведені дослідження відносно зміни кришення ґрунту в ґрунтовому горизонті залежно від швидкості руху орного агрегату на заданій передачі трактора та ширини захвату (рис. 3) за заданими параметрами (табл. 2).

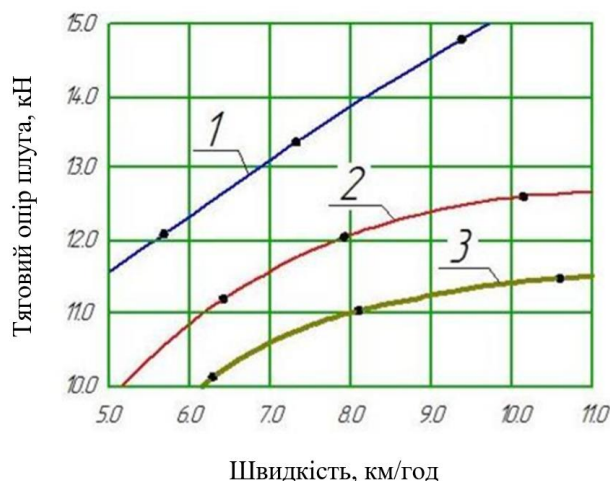


Рис. 2. Залежність тягового опору плуга від швидкості руху та ширини захвату відвального плуга із серійними та модернізованими робочими органами: 1 – без ДПРО (серійний плуг); 2 – ДПРО 200×70×8 мм; 3 – ДПРО 300×100×8 мм.

Таблиця 2

Параметри роботи під час обробітку відвальним плугом

Передача трактора	Серійний відвальний плуг		ДПРО 200 мм		ДПРО 300 мм	
	Фактична швидкість поступального руху, км/год	Кришення ґрунту, %	Фактична швидкість поступального руху, км/год	Кришення ґрунту, %	Фактична швидкість поступального руху, км/год	Кришення ґрунту, %
3	5,34	85,9	5,52	87,5	5,65	89,4
4	6,16	91,8	6,39	94,0	6,57	96,3
5	7,15	92,9	7,61	95,2	7,76	97,9

Як видно з рис. 3, порівняльна характеристика кришення ґрунту за фракційного складу 0–50 мм показує, що кришення ґрунту в разі застосування додаткових робочих органів більш ефективніше за параметрів, близьких до швидкості руху $V=7,76$ км/год, кришення ґрунту такої фракції становить 97,9 %.

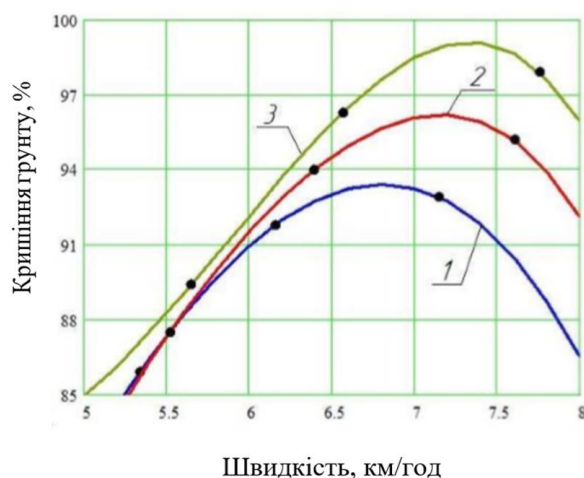


Рис. 3. Залежність зміни кришення ґрунту від швидкості руху та довжини додаткових плоскорізальних робочих органів: 1 – без ДПРО (серійний плуг); 2 – ДПРО 200×70×8 мм; 3 – ДПРО 300×100×8 мм

За результатами отриманих залежностей можна зробити висновок, що запропонована конструкція із застосуванням додаткових робочих органів працездатна за таких параметрів: довжина плоскорізального робочого органу до 300 мм за швидкості руху до 8 км/год.

За таких параметрів досягаються оптимальні агротехнічні та силові показники роботи орного агрегату, що повністю відповідають вихідним агротехнічним вимогам.

Висновки. Таким чином, у результаті проведених досліджень ми досягли поставленої мети, оскільки наведено конструкцію вдосконаленого робочого органу відвального плуга та визначено його конструктивні параметри. Також проведено теоретичний аналіз запропонованого модернізованого корпусу плуга з додатковим плоскорізальним робочим органом. При цьому визначено, що застосування додаткового робочого органу плуга призводить до збільшення нормальної реакції на польову дошку, що відповідає зменшенню сили тяги. Крім того, запропонована установка додаткового робочого органу дозволить проводити пошаровий обробіток ґрунту і цим самим покращити якісні показники технологічної операції.

Отже, вищевикладене дає передумови для подальших досліджень цієї проблематики та впровадження у виробництво запропонованого технічного рішення.

Список використаних джерел

1. Аулін В.В., Тихий А.А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2017. 278 с.
2. Дзюба О.А. Стан питання і шляхи вдосконалення лемішних начіпних плугів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 226–232.
3. Леженкін О.М., Коломієць С.М. Динаміка ґрунтообробних агрегатів. *Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції* : матеріали міжнародного науково-практичного форуму. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. Ч. 1. С. 153–156.
4. Сірий І.О. Передумови основного обробітку ґрунту шляхом створення деформацій розтягування-вигину і зсуву. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2016. №. 4. С. 171–181.
5. Pratiwi D.K., Chandra H., Utami N.P., Irawan O., Purba A.N. Damage Analysis of Moldboard Plow. *E3S Web of Conferences*. Том. 68. 04004. 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186804004>
6. Nassir J. Effect of Moldboard Plow Types on Soil Physical Properties Under Different Soil Moisture Content and Tractor Speed. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. Vol. 31(1). 48–58. <https://doi.org/10.37077/25200860.2018.75>
7. Котенко С.С., Калінін О.Є. До методики розрахунку коефіцієнтів відновлення лемешів плугів. *Сільськогосподарські машини*. 2015. Вип. 32. С. 95–102.
8. Непочатенко В.В., Мелентьев О.Б. Покращення якісних показників плуга під час виконання технологічної операції оранки на перезволожених ґрунтах. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2015. Вип. 3. С. 138–143.
9. Василенко М.О., Калінін О.Є. Зони зміцнення лемешів плугів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2016. Вип. 170. С. 138–141.
10. Alwan A.A Field Study of Soil Pulverization Energy by using Different Moldboards Types Under Various Operating Condition. *Basrah Journal of Agricultural Sciences*. Vol. 32(2). 373–388. <https://doi.org/10.37077/25200860.2019.284>
11. Hamid A.A., Alsabbagh A.R. Effect of Moldboard types, Two depths of Tillage and Two speeds of Tractor in some Physical Properties and Pulverization of Soil. *Kufa Journal For Agricultural Sciences*. Vol. 15 (1), 105–116. <https://doi.org/10.36077/kjas/2023/v15i1.10334>

Стаття надійшла до редакції 22.03.2025 р.

**T. Kutkovetska¹, B. Melentiev²**¹**Uman National University**²**Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University**

MODERNIZATION OF THE PLOUGH BODY WITH SUBSTITUTION OF ITS DESIGN PARAMETERS

Summary

The article presents research on improving the quality of basic tillage by improving the working elements of a dump plow with a justification of its design parameters. It has been established that today many producers are returning to traditional technologies for growing crops and deep tillage with turning over soil plots, which occupies one of the main places. Therefore, it is important to increase the efficiency of dump plows for primary soil cultivation by improving their working elements. The scientific novelty in this study is the installation of additional flat-cutting working bodies on each plow body on the field edge side. The practical value lies in ensuring the stability of the plowing unit, reducing traction resistance and improving the quality of deep soil loosening. The main results of the study showed that a reduction in the draft resistance of the plowing unit and the energy intensity of the main tillage process with rotation of the soil clod can be obtained by improving the technological process of plowing, namely, by conducting layer-by-layer tillage. It can be noted that changing the shape of the cultivated soil layer should contribute to an increase in the angle of rotation of the soil clod, and maintaining the constructive width of the plow's grip will prevent the violation of the geometric parameters of the working elements and thereby improve the quality of soil cultivation. It was determined that the proposed design with the use of additional working elements is operational with the following parameters: the length of the flat-cutting working element is up to 300 mm at a speed of up to 8 km/h. With these parameters, optimal agrotechnical and power performance indicators of the plowing unit are achieved, which fully meet the initial agrotechnical requirements. The obtained studies showed that the proposed constructive technical solution will ensure high productivity of the plowing unit.

Keywords: plow, dump plowing, soil cultivation, flat-cutting working elements, traction resistance, plowing unit, ploughshare, field board, soil loosening, technological operation.



В. О. Лукаш, аспірант

ORCID: 0009-0003-5652-9798

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: vitalii.lukash@pdau.edu.ua

ТЕПЛОВА ОБРОБКА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. У статті розглядаються деякі аспекти теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, зокрема процеси сушіння зерна, які є важливими для збереження якості врожаю та забезпечення його довготривалого зберігання. Метою статті є вивчення ключових аспектів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, аналіз проблем, що виконуються в процесі сушіння зерна, а також визначення вимог до конструкції сучасних зерносушилок. Детально проаналізовано проблеми, що виникають під час процесу сушіння зерна, зокрема нерівномірне сушіння, високі енергетичні витрати та можливе зниження якості зерна за неправильного регулювання умов сушіння. Підкреслено важливість відповідності конструкцій сучасних зерносушильних установок вимогам енергоефективності та екологічності. Вказано, що для досягнення оптимальних результатів важливо не тільки правильно налаштувати температурні режими, але й удосконалювати саму конструкцію сушильних установок, ураховуючи новітні технології та матеріали.

Ключові слова: сільськогосподарське виробництво, тепла обробка, сільськогосподарські матеріали, сушіння зерна, зерносушарки, вологість зерна.

Постановка проблеми. Теплова обробка має важливе значення для сільськогосподарського виробництва. Вона використовується в усіх галузях цієї сфери. Наразі близько 15% енергоспоживання агропромислового комплексу розвинених країн йде на теплову обробку сільськогосподарських матеріалів [1]. Тому питання зниження енерговитрат та підвищення ефективності таких процесів є важливим на глобальному рівні. Невідповідність технічного обладнання умовам сільськогосподарського виробництва (різноманітні форми власності та ринкові механізми) вимагає кардинальних змін у забезпеченні процесів теплового оброблення. Ці процеси включають поєднання теплофізичних, фізико-хімічних і біохімічних явищ, що відбуваються одночасно. Головною метою теплової обробки є підвищення стійкості матеріалів під час зберігання або тимчасової консервації.

Процес сушіння є одним із найбільш важливих і енерговитратних видів теплової обробки в сільському господарстві. Він дозволяє забезпечити тривале зберігання продукції та ефективне попереднє оброблення сировини для численних технологічних етапів виробництва і перероблення аграрної продукції. Завдяки сушінню значно покращується якість багатьох сільськогосподарських продуктів.

Збереження, оброблення та перероблення зерна в нашій країні є складними і витратними процесами, які вимагають сучасної матеріально-технічної бази. Однак досвід передових господарств показує, що виробництво високоякісного зерна є вигідним, з рівнем рентабельності не менше 40%. У найближчі роки можна очікувати зростання попиту на нову техніку для оброблення та зберігання зерна. Зростання валових зборів і зменшення витрат на виробництво зерна можливе лише за умови впровадження високоефективних технологій світового рівня, розроблених відповідно до концептуальних принципів їх розвитку [2]. Для успішної реалізації цього напряму необхідно створити ефективну та конкурентоспроможну матеріально-технічну базу

таких підприємств. Ураховуючи обсяги продукції, що ними виробляється, сучасні сушильні комплекси з продуктивністю понад 100 тонн на годину будуть економічно недоцільними. Тому розроблення та адаптація технологій механізації теплової обробки зерна є важливою науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз літературних джерел за останні роки за темою статті свідчить про значну увагу науковців до питань розвитку технологій теплової обробки сільськогосподарських матеріалів і знаходження шляхів підвищення її ефективності. Питання покращення ефективності та зниження енергоспоживання процесів сушіння зерна розглядаються в роботах [3], [4].

У роботі [5] досліджено питання волого-теплової обробки зернової сировини і зазначено, що під впливом температури й тиску відбуваються значні зміни в структурі та властивостях поживних речовин, що дає змогу отримувати продукцію високої якості.

Переривчате сушіння харчових продуктів висвітлюють науковці у роботі [6], де розглядають питання енергозбереження та покращення якості продукції під час такого сушіння. Обговорюються різні стратегії моделювання, а також їх переваги та недоліки. Окремо вивчається процес уривчастого мікрохвильового конвективного сушіння. Зазначено значні можливості та перспективи для подальших досліджень у цій галузі.

Застосування теплової обробки відіграє важливу роль у процесах сушіння, зберігання та перероблення сільськогосподарських матеріалів, що забезпечує їх довготривале збереження, покращення смакових та харчових властивостей.

Однак сучасні технології теплової обробки часто супроводжуються високими енергетичними витратами та не завжди оптимальними результатами. Тому надзвичайно важливим є пошук нових підходів та вдосконалення наявних методів для підвищення ефективності та зниження енергоспоживання, що дозволить зменшити витрати на енергоносії та знизити вплив на навколишнє середовище, при цьому зберігаючи високу якість обробленої продукції [7].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є вивчення ключових аспектів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, аналіз проблем, що виконуються в процесі сушіння зерна, а також визначення вимог до конструкції сучасних зерносушилок.

Завдання дослідження: 1) розглянути базові аспекти теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, зокрема, процесу сушіння зерна; 2) висвітлити основні проблеми, що виникають у процесі сушіння зерна; 3) визначити головні вимоги до конструкції сучасних зерносушилок; 4) вибрати можливі рішення проблеми підвищення ефективності сушіння зерна.

Основна частина. Сушіння є завершальним етапом у виробництві зерна, і від нього значною мірою залежать його якість і здатність до тривалого зберігання. Зерно є живим організмом і за своєю структурою нагадує колоїдне капілярно-пористе тіло. Внутрішні мікропори та капіляри дозволяють волозі переміщуватися як із глибини до поверхні, так і у зворотному напрямку. Вода відіграє ключову роль у життєдіяльності зерна, оскільки бере участь у процесах обміну речовин. Якщо її вміст низький, вона залишається у зв'язаному стані. Проте в разі підвищення вологості понад певний рівень, так званий кондиційний показник, у структурі зерна з'являється вільна вода, що активує біологічні процеси. Таке зерно не може довго зберігатися, оскільки в ньому швидко розмножуються шкідливі мікроорганізми та посилюється інтенсивність дихання. Це призводить до самозігрівання і псування зернової маси [8].

Щоб зберегти якість зібраного врожаю та підготувати його до тривалого зберігання, необхідно видалити надлишкову вологу. Проте підвищення температури сушіння має певні обмеження, пов'язані з такими факторами: зниженням схожості, змінами у структурних компонентах зерна, порушенням його біологічної будови та погіршенням якісних характеристик.

У висушеному зерні практично відсутня вільна волога, і воно перебуває в стані спокою або анабіозу. Життєві процеси в ньому не припиняються повністю, але сповільнюються до мінімального рівня, достатнього для підтримання життєдіяльності клітин зародка. Завдяки цьому таке зерно може зберігатися тривалий час.

Залежно від рівня вологості державні стандарти класифікують насіння зернових культур за чотирма категоріями: сухе, середньої сухості, вологе та сире (табл. 1).

Таблиця 1

Культура	Відносна вологість зерна, %			
	сухе (до)	середньої сухості	вологе	сире (понад)
Зернові злакові:				
пшениця, жито, ячмінь, гречка	14	14,0...15,5	15,7...17,0	17,0
овес, кукурудза (зерно)	14	14,0... 16,0	16,0...18,0	18,0
Зернові бобові:				
горох, кормові боби, люпин	14	14,0... 16,0	16,0...18,0	18,0
квасоля	16	16,0...18,0	18,0...20,0	20,0
Зернові олійні:				
соняшник і льон (насіння)	11	11,0...13,0	13,0...14,5	4,5
конопля (насіння)	11	11,0...12,0	12,0... 14,0	14,0

Отже, головним завданням сушіння є зменшення вологості зерна до кондиційного рівня. Процес сушіння є складним технологічним явищем, що включає низку взаємопов'язаних теплофізичних, фізико-хімічних та біохімічних змін. Це один із найпоширеніших технологічних процесів, що застосовується в різних галузях. Натепер сушінню підлягають деревина, ізоляційні матеріали, цегла, паливо, продукти харчування, а також фрукти. Основна мета теплової обробки сільськогосподарської продукції полягає у підвищенні її стійкості до зберігання або тимчасового консервування. Водночас значення цього процесу не обмежується лише цими аспектами.

Сушіння зерна за науково обґрунтованими режимами сприяє підвищенню його стійкості до зберігання, покращує технологічні та посівні властивості. Наприклад, підсушування насіннєвого матеріалу створює оптимальні умови для дозрівання після збирання, що позитивно впливає на енергію проростання та схожість.

Оброблення товарного зерна теплом покращує якість продукції його переробки, зокрема борошна, олії тощо. Це своєю чергою підвищує продуктивність млинів та олійно-екстракційних підприємств, збільшує вихід кінцевої продукції, зменшує зношення обладнання та сприяє зниженню собівартості виробництва. Водночас використання високих температур у процесі сушіння може призвести до втрати схожості зерна, що зазвичай є незворотним процесом [9].

Досягнення рівномірного прогрівання та однорідного розподілу вологи у зерновій масі, а також контроль температури повітря і швидкості переміщення зерна створюють певні труднощі. Тому на практиці сушіння здійснюється з урахуванням нормативних даних, наведених у відповідних таблицях (табл. 2).

Перегрів зерна понад допустимі значення негативно впливає на вміст білків, крохмалю та жирів. Білкові сполуки мають здатність поглинати воду й набухати, що є важливим фактором як для проростання насіння, так і для приготування тіста. Однак за надмірного нагрівання зерна відбувається денатурація білка, що призводить до зниження його водопоглинальної здатності.

Висока температура також негативно позначається на кількості та якості клейковини в пшеничному зерні під час сушіння, оскільки у структурі відбуваються певні зміни. Під дією тем-

ператури пшеничне зерно з нормальною або слабкою клейковиною до 50 °С не чинить негативного впливу на її якість, проте в разі перевищення цього порога клейковина може втрачати свої властивості. Здатність зерна зберігати природні характеристики під впливом температури називається термостійкістю, яка підвищується зі зменшенням рівня його вологості.

Таблиця 2

Рекомендована максимальна температура нагрівання зерна залежно від його призначення

п/п	Призначення зерна	Максимальна температура нагріву, °С
1	Фуражне	82
2	Для перероблення на борошно	65
3	Насіннєве і для солоду (за вмісту води нижче 26%)	49
4	Насіння олійних культур	46

Наприклад, пшениця з вологістю 7–8% за нагрівання до 70°C не втрачає схожості, тоді як та сама пшениця з вологістю 20% втрачає її вже за 40–45°C. На термостійкість значно впливає також тривалість теплового впливу. За короточасного нагрівання зерно може витримувати вищі температури. Так, у рециркуляційних сушарках насіннєве зерно з вологістю 20% можна прогрівати до 50°C, тоді як у шахтних сушарках – лише до 40°C. Час термічного впливу в рециркуляційній сушарці становить 2–3 секунди, а в шахтній – 20 хвилин.

У сушінні діє основне правило: температура нагрівання зерна має бути тим нижчою, чим вища його вологість і довший період термічного впливу.

За температури понад 70°C у зерні відбуваються зміни в крохмалі, зокрема процес клейстеризації, що негативно позначається на його хлібопекарських властивостях. Із підвищенням температури зростає активність ферментів, сягаючи максимуму в діапазоні 35–55°C. Однак подальше підвищення температури до 60–70°C спричиняє її поступове зниження, а за 80°C ферментативна активність повністю зникає, що супроводжується втратою схожості зерна.

Зниження температури нагрівання нижче встановлених режимних значень неминує призводить до падіння продуктивності сушарки, збільшення питомих витрат пального та електроенергії. Отже, під час сушіння неприпустиме зниження температури нижче встановлених технологічних параметрів.

Якщо порівнювати швидкість висушування різних зернових культур за однакового підведення теплової енергії, можна помітити значні відмінності. Залежно від цього параметра зернові поділяються на три групи:

- швидко висихаючі (насіння капусти, цукрового буряка, ріпаку);
- із середньою швидкістю висихання (пшениця, жито, овес, ячмінь);
- повільно висихаючі (горох, квасоля, люпин).

Термічну обробку сільськогосподарських матеріалів також використовують для боротьби зі шкідниками хлібних запасів та мікроорганізмами. Важливо при цьому правильно поєднувати температуру нагрівання і тривалість процесу сушіння [9].

Для дезінсекції зерно нагрівають до 50–60°C протягом 1–2 хвилин. Це призводить до загибелі таких шкідників, як кліщі, довгоносики, брухуси та мукоїди на всіх стадіях розвитку (табл. 3). Специфічні енерговитрати на проведення дезінсекції зерна становлять 17 кВт·год/т.

Сушіння також сприяє зменшенню маси оброблюваних продуктів, що має важливе значення. Наприклад, у процесі сушіння маса молока зменшується на 80%, овочів – на 70–75%, фруктів – на 50%, а зерна – до 10–15%.

Доцільною є організація сушіння безпосередньо в місцях виробництва сільськогосподарської продукції, оскільки це дає змогу зменшити навантаження на залізничний та інші

види транспорту, позбавляючи їх необхідності перевезення значної кількості зайвої маси у вигляді води.

Таблиця 3

Режими термічного знезараження зерна

Шкідники	Тривалість існування в хвилинах (за найбільш стійкими стадіями) за температури:		
	50°C	55°C	60°C
Амбарний довгоносик	55	10	-
Рисовий довгоносик	60	20	-
Борошняний хрущак	-	10	-
Рудий борошноїд	190	25	10
Сурінамський борошноїд	40	10	7
Борошняний кліщ	20	10	5

Аналіз наукових досліджень і наведені вище дані свідчать про те, що для підвищення ефективності процесу сушіння зерна конструкція зерносушарки має забезпечувати рівномірний нагрів та видалення вологи за умови надійного контролю температури й вологості зерна протягом усього процесу.

Сучасні зерносушарки повинні бути універсальними, що дозволяє обробляти різні види зерна (пшениця, рис, соняшник, кукурудза тощо), які мають різні фізико-хімічні, біохімічні, структурно-механічні та інші технологічні властивості. Для підвищення ефективності сушіння можна збільшити активну поверхню зерна, яка бере участь у тепло- і вологообміні, а також оптимізувати поєднання технологічних методів зневоднення, підвищення температури зерна, що надходить на сушіння, і його подальше охолодження.

Одним зі способів підвищення ефективності сушіння зерна є розроблення методів інтенсифікації випаровування вологи з матеріалу та зменшення енергетичних витрат, що необхідні для цього процесу. Для розв'язання питання зменшення енергоємності сушіння зерна можливі такі підходи:

- Підвищення температури сушильного агента та збільшення його витрати;
- Рециркуляція відпрацьованого теплоносія в зерносушарці;
- Попередній підігрів зерна перед сушінням;
- Герметизація та теплоізоляція сушарки, каналів і повітропроводів;
- Використання неоднорідних електричних полів;
- Регенерація тепла з відпрацьованого теплоносія;
- Застосування електромагнітних полів високої та надвисокої частоти.

Порівнюючи ефективність застосування зазначених технічних прийомів, варто відзначити, що найбільш доцільним з точки зору технології післязбирального оброблення зерна є попередній підігрів зерна перед сушінням. Однак для реалізації цього процесу в конструкції зерносушарки необхідно передбачити спеціальну ємність для підігріву, що призводить до збільшення її металомісткості.

Висновки. У висновках до статті можна підсумувати основні результати дослідження:

1. Вивчення ключових аспектів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів показало, що цей процес є важливим для забезпечення високої якості та тривалого зберігання врожаю. Теплова обробка, зокрема сушіння зерна, впливає на збереження його харчової цінності та запобігання втратам під час зберігання.

2. Аналіз проблем, що виникають під час сушіння зерна, вказав на такі критичні фактори, як нерівномірне сушіння, високі енергетичні витрати та можливе зниження якості зерна за непра-

вильно налаштованих умов процесу. Вказані проблеми потребують ретельного контролю та постійного вдосконалення технологічних процесів для досягнення оптимальних результатів.

3. Визначення вимог до конструкції сучасних зерносушилок підкреслило необхідність забезпечення енергоефективності та екологічності в процесі сушіння. Сучасні зерносушильні установки повинні бути адаптовані до змінюваних кліматичних умов, використовувати новітні технології та матеріали для зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності процесу.

4. Розвиток технологій і конструкцій зерносушильних установок є необхідним для подальшого вдосконалення процесу сушіння. Урахування інноваційних підходів до матеріалів і конструкційних рішень дозволить знизити витрати енергії та поліпшити якість продукції, що зберігається.

Таким чином, результати дослідження підкреслюють важливість інновацій та удосконалення як технологічних процесів, так і конструкцій сушильних установок для досягнення максимального ефекту від теплової обробки сільськогосподарських матеріалів.

Перспективами подальших досліджень з цієї теми є: розроблення нових технологій сушіння; оптимізація енергоспоживання в процесах теплової обробки; вдосконалення конструкцій зерносушилок; інтеграція новітніх матеріалів і технологій; покращення якості обробленої продукції; вивчення впливу кліматичних умов на ефективність процесів теплової обробки; створення системи моніторингу та контролю якості процесу сушіння.

Список використаних джерел

1. Макалюк І.В., Місйяло О.В. Особливості планування діяльності сільськогосподарських підприємств, що займаються рослинництвом. The 3th International scientific and practical conference «*Topical issues of the development of modern science*» (November 13–15, 2019). Publishing House «ACCENT», Sofia, Bulgaria. 2019. 493 p. P. 144–149.
2. Ленкова Т. М., Паньков П. Ефективність СВЧ-обробки зерна. *Комбікорми*. 2000. № 4. С. 31–32.
3. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів : монографія. Луцьк : ЛДТУ, 2002. 165 с.
4. Гапонюк О.І., Остапчук М.В., Станкевич Г.М. Активне вентилявання та сушіння зерна : монографія. Одеса : Поліграф, 2014. 324 с.
5. Яшук Н. Зберігання зерна та якісні засоби обробки в післязбиральний період. *Пропозиція: український журнал з питань агробізнесу*. 2009. № 9. С. 90–95.
6. Kumar C., Karim M., Joardder M. Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*. 2014. 121. 48–57.
7. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. nr. 8(94). 50–58.
8. Котов Б.І., Грищенко В.О. Математична модель охолодження вологого зерна у вентиляємих бункерах з радіальним розподіленням повітря. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47(1). С. 132–139.
9. Лукаш В.О., Костенко О.М., Дрожжана О.У. Теплова обробка зерна та шляхи підвищення її ефективності. *Інноваційні аспекти системи безпеки праці, захисту інтелектуальної власності* : матеріали VII всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Полтава, 24–25 берез. 2022 р.). Полтава : ПДАУ, 2022. С. 160–163.

Стаття надійшла до редакції 21.03.2025 р.



V. Lukash
Poltava State Agrarian University

HEAT TREATMENT OF AGRICULTURAL MATERIALS AND WAYS TO INCREASE ITS EFFICIENCY

Summary

This article discusses some important aspects of the heat treatment of agricultural materials, in particular grain drying processes, which are extremely important for maintaining the quality of the crop and ensuring its long-term storage. The topic of this paper is of particular relevance in the context of modern technological requirements that set the agricultural sector the task of reducing energy consumption, increasing efficiency and ensuring minimal environmental impact. The purpose of the article is to comprehensively study the key aspects of heat treatment of agricultural materials, to analyze in depth the existing problems that arise in the process of grain drying, and to determine the basic requirements for the design of modern grain dryers that provide optimal conditions for maintaining product quality.

A number of problems that arise during the grain drying process are discussed in detail. In particular, such components as uneven drying, high energy costs, and possible deterioration of grain quality due to improper regulation of temperature and moisture conditions are analyzed. The author emphasizes the importance of compliance of modern grain drying plants with the requirements of energy efficiency, environmental friendliness and innovative technologies. It is emphasized that in order to achieve the most effective results, it is necessary not only to properly adjust the temperature conditions, but also to improve the design of drying plants, taking into account the latest developments in the field of materials science and processing technologies.

Various technological approaches aimed at improving the efficiency of heat treatment of agricultural materials are also considered. This includes both the improvement of existing technologies and the development of new methods that reduce energy costs, improve drying uniformity and maintain high product quality. The article highlights the prospects for the development of modern grain drying systems based on the principles of innovation and adaptation to changing climatic conditions.

Keywords: agricultural production, heat treatment, agricultural materials, grain drying, grain dryers, grain moisture.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-9>

УДК 519.254

В. Т. Надикто, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1770-8297

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПОСТІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОЛІЇ НА ВЕЛИЧИНУ НЕПРОДУКТИВНОЇ ПЛОЩІ ПОЛЯ

Анотація. Наслідком і невід'ємним елементом технологій вирощування сільськогосподарських культур із застосуванням постійної технологічної колії є непродуктивна площа поля. Її величина формується площею доріжок, попередньо прокладених із заданим кроком для здійснення переміщення по них ходових систем машинно-тракторних агрегатів на основі колісних енергетичних засобів. Об'єктом теоретичного дослідження виступає аналітична залежність величини непродуктивної площі поля від його довжини і ширини, а також від кроку постійної технологічної колії та ширини її слідів. Установлено, що за збільшення значення кроку постійної технологічної колії (параметр H) непродуктивна площа поля прогресивно зменшується. Найвища інтенсивність цього процесу має місце за зростання параметра H до 13...15 м. На підставі такої інформації аграрні виробники можуть визначатися із вибором робочої ширини захвату (а отже, і кроку постійної технологічної колії) використовуваних машинно-тракторних агрегатів. Зміна довжини й ширини поля має незначний вплив на величину його непродуктивної площі при вирощуванні сільськогосподарських культур із застосуванням постійної технологічної колії.

Ключові слова: довжина поля, ширина поля, ширина сліду колії, ширина шини колеса, відносна площа поля.

Постановка проблеми. Одним із шляхів збереження родючості ґрунтів нашої країни є розроблення таких систем землеробства, які базуються на принципово нових технологіях вирощування сільськогосподарських культур із використанням економічно ефективних і екологічно безпечних технічних та агрохімічних засобів. Нині практично у всьому світі найбільш актуальною є проблема падіння родючості ґрунтів через їх переуцільнення ходовими системами важких тракторів і с.-г. машин. За використання традиційних механізованих технологій у процесах підготовки ґрунту, сівби, догляду за рослинами і збирання врожаю машини виходять на поле більше десятка разів на рік [1]. Нерідко сумарна площа слідів рушіїв машин перевищує площу польової ділянки в 1,1...2 рази [2]. Близько 10...15 % площі поля піддається впливу від 6 до 20 разів, 65...80 % – 1...6 разів, і тільки на 10...15 % вона не потерпає від додаткового уцільнювального впливу [3].

Аналіз останніх досліджень. Спроби розв'язати розглядувану проблему шляхом застосування шин низького тиску, спарених і навіть потроєних коліс забезпечують лише частковий ефект. Не дає позитивного результату і застосування комбінованих машинно-тракторних агрегатів (МТА), оскільки переважна частка збитків від переуцільнення припадає на найперший контакт ходової системи машини з ґрунтом. З огляду на це скорочення числа проходів МТА по полю не вельми ефективно з позиції запобігання істотним змінам структурного складу ґрунту.

Застосування гусеничного рушія замість колісного хоча і знижує негативну дію на ґрунт, проте є далеко не радикальним засобом вирішення цієї проблеми. Свого часу науковці Південного філіалу ІМЕСГ НААН України провели трирічні досліді з виявлення впливу різного типу рушіїв енергетичних засобів на врожайність ярого ячменю [4]. Результати досліджень

показали, що гусеничний трактор як за ущільненням, так і за врожайністю по сліду гусениці поступається колісному трактору тягового класу 3 із подвоєними шинами.

Узагальнення відомих результатів випробувань надає підстави стверджувати, що зменшити ущільнення ґрунту за одночасного збільшення тягових показників тракторів і зменшення пов'язаних із цим витрат на самопересування МТА по полю можна лише за упорядкованого (тобто маршрутизованого) способу їх руху. Такими технічними рішеннями можуть бути: 1) рух агрегатів по заздалегідь прокладених (сформованих) коліях-доріжках; 2) переміщення машин по рейковому шляху (рух твердого колеса по твердій основі). За інших техніко-технологічних рішень загалом негативна дія ходових систем машинно-тракторних агрегатів на ґрунт принаймні не знижується.

Причина такого наслідку полягає у наявності принципового протиріччя в системі «рушій – ґрунт». Суть його полягає в тому, що для досягнення енергетичним засобом високих тягово-зчіпних властивостей рушій останнього повинні контактувати із сухим і ущільненим ґрунтом, а для нормального росту культурних рослин потрібне оптимально вологе й пухке середовище.

Практично такі вимоги можна задовольнити лише тоді, коли чітко розмежувати на полі зони руху енергетичних засобів і зони росту рослин. Процес формування зон руху енергетичних засобів може бути або окремою операцією, або об'єднуватися з найпершою із тих, які проводяться весною (боронуванням, наприклад). Кінцевим результатом вказаного процесу повинні бути прокладені із заданим кроком, а також поглиблені та вирівняні в поздовжньо-вертикальному напрямку постійні технологічні колії (ПТК) [4].

За кордоном таке технологічне рішення відоме під назвою CTF – controlled traffic farming [5, 6]. Одним із стримувальних факторів широкого застосування ПТК (CTF) є той факт, що їх упровадження пов'язане з появою непродуктивної площі поля. До такої належить та її частина, яка припадає на сліди технологічної колії. Останні не засіваються с.-г. культурою, оскільки вони призначенні суто для переміщення ходових систем енергетичних засобів.

Методика розрахунку непродуктивної площі поля не складна, а тому не створює будь-яких труднощів як для науковців, так і для виробників [6]. Нез'ясованими залишаються залежності значень цього показника від параметрів поля (ширина, довжина) і ПТК (крок, ширина сліду).

Мета дослідження полягає в установленні закономірностей зміни величини непродуктивної площі поля від його ширини й довжини із застосуванням ПТК з установленими значеннями її кроку та ширини слідів.

Основна частина. В Україні технологічні основи вирощування сільськогосподарських культур з використанням постійної технологічної колії розроблено ННЦ «ІМЕСГ» у співпраці з Таврійським ДАТУ. Згідно зі здійсненими їх співробітниками напрацюваннями прокладання слідів ПТК може бути окремою технологічною операцією. Енергетичною базою агрегату для її здійснення є вітчизняний орно-просапний трактор сімейства ХТЗ-160, який налаштований на реверсивний режим руху й агрегується із спеціальним знаряддям для прокладання слідів ПТК (рис. 1).

Після проходження такого МТА оброблюване поле ділиться на продуктивну і непродуктивну зони. Останню репрезентують доріжки шириною b (тобто сліди ПТК, рис. 2), по яких у подальшому переміщуються всі агрегати, використовувані в технології вирощування тієї чи іншої сільськогосподарської культури. Сліди ПТК при цьому прокладаються із заданим кроком H , який формують маркери фронтального ґрунтообробного знаряддя.

У поздовжньо-вертикальному й горизонтальному напрямках ущільнені доріжки постійної колії мають досить вирівняний профіль [7, 8]. А це дуже важливо для організації руху як звичайних машинно-тракторних агрегатів, так і для тих, що використовують автоматичний режим керування їх переміщенням [9, 10].



Рис. 1. Агрегат для прокладання слідів ПТК



Рис. 2. Сліди ПТК на полі

Натомість, протягом часу вегетації останньої включно до її збирання ґрунт продуктивної площі поля не піддається ущільненню ходовою системою використовуваних МТА. У підсумку саме поділ ґрунтового середовища на дві зони (продуктивну і непродуктивну) дає змогу розв'язати згадане вище протиріччя системи «рушій – ґрунт».

Площа поля під слідами ПТК (у тому числі на поворотних смугах) є непродуктивною. Це обумовлено тим, що сформовані один раз доріжки не засіваються вирощуваною сільськогосподарською культурою, оскільки вони призначені суто для переміщення МТА. За даними [4] величину непродуктивної площі (S) можна визначити із такого виразу:

$$S = \frac{2b}{H} \cdot [A \cdot (L - H) + l_n \cdot (A - H)], \quad (1)$$

де b – ширина сліду ПТК, м;

H – крок ПТК, м;

A, L – ширина і довжина поля відповідно, м;

l_n – довжина повороту МТА за його руху на поворотній смузі, м.

У роботі [4] підкреслюється, що мінімальне значення кроку ПТК має бути більшим за позначку 5,6 м. З урахуванням цього і прийняттям того факту, що в переважній більшості випадків значення параметра H дорівнює робочій ширині захвату МТА, останні на поворотній смузі здійснюватимуть поворот по півколу. За таких обставин справедливою є така залежність:

$$l_n = \pi \cdot H. \quad (2)$$

Для подальшого аналізу розглядатимемо не абсолютне значення непродуктивної площі поля (S), а відносне (S_o):

$$S_o = \frac{S}{L \cdot A}. \quad (3)$$

З урахуванням (2) і (3) із рівняння (1) остаточно знаходимо, що

$$S_o = \frac{2b}{L \cdot A \cdot H} \cdot [A \cdot (L - H) + A \cdot H \cdot (A - H)]. \quad (4)$$

Отримане рівняння (4) дає можливість оцінити вплив залежності величини непродуктивної площі поля як від його параметрів (довжина L і ширина A), так і параметрів ПТК (крок H і ширина слідів b). Аналіз отриманих результатів розрахунків засвідчує, що збільшення кроку ПТК з 6 до 24 м обумовлює прогресивне зменшення непродуктивної площі поля (рис. 3).

Водночас інтенсивність цього процесу не рівномірна. У принципі кожен із трьох отриманих функціональних залежностей $S_o = f(H)$ можна розділити на дві зони: зона АВ і зона ВС (рис. 3). У зоні АВ інтенсивність зменшення показника S_o зі збільшенням значення параметра H дещо вища, ніж у зоні ВС.

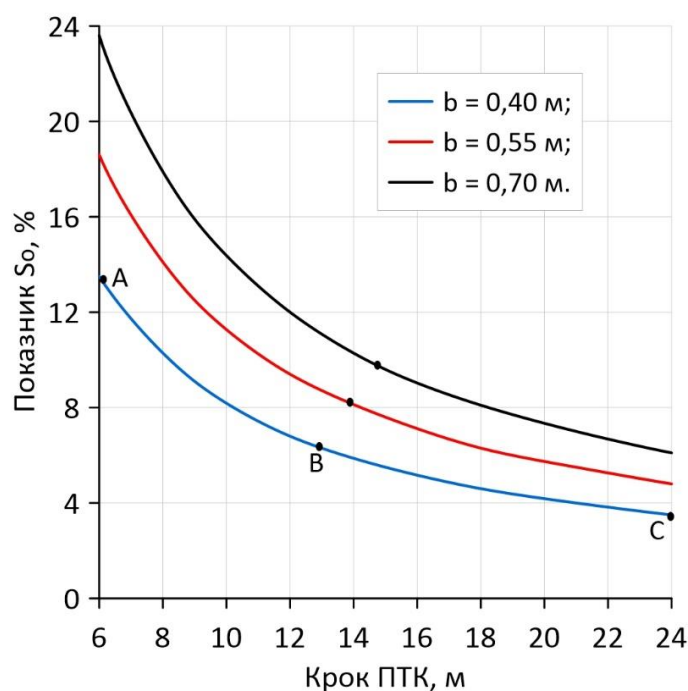


Рис. 3. Залежність непродуктивної площі поля від кроку ПТК за різних значень ширини її слідів (b)

Координати точки розмежування цих зон (т. В) для кожної із залежностей $S_0 = f(H)$ можна визначити як аналітично, так і графічно за методикою, викладеною у [11]. У цьому випадку маємо (див. рис. 3), що залежно від ширини слідів ПТК (параметр b) зменшення непродуктивної площі поля найбільш ефективно за збільшення значень кроку ПТК до 13...15 м. Наявність такої інформації може бути корисною для аграрних виробників під час визначення ними ширини захвату використовуваних МТА.

З аналізу даних на рис. 3 легко побачити, що в діапазоні всіх значень параметра H значення показника S_0 тим менше, чим менша ширина слідів ПТК (параметр b). Цей цілком логічний результат вказує на те, що в разі реалізації технології вирощування с.-г. культур із застосуванням ПТК перевагу слід віддавати МТА на основі колісних енергетичних засобів із відносно вузькими шинами. Збільшення їх питомого тиску на ґрунт при цьому не виступає обмежувальним фактором, оскільки ущільнення ґрунтового середовища здійснюється в зоні непродуктивної площі поля – слідах постійної технологічної колії.

За розрахунковими даними (табл. 1) збільшення довжини поля (параметр L) у принципі обумовлює зменшення непродуктивної площі поля. Водночас у кількісному вираженні це зменшення настільки незначне, що можна говорити про індиферентність значень показника S_0 до варіювання значень параметра L .

Таблиця 1
Залежність непродуктивної площі поля від його довжини за різних значень кроку ПТК

Крок ПТК (H), м	Довжина поля (L), м		
	700	1000	1300
	Непродуктивна площа (S_0), %		
6	13,60	13,50	13,46
9	9,10	9,06	9,02
12	6,90	6,83	6,80
15	5,60	5,50	5,46
18	4,70	4,61	4,57
21	4,00	3,97	3,94
24	3,60	3,50	3,46

Ще меншою мірою величина непродуктивної площі поля залежить від його ширини (табл. 2). Майже для всіх значень кроку ПТК від 6 до 24 м збільшення значення параметра A від 700 до 1000 м величина показника S_0 залишається практично незмінною.

Таблиця 2
Залежність непродуктивної площі поля від його ширини за різних значень кроку ПТК

Крок ПТК (H), м	Ширина поля (A), м		
	500	700	1000
	Непродуктивна площа (S_0), %		
6	13,50	13,50	13,50
9	9,06	9,06	9,06
12	6,83	6,83	6,84
15	5,50	5,50	5,50
18	4,61	4,61	4,61
21	3,97	3,97	3,98
24	3,49	3,50	3,50

Звідси випливає, що функціональні залежності $S_0 = f(L)$ і $S_0 = f(A)$ не виступають тими факторами, які повинні враховувати аграрні виробники в разі реалізації ними технологій вирощування сільськогосподарських культур із застосуванням постійної технологічної колії.

Висновки. Запропоновано аналітичну залежність, яка дає змогу визначити закономірність зміни непродуктивної площі поля від його довжини й ширини, а також кроку постійної технологічної колії та ширини її слідів. У перспективі наявність такої залежності дасть можливість здійснити техніко-економічну оцінку ефективності впровадження технології вирощування с.-г. культур із застосуванням постійної технологічної колії.

Установлено, що за збільшення значення кроку постійної технологічної колії (параметр Н) непродуктивна площа поля прогресивно зменшується. Найвища інтенсивність цього процесу має місце за зростання параметра Н до 13...15 м. На підставі такої інформації аграрні виробники можуть визначатися з вибором робочої ширини захвату використовуваних МТА.

Зміна довжини й ширини поля має незначний вплив на величину його непродуктивної площі для вирощування сільськогосподарських культур із застосуванням постійної технологічної колії.

Список використаних джерел

1. Antille D.L., Peets S., Galambosova J. et al. Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17. P. 653–682.
2. Li Y.X., Tullberg J.N., Freebairn D.M. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yield. *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 97. P. 282–292.
3. Hefner M., Labouriau R., Nørremark M., et al. Controlled traffic farming increased crop yield, root growth, and nitrogen supply at two organic vegetable farms. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 191. P. 117–130.
4. Надикто В. Т., Улексін В. О. Колійна та мостова системи землеробства. *ТОВ «Видавничий будинок «ММД»*. 2008. 270 с.
5. Tullberg J.N. Wheel traffic effects on tillage draught. *Journal of Agricultural and Engineering Research*. 2000. Vol. 75. P. 375–382.
6. Tullberg J. Tillage, traffic and sustainability-A challenge for ISTRO. *Soil and Tillage Research*. 2010. Vol. 111. P. 26–32.
7. Bulgakov V., Pscuzzi S., Nadykto V., Ivanovs S. & Adamchuk V. Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems. *Soil and Tillage Research*. 2021. Vol. 208. P. 104895.
8. Bulgakov V., Pascuzzi S., Nadykto V. et al. Effects of Tractor and Soil Parameters on the Depth of the Permanent Traffic Lanes in Controlled Traffic Farming Systems. *Applied Science*. 2022. Vol. 12. P. 6620.
9. Борис А. М., Савченко І. Ф., Рихлівський П. А. та ін. Розроблення системи автоматичного підрулювання навіски машинно-тракторного агрегату. *Крамаровські читання : збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Київ, 23–24 лютого 2023 р. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. С. 337–339.
10. Адамчук В. В., Борис А. М., Савченко І. Ф. та ін. Досвід застосування системи точного водіння агрегатів на вирощуванні столових коренеплодів. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб. наук. пр. ННЦ «ІМЕСГ»*. Глеваха, 2022. Вип. 15 (114). С. 131–137. doi.org/10.37204/0131-2189-2022-15-16.
11. Надикто В. Т. Основи наукових досліджень. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС. 2017. 268 с.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.



V. Nadykto
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF CONSTANT TECHNOLOGICAL TRACK PARAMETERS ON THE SIZE OF UNPRODUCTIVE FIELD AREA

Summary

The unproductive area of the field is a consequence and an integral element of the technologies for growing crops using a permanent technological track. Its value is formed by the area of tracks previously laid with a given step for the movement of running systems of machine-tractor units based on wheeled power tools along them. The object of theoretical research is the analytical dependence of the size of the unproductive area of the field from its length and width, as well as from the step of the permanent technological track and the width of its tracks. It has been established that with an increase in the value of the step of the constant technological track (parameter H), the unproductive area of the field progressively decreases. The highest intensity of this process occurs with an increase in the parameter H to 13...15 m. Based on such information, agricultural producers can determine the choice of the working width of the grip (and therefore the step of the constant technological track) of the used machine-tractor units. Changing the length and width of the field slightly affects the size of its unproductive area when growing agricultural crops using a constant technological track.

Keywords: field length, field width, track width, wheel tyre width, relative field area.+

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-10>

УДК 681.5

О. А. Новохат¹, канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-1198-6675

Д. І. Гончаренко¹, магістр¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

e-mail: novokhatoleh@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИМУЛЯЦІЇ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У НАПУСКНОМУ ПРИСТРОЇ ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Анотація. Наведено алгоритм створення комп'ютерної симуляції, що відтворює процес утворення розплаву полімеру в напускному пристрої екструдера 3D-принтера. Встановлено параметри налаштування в модулі Flow Simulation програмного забезпечення SOLIDWORKS, а також граничні та початкові умови процесу. Представлено результати моделювання у вигляді візуального розподілу температурних полів у напускному пристрої екструдера, а також у потоці полімеру. Описано графічну залежність зміни температури напускного пристрою під час його нагрівання та впродовж усталеного режиму. Наведено рекомендації до застосування розробленого алгоритму моделювання комп'ютерної симуляції.

Ключові слова: екструдери, моделювання, комп'ютерна симуляція, температурне поле, полімери, розплав.

Постановка проблеми. Широко розповсюдженим матеріалом є різноманітні термопластичні полімерні вироби. Одним зі способів їх виготовлення є екструзія шляхом продавлення матеріалу через екструзійну головку. Іншим перспективним способом утворення полімерних виробів є використання 3D-принтерів. Останнім часом такі пристрої все частіше почали застосовуватись для друку елементів різноманітних механізмів у різних галузях, зокрема й машинобудуванні, адже такий спосіб виробництва дозволяє автоматизувати процес, створювати вироби складної конфігурації та високої якості [1].

Однією з проблем використання технології 3D-друку є забезпечення рівномірності нагрівання полімеру для утворення розплаву та рівномірної його подачі під час друку – формування тривимірного об'єкта. Крім того, важливо ще на стадії проєктування елементів 3D-принтера, зокрема його напускного пристрою екструдера, визначати характер розподілу температурних полів під час нагрівання та характер потоку полімеру.

Аналіз останніх досліджень. Літературний огляд показав, що технологія 3D-друку набула широкого розповсюдження [2; 3]. На початку винайдення 3D-принтери мали досить вузьку сферу застосування. Проте ситуація швидко змінилась [4]. Наразі технологія тривимірного друку поширена від побутового використання до масштабного в різноманітних галузях, зокрема в машинобудуванні для виробництва деталей складної конфігурації й не тільки [5; 6; 7].

Встановлено, що якість виробів 3D-друку напряму залежить від теплообмінних процесів у напускному пристрої екструдера. Адже від рівномірності нагрівання полімеру та геометрії конструкції залежить якість напуску розплаву та мінімізація турбулентності його потоку. Лише за таких задовільних параметрів шари розплаву полімеру будуть лягати щільними шарами та формувати безпористий тривимірний виріб [8; 9].

Процес моделювання розпочинається зі створення ескізу поперечного перерізу сопла (рис. 1). Для цього частково задається його контур та основні геометричні параметри, зокрема діаметр вхідного отвору для полімеру, довжина зони нагрівання, конфігурація конічної частини та розміри вихідного каналу. Подальше формування внутрішньої порожнини здійснюється шляхом операцій обертання та вирізання. Висока точність дотримання розрахункових розмірів є критичною, оскільки вона безпосередньо впливає на достовірність і коректність наступних симуляційних розрахунків.



Після завершення формування геометричної моделі додаються конструктивні елементи, зокрема нанесення різьби для кріплення (рис. 2). Також важливим аспектом є вибір матеріалу деталей, оскільки його теплопровідність суттєво впливає на ефективність процесів нагріву та охолодження. Зазвичай для цих цілей використовуються латунь або мідь, зважаючи на їхні високі теплофізичні характеристики, в даному випадку матеріалом виготовлення є латунь.

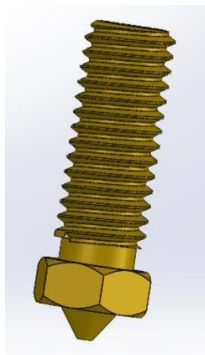


Рис. 2. Тривимірна модель головки екструдера

На завершальному етапі до тривимірної моделі додаються побудовані аналогічним чином інші елементи. Їх розташування здійснюється шляхом задання відповідних зв'язків та співвідношень між собою, зокрема контакту, співвісності та паралельності. Це забезпечує коректне позиціонування всіх деталей у конструкції і гарантує їх правильну взаємодію в процесі симуляційного моделювання. Готову тривимірну збірку напускного пристрою екструдера разом із тепловідвідною частиною показано на рис. 3.

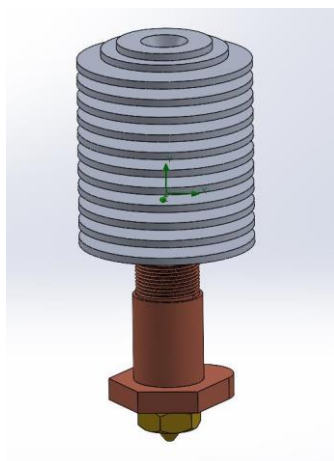


Рис. 3. Тривимірна модель напускного пристрою екструдера

Подальша робота базується на задання параметрів симуляції протікання розплаву полімеру через головку екструдера в модулі SOLIDWORKS Flow Simulation [15].

Для забезпечення точності проведення симуляційного моделювання на вхідному та вихідному отворах розміщуються умовні заглушки (рис. 4).

Подальші налаштування полягають у заданні розмірностей вимірювання фізичних величин (рис. 5) та типу аналізу (рис. 6).

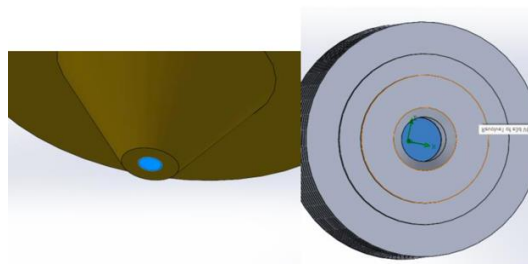


Рис. 4. Опломбування отворів

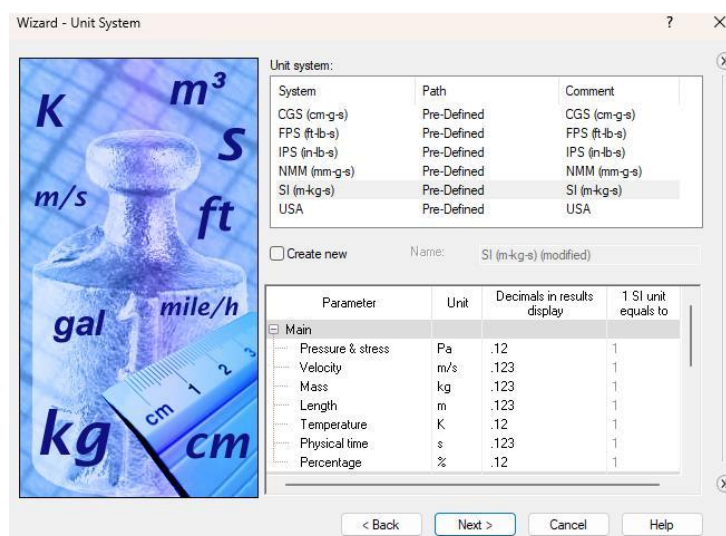


Рис. 5. Задання розмірностей фізичних величин

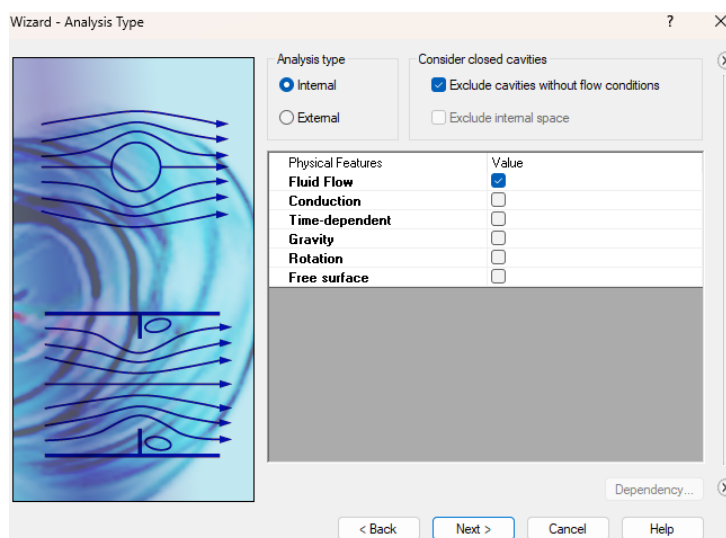


Рис. 6. Задання типу аналізу

За середовище, що протікає всередині головки екструдера, вибрано матеріал PETG. Його було додано до бібліотеки SOLIDWORKS із заданням необхідних теплофізичних характеристик, що відповідають властивостям реального полімерного розплаву.

Усередині каналу головки екструдера за деяких умов можливе виникнення турбулентного режиму розплаву полімеру. Тому для опису режиму потоку середовища всередині каналу задано як ламінарний, так і турбулентний режими (рис. 7).

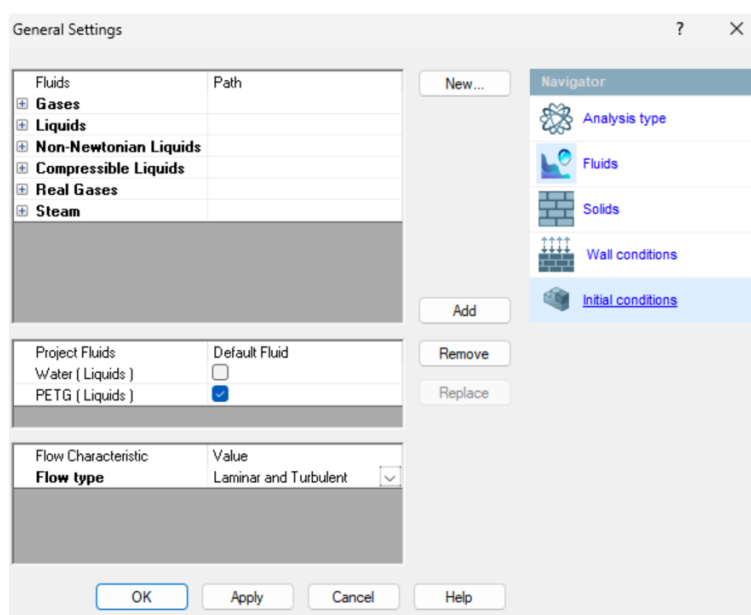


Рис. 7. Задання типу матеріалу та режиму потоку

Потік полімерного розплаву в симуляційному моделюванні спрямовується завдяки вказівці попередньо доданих заглушок як вхідного та вихідного отворів каналу.

Задання граничних умов базується на використанні відомих фізичних законів. Зокрема, тепловіддача від поверхні тривимірної моделі в навколишнє середовище описується законом Ньютона-Ріхмана. Також під час нагрівання металевого тіла з поверхні генерується випромінювання теплоти за законом Стефана-Больцмана. Теплопровідність середовища описується законом Фур'є.

Також задаються початкові умови протікання процесу в головці екструдера. Зокрема, вказуються початкова температура, тиск навколишнього середовища (атмосферний), витрата полімерного розплаву.

Під час визначення параметрів у різних точках тривимірної моделі застосовується автоматична генерація сітки (рис. 8). Для збільшення точності розрахунків збільшено щільність розміщення вузлів, особливо там, де відбуваються суттєві зміни параметрів. Це зменшує похибку вимірювання і надає можливість отримувати більш точні дані.

За допомогою постпроцесингових інструментів модуля Flow Simulation отримано візуалізацію розподілу температурних полів напускного пристрою екструдера (рис. 9).

Аналіз результатів комп'ютерної симуляції (рис. 9) показав таке:

1. Температура зони підводу полімеру (верхня частина напускного пристрою) має рівномірний спадний характер. Це свідчить про ефективність тепловідвідної конструкції;
2. Температура зони нагрівання полімеру (нижня частина напускного пристрою) однакова, що свідчить про рівномірність розігріву;
3. Максимальна температура напускного пристрою знаходиться в зоні нагрівання полімеру і становить 249,2 °C;
4. Мінімальна температура напускного пристрою знаходиться в зоні підводу полімеру і становить 48,25 °C;

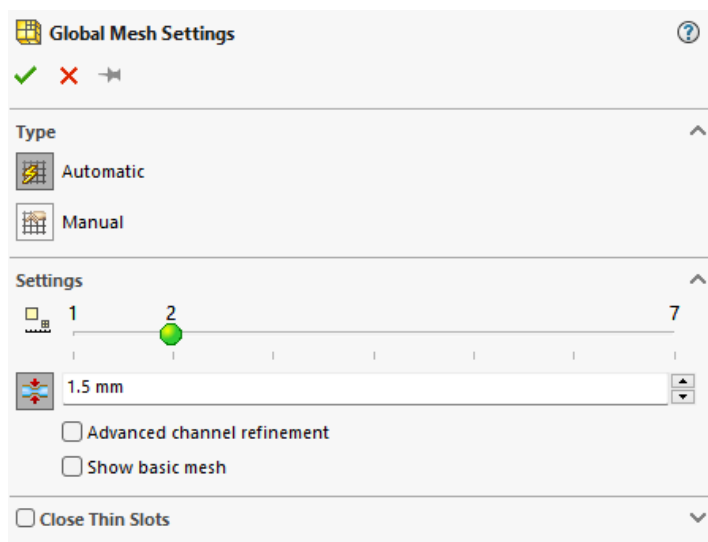


Рис. 8. Налаштування сітки

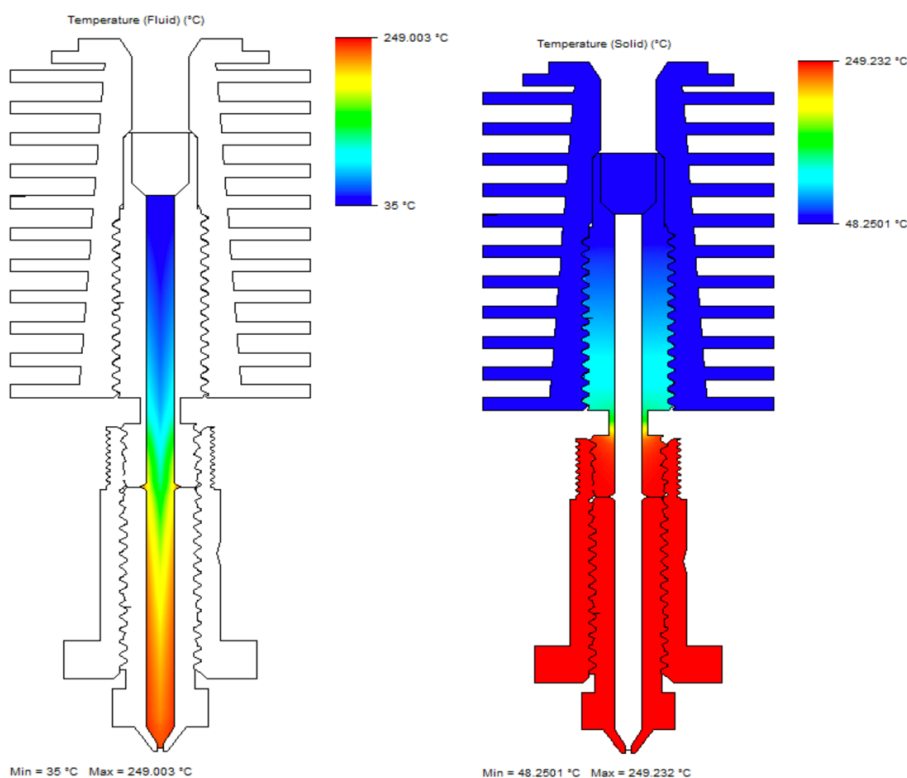


Рис. 9. Розподіл температурних полів у потоці полімеру (зліва) та напускному пристрої екструдера (справа)

5. Висока теплопровідність елементів конструкції дозволяє швидко підводити та відводити теплоту, сприяючи ефективності теплообмінних процесів;

6. Максимальна температура розплаву полімеру становить 249 °C, що майже рівне температурі головки екструдера. Це свідчить про високу ефективність теплообміну від внутрішньої поверхні каналу головки до розплаву;

7. Мінімальна температура розплаву полімеру становить 35 °С. Це значення менше за мінімальну температуру напускного пристрою з певної причини. Оскільки теплопровідність матеріалу пристрою висока, температурне поле від найбільш нагрітої частини ефективно розподіляється по всій його поверхні, в тому числі доходячи до найвіддаленішої точки. Полімер же рухається всередині каналу і потрапляє в напускний пристрій холодним, не встигаючи нагрітись до його температури, доки не потрапить до зони нагрівання;

8. Розподіл температур у поперечному перерізі потоку полімеру може різнитись через його рух. Так, шари полімеру, що безпосередньо контактують із більш нагрітою внутрішньою стінкою напускного пристрою, прогріваються швидше, ніж більш глибокі шари;

9. Характер розподілу температур у розплаві полімеру свідчить про відсутність вираженої турбулентності потоку та застійних зон. Це дає змогу рівномірно виходити розплав полімеру з головки екструдера.

Кінетику нагрівання головки екструдера та подальше підтримання значення її температури показано на рис. 10.

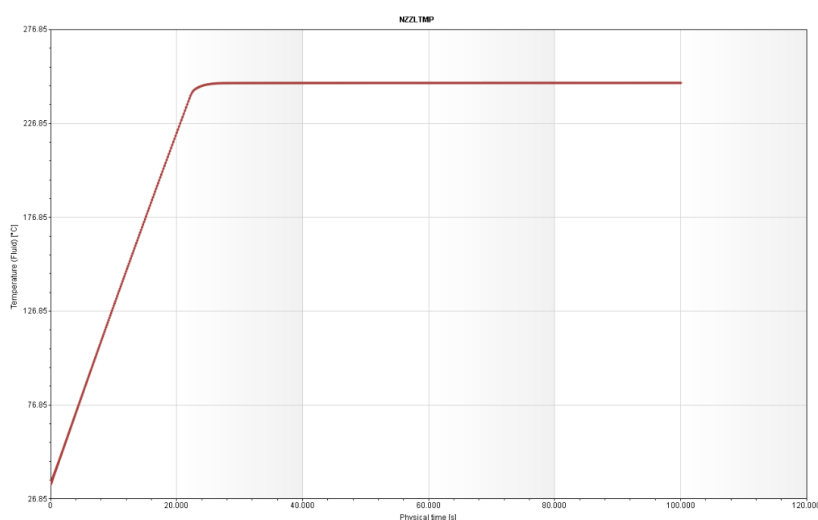


Рис. 10. Залежність температури головки екструдера від часу

Швидкість нагрівання має прямолінійний характер зростання і залежить від потужності нагрівного елемента.

Висновки. Наведений алгоритм симуляційного моделювання розподілу температурних полів у напускному пристрої екструдера дає змогу відтворити таку процедуру для подібних пристроїв.

Отримані дані щодо розподілу температурних полів допоможуть визначити температуру в кожній точці конструкції. За цими даними можна знайти шляхи вдосконалення конструкції з метою покращення теплообмінних процесів від нагрівного елемента до розплаву полімеру, а також конструкції охолодження зони підводу.

Симуляційна модель також дозволяє контролювати зміну температури в потоці полімеру та визначати режим руху кожній точці каналу. Завдяки цьому можна на стадії симуляції визначити наявність осередків застійних зон та турбулентності потоку полімеру, що може негативно позначитись на якості напуску розплаву.

*Список використаних джерел*

1. Chua C. K., Leong K. F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications: The 5th Edition of Rapid Prototyping: Principles and Applications. Singapore: World Scientific Publishing, 2017. 430 p. <https://doi.org/10.1142/10200>
2. Edgar J., Tint S. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd Edition. *Johnson Matthey Technology Review*. 2015. V. 59, № 3. P. 193–198. <https://doi.org/10.1595/205651315X688406>
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2014. 484 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
4. Lipson, H., Kurman, M. Fabricated: The New World of 3D Printing. –Indianapolis: John Wiley & Sons, 2013. 320 p.
5. Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Munich: Carl Hanser Verlag, 2011. 219 p. <https://doi.org/10.3139/9783446431621.fm>
6. Hopkinson N., Hague R. J. M., Dickens P. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. Chichester: Wiley, 2006. 310 p. <https://doi.org/10.1002/0470033991>
7. Gebhardt A., Höttner J.–S. Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing. Munich: Hanser Publishers, 2016. 311 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-56990-583-8>
8. Rouf S., Raina A., Haq M. I. U., Naveed N., Jeganmohan S., Kichloo A. F. 3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2022. V. 5. № 3. P. 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.02.001>
9. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. V. 143. P. 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
10. Yu A Antokhina, V M Balashov, E G Semenova, A G Varzhapetyan. Computer simulation of processes in technical systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1619. P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012069>
11. Veselý P. Nozzle Temperature Effect on 3D Printed Structure Properties. *ELEKTROTECHNOLÓGIA* 2019: Slovakia. 2019. P. 126–131.
12. Wang J., Chen H.-J., Gong Y.-J., Wang Q., Ren J. Optimization Design of Printing Nozzle for a Delta 3d Printer. 3rd Advances in Engineering Research (AER). 2017. V. 105. P. 820–825. <https://doi.org/10.2991/mme-16.2017.114>
13. SOLIDWORKS 3D CAD. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-3d-cad>
14. SOLIDWORKS Flow Simulation. URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
15. An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation. URL: https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_sim_studentwb_2011_eng.pdf

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025 р.

O. Novokhat, D. Honcharenko

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**MODELING OF COMPUTER SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD
DISTRIBUTION IN THE EXTRUDER FEEDING DEVICE**

Summary

The algorithm for creating a computer simulation that replicates the process of polymer melt formation in the extruder feeding device, particularly in a 3D printer, is presented. The configuration parameters in the Flow Simulation module of SOLIDWORKS software, as well as the boundary and initial conditions of the process, have been established. The simulation results are provided in the form of a visual representation of the temperature field distribution within the extruder feeding device and in the polymer flow. A graphical dependence illustrating temperature variations of the feeding device during heating and in the steady-state mode is described. Recommendations for the application of the developed computer simulation modeling algorithm are provided.

Keywords: extruder, modeling, computer simulation, temperature, temperature field, polymer, melt.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-11>

УДК 637.134.001.57

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

О. О. Червоткіна, асист.

ORCID: 0000-0002-6814-0566

О. О. Ковальов, канд. техн. наук, ст. викл.

ORCID: 0000-0002-4974-5201

В. Ф. Ялпачик, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-0349-2448

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: nadiia.palanychka@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИСПЕРГУВАННЯ МОЛОЧНОГО ЖИРУ В ГОМОГЕНІЗАТОРІ ПУЛЬСАЦІЙНОГО ТИПУ

Анотація. Ця робота присвячена дослідженню теми диспергування молочного жиру шляхом гомогенізації. Встановлено, що існуюче технологічне обладнання для гомогенізації має дуже високі показники енерговитрат на процес, що в умовах сьогодення є суттєвим недоліком. За підсумками дослідження встановлено, що найбільш перспективним обладнанням для досягнення високої якості готового продукту за низьких енерговитрат є пульсаційний гомогенізатор. Було здійснено аналіз ефективності диспергування молочного жиру в пульсаційному гомогенізаторі молока, що дало можливість виявити чинники та сили, які впливають на якість гомогенізації, а отже, регулювати цей технологічний процес у виробничих умовах. Експериментальні дослідження показали, що середній діаметр жирових кульок молока після гомогенізації в пульсаційному гомогенізаторі становить 0,8 мкм, що цілком відповідає вимогам сьогодення.

Ключові слова: диспергування, якість, пульсаційний гомогенізатор, молочний жир, ступінь гомогенізації, ефективність, енергоємність.

Постановка проблеми. Процес диспергування являє собою тонке подрібнення або рівномірного розподілення однієї речовини (дисперсної фази) в дисперсійному середовищі, яке її оточує, що, зі свого боку, дає змогу отримати однорідну дисперсійну систему (емульсію або суспензію). Широкого використання цей процес набув у хімічній, фармацевтичній, харчовій, косметологічній промисловості, а також у сільському господарстві [1, 2]. У харчовій промисловості процес диспергування використовують у виробництві соусів, майонезу, маргарину, шоколадних напоїв, фруктових пюре тощо. Однак найбільш широко цей процес застосовують у молочній промисловості для переробки молока й виробництва молочних продуктів, оскільки завдяки диспергуванню готовий продукт стає більш стабільним, однорідним, покращуються смакові якості продукту та засвоюваність молочного жиру. Для здійснення цього процесу на підприємствах молочної промисловості використовують технологічне обладнання – гомогенізатори. На сьогодні підприємствами широко використовуються апарати клапанного типу. Такі гомогенізатори дають можливість отримати високу якість готового продукту та досить прості у використанні. Проте вони мають інший, зворотний, бік – велику вартість обладнання, великі габаритні розміри і саме головне – високу енергоємність процесу, що в умовах сьогодення є суттєвим недоліком [3]. Саме це спонукає до дослідження процесу диспергування молочного жиру шляхом гомогенізації з метою знаходження нових, більш перспективних типів обладнання, яке дасть можливість отримати високу якість кінцевого продукту та матиме нижчі витрати енергії на процес у порівнянні з існуючими клапанними пристроями.

Аналіз останніх досліджень. Досліджували процес гомогенізації молока з метою підвищення якості кінцевого продукту такі вчені, як: Drankhar P., Innings F., Glawdel T., Liu C.,

Håkansson, A., Promtov M.A., Барановський Н. В., Нужин Є. В., Фіалкова Є. О., Орешина М. М. [2, 4, 5, 6, 7]. Аналізуючи їх роботи, можна зробити висновок, що на цей час не існує чітко визначеної єдиної теорії диспергування шляхом гомогенізації [8, 9, 10]. Оскільки молочний жир має дуже мікроскопічний розмір і достатньо велику швидкість, не можна провести якісне спостереження за цим процесом [11,12]. Однак проведений аналіз дав змогу виділити досить перспективний тип обладнання, який під час дослідження показав гарні результати щодо якості готового продукту та використання енергії на процес, – це пульсаційний гомогенізатор. Було встановлено, що цей тип технологічного обладнання дозволяє отримати середній діаметр жирових кульок після гомогенізації менше за 1 мкм, як у клапанного гомогенізатора [13, 14], однак при цьому енерговитрати на процес становлять 0,82 Дж/кг [15], що значно менше, ніж у клапанного типу обладнання. Тому доцільним було продовжити дослідження пульсаційного гомогенізатора з метою подальшого визначення ефективності диспергування молочного жиру.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Завданням цієї статті є вивчення механізму диспергування часток жиру молочного в обладнанні пульсаційного типу з метою встановлення ефективності використання цього типу гомогенізатора в молочній промисловості для переробки молока та виробництва молочних продуктів.

Основна частина. Проведені попередні теоретичні дослідження показали, що пульсаційний гомогенізатор повинен містити резервуари для транспортування молока безпосередньо в гомогенізатор і зберігання гомогенізованого продукту, нагнітальний насос для переміщення сировини, вентиль і робочу циліндричну прозору камеру пульсаційного гомогенізатора, у якій розташований ударний механізм із наскрізними отворами. Поршень має здійснювати зворотно-поступальні рухи за допомогою приводу, що має електродвигун із регульованою частотою обертання вала та кривошипний механізм із можливістю зміни радіуса кривошипа. З огляду на отримані дані було зроблено схему пульсаційного гомогенізатора, зображеного на рис. 1. Устаткування має резервуари для подання молочної сировини до гомогенізатора (1) та зберігання гомогенізованого продукту (7), насос для транспортування молока (2), клапан (3) та циліндричну камеру з прозорою стінкою для гомогенізації (4), що містить робочий пристрій ударного типу (5) із наскрізними щілинами. Ударний пристрій переміщається коливально за допомогою привода (8), що має електродвигун (10) з електронним регулятором швидкості обертання вала і кривошипний механізм (9), який дає змогу змінювати радіус кривошипа.

З метою реалізації експериментальних досліджень у сфері пульсаційної гомогенізації на базі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв ім. проф. Ф. Ю. Ялпачика Таврійського державного агротехнологічного університету ім. Дмитра Моторного було спроектовано та виготовлено експериментальну установку, конструктивне виконання якої наведено на рис. 2 [16].

Робота пристрою відбувається таким чином: у резервуар (1) завантажували попередньо підігріте до потрібної температури незбиране молоко. За допомогою насоса (2) воно надходило до гомогенізаційної камери (4) через регульовальний вентиль (3), який контролює подачу молока. Під впливом зворотно-поступального руху поршня (5) відбувалося подрібнення жирових частинок у молоці. Після цього гомогенізований продукт спрямовувався до ємності (7).

Основними змінними параметрами пристрою є можливість регулювання інтенсивності руху ударного поршня (його частоти й амплітуди коливань). Ці параметри впливають на гідродинамічні показники в зоні диспергування (швидкість та тиск емульсії) і визначають якість гомогенізації.

Пульсаційний гомогенізатор дає змогу створити умови, у яких виникає значний знакозмінний (пульсуючий) градієнт швидкості проходження потоку продукту, а отже, можна отримати високу якість диспергування емульсії [16]. Зниження енерговитрат у такому типі гомогенізатора реалізується завдяки уникненню застійних зон та об'ємів емульсії з недостатньою дисипацією енергії [11, 17].

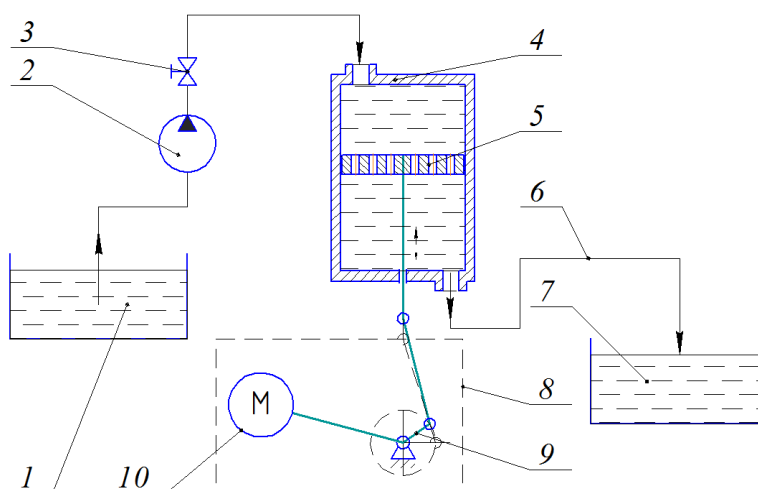


Рис. 1. Схема лабораторної установки, призначеної для дослідження роботи пульсаційного гомогенізатора: 1, 7 – резервуари для подавання та збирання молока відповідно; 2 – насосний агрегат; 3 – запірний вентиль; 4 – камера, у якій відбувається процес гомогенізації; 5 – поршневий механізм; 6 – система трубопроводів; 8 – привід, що забезпечує рух основного робочого елемента; 9 – кривошипний вузол із механізмом регулювання амплітуди; 10 – електродвигун з електричним регулятором частоти обертання вала

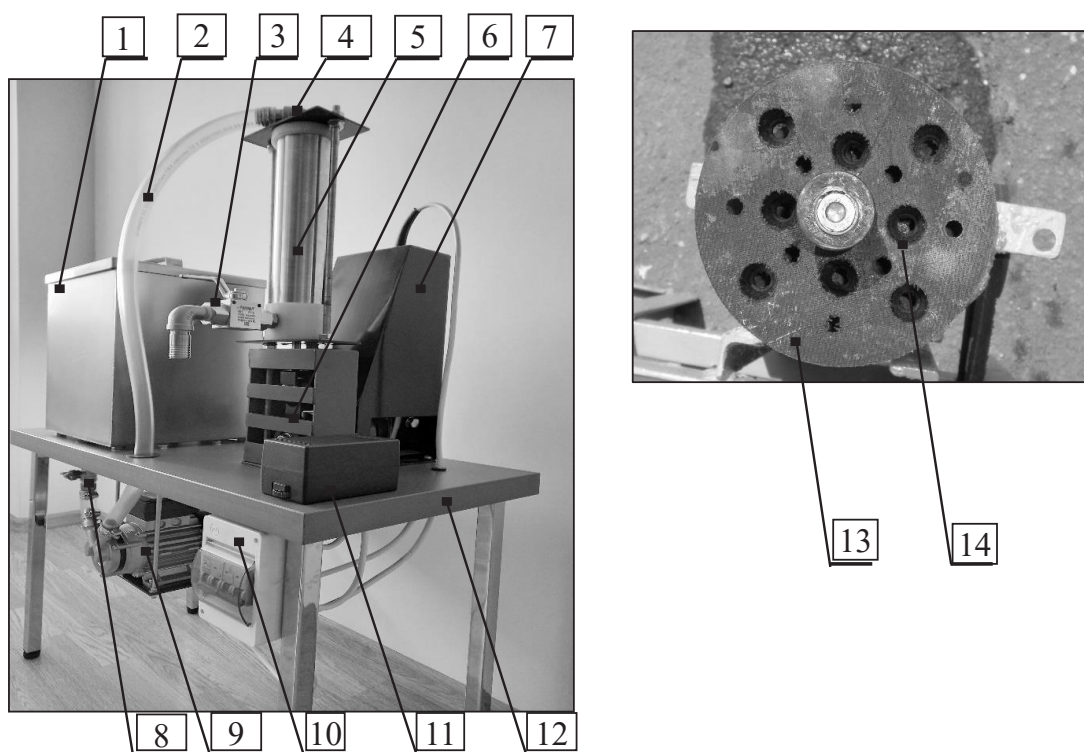


Рис. 2. Схема лабораторної установки для дослідження пульсаційного гомогенізатора: 1, 7 – резервуари, призначені для подавання та збору молока відповідно; 2 – насосний агрегат; 3 – запірний вентиль; 4 – камера, у якій відбувається процес гомогенізації; 5 – поршневий елемент; 6 – система трубопроводів; 8 – механізм, що забезпечує рух робочої частини; 9 – кривошипний вузол з можливістю регулювання амплітуди коливань; 10 – електричний двигун, обладнаний регулятором частоти обертання вала

Дослідження ефективності роботи пульсаційного гомогенізатора проводилось на прикладі молока (жирові кульки – дисперсна фаза емульсії, а молочна плазма – дисперсійна), але може бути використано для будь-яких інших дрібнодисперсних емульсій.

Для дослідження та розрахунку швидкості проходження потоку молока в пульсаційному гомогенізаторі використовували комп'ютерне моделювання з програмним забезпеченням для комп'ютерного аналізу гідродинамічних процесів Ansys Workbench [18] та його модуля CFX, який дає можливість проводити ефективні та надійні розрахунки з динаміки рідини та газу.

Під час розрахунку були визначені профілі розподілу тиску, швидкостей і ліній струму вздовж робочої камери з урахуванням змін параметрів, що впливають на процес пульсаційної гомогенізації (рис. 3).

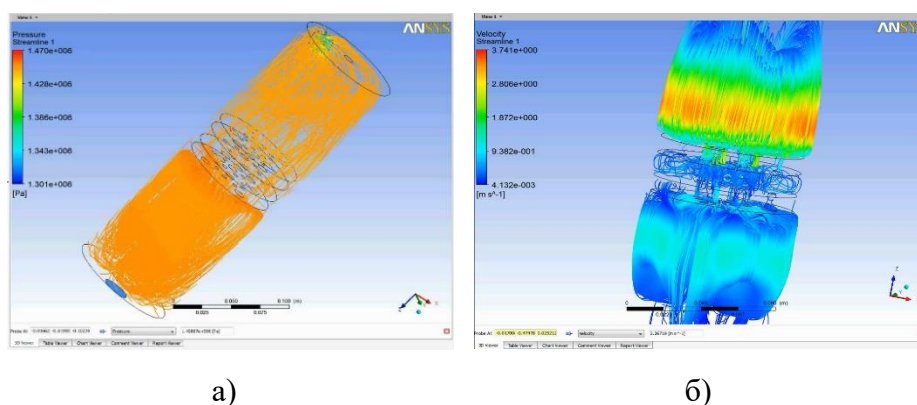


Рис. 3. Об'ємні 3-Д графіки, побудовані в Ansys Workbench:
а) розподіл тиску; б) розподіл швидкостей у внутрішньому об'ємі камери

Аналітичні обчислення засвідчили, що для досягнення високого рівня гомогенізації ($N_m = 4...5$) у пульсаційному гомогенізаторі потрібно забезпечити певні параметри роботи: амплітуда руху поршня-ударника має становити 10–12 мм, частота коливань – у межах 55–65 Гц, а витрата молока повинна бути на рівні 1800–2000 кг/год.

Для перевірки отриманих аналітичних даних було проведено експериментальні дослідження процесу пульсаційної гомогенізації для визначення ступеня диспергування молочного жиру. Отримані дані порівнювали з даними гомогенізації в клапанному гомогенізаторі [17].

Для аналізу отриманих результатів експерименту було застосовано номограмний підхід, що дає можливість одночасно оцінити вплив усіх незалежних змінних факторів на параметри оптимізації, які входять до рівняння регресії. Це дає змогу зрозуміти, як саме ці фактори впливають на фактичний хід технологічного процесу [18, 19].

З використанням програмного забезпечення Mathcad було створено номограму (рис. 4), яка слугувала інструментом для аналізу та підбору оптимальних значень факторів для забезпечення ступеня диспергування молочного жиру в пульсаційному гомогенізаторі на рівні не менше ніж 4.

На основі проведених досліджень визначено, що для ефективної роботи пульсаційного гомогенізатора з продуктивністю подачі молока 1800–2000 кг/год та досягнення ступеня гомогенізації на рівні 5 потрібно дотримуватися таких технологічних умов: амплітуда коливань повинна бути в межах 10–13 мм, а частота – від 53 до 62 Гц.

Різниця між теоретичними й експериментальними результатами в межах усього діапазону параметрів не перевищує 11 %, що свідчить про достовірність і відповідність отриманих даних.

Експериментальним шляхом також було визначено питому енергоємність процесу гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі, результати якого приведено на номограмі, рис. 5.

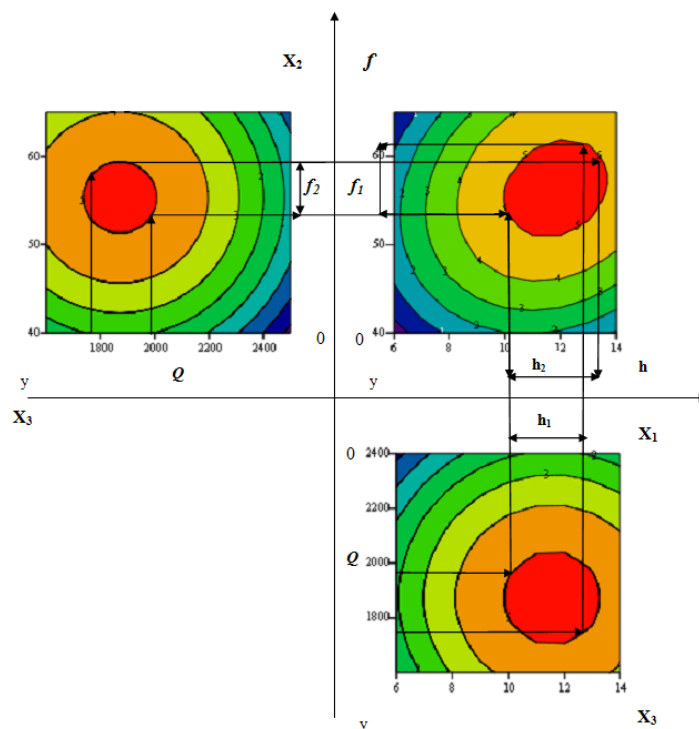


Рис. 4. Номограма для оцінки та встановлення оптимальних режимів факторів, що забезпечують ступінь гомогенізації молока в пульсаційному гомогенізаторі не менше ніж 4

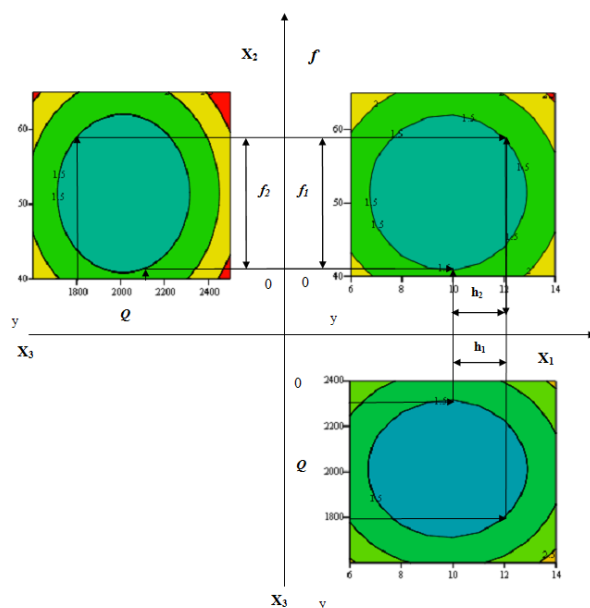


Рис. 5. Графічне представлення (номограма) для визначення оптимальних значень параметрів, що сприяють зниженню енерговитрат під час пульсаційної гомогенізації

На основі проведеного аналізу встановлено, що під час роботи пульсаційного гомогенізатора з витратою молока в межах 1800–2250 кг/год, амплітудою руху поршня-ударника 10–12 мм та частотою коливань 43–59 Гц енергоспоживання в процесі гомогенізації становить 1,5 кВт, а питомі енерговитрати – 0,83 Дж/кг.

Після поєднання оптимальних значень із двох номограм зроблено висновок, що для досягнення найвищого ступеня гомогенізації ($H_m = 5$) за мінімальних питомих енерговитрат ($E_{\text{пит}} = 0,83$ Дж/кг), слід забезпечити такі умови: амплітуда руху поршня-ударника – від 10 до 12 мм, частота – у діапазоні 55–59 Гц, а витрата молока – у межах 1800–2000 кг/год.

Розбіжність між теоретичними розрахунками та результатами експериментальних досліджень не перевищує 9 % по всьому діапазону зміни параметрів, що свідчить про достовірність і точність отриманих даних.

На рис. 6 представлено диференційні розподілення діаметрів часток жиру, отриманих унаслідок диспергування в пульсаційному гомогенізаторі та відповідно клапанному гомогенізаторі.

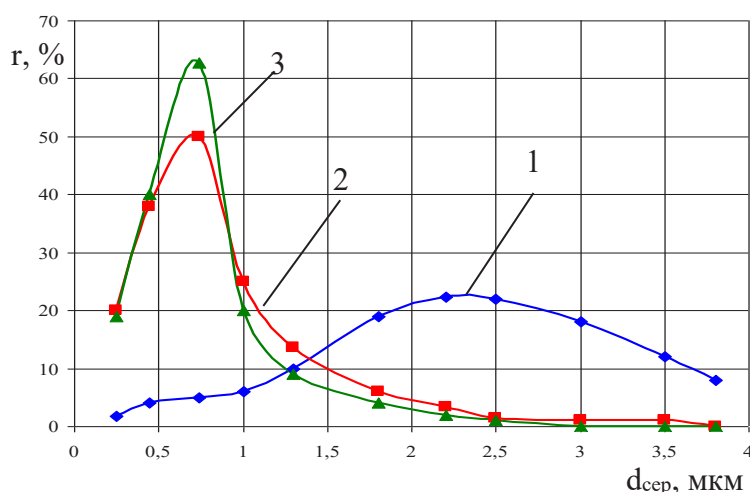


Рис. 6. Диференціальний розподіл діаметрів часток жиру за розмірами: 1 – необроблене молоко; 2 – дисперговане в клапанному гомогенізаторі, з тиском 16 МПа та температурою 65 °С; 3 – дисперговане в пульсаційному гомогенізаторі, з тиском 1,5 МПа та температурою 65 °С

Результати показують, що діаметр часток жиру молочної емульсії менше за використання пульсаційної гомогенізації ($d_{av} = 0,98$ мкм проти 0,80 мкм.). Тобто якість гомогенізації у дослідному гомогенізаторі стала вище на 19 % порівняно з результатами досліджень, зазначених у роботі [19]. При цьому рівномірність фракційного складу після обробки в дослідному гомогенізаторі не менше, ніж в еталонного – клапанного гомогенізатора.

Висновки. Процес диспергування шляхом гомогенізації на цей час є доволі поширеним, його використовують у багатьох галузях промисловості, зокрема в харчовій і переробній. У технологічній лінії переробки молока та виробництва молочної продукції процес гомогенізації є одним із найважливіших, оскільки диспергування впливає на смакові й сенсорні характеристики готової продукції. Поширення на підприємствах харчової промисловості набули клапанні типи гомогенізаторів, однак в умовах сьогодення їх використання є неефективним та вартісним, оскільки такі гомогенізатори використовують дуже багато електроенергії. Проведені аналітичні дослідження дали можливість встановити перспективний тип гомогенізатора – пульсаційний, завдяки якому можна суттєво знизити витрати електроенергії на процес гомогенізації, при цьому не втрачаючи якість готового продукту. Було проведено дослідження, яке допомогло встановити й розрахувати основні показники процесу диспергування в пульсаційному гомогенізаторі. Результати експериментальних досліджень засвідчили, що для досягнення максимальної гомогенізації на рівні $H_m = 5$ за мінімальних питомих затрат електроенергії $E_{\text{пит}} = 0,83$ Дж/кг потрібно дотримуватися таких параметрів: амплітуда руху ударного

поршня має становити 10–12 мм, частота коливань – у межах 55–59 Гц, а подача молока через пульсаційний гомогенізатор – 1800–2000 кг/год. Це, зі свого боку, свідчить про ефективність використання пульсаційного гомогенізатора в лініях переробки молочної продукції.

Також було встановлено, що середній діаметр жирових кульок молока становить 0,80 мкм. При цьому рівномірність фракційного складу після обробки в дослідному гомогенізаторі не менше, ніж в еталонного – клапанного гомогенізатора.

Отже, проведені дослідження доводять, що дослідний пульсаційний гомогенізатор за параметром якості гомогенізації не поступається еталонному – клапанному гомогенізатору. Таким чином, цей гомогенізатор є перспективним для заміни клапанних гомогенізаторів і потребує подальших поглиблених досліджень з метою визначення енерговитрат та впровадження його у виробництво.

Список використаних джерел

1. Huppertz T. Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Second Edition). 2011. P. 761–764.
2. Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4. Iss. 5. 8 p. URL: [www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20\(part-4\)/A04540108.pdf](http://www.iosrjen.org/Papers/vol4_issue5%20(part-4)/A04540108.pdf).
3. Samoichuk K., Kovalyov A., Fuchadzh N., Bezalychna O., Shevtsova A. Energy Costs Reduction for Dispersion Using a Jet-Slot Type Milk Homogenizer. *Energies*. 2023. Vol. 16 (5). P. 2211. <https://doi.org/10.3390/en16052211>.
4. Wilbey R.A. Homogenization of Milk: Principles and Mechanism of Homogenization, Effects and Assessment of Efficiency: Valve Homogenizers. *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Second Edition). 2011. P. 750–754.
5. Liu C., Li M., Liang C., Wang W. Measurement and analysis of bimodal drop size distribution in a rotor-stator homogenizer. *Chemical Engineering Science*. 2013. Vol. 102. P. 622–631.
6. Ahmad T. Homogenization-Centrifugation. In: *Dairy Plant Engineering and Management*. 10th chapter. 8th Edn. Kitab Mahal, Allahabad, India, 2012. P. 237–247.
7. Håkansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trägårdh C. & Bergenståhl B. 2011. Turbulent Velocity Fields Measurements of Two Phase Flow in a High Pressure Homogenizer Scale Model. *Submitted to journal*. 2016. P. 320–342.
8. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer. *Chemical Engineering & Technology*. August, 2015. Volume 28. Issue 8. Pages 882–891. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ceat.200500080>.
9. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Івженко А. О., Левченко Л. В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : зб. наук. праць*. Мелітополь : ТДАТУ, 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.
10. Peng J., Dong W., Li L., Xu J., Jin D., Xia X., Liu Y. Effect of high-pressure homogenization preparation on mean globule size and large-diameter tail of oil-in-water injectable emulsions. *Journal of Food and Drug Analysis*. 2015. Vol. 23 (4). P. 828–835. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.04.004>.
11. Postelmans A., Aernouts B., Jordens J., Van Gerven T., Saeys W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 60. P. 102311. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102311>.
12. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing. *Technical Acoustics*. 2011. Vol. 9. P. 156–166.
13. Brivibaa K., Gräfc V., Walzc E., Guamisd B., P. Butz P. Ultra high pressure homogenization of almond milk: Physico-chemical and physiological effects. *Food Chemistry*. 2016. Vol. 192. P. 82–89.
14. Rayner Marilyn, Dejmek Petr. *Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry*: CRCpress Taylor Ftancis group London, 2015. 322 p.
15. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій : автореф. дис. на здобуття ступеня д-ра техн. наук: 05.18.12 Харківський держ. ун-т харч. та торгівлі. Харків, 2018. 44 с.



16. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Левченко Л. В. Теоретичні дослідження пульсаційної гомогенізації молока. *Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : матеріали другої міжнар. наук.– практ. конф.*, 5–7 вер. 2017 р. Харків : ХДУХТ, 2017. С. 42–43.

17. Deynichenko G., Samoichuk K., Yudina T., Levchenko L., Palianychka N., Verkholtantseva V., Dmytrevskyi D., Chervonyi V. Parameter optimization of milk pulsation homogenizer. *Journal of Hygienic Engineering and Design*, 2018. Vol. 24. P. 63–67.

18. Гвоздев О. В., Самойчук К. О., Паляничка Н. О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench. *Обладнання та технології харчових виробництв : зб. наук. праць*. Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк : ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 294–299.

19. Паляничка Н. О. Використання енергоефективного обладнання для диспергування емульсій. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. Вип. 20, т. 1. С. 26–34. DOI: 10.31388/2078-0877-20-1-26-34.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2025 р.

**N. Palianychka, O. Chervotkina, A. Kovalov, V. Yalpachyk
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF MILK FAT DISPERSION IN A PULSATION-TYPE HOMOGENIZER

Summary

This work is devoted to the study of the topic of milk fat dispersion by homogenization. The process of dispersion by homogenization is currently quite widespread, it is widely used in many industries, including food and processing. In the technological line of milk processing and dairy product production, the homogenization process is one of the most important, since dispersion affects the taste and sensory characteristics of the finished product. Valve-type homogenizers have become widespread in food industry enterprises, however, in today's conditions, their use is very inefficient and costly, since such homogenizers use a lot of electricity. The conducted analytical studies allowed us to establish a promising type of homogenizer – pulsating, which allows us to significantly reduce electricity consumption for the homogenization process, without losing the quality of the finished product.

A study of the efficiency of milk fat dispersion in a pulsating milk homogenizer was conducted, which allowed us to establish the factors and forces that affect the quality of homogenization, which will subsequently allow us to regulate this technological process in production conditions. The conducted experimental studies showed that to obtain the maximum degree of homogenization $H_m = 5$ with minimal specific energy consumption $E_{pit} = 0.83$ J/kg, it is necessary to create the following conditions: the amplitude of the piston-hammer oscillations is 10...12 mm, the oscillation frequency is 55...59 Hz and the milk supply in the pulsating homogenizer is 1800...2000 kg/h, which in turn indicates the efficiency of using the pulsating homogenizer in dairy processing lines.

It was also established that the average diameter of milk fat globules is 0.80 μm . At the same time, the uniformity of the fractional composition after processing in the experimental homogenizer is no less than that of the reference valve homogenizer, which fully meets today's requirements.

Keywords: dispersion, quality, pulsating homogenizer, milk fat, degree of homogenization, efficiency, energy consumption.

С. В. Попов, канд. техн. наук

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: stanislav.popov@pdau.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2381-152X

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ЦИЛІНДРА РІЗЦЕМ ІЗ ТВЕРДОГО СПЛАВУ

Анотація. Одним із показників ефективної роботи сучасного металорізального обладнання є точність оброблення. Важливим етапом у технології машинобудування є перехід від застарілих моделей металорізальних верстатів до обладнання із числовим програмним забезпеченням. Цього можливо досягти за умови збереження та суттєвого покращення точності оброблення, зокрема розточування отвору твердосплавним різцем у чавунній корпусній деталі.

Для оцінювання точності оброблення на металорізальному верстаті із числовим програмним керуванням проведено вимірювання розмірних параметрів циліндра. Здійснено статистичне оброблення результатів, яке дозволило зробити висновки щодо необхідності додаткового підналагодження обладнання, а також імовірної кількості браку.

Ключові слова: металорізальний верстат, зношування, різальний інструмент, статистичне оброблення, допуск, варіаційний ряд, гістограма, момент розподілу, підналагодження, брак продукції.

Постановка проблеми. Точність розмірів є одним із найважливіших показників ефективності роботи технологічного обладнання (металорізальні верстати) під час оброблення виробів машинобудування. Суттєвий вплив також має точність та якість виконання геометричних параметрів і безпосередньо конструкції різального інструмента [1; 2].

Одним із напрямів діяльності ПрАТ «Полтавський машинобудівний завод» є виготовлення обладнання для перероблення м'яса. Зокрема, вовчок-м'ясорубка марки К7-ФВП-160 (рис. 1, табл. 1) призначений безпосередньо для процесу подрібнення м'яса без кісток та м'ясних продуктів на етапі виробництва фаршу для різноманітних м'ясних виробів, що охолоджені до температури 4...12°C чи впливом низьких температур до 2...3°C [3].

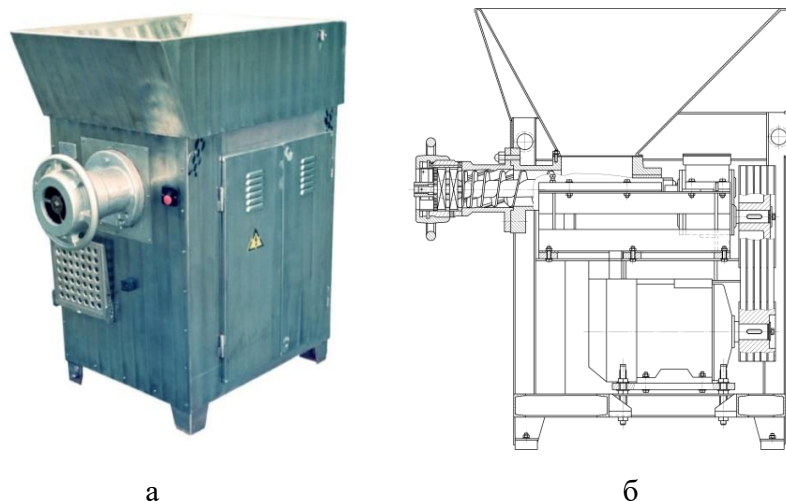


Рис. 1. Вовчок-м'ясорубка марки К7-ФВП-160 [3]: а – вид загальний; б – конструктивна схема

Таблиця 1

Технічна характеристика вовчка-м'ясорубки марки К7-ФВП-160 [3]

Назва параметра	Величина
Продуктивність, кг/год	5000
Діаметр решіток ножових, мм	160
Висота для завантаження сировини, мм	1600
Висота для вивантаження подрібненого продукту, мм	950
Місткість чаші завантаження, м³	0,2
Потужність електричного двигуна, кВт	22

Під час розроблення нового технологічного процесу (перехід із застарілого обладнання на верстат із числовим програмним керуванням моделі 16K20Ф3) оброблення циліндра вовчка (рис. 2) виникла необхідність дослідити точність розточування деталі, виготовленої з чавуну марки СЧ20 (отвір $\varnothing 160H11$ мм) твердосплавним різцем ВК6 із використанням методів математичної статистики. Це має допомогти під час визначення точності обробки на обладнанні із ЧПК.

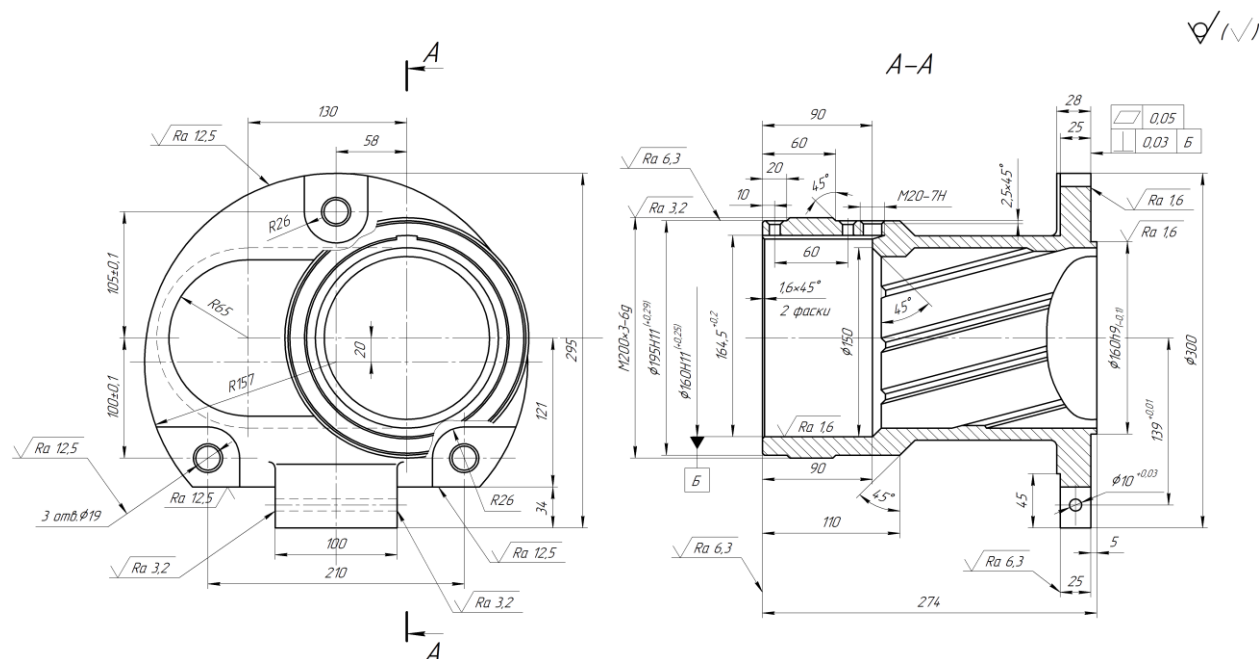


Рис. 2. Циліндр вовчка

Аналіз останніх досліджень. Значну кількість наукових робіт присвячено дослідженню процесів, що супроводжують токарне оброблення виробів із чавуну. Зокрема, науковці [4] зазначають, що оброблення металів різанням є однією з найважливіших операцій надання матеріалам необхідної форми. З огляду на це вони дослідили вплив сили різання на процеси деформації, зносу інструменту, напруження стиску з використанням методів оптимізації. Для прогнозування потужності різання використано аналітичний та експериментальний методи. Зазначено суттєвий вплив на зусилля під час різання таких факторів, як: швидкість; глибина; геометричні параметри різального інструменту. Зменшення зносу різального інструменту можливо завдяки скороченню вібрацій та величини сили різання.

Автоматизований контроль стану умов оброблення, заснований на вимірюваннях датчиками фізичних величин, що пов'язані зі зносом різального інструменту, пропонується в роботі [5]. Вони можуть бути використані як ознаки зношування різального інструменту. Однак ці

величини залежать не тільки від зносу, а також низки інших параметрів випадкового характеру. Запропоновано використовувати штучний інтелект для аналізу сигналів із різних датчиків для вивчення стану різальної кромки інструменту.

Під час оброблення важлива стійкість різального інструменту [6]. Її значення спрогнозувати доволі складно, тому що кожен інструмент та матеріал має різні характеристики. Для прогнозування ресурсу запропоновано використовувати рівняння Тейлора з константами, що враховують конкретні умови оброблення.

Стрімкий розвиток конструкційних матеріалів вимагає їх оброблення прогресивними різальними інструментами, що повинні мати високу термостійкість, зносостійкість і твердість [7]. Цим вимогам цілковито відповідають керамічні різальні інструменти, зокрема для оброблення чавуну. Проведено дослідження величини зносу керамічного різального інструменту під час оброблення на верстаті із числовим програмним керуванням. Зазначено, що підвищення швидкості різання впливає безпосередньо на зношування. Величина зносу різального інструменту має прямопропорційну залежність із поверхневою шорсткістю заготовки.

Авторським колективом [8] наведено результати дослідження стосовно оброблення чотирьох сортів чавуну інструментом із твердосплавним покриттям, а також без нього. Ефективність інструментів оцінювалася на основі даних експериментів зносу їх різальної частини, зміни сили різання, а також середньої температури.

Серед основних запитів сучасної промисловості слід зазначити якість обробки шляхом вибору матеріалів, а також методів оброблення [9]. Проведено дослідження токарного оброблення, початковими даними для якого були частота обертання шпинделя, подача та глибина різання. Досліджувалися такі параметри оброблення чавуну: час оброблення; швидкість знімання припуску; поверхнева шорсткість. Аналіз проведено з використанням емпіричного рівняння, що зіставлялося з даними експериментів.

Цікавим для ознайомлення є проведений порівняльний аналіз чистового фрезерування корпусної деталі [10]. Оброблення здійснювалася на звичайному верстаті, а також верстаті з числовим програмним керуванням. Виявлено рівень впливу елементарних похибок на точність оброблення. Визначальний вплив безпосередньо на точність оброблення на звичайному верстаті мають похибки налаштування та розмірного зношування фрези. На верстаті з числовим програмним керуванням маємо зменшену похибку налаштування. Також зменшено похибку інструменту шляхом програмованої корекції інструмента. Сумарна похибка на верстаті з числовим програмним керуванням є меншою у 2,6 раза, ніж на звичайному.

Отже, чималу кількість наукових досліджень, як закордонних, так і вітчизняних науковців, присвячено безпосередньо вивченню впливу режимних параметрів оброблення на зношування різального інструменту, визначення величини потужності різання, стан кромки, значення періоду стійкості, похибки оброблення. Водночас питанням розмірної точності виробів за результатами верстатної обробки приділено недостатньо уваги.

Формулювання мети статті (постановка завдання). За реальних умов у сучасному виробництві будь-який процес механічного оброблення відбувається під впливом чималої кількості факторів. Вони залежать від нестабільності припуску оброблення, непостійності режимів різання, твердості поверхневого шару матеріалу, складників сили різання, теплових деформацій тощо. Унаслідок цього розміри, що отримані після оброблення, носять випадковий характер. Практично неможливо виявити та провести оцінювання всіх закономірностей, що пов'язують похибки оброблення з факторами впливу. Таким чином, сучасні методи оцінювання похибок оброблення засновані на теоретико-ймовірнісному підході. Вони дозволяють розв'язати наступні задачі: встановлення виду матмоделі похибки; визначення характеристик матмоделі; визначення показників, що характеризують точність оброблення.



Для оцінювання точності оброблення необхідно виконати такі завдання: 1) провести вимірювання розмірного параметру циліндра, що контролюється, з побудовою точкових діаграм; 2) здійснити статистичне оброблення результатів; 3) провести детальний аналіз результатів статистичного оброблення.

Дослідження точності операції токарної обробки здійснюємо вимірюванням загальної вибірки, отриманої з одного металорізального верстату за час між його налагодженнями. Вплив зносу різального інструменту вважаємо мінімальним і не враховуємо його.

Основна частина. Проводимо дослідження точності оброблення діаметрального розміру циліндра вовчка, а саме Ø160H11 мм. Оброблення здійснюємо на токарно-гвинторізному верстаті із ЧПК моделі 16K20Ф3. Метою аналізу розподілу точності оброблення деталей у партії є прогноз імовірної кількості придатних та бракованих деталей на операції.

Початковими даними є: дійсні відхилення оброблюваних деталей x_i ; кількість деталей у виборці становить 60 шт.; допуск на оброблення – 250 мкм; максимальне граничне відхилення $x_{max} = 250$ мкм; мінімальне граничне відхилення $x_{min} = 0$ мкм.

Варіаційний ряд отримуємо з початкових даних розташуванням у порядку зменшення (табл. 2).

Для побудови гістограми $\hat{f}_N(x)$, що є емпіричним аналогом функції щільності розподілу $f(x)$, виконуємо ряд певних дій.

Визначаємо попередню кількість квантів (інтервалів), на які необхідно розділити вісь Ox :

$$K = 1 + 3,2 \lg N, \quad (1)$$

де N – число даних варіаційного ряду.

$$K = 1 + 3,2 \lg 60 = 6,69.$$

Кінцевий результат заокруглюємо до найближчого цілого числа, тобто $K = 7$.

Таблиця 2

Варіаційний ряд

248	170	139	114	105	73
230	168	138	113	98	70
220	162	136	112	87	64
212	160	136	112	86	62
208	159	135	110	86	50
191	159	130	110	80	49
189	155	121	110	80	30
182	154	121	109	78	23
182	140	120	108	76	10
170	140	115	107	76	9

Довжина інтервалу:

$$\Delta x = (x_{max} - x_{min}) / K, \quad (2)$$

$$\Delta x = (250 - 0) / 7 = 35,7.$$

Центр розподілу або середина області зміни вибірки:

$$(x_{max} + x_{min}) / 2, \quad (3)$$

$$(250 + 0) / 2 = 125.$$

Визначаємо число спостережень N_m , що відповідають кожному інтервалу, причому N_m дорівнює числу членів варіаційного ряду, для яких виконується нерівність:

$$x_m \leq x_i < x_m + \Delta x, \quad (4)$$

де x_m , $x_m + \Delta x$ – межі інтервалу m .

Під час використання формули (4) значення x_i , що потрапило на межу між $(m - 1)$ та m інтервалами, відносять до інтервалу m .

Визначаємо відносну кількість спостережень N_m / N (відносна частота), що відповідають даному інтервалові.

Оброблення даних нашого експерименту представимо в табличній формі (табл. 3).

Таблиця 3

Оброблення експериментальних даних

№ інт.	Інтервал	m	$p = m / n$	Середина інтервалу
1	249,9...214,2	3	0,05	232,05
2	214,2...178,5	6	0,10	196,35
3	178,5...142,8	9	0,15	160,65
4	142,8...107,1	22	0,37	124,95
5	107,1...71,4	11	0,18	89,25
6	71,4...35,7	5	0,08	53,55
7	35,7...0	4	0,07	17,85
Σ		60	1,00	–

Побудуємо гістограму (рис. 3), що є ступінчастою кривою. Її значення на m інтервалі (x_m , $x_m + \Delta x$) постійно дорівнює N_m / N ($m = 1, 2, \dots, K$).

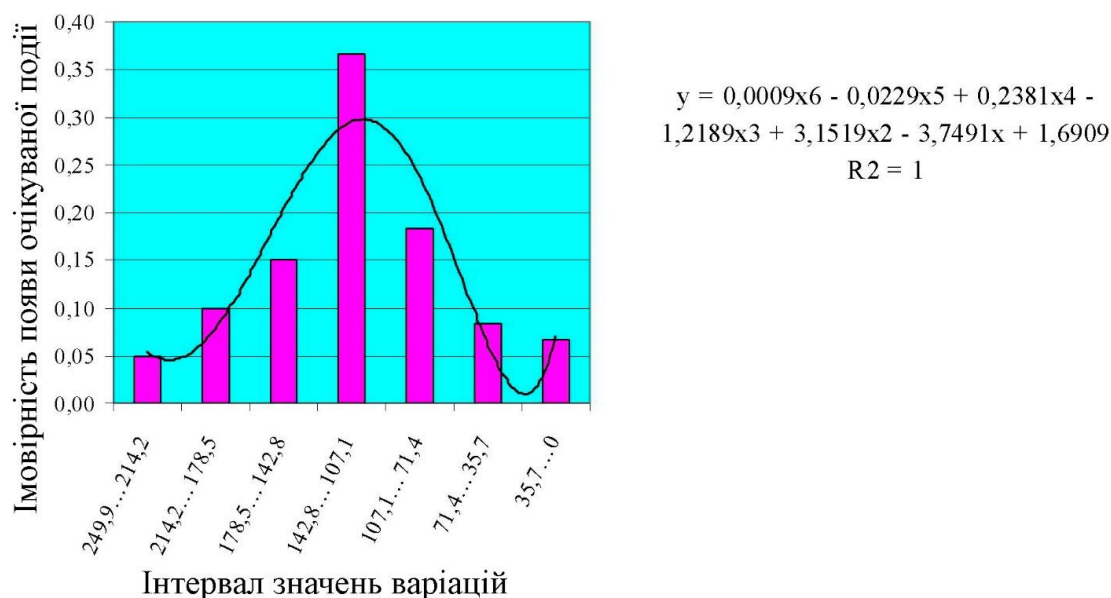


Рис. 3. Гістограма розподілу частоти появи випадкової величини

Використаємо метод моментів для порівняння емпіричного розподілу з теоретичним (приблизно приймаємо нормальним). Для цього необхідно визначити моменти розподілу та порівняти їх із моментами теоретичного нормального розподілу.

Функція диференціальна для закону нормального розподілу має вид:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

де e – основа натурального логарифму;

x_i – значення аргументу, що відповідає результатам вимірювань;

$\bar{x}$ – середнє арифметичне для ряду параметрів;

σ – середнє квадратичне відхилення.

Випадкові величини характеризують саме закони розподілу імовірностей. Під час математичних операцій, що стосуються випадкових величин, урахування розподілів потребує чималої обчислювальної роботи. У практичних розрахунках користуються числовими характеристиками розподілів. Серед них найбільш інформативними будуть моменти розподілу.

Центральний момент першого порядку буде нульовим. Розсіювання варіацій відносно середнього значення характеризує центральний момент 2-го порядку. Він називається дисперсією D_x або σ_x^2 (σ_x – середньоквадратичне відхилення). Центральний момент 3-го порядку характеризує асиметрію розподілу. Гостроверхність кривої щільності розподілу характеризує центральний момент 4-го порядку.

Ексцес використовуємо для порівняння експериментального закону розподілу з нормальним:

$$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4}. \quad (6)$$

Показник асиметрії:

$$q_s = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}. \quad (7)$$

Для нормального розподілу:

$$\mu_1 = 0, \mu_2 = D_x, \mu_3 = 0, \mu_4 = 3\sigma_x^4, E = 0, q_s = 0. \quad (8)$$

Розрахунок розпочинаємо з визначення середнього арифметичного значення $\bar{X}$, а також оцінювання середнього квадратичного відхилення $\bar{\sigma}$. Потім перевіряємо гіпотезу про нормальність розподілу відхилень. Для цього визначаємо величину ексцесу E , показник асиметрії q_s , а також їх розрахункові середньоквадратичні відхилення. Потім визначаємо коефіцієнт точності μ та правильність порівнянням фактичного E_ϕ та допустимого E_δ зміщення рівня налагодження, фактичного l_ϕ та допустимого l_δ коефіцієнта точності налагодження. Коефіцієнт точності μ визначимо як результат ділення граничної похибки визначеної величини $6\bar{\sigma}$ та допуску σ на оброблення. Якщо $\mu > 1$, то точність процесу є недостатньою. Деяка частина деталей піде у брак. Можливий випадок, що всі браковані деталі матимуть розміри менші допустимих. Тобто брак q_x за заниженими розмірами. Якщо всі браковані деталі матимуть розміри більші допустимих – брак q_x за завищеними розмірами. Імовірність відсотку браку q_1 і q_2 визначається за формулами з використанням функцій Лапласу. Величина E_ϕ є дійсним зміщенням центру налагодження обладнання відносно середини поля допуску. Знак вказуватиме на напрям зміщення. Якість налагодження обладнання вважається достатньою, якщо $l_\phi < l_\delta$. Якщо навпаки, то налагодження є незадовільним.

За $\mu = 1$ для роботи без браку необхідно, щоб виконувалася умова $l_\phi = l_\delta = 0$, що неможливо із практичної точки зору. Якщо $\mu < 1$, то точність процесу є цілком задовільною. Робота без браку можлива, якщо $E_\phi < E_\delta$.

Визначаємо моменти розподілу (табл. 4).

Для нашого випадку було отримано: середнє значення (математичне очікування) $m = 121,29$; дисперсія $\sigma^2 = 2868,65$; середнє квадратичне відхилення $\sigma = 53,56$; коефіцієнт ексцесу $E = 1,01$; коефіцієнт асиметрії $q(s) = 0,001$; величина допуску $\delta = 250$ мкм; коефіцієнт точності $\mu = 17,60$.

Визначимо фактичну похибку налагодження верстату:

$$E_{\phi} = x_{cp} - \frac{x_{\sigma} - x_{\pi}}{2}; \quad (9)$$

де x_{σ} , x_{π} – максимальне та мінімальне граничні відхилення.

Таблиця 4

Моменти розподілу

$x - x_{cp}$	$(x - x_{cp})^2$	$(x - x_{cp})^3$	$(x - x_{cp})^4$	Моменти			
				μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
110,76	12267,04	1358656,37	150480251,01	11,60	613,35	67932,82	7524012,55
75,06	5634,00	422888,31	31741996,56	19,64	563,40	42288,83	3174199,66
39,36	1549,21	60976,89	2400050,38	24,10	232,38	9146,53	360007,56
3,66	13,40	49,03	179,44	45,82	4,91	17,98	65,80
-32,04	1026,56	-32891,03	1053828,72	16,36	188,20	-6030,02	193201,93
-67,74	4588,71	-310839,05	21056237,44	4,46	382,39	-25903,25	1754686,45
-103,44	10699,83	-1106790,79	114486439,07	1,19	713,32	-73786,05	7632429,27
110,76	12,267,04	1358656,37	150480251,01	11,60	613,35	67932,82	7524012,55
Усього:				123,17	2697,96	13666,83	20638603,2

$$E_{\phi} = 121,29 - \frac{250 - 0}{2} = -3,71.$$

Визначимо допустиму похибку налагодження верстату:

$$E_{\sigma} = \frac{T}{2} - \frac{\omega_c}{2}; \quad (10)$$

де T – допуск на розмір;

$$\omega_c = 6\sigma;$$

$$E_{\sigma} = \frac{250}{2} - \frac{6 \cdot 53,56}{2} = -35,68.$$

Результати для порівняння заносимо до табл. 5.

Таблиця 5

Характеристики точності

Характеристики	За результатами вимірювань	Для нормального розподілу
Центральний момент 2-го порядку, μ_2	2697,96	2868,65
Центральний момент 3-го порядку, μ_3	13666,83	0
Центральний момент 4-го порядку, μ_4	20638603,22	24687519
Коефіцієнт ексцесу, E	2,84	0
Коефіцієнт асиметрії, $q(s)$	0,001	0

Оскільки $E > 0$, то крива щільності розподілу є більш гостроверхою, ніж крива нормального розподілу. Розподіл зрушений вправо.

Визначимо відсоток браку із застосуванням функцій Лапласу. Імовірний відсоток браку за верхньою та нижньою межами допуску:

$$P_{\phi, \phi} = (0,5 - \Phi(t_{\phi})) \cdot 100\% ; \quad (11)$$

$$P_{\phi, n} = (0,5 - \Phi(t_n)) \cdot 100\% ; \quad (12)$$

де

$$t_{\phi} = \frac{x_{\phi} - x_{cp}}{\sigma} , \quad (13)$$

$$t_n = \frac{x_n - x_{cp}}{\sigma} . \quad (14)$$

Тобто матимемо:

$$P_{\phi, \phi} = \left(0,5 - \Phi \left(\frac{250 - 121,29}{53,56} \right) \right) \cdot 100\% = 1,92\% ;$$

$$P_{\phi, n} = \left(0,5 - \Phi \left(\frac{0 - 121,29}{53,56} \right) \right) \cdot 100\% = -2,26\% .$$

Висновки. Проведено вимірювання розмірного параметру циліндра. Здійснено статистичне оброблення результатів вимірювань та детальний аналіз. Оскільки коефіцієнт точності $\mu = 17,60 > 1$, то точність процесу може бути підвищена. $E_{\phi} < E_{\phi}$, тобто $-35,68 < -3,71$, що свідчить про можливе підналагодження верстату (наприклад, коригуванням програми). Це безпосередньо вплине на зменшення кількості бракованих деталей. Враховуючи те, що кількість браку не перевищує 5%, то налагодження токарно-гвинторізного верстату із ЧПК моделі 16K20Ф3 під час розточування Ø160Н11 циліндра вовчка-м'ясорубки різцем із твердого сплаву ВК6 вважаємо прийнятним.

Список використаних джерел

1. Попов С.В., Васильєв А.В. Підвищення ефективності токарної оброблення гільз циліндрів розчинонасосів. *Scientific Journal ScienceRise*. 2019. № 8(61). С. 35–41. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.179035>
2. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування : монографія / Є.А. Фролов та ін. Полтава, 2019. 204 с.
3. Вовчок-м'ясорубка марки К7-ФВП-160. URL: <https://poltavamash.com/ua/component/jshopping/product/view/13/114?Itemid=198> (дата звернення: 16.02.2025).
4. Chandan K., Sanjay K., Ajay K. Reviews of Metal Cutting. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. 2020. 11(12). Р. 1730–1735. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.12.2020.159>
5. Jemielniak K. Tool Condition Monitoring in Metal Cutting. *Soft Modeling in Industrial Manufacturing, Studies in Systems, Decision and Control*. 2018. 183. Р. 45–74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03201-2_4
6. Sobron M., Lubis Y., Sofyan D., Steven D., Andri. Tool Life Investigation of Carbide Cutting Tools in the Turning of Cast Iron Material. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 725. 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012039>
7. Lubis S., Darmawan S., Rosehan, Winata W., Zulkarnain M. Tool wear analysis of ceramic cutting tools in the turning of gray cast iron materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 857. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/857/1/012003>
8. Martinez I., Tanaka R., Yamane Y., Sekiya K., Yamada K., Ishihara T., Furuya S. Wear characteristics of coated carbide tools in the turning of ductile cast iron. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century: LEM21*. 2015. 2015.8. https://doi.org/10.1299/jsmelem.2015.8._0213-1
9. Bilal Ahamed S., Lavanyan R., Ranjith T., Basked N., Ganesan M., Vinoth Kumar S. Experimental Investigations and Comparative Analysis of Turning EN-8 & Cast Iron using L9 Orthogonal Array. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2019. 7 (02). Р. 1–7. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV7IS02017>



10. Дерібо О.В., Дусанюк Ж.П., Кулик А.Ф. Порівняльний аналіз точності оброблення на верстаті із ручним керуванням і на верстаті з числовим програмним керуванням. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 5. С. 116–123.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2025 р.

S. Popov
Poltava State Agrarian University

RESEARCH ON THE ACCURACY OF CYLINDER MACHINING WITH A HARD ALLOY TOOL

Summary

The accuracy of machining on metal-cutting equipment is one of the main indicators of its efficiency. It is crucial for ensuring the quality of finished products. In the conditions of modern mechanical engineering, an important stage is the transition from outdated models of metal-cutting machines to new technologies. For example, machining on machines with numerical software. Thus, new opportunities open up for increasing the accuracy of machining. This will reduce production costs and improve the competitiveness of products.

One of the key tasks that must be solved within the framework of this transition is to ensure high machining accuracy, especially when boring holes with a carbide cutter in a cast-iron body part. The use of a carbide tool allows you to achieve better characteristics during turning. This will also have a positive effect on the accuracy of machining cast-iron products. Nevertheless, to achieve results, it is necessary to conduct a thorough analysis and control of the machining process.

To assess the machining accuracy on a CNC machine tool, the cylinder dimensional parameter was measured. This allowed us to collect data on the accuracy of the hole boring and determine deviations from the specified dimensions. The impact of cutting tool wear is considered minimal, so it was not taken into account. Statistical processing of the measurement results helped to draw conclusions about the need for additional equipment adjustment.

In addition, the results of the experiment allowed us to estimate the probable number of defects. They can occur during the machining process. Determining the causes of deviations and controlling machining accuracy are critically important for preventing the production of defective parts.

Constant monitoring and analysis of machining accuracy is the key to the effective operation of modern metal-cutting equipment and improving the quality of production in general.

Keywords: metal-cutting machine, wear, cutting tool, statistical processing, tolerance, variation series, histogram, distribution moment, fine-tuning, processing defect.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-13>

УДК 662.8.055:665.3

К. О. Самойчук, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

В. А. Самохвал, аспірант

ORCID: 0000-0001-5539-3647

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ПРЕС-ЕКСТРУДЕРА В ПАРІ З БАГАТОСЕКЦІЙНИМ ПРИСТРОЄМ ФОРМУВАННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ

Анотація. Актуальність цього дослідження обумовлена гострими проблемами, з якими стикаються виробники паливних брикетів, що використовують як сировину відходи оліємістких культур. Більша частина пресового обладнання не дає змоги без включення в лінію додаткового обладнання виготовляти якісний продукт із цього типу сировини. Тому ці дослідження спрямовані на вирішення проблеми щодо зменшення відсоткової частки олій у готовому продукті та збільшення часу перебування сировини у стиснутому стані завдяки додаванню секцій пристрою формування паливних брикетів. Таким чином, поставлену мету роботи – покращення якості готової продукції та збільшення ресурсу пресового обладнання – було виконано. За результатами проведених досліджень було визначено, що розроблений шнековий прес екструдер у парі з пристроєм остаточного формування зі здатністю відбору олій на етапі формування брикету має підвищену ефективність порівняно з традиційними.

Ключові слова: олія, брикет, прес, формування, достискання, сировина, лігнін.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції в енергетичній галузі свідчать про поступове зростання вартості видобутку традиційних енергоресурсів, зокрема нафтопродуктів, вугілля та природного газу [1, 2]. Тому в Україні стрімко розвивається галузь із переробки відходів та залишків рослинної сировини в біопаливо [3, 4]. Основною сировиною для виробництва паливних брикетів є відходи провіювання таких сільськогосподарських культур, як соняшник, соя, льон, коріандр і рапс, які містять у своїй структурі велику кількість олій [5].

На цей час на світовому ринку представлено великий асортимент пресового обладнання, яке ефективно функціонує під час переробки сировини, що не містить олій або містить незначну кількість олій (солома, очерет, відходи після обробки деревини тощо) [7]. Проте відома невелика кількість промислового обладнання, здатного працювати з оліємісткою сировиною та забезпечувати гарну якість паливних брикетів, що не містять центрального отвору. При цьому основною вимогою до такого обладнання є забезпечення мінімальних витрат електроенергії, що є дуже важливим для підвищення економічної ефективності виробництва [8]. У роботі із сировиною, що у своїй структурі містить частку олій, найкраще зарекомендувало шнекове обладнання. Після вивчення процесу брикетування шнековим пресом можна зробити висновок, що більша частина виробників стикаються з проблемами низької якості готової продукції у разі використання цього виду сировини. Для вирішення цієї проблеми в більшості випадків використовують маслопрес як проміжне обладнання для відбору олій [9], завдяки чому вже в брикетер подається заздалегідь знежирена і частково спресована сировина, що, зі свого боку, поліпшує якість брикету, але в разі зменшує ресурс пресу, оскільки така сировина є абразивною і сухою, що призводить до надмірного зношування деталей та збільшує витрати електроенергії через додаткове обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові дослідження в галузі виробництва обладнання для переробки різних видів сировини переважно зосереджені на вивченні конструктивних особливостей вже існуючих агрегатів та аналізі технологічних процесів, які відбуваються під час їх експлуатації [10, 11]. Дослідники прагнуть виявити найбільш ефективні способи вдосконалення конструкцій, що дадуть змогу підвищити продуктивність обладнання, знизити витрати енергії та покращити якість кінцевої продукції. Одночасно із цим велика кількість виробничих підприємств, які вже займаються виготовленням пресового обладнання, концентрують свої зусилля на розробці більш інноваційних моделей, що відрізняються підвищеною ефективністю, економічністю та здатністю працювати з різними типами сировини [12, 13]. Особливої уваги заслуговує сектор виробництва паливних брикетів, який демонструє високий потенціал для розвитку. Останнім часом відзначається помітне зростання кількості нових моделей устаткування, що поєднують у собі широкий спектр технологічних операцій, необхідних для повного циклу виробництва паливних брикетів з різних видів сировини [14].

В Україні сільське господарство розвинене на високому рівні, тому існують значні ресурси для забезпечення цієї галузі відповідною сировиною. Органічні відходи сільськогосподарського виробництва є ефективним джерелом біопалива, оскільки більшість із них мають високу теплотворну здатність і добре згоряють, при цьому кожен вид сировини потребує використання спеціально адаптованого пресового обладнання, що дає можливість досягти оптимального рівня ущільнення та формування брикетів [15, 16].

Дослідження показали, що найефективніше із цим типом сировини працює обладнання шнекового типу [17, 18]. Останнім часом цей тип пресового обладнання зазнав суттєвого вдосконалення, що дало можливість значно підвищити його універсальність і розширити спектр можливостей його застосування [19]. Однак слід зазначити, що більшість шнекових пресів, які використовуються для роботи з олійємісними культурами, мають досить складну структуру й передбачають наявність у виробничій лінії кількох окремих технологічних установок [20–21]. Це, зі свого боку, збільшує як початкові капіталовкладення в закупівлю нового обладнання, так і собівартість його обслуговування. З метою мінімізації витрат і підвищення економічної ефективності виробництва було ухвалено рішення про розробку нового типу установки, яка б інтегрувала основні процеси в одному універсальному пресовому агрегаті. Це дасть змогу значно скоротити витрати на виробничий процес, спростити експлуатацію обладнання та забезпечити його максимальну продуктивність [22].

Формулювання цілей статті. Метою цієї роботи є всебічне вивчення та аналіз наукової літератури, патентних розробок, а також зразків обладнання, що використовуються у сфері виробництва паливних брикетів. На основі отриманих даних передбачається розробка більш універсального й економічно вигідного обладнання, яке характеризуватиметься відносно низькою собівартістю та високою ефективністю. Запропонована установка повинна поєднувати в собі більшість ключових технологічних процесів, необхідних для виготовлення паливних брикетів із конкретного виду сировини. Одним із головних завдань є забезпечення більш тривалого утримання сировини в стиснутому стані, що сприятиме покращенню її щільності, механічної міцності та енергетичної ефективності кінцевого продукту.

Основна частина. Процес брикетування заснований на фізико-хімічних властивостях лігніну, який є природним компонентом рослинних клітин. Саме лігнін виконує функцію природного сполучного матеріалу, що активується під впливом високої температури та значного механічного тиску. У процесі нагрівання органічної сировини лігнін починає розм'якшуватися та виступати у ролі природного клею, забезпечуючи спікання частинок між собою та формування міцної структури паливного брикету [23–24].



Основою технології виробництва паливних брикетів є процес пресування шнеком рослинної сировини, зокрема відходів провіювання таких культур, як соняшник, льон, коріандр, ріпак, соя, а також якісно подрібнених залишків деревини, як-от тирса. Під час пресування відходи піддаються дії високого тиску, через що підвищується температура. Саме цей тепловий ефект сприяє активному виділенню лігніну, який, стаючи твердим після охолодження, забезпечує міцність готового виробу. При цьому готові паливні брикети не містять додаткових синтетичних або хімічних сполучних речовин, оскільки лігнін, що входить до складу будь-якої органічної сировини, самостійно виконує цю функцію. Завдяки цьому брикети мають високу механічну міцність, що робить їх стійкими до зовнішніх впливів і сприяє зручному транспортуванню та тривалому зберіганню. Крім того, щільна поверхнева структура брикетів зменшує їхню гігроскопічність, що є важливою перевагою у разі зберігання у відкритих або вологих умовах. Однак ефективність процесу брикетування значною мірою залежить від правильного вибору та підготовки сировини. Один із ключових параметрів – вміст лігніну в різних видах сировини, адже його недостатня кількість у вихідному матеріалі може спричинити руйнування брикету ще на стадії виходу з пресувального пристрою. У таких випадках брикети можуть розпадатися на окремі частини або набувати нестабільної структури. Не менш важливим є контроль рівня вологості сировини перед брикетуванням. Оптимальним є діапазон 8–12 %, оскільки саме за таких параметрів лігнін максимально ефективно виконує свою функцію. Якщо вологість перевищує 12 %, у зоні розвантаження преса через високу температуру може утворюватися так звана парова пробка. Це явище призводить до надмірного внутрішнього тиску в брикеті та, як наслідок, до його розтріскування або повного руйнування. З іншого боку, надмірне висушування сировини теж небажане, оскільки воно погіршує властивості лігніну та знижує ефективність процесу спікання частинок. Таким чином, якість паливних брикетів безпосередньо залежить від правильного вибору сировини, її попередньої обробки, а також точного дотримання параметрів температури, вологості та тиску під час процесу брикетування.

За результатами проведеного аналізу було ухвалено рішення про розробку інноваційного обладнання, яке об'єднує відразу кілька ключових технологічних процесів. Запропонована установка поєднує функції формування паливного брикету, ефективного віджиму технічних олій та оптимізації технологічного циклу шляхом збільшення часу перебування сировини у стиснутому стані. Таке конструктивне рішення дає змогу значно підвищити якість кінцевого продукту, забезпечуючи його високу щільність, механічну міцність і стабільність форми. Крім того, подовження часу стискання сприяє покращенню процесу виділення та рівномірного розподілу лігніну, що відіграє ключову роль у скріпленні частинок брикету. Запропонована концепція дає можливість оптимізувати виробничий процес, зменшити витрати енергії та забезпечити максимальну ефективність роботи обладнання під час переробки різних видів сировини.

Таблиця 1

Технічні характеристики вдосконаленого прес-екструдера

Показник	Величина
Продуктивність (за відходами олієвісних культур), кг/год	20–150
Встановлена потужність, кВт	до 7,5
Споживана потужність, кВт/т	55...60
Потужність електродвигуна, кВт	11
Частота обертання шнеків, об/хв	75
Робоча температура, °C	65–85
Вологість сировини до, %	14

Під час досліджень було використано три види сировини: відходи соняшнику, відходи сої та відходи льону. Основним параметром експерименту була зміна кількості секцій у конструкції пристрою остаточного формування брикету та зміна регульовального зазору канавок для відбору олій на торцях секцій, що давало можливість оцінити вплив цього фактора на кінцеві характеристики продукції. Перед початком випробувань уся сировина була завчасно підготовлена, що забезпечило її однакову структуру, рівень вологості та вміст олієвмісної складової. Це дало змогу мінімізувати вплив зовнішніх змінних факторів і забезпечити коректність отриманих результатів. Усі дослідження проводилися в однакових умовах і протягом однакових проміжків часу. Для підвищення достовірності отриманих даних кожен із дослідів повторювався чотири рази, а результати аналізувалися та вносилися в таблицю.

Конструкція органів обладнання зображено на (рис. 1). [25]

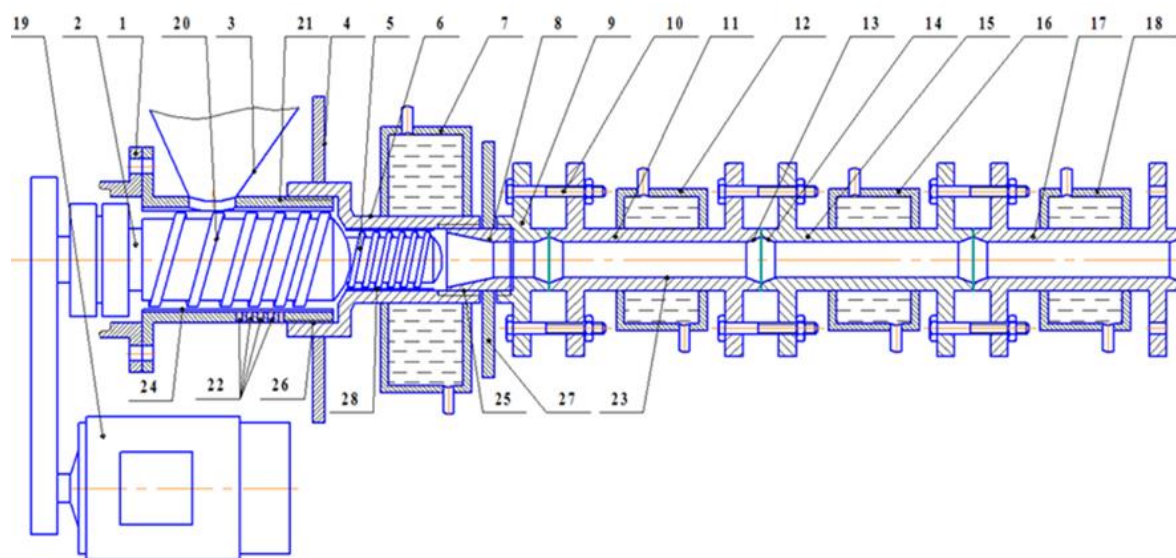


Рис. 1. Схема шнекового розробленого прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів з пристроєм остаточного формування:

1 – корпус привода; 2 – приводний вал; 3 – завантажувальний бункер; 4 – фіксатор; 5, 20 – шнек; 6 – камера дожиму; 7, 12, 16, 18 – сорочка охолодження; 8 – матриця; 9 – пристрій остаточного формування; 10 – болт; 11, 15, 17 – секції труб; 13, 14 – маслозгінні фаски; 19 – електродвигун; 21 – пресовальна камера; 22 – аварійні відводи; 23 – труба; 24, 28 ребра; 25, 26 – різьбове з'єднання; 27 – рукоятка

Вихід олії визначили за рівнянням (1):

$$V_o = \frac{m_m}{m_o} \cdot 100, \quad (1)$$

де V_o – вихід відібраної олії, %;

m_o – маса відібраної технічної олії, кг;

m_m – маса брикетів, кг.

Тривалість перебування матеріалу в матриці під час процесу брикетування відіграє важливу роль, оскільки саме цей фактор сприяє зменшенню внутрішніх напружень у сформованому брикеті. Чим довше матеріал залишається в стислому стані, тим краще відбувається стабілізація його структури, що безпосередньо впливає на кінцеві характеристики виробу.

Цей показник залежить від кількості матеріалу, що надходить у пресову камеру, а також від конструктивних особливостей обладнання, зокрема довжини пристрою остаточного форму-

вання. Оптимальне співвідношення цих параметрів дозволяє досягти максимальної щільності брикетів, що є важливим критерієм їхньої якості. Під час розробки обладнання для брикетування всі ці параметри були враховані з метою забезпечення ефективного процесу пресування.

Таблиця 2

Кількісні показники роботи вдосконаленого пресу

Кількість секцій пристрою	1	2	3	4	5	6	7	8
Маса олії для виготовлення 100 кг брикету з відходів соняшника	0,85	2	2,7	3,4	4,1	4,8	5,0	5,4
Маса олії для виготовлення 100 кг брикету з відходів сої	0,4	0,8	1	1,2	1,8	2,1	2,6	2,75
Маса олії для виготовлення 100 кг брикету з відходів льону	0,6	1,2	1,7	3	3,4	4,1	4,9	5,3

Висновки. З проведених досліджень можна зробити висновок, що найбільш ефективним варіантом для таких матеріалів є використання шнекових прес-екструдерів, оскільки вони забезпечують стабільний процес переробки та високий рівень продуктивності. Особливо ефективним виявилось застосування секційного пристрою остаточного формування брикету, що значно покращує якість кінцевого продукту. Завдяки наявності невеликих секцій у конструкції пристрою з'явилася можливість із великою точністю регулювати рівень тиску та контролювати видалення олій на кожному етапі формування брикету. Це, зі свого боку, дає можливість значно подовжити час перебування сировини у стиснутому стані, що сприяє покращенню фізико-механічних характеристик готової продукції. Таке рішення забезпечує рівномірне ущільнення матеріалу, що позитивно впливає на стабільність форми брикетів, їхню щільність та енергетичну ефективність у подальшому використанні.

З економічного погляду застосування прес-екструдера в поєднанні з пристроєм остаточного формування дає змогу значно зменшити собівартість виробництва готової продукції. Одним із ключових факторів економічної вигоди є розширення спектра сировини, яка може бути використана в процесі пресування без необхідності застосування додаткового проміжного обладнання. Це суттєво спрощує виробничий процес і знижує операційні витрати. Під час експериментальних випробувань було підтверджено теоретичне припущення, що запропоноване технічне рішення дає можливість суттєво покращити якість кінцевого продукту.

Розроблене обладнання продемонструвало високу стабільність роботи навіть у випадках, коли рівень вмісту олій у сировині наближався до критичних показників. Крім того, завдяки оптимізованій конструкції та видаленню з виробничого циклу зайвих етапів обробки було досягнуто суттєвого показника щодо зменшення витрат електроенергії. Таким чином, розроблена технологія підтвердила свою ефективність як з технічного, так і з економічного погляду, забезпечуючи високу якість продукції за одночасного зниження виробничих витрат.

Список використаних джерел

1. Руденко Д. Т., Єременко О. І., Василенков В. Є. Дослідження в процесі брикетування рослинної біомаси шнековим механізмом. *Науковий журнал «Інженерія природокористування»*. 2020. Вип. 3 (17). С. 15–22.
2. Гелетуша Г. Г., Железна Т. А., Драгнєв С. В. Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2018. № 20. С. 48.
3. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Перспективи використання біопалива з рослинної сировини. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії» (3–4 листопада 2022 р). Черкаси, 2022. С. 158–161.
4. Гелетуша Г. Г., Железна Т. А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Ч. 1. *Промислова теплотехніка*, 2010. Т. 3. № 3. С. 73–79.



5. Полянський О. С., Д'яконов В. І., Дьяконов О. В. Комплексна оцінка енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, «Механізація сільськогосподарського виробництва»*. 2018. Вип. 190. С. 192–202.
6. Патент а202007249. Україна, МПК(2006) : В30В.11/00, В30В 9/00, В27N 5/00 Шнековий прес-екструдер для виготовлення брикетів / Самохвал І. В. А. : патентовласник Самохвал Віталій Анатолійович – u202007249 : заявлено 13.11.2020 : опубліковано 18.05.2022. Бюл. № 20.
7. Бойко В. С., Самойчук К. О., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О., Михайлов Є. В., Червоткіна О. О., Тарасенко В. Г. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси. Київ : Проф Книга, 2021. С. 468.
8. Palamarchuk I., Mushtruk M., Gudzenko M., Vasylyv V., Slobodyanyuk N., Kuts A., Nychyk O., Bober A., Salavor O. Mathematical modeling, of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 937–944. <https://doi.org/10.5219/1436>.
9. Indartono Y.S., Heriawan H., Kartika I.A. Innovative and flexible single screw press for the oil extraction of Calophyllum seeds. *Research in Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 65. P. 91–97.
10. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М., Мотіль І. М., Госовський Р. Р. Дослідження процесу формування паливних брикетів з рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. С. 138–146.
11. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Розробка міні-лінії для виготовлення паливних брикетів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 21. Т. 1. С. 152–159.
12. Vorobiev E., Bogaert L., Mhemdi H. Residence time distribution and flow pattern modeling of oilseeds in a pilot screw press. *Oilseeds & Fats Crops and Lipids*. 2020. Vol. 27 (65). <https://doi.org/10.1051/ocl/2020060>.
13. Лук'янець В. О., Субота С. В. Вплив параметрів ущільнення рослинної біомаси на показники якості біопаливних брикетів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2014. Вип. 99. Т. 2. С. 103–113.
14. Фомич М. І. Технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів. *Сільськогосподарські машини*. 2023. № 46. С. 53–59.
15. Alonge A.F., Extraction of vegetable oils from agricultural materials: A review. In Proceedings of the 12th CIGR Section VI International Symposium. *CIGR – International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering*, 2019. P. 1184–1206.
16. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Виготовлення паливних брикетів на пресі екструдерного типу. Науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (24 лютого 2023 р.). ТДАТУ, 2023. С. 11.
17. Antoniassi R., Wilhelm A.E., Reis S.L.R., Regis S.A., Faria-Machado A.F., Bizzo H.R., & Cenci S.A. Expeller pressing of passion fruit seed oil: Pressing efficiency and quality of oil. *Brazilian Journal of Food Technology*. 2022. Vol. 25. No. 2021168. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.16821>.
18. Єременко О. І., Лук'янець В. О. Дослідження та вдосконалення живильного пристрою перспективного брикетного преса. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 4. Т. 2. С. 146–156.
19. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Підвищення ефективності виробництва паливних брикетів з оліємистих сировин в шнекових прес-екструдерах. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2023»* (18–19 травня 2023 року). Київ : Національний університет біоресурсів та природокористування України, 2023. С. 56–59.
20. Subota S.V. Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen roboty hvyntovoho pres-bryketuvalnyka vyrobnytstva palyvnykh bryketiv iz roslynnoyi syrovyny. *Mizhvidomchyu tematychnyy naukovyy zbirnyk Mekhanizatsiya ta elektryfikatsiya sil'skoho hospodarstva*. 2015. Issue 97. Vol. 2. P. 40–46.
21. Червоткіна О. О., Фучаджи Н. О., Паляничка Н. О., Самохвал В. А. Вплив різних параметрів при процесі гранулювання рослинної сировини на якість гранул. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання*. Мелітополь : ТДАТУ, 2023. Вип. 23. Т. 2. С. 103–123.
22. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Дослідження ефективності роботи обладнання для інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13. Т. 1. С. 16. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-16>.



23. Bălăţatu C., Mateescu M., Anghelache D., Tăbăraşu A. The importance of moisture in extracting oils from oilseeds. A review. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*. 2022. Vol. 2. P. 167–170.

24. Gudzenko M.M., Vasylyv V.P., Mushtruk M.M., Zheplinska M.M., Palamarchuk I.P., Burova Z.A., Sarana V.V. Parameters of screw nozzles of twin-screw extruder-press on oil yield. *Animal Science and Food Technology*. 2021. Vol. 12 (3). P. 5–17.

25. Патент. 127064. Україна, МПК (2022.05) Шнековий прес екструдер для виготовлення брикетів / Самохвал В. А. : патентовласник Самохвал Віталій Анатолійович. а 202007249 : заявлено 13.11.2020: опубліковано 30.03.2023. Бюл. № 13. 8 с.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.

K. Samoichuk, V. Samokhval
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

STUDYING THE OPERATION OF A SCREW PRESS EXTRUDER IN COMBINATION WITH A MULTI-SECTIONAL FUEL BRIQUETTE FORMING DEVICE

Summary

The relevance of this study is due to the acute problems faced by most fuel briquette producers that use oilseed waste as a raw material. Currently, the world market offers a wide range of press equipment that operates efficiently when processing raw materials that do not contain oil or contain a small amount of oil (straw, reeds, wood waste). However, there is not a large number of industrial equipment capable of working with oil-containing feedstocks and providing good quality fuel briquettes that do not contain a central hole. The large time of pressing equipment does not allow to produce a quality product from this type of raw material without including additional equipment in the line. During pressing, the waste is exposed to high pressure, which is accompanied by an increase in temperature. It is this thermal effect that promotes the active release of lignin, which, hardening after cooling, ensures the strength of the finished product. As a result, the briquettes have high mechanical strength, which makes them resistant to external influences, and the dense surface structure of the briquettes reduces their hygroscopicity and facilitates convenient transportation and long-term storage. Our research is aimed at solving the problem of reducing the percentage of oils in the finished product and increasing the time of stay of raw materials in a compressed state due to the number of sections of the fuel briquette forming device. One of the goals of the work is to improve the quality of the finished product and increase the service life of the press equipment. After analyzing the operation of the existing press equipment and its shortcomings, it was decided to develop a wicker screw press extruder paired with an extended final molding device with the ability to dose oils at the briquette formation stage.

Keywords: oil, briquette, press, molding, ripening, raw materials, lignin.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-14>

УДК 637.134

С. В. Кюрчев, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-6512-8118

К. О. Самойчук, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА МОЛОЧНИХ ВЕРШКІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУМИННОГО ТА ПУЛЬСАЦІЙНОГО ГОМОГЕНІЗАТОРІВ

Анотація. З метою підвищення енергоефективності процесів виготовлення питних вершків потрібно вирішити питання значних енерговитрат на етапі гомогенізації. Для цього запропоновано застосування струминних і пульсаційних гомогенізаторів, що відзначаються високою енергоефективністю. Проте для їх впровадження на виробництві необхідним є коригування наявної технологічної схеми виготовлення питних вершків і проведення експериментальної оцінки її ефективності. Проектування технологічних схем виготовлення молочних вершків із використанням запропонованих гомогенізаторів повинно передбачати визначення оптимальних режимних і технологічних параметрів функціонування кожного типу гомогенізатора. Для розробки технології переробки молока із застосуванням цих двох видів гомогенізаторів важливо встановити взаємозв'язок між режимами роботи клапанних гомогенізаторів і ключовими параметрами нових пристроїв. Контроль якості отриманого молока здійснювався відповідно до основних показників, визначених чинними стандартами, і підтвердив повну відповідність продукції сучасним вимогам до харчових виробів.

Ключові слова: технологія, гомогенізація, технологічна схема, молочні вершки, пульсаційний гомогенізатор, струминний гомогенізатор.

Постановка проблеми. Однією з актуальних проблем молочної переробної галузі, зокрема у виробництві питного молока, є значні енергетичні витрати на одиницю готової продукції. Встановлено, що серед технологічних операцій у виробництві питного молока найбільш енерговитратними є процеси пастеризації (стерилізації) та гомогенізації [1, 2]. При цьому коефіцієнт подрібнення жирових кульок молока під час гомогенізації не перевищує 1 %, що свідчить про вкрай низьку ефективність диспергування молочного жиру в сучасних клапанних гомогенізаторах [3, 4].

Для розв'язання цієї проблеми розроблено два нові типи гомогенізаторів: струминний та пульсаційний [5, 6]. Принцип їхньої роботи детально описаний у дослідженнях [7–9]. Використання цих пристроїв замість клапанних гомогенізаторів дає змогу знизити собівартість виробництва широкого асортименту молочної продукції, підвищити її конкурентоспроможність, наростити обсяги виробництва та, відповідно, збільшити валовий національний продукт України [4, 5]. Застосування нових гомогенізаторів дає можливість скоротити енергоспоживання у виробництві питного молока на 20–40 %, зменшити собівартість готової продукції на 5–15 %, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної молочної промисловості та продовольчої безпеки країни [6, 7].

Для України зниження собівартості продукції має особливе значення в контексті міжнародних угод щодо відкриття азійського ринку для української молочної продукції. Ці переваги сприяють підвищенню відповідності українських продуктів міжнародним стандартам на 25–30 % [8, 9].

Для успішного впровадження розроблених енергоефективних струминних і пульсаційних гомогенізаторів потрібно створити відповідні технологічні схеми, що міститимуть визначення режимних параметрів роботи кожного типу пристрою. Це забезпечить їхню ефективну інтеграцію у наявні виробничі процеси молочної промисловості.

Аналіз останніх досліджень. Вершки питні – це концентрована жирова частина молока, що отримується шляхом сепарування. Залежно від масової частки жиру вершки можуть містити від 10 до 58 % жиру [10, 11].

У пастеризованих вершках, розфасованих у споживчу тару, не допускається наявність БГКП у 0,01 р. Стерилізовані вершки у споживчій тарі мають відповідати вимогам промислової стерильності [12].

Для виробництва питних вершків використовують незбиране молоко не нижче 1-го сорту відповідно до чинного стандарту на молоко-сировину, кислотністю не вище за 18 °Т. Вершки першого та другого сорту повинні мати кислотність 14 °Т за жирності 32–37 % для першого сорту та 17 °Т для другого сорту.

Крім того, у виробництві питних вершків застосовують сухе незбиране молоко, знежирене сухе молоко, сухі вершки, несолене вершкове масло, вітаміни, вітамінні й полівітамінні премікси, пробіотичні речовини, мікро- та макроелементи, а також питну воду [13].

Для виробництва УВТ-оброблених і стерилізованих вершків використовується сухе незбиране молоко вищого сорту, з кислотністю у відновленому стані не більше ніж 18 °Т і термостійкістю не нижче 2-ї групи за алкогольною пробою [14].

Молоко незбиране для стерилізованих вершків та вершків УВТ-оброблених повинно містити не більше ніж 500 тис./см³ соматичних клітин. З метою збереження якості стерилізованих вершків допускається застосування солей-стабілізаторів у вигляді лимоннокислого або фосфорнокислого натрію та калію.

Для виготовлення продукції дозволяється використання сировини як вітчизняного, так і імпортного виробництва за умови відповідності стандартним вимогам якості та безпеки [15, 16].

Технологічний процес виробництва вершків має такі етапи: оцінка якості та приймання молока, очищення, охолодження, резервування, сепарування молока для отримання вершків, нормалізація за вмістом жиру, гомогенізація, пастеризація, охолодження, фасування та зберігання (рис. 1).

У сучасних технологічних лініях виробництва питних вершків найбільш розповсюдженими є клапанні гомогенізатори, для яких у класичних технологічних схемах зазначають режими гомогенізації. Дані для клапанних типів машин наведені в табл. 1 [17, 18].

Таким чином, із застосуванням клапанних гомогенізаторів у виробничих лініях вершків потрібно забезпечувати тиск до 17 МПа, що призводить до значних питомих енерговитрат – до 7 кВт·год/т. Це суттєво збільшує загальні енерговитрати на виробництво одиниці продукції, а отже, її собівартість [19, 20].

Для створення оновленої, скоригованої, технології виробництва питних вершків із застосуванням нових типів гомогенізаторів (струминного та пульсаційного) замість клапанного потрібно визначити послідовність технологічних процесів та їхні режимні параметри [21, 22]. Це сприятиме впровадженню більш ефективних гомогенізаторів у молочне виробництво, спрощенню їхньої інтеграції у наявні технологічні лінії підприємств.

Формулювання мети дослідження. Основною метою цієї статті є розробка нової технології виробництва питних вершків із застосуванням струминного та пульсаційного гомогенізаторів.

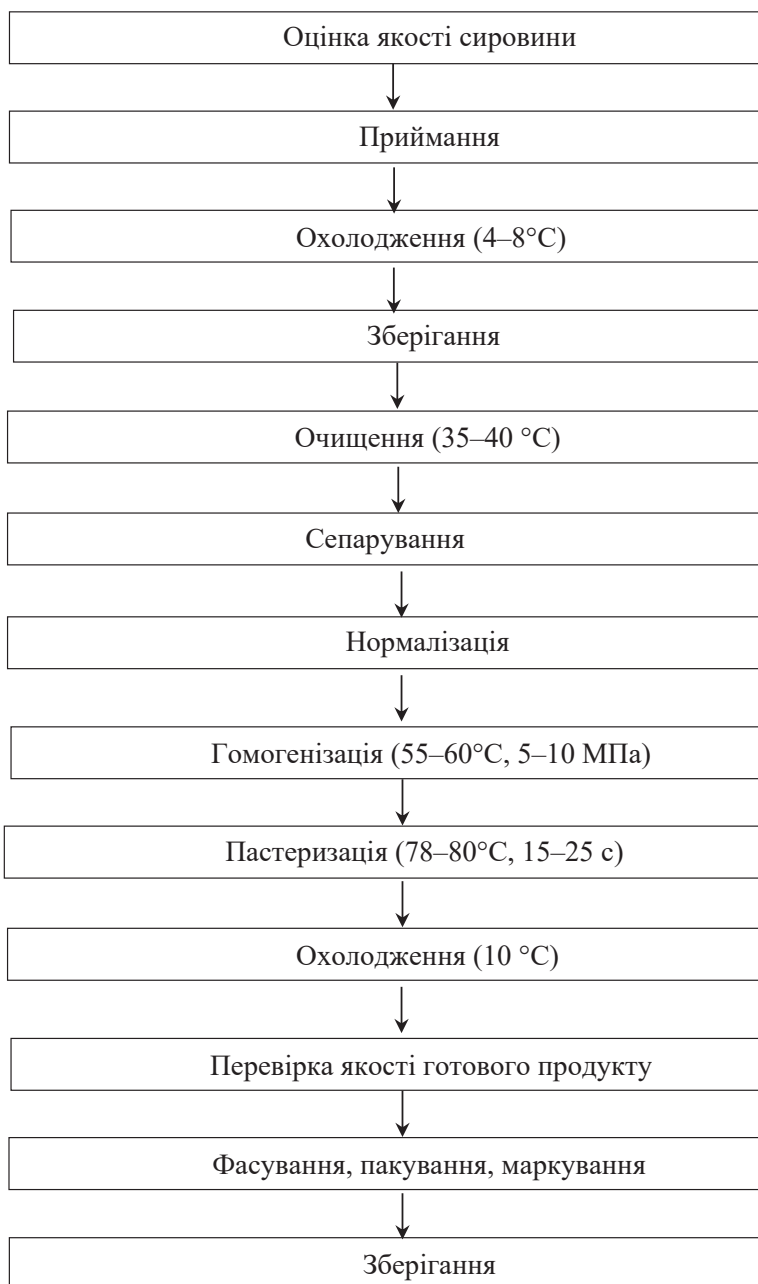


Рис. 1. Класична технологія виробництва питних вершків

Таблиця 1

Режими клапанної гомогенізації

Найменування продукту	Тиск, МПа	Температура, °C
1. Вершки пастеризовані з масовою часткою жиру Ж = (8, 10, 20, 35) %;	5,0...10,0	55...60
2. Вершки стерилізовані з масовою часткою жиру Ж > 10 %	11,0...17,0	135

Для реалізації поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

– визначити послідовність технологічних етапів виробництва питних вершків із використанням струминного та пульсаційного гомогенізаторів;

– встановити режимні параметри основних технологічних операцій у процесі виробництва питних вершків із застосуванням нових гомогенізаторів;

– виготовити експериментальні партії питного молока за розробленими технологічними схемами та провести оцінку відповідності їхньої якості чинним в Україні стандартам.

Основна частина. Технологічний процес виробництва питних вершків із використанням розроблених гомогенізаторів матиме такі етапи (рис. 2, 3): оцінку якості та приймання молока, очищення, охолодження, резервування, сепарування для отримання вершків, нормалізацію за вмістом жиру, гомогенізацію, пастеризацію, охолодження, фасування та зберігання.

Випробування якості питних вершків, виготовленого за розробленою технологією з використанням нових типів гомогенізаторів відбувалося відповідно до табл. 2.

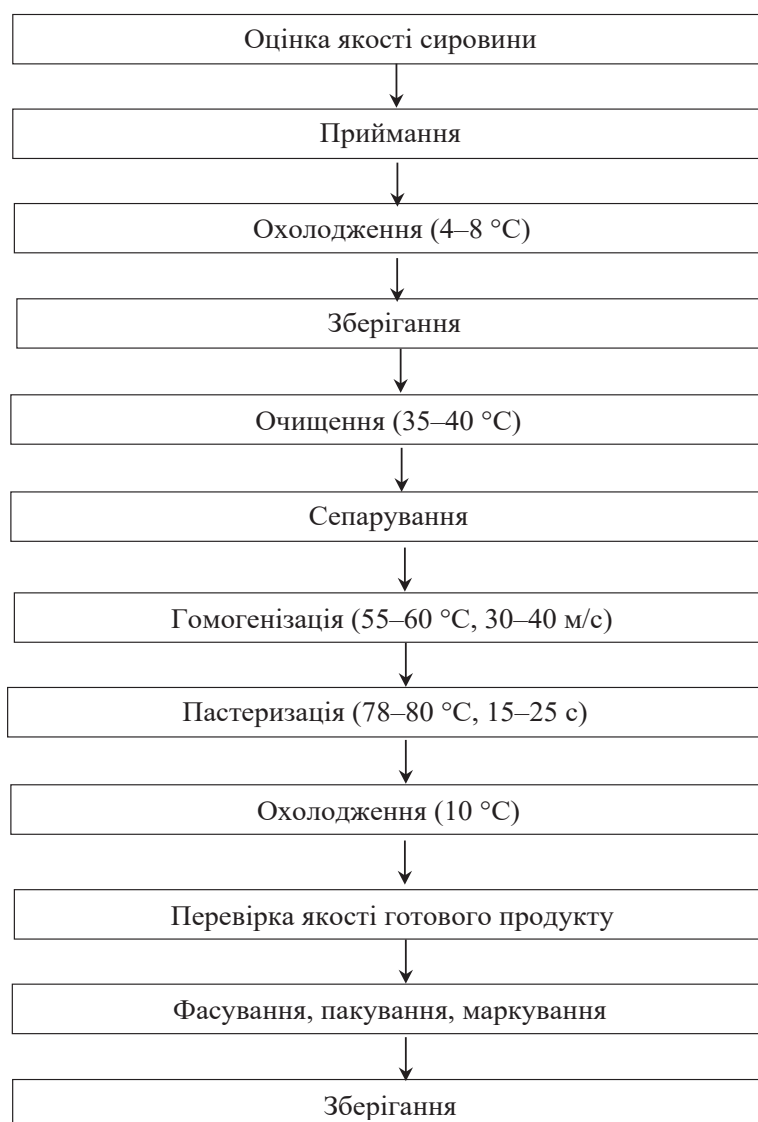


Рис. 2. Технологічні процеси виробництва питних вершків за використання струминного гомогенізатора

Питні вершки виготовлялися відповідно до опису та вимог, наведених вище. Сировиною для виготовлення продуктів було молоко коров'яче за ДСТУ 3662:2018 «Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови» жирністю не менше за 3,5 % [23, 24].

Таблиця 2

Показники випробування якості виготовлених питних вершків

Показник	Найменування стандарту
1. Зовнішній вигляд та консистенція	ДСТУ 7519:2014
2. Смак і запах	ДСТУ 7519:2014
3. Колір	ДСТУ 7519:2014
4. Масова частка загального жиру, %	ДСТУ ISO 2450:2007
5. Титрована кислотність, °T	ГОСТ 3624
6. Густина, кг/м ³	ДСТУ 6082:2009
7. Кількість мезофільних аеробних і факультативно анаеробних мікроорганізмів (кМАФАнМ)	ДСТУ 7357:2013
8. Бактерії групи кишкових паличок (БГКП), колі форми	ДСТУ 7357:2013, ДСТУ IDF 73A:2003
9. Патогенні мікроорганізми, зокрема Salmonella	ДСТУ IDF 93A:2003
10. Staphylococcus aureus	ГОСТ 30347-97

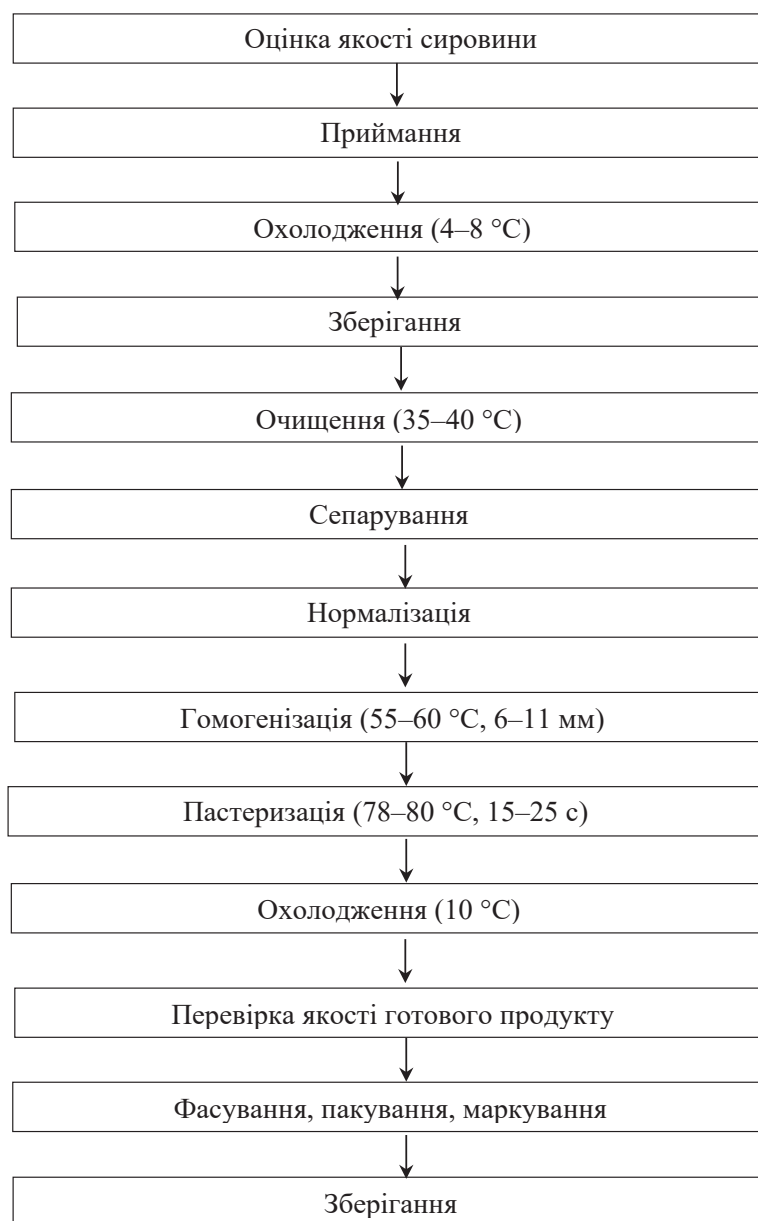


Рис. 3. Технологічні процеси виробництва питних вершків за використання пульсаційного гомогенізатора

З молока-сировини було виготовлено по 9 зразків питного молока в трьох партіях (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристика виробленого питного молока

Найменування	1-ша партія	2-га партія	3-тя партія	Усього
Об'єм молока, л	50	50	50	150
Об'єм виготовленого продукту, л	17,5	17,5	17,5	
Кількість зразків	3	3	3	9
Об'єм одного зразка, л	5,5	5,5	5,5	
Об'єм переданого продукту, л	16,5	16,5	16,5	49,5
Об'єм аналізованого продукту, л	16,5	16,5	16,5	49,5

За результатами аналізів, проведених у відділі аналітичних досліджень та якості харчової продукції Інституту продовольчих ресурсів НААН України, встановлено, що за органолептичними показниками: зовнішнім виглядом і консистенцією, смаком, запахом і кольором – виготовлене питне молоко повністю відповідає нормам.

За фізико-хімічними та мікробіологічними показниками – результати зведені в табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-хімічні та мікробіологічні показники виготовленого питного молока

Показник	Значення за зразками								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Жир, %	9,95	10,03	9,97	10,05	10,12	10,17	9,95	9,9	10,01
Кислотність, °	19	19	19	19	19	19	18	18	19
Густина, кг/м ³	1015	1015	1014	1014	1014	1013	1015	1014	1015
Мезофільні мікроорганізми (кМАФАнМ)	2·10 ³	2·10 ³	2·10 ³	1·10 ³	1·10 ³	1·10 ³	2·10 ³	2·10 ³	2·10 ³

Ось перефразований текст зі збереженням обсягу:

Бактерії та мікроорганізми, вміст яких не допускається чинними стандартами, у виготовлених партіях продукту виявлені не були.

Окрему увагу приділено стабільності жирності вершків, нормалізація яких здійснювалася за допомогою струминного гомогенізатора. Відхилення цього показника не перевищували межі +0,17–0,1 %, що свідчить про високу точність процесу нормалізації.

Таким чином, отримані питні вершки повністю відповідають чинним нормам і стандартам та можуть бути рекомендовані для впровадження у виробництво.

Висновки. Проведено аналіз застосування гомогенізації в сучасних технологічних схемах виробництва питних вершків ті розглянуто режими традиційної клапанної гомогенізації. Описано класичну технологію виготовлення питних вершків, на основі якої розроблено дві нові технології виробництва питного молока із використанням струминного та пульсаційного гомогенізаторів замість клапанного з урахуванням оптимальних режимів гомогенізації.

Було виготовлено партії молочної продукції із застосуванням розроблених гомогенізаторів. Випробування якості цих партій проведено у відділі аналітичних досліджень та оцінки якості харчових продуктів Інституту продовольчих ресурсів НААН України. Результати досліджень показали, що всі показники якості отриманого продукту із використанням новітніх гомогенізаторів повністю відповідають чинним стандартам.

Список використаних джерел

1. Rayner M., Dejmek P. Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry; CRC Press, Taylor & Francis Group 322. 2015. ISBN 9781466580435. DOI: 10.1201/b18436.
2. Håkansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trägårdh C., Bergenstahl B. Velocity measurements of turbulent two-phase flow in a high-pressure homogenizer model. *Chem. Eng. Commun.* 2013. Vol. 200. P. 93–114. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.691921>.
3. Yong A., Islam M., Hasan N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017. Vol. 35. P. 1–22. <https://doi.org/10.26776/IJEMM.02.04.2017.05>.
4. Wang X., Wang Y., Li F., Li L., Ge X., Zhang S., Qiu T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 2020, Vol. 226. P. 115838. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>.
5. Liao Y., Lucas D.A. Literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 2009. Vol. 64. P. 3389–3406. DOI: 10.1016/J.CES.2009.04.026.
6. Postelmans A., Aernouts B., Jordens J., Van Gerven T., Saeys W. Milk homogenization monitoring: Fat globule size estimation from scattering spectra of milk. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2020. Vol. 60. P. 102311. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102311.
7. Valencia-Flores D., Hernández-Herrero M., Guamis B., Ferragut V. Comparing the Effects of Ultra-High-Pressure Homogenization and Conventional Thermal Treatments on the Microbiological, Phys, and Chem Quality of Almond Beverages. *J. Food Sci.* 2013, Vol. 78. P. 199–205. <https://doi.org/10.1111/17503841.12029>.
8. Ковальов О. О., Самойчук К. О., Фучаджи Н. О. Методологія дослідження параметрів струминних гомогенізаторів молока. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2013. Вип. 13. Т. 1. С. 15. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-15.
9. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Розробка технології виробництва питного молока із застосуванням струминного та пульсаційного гомогенізаторів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Том 14, № 2. С. 10. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-10>.
10. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : зб. наук. праць*. Мелітополь : ТДАТУ, 2011. Вип. 11. Т. 6. С. 77–83.
11. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф. Розробка експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання / ТДАТУ*; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1.
12. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Івженко А. О., Левченко Л. В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : зб. наук. праць*. Мелітополь : ТДАТУ, 2016. Вип. 16. Т. 1. С. 9–15.
13. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Визначення параметрів струминного та пульсаційного гомогенізаторів молока при їх промисловому застосуванні. *Праці ТДАТУ*. 2024. Вип. 24. Т. 1. С. 53–62. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-3.
14. Самойчук К. О., Ковальов О. О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази. *Обладнання та технології харчових виробництв : зб. наук. праць. Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського*. Донецьк : ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 42–46.
15. Samoichuk K., Yalpachyk V., Kholobtseva I., Dmytrevskiy D., Chervonyi V. Design Improvement of the Rotary-Pulsation Device by Resonance Phenomena. In: Ivanov V., Pavlenko I., Edl M., Machado J., Xu J. (eds.). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2024. P. 74–83.
16. Самойчук К. О., Бойко В. С., Олексієнко В. О., Петриченко С. В., Тарасенко В. Г., Паляничка Н. О., Верхоланцева В. О., Ковальов О. О., Задосна Н. О. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв : підручник. Київ : ПроФКнига, 2020. 428 с.
17. Самойчук К. О., Ковальов О. О., Султанова В. О. Якість та енергетична ефективність процесу струминної гомогенізації молока з роздільною подачею вершків. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : зб. наук. праць*. Мелітополь : ТДАТУ, 2015. Вип. 15. Т. 1. С. 240–248.
18. Wang X., Wang Y., Li F., Li L., Ge X., Zhang S., Qiu T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 2020. Vol. 226. P. 115838. DOI: 10.1016/j.ces.2020.115838.



19. Morales J., Watts A., McConville J. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 2016. Vol. 22. P. 165–213. DOI: 10.1007/978-3-319-42609-9_4.
20. Ялпачик В. Ф., Загорко Н. П., Паляничка Н. О., Буденко С. Ф., Самойчук К. О., Кюрчев С. В., Верховланцева В. О., Олексієнко В. О., Циб В. Г. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва : лабораторний практикум. Мелітополь : Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. 274 с.
21. Acharyaa S., Mishrab V., Patelc J. Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review. *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2341. P. 030025. <https://doi.org/10.1063/5.0051818>.
22. Ciron C., Gee V., Kelly A., Auty M. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts. *Int. Dairy J.* 2010. Vol. 20. P. 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>.
23. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR J. Eng.* 2014. Vol. 4. P. 1–8. <https://doi.org/10.9790/3021-04540108>.
24. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). In *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011. P. 761–764. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>.

Дослідження виконано в рамках науково-технічної роботи «Розроблення технології переробки молочних продуктів з використанням нових типів гомогенізаторів», яка фінансувалась МОН за договором № ДЗ/132 – 2022.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.

S. Kiurchev, K. Samoichuk
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

DEVELOPMENT OF DRINKING CREAM PRODUCTION TECHNOLOGY USING STREAM AND PULSATION HOMOGENIZERS

Summary

To increase the energy efficiency of production processes for the production of drinking cream, it is necessary to solve the issue of significant energy costs for homogenization. For this purpose, the use of energy-saving stream and pulsation homogenizers is proposed. However, before their implementation at enterprises, it is important to adjust the existing technological scheme for the production of cream and experimentally confirm its effectiveness. The main task of this work is to develop an updated technology for the production of drinking cream using stream and pulsation homogenizers. To achieve this goal, the work defines the procedure for performing technological operations in the production of drinking cream using the proposed homogenizers, and also establishes the corresponding operating parameters of these processes. The main stages of the technological scheme for the production of drinking cream include: quality control of raw materials, milk reception, cooling, storage, cleaning, homogenization, pasteurization, further cooling, control of finished products, packaging, labeling and storage. Batches of drinking cream were manufactured in accordance with the developed technological schemes and checked for compliance of their characteristics with current state standards. Dairy products were produced using the latest homogenizers.

According to the results of research conducted in the Department of Analytical Control and Quality Assessment of Food Products of the Institute of Food Resources of the National Academy of Sciences of Ukraine, it had been established that the organoleptic characteristics, such as appearance, consistency, taste, smell and color, of the obtained drinking cream fully comply with regulatory requirements. The tests did not reveal bacteria and microorganisms, the presence of which is not allowed by current standards. Special attention was paid to the stability of milk fat content, the normalization of which was carried out using a stream homogenizer. Deviations of this indicator did not exceed ± 0.17 – 0.1% , which indicates high accuracy of normalization. Thus, drinking cream obtained using this technology fully comply with current regulatory requirements and can be recommended for industrial production.

Keywords: technology, homogenization, technological scheme, dairy cream, pulsation homogenizer, stream homogenizer.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-15>

УДК 620.95:628.353

О. Г. Скляр, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

А. С. Комар, інженер

ORCID: 0000-0001-7037-8402

В. Д. Акулов, аспірант

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

Анотація. У статті розглянуто сучасний стан виробництва й використання біогазу в Україні з акцентом на перспективи оптимізації біогазових установок та ефективну утилізацію відходів птахівництва. Проаналізовано основні технологічні аспекти вдосконалення роботи біогазових комплексів, зокрема впровадження високоефективних систем очищення біогазу, оптимізацію процесів ферментації та застосування цифрових технологій для управління установками. Особливу увагу приділено використанню відходів птахівництва як перспективної сировини для біогазових станцій, що дає змогу зменшити екологічне навантаження та підвищити економічну ефективність біоенергетичних проєктів.

Ключові слова: біогаз, біогазові установки, утилізація відходів, оптимізація процесів, біоенергетика, очищення біогазу, птахівництво.

Постановка проблеми. В умовах зростаючої енергетичної кризи та стрімкого підвищення цін на викопні енергоносії Україна стоїть перед необхідністю переходу до відновлюваних джерел енергії. Біогаз, отриманий шляхом анаеробного зброджування органічних відходів, є одним із найперспективніших альтернативних енергоносіїв, який сприяє як утилізації біомаси, так і зниженню негативного впливу на довкілля [1, 2]. Проте поточна технологічна база біогазових установок в Україні має низку недоліків, що обмежують їх ефективність. Серед основних проблем – недостатня автоматизація технологічного процесу, високі енергетичні витрати на підтримання оптимальних умов ферментації та неефективність теплових систем, зокрема в контексті підігріву сировини [3, 4]. Особлива складність виникає під час переробки відходів птахівництва, зокрема пташиного посліду, які характеризуються високою неоднорідністю та змінним вмістом органічних речовин [5]. Відсутність сучасних технологій, здатних забезпечити стабільну ферментацію та ефективну утилізацію цих відходів, призводить до зниження виходу метану, що обмежує можливості заміщення імпортного природного газу біогазом [6]. Крім того, недосконала нормативно-правова база та відсутність комплексної підтримки з боку держави стримують розвиток галузі, що позначається як на технічних, так і на економічних показниках. Таким чином, вирішення проблем оптимізації біогазових установок, удосконалення технологій рекуперації тепла [7], автоматизації процесів та інтеграції сучасних методів утилізації птахівницьких відходів є надзвичайно важливим завданням для забезпечення енергетичної незалежності України та її інтеграції у глобальний ринок відновлюваної енергії.

Аналіз останніх досліджень. Оптимізація виробництва біогазу за допомогою сучасних технологій детально досліджується як українськими, так і зарубіжними вченими, це питання аналізували Максимов М., Жадан С., Шевчук В., Ратушняк Г., Піцик В., Голуб Н. Б., Козловець О.,



Nielfa A., Schlegel M., Brone I. [8–16] Останні наукові дослідження в цій галузі зосереджені на підвищенні ефективності анаеробного зброджування, покращенні систем очищення біогазу та застосуванні сучасних методів моделювання процесів.

Дослідження [9], опубліковане в Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, присвячене оптимізації виробництва біогазу з використанням штучних нейронних мереж. Автори розробили модель, яка дає можливість прогнозувати кумулятивний вихід біогазу та метану в процесі анаеробного зброджування відходів, враховуючи такі параметри, як гідравлічний час утримання, рН середовища та температура. Застосування цієї моделі сприяє підвищенню ефективності біогазових установок шляхом оптимізації робочих умов.

У статті [10] розглядається утилізація пташиного посліду в рамках безвідходної технології. Автори аналізують доцільність використання пташиного посліду для виробництва біогазу й отримання органічних добрив, підкреслюючи важливість збереження азоту та інших поживних речовин у кінцевому продукті.

Дослідження Жадана С. [11] присвячене біотехнології переробки відходів птахівництва, зокрема курячого посліду, з метою отримання біогазу. У роботі розглядаються процеси метанового зброджування та фактори, що впливають на ефективність цього процесу, зокрема вміст амонійного азоту та сульфідів, які можуть спричиняти інгібування біохімічних реакцій.

Ці дослідження підкреслюють важливість комплексного підходу до оптимізації біогазових установок, включно з удосконаленням технологій переробки відходів птахівництва, застосуванням сучасних методів моделювання й автоматизацією процесів, а також модернізацією систем очищення біогазу для підвищення його якості й ефективності використання.

Формулювання мети статті. Метою статті є визначення ключових технологічних аспектів оптимізації біогазових установок, а також обґрунтування ефективних методів утилізації відходів птахівництва для підвищення енергоефективності й екологічної безпеки.

Основна частина. У сучасних умовах зростання цін на викопні енергоносії та загострення екологічної ситуації виробництво біогазу набуває особливої актуальності для України [17]. Біогаз, який отримують шляхом анаеробного зброджування органічних відходів, дає змогу не лише утилізувати біомасу, але й забезпечити енергетичну незалежність країни та знизити викиди парникових газів. Особливо перспективним є використання біогазових установок на базі агропромислової сировини, серед якої важливе місце посідають відходи птахівництва [18]. Розвиток ефективних технологій утилізації пташиного посліду сприяє підвищенню виходу біогазу, отриманню якісних органічних добрив і вирішенню екологічних проблем, пов'язаних із накопиченням відходів у сільській місцевості [19, 20].

Наразі в Україні функціонує близько 60 біогазових установок із загальною потужністю понад 90 МВт. Основними джерелами сировини є гній тваринництва, аграрні залишки, відходи харчової промисловості та побутові органічні відходи. За оцінками, потенціал виробництва біогазу міг би замінити до 59 % споживання природного газу, що свідчить про величезні можливості галузі. Однак масштабному впровадженню технологій перешкоджають високі капіталовкладення, недостатня автоматизація процесів і обмежена інфраструктура для збору сировини [21, 22].

Підвищення ефективності анаеробного зброджування – ключовий напрям оптимізації біогазових установок. Сучасні системи автоматизації з використанням програмованих логічних контролерів дають змогу в режимі реального часу контролювати температуру, рН та швидкість завантаження субстрату, що забезпечує стабільну роботу метантенків і максимальний вихід метану [23, 24]. Попередня підготовка сировини, включно з подрібненням, змішуванням і регулюванням вологості, є невід'ємною умовою для досягнення рівномірного розподілу органічних речовин і оптимального контакту з метаноутворювальними мікроорганізмами.

Оптимізація біогазових установок – це комплекс заходів, спрямованих на підвищення ефективності виробництва біогазу, зниження енергозатрат, покращення якості кінцевого продукту та забезпечення економічної доцільності підприємства. Існує кілька основних напрямів оптимізації [25–27].

Технічна оптимізація. Перше, що потрібно для оптимізації роботи, – визначити, наскільки фактичні параметри роботи відрізняються від параметрів, зазначених у паспорті. Установку запускають у тестовому режимі, коли триває збір даних: час загальної роботи, період функціонування з повним і неповним завантаженням, години простою тощо [28]. На основі отриманих даних проводиться аналіз функціонування, фіксуються відхилення від норми, визначаються слабкі місця і розриви в технологічній схемі. Далі визначаються перелік і послідовність заходів, завдяки яким установка для біогазу виводиться на оптимальні значення:

- регулярна профілактика всього обладнання, задіяного в схемі отримання біогазу;
- встановлення датчиків, що відстежують роботу обладнання та фіксують будь-який збій;
- своєчасне виконання поточного ремонту;
- формування запасів комплектуючих, особливо за важливими позиціями.

Метою оптимізації є встановлення такої системи, яка забезпечувала б рівномірне завантаження обладнання та його чітку роботу, зокрема на сусідніх ділянках експлуатації. Для реалізації такої мети рекомендується використовувати обладнання з мінімальним рівнем зносу, тобто з невеликою кількістю рухомих частин.

Енергетична оптимізація. Другий спосіб підвищити ефективність застосування установки для біогазу – провести енергетичний аудит, визначити фактичне споживання енергії та способи його зниження [29].

Під час аналізу першого етапу слід зіставити обсяг споживання енергії з такими показниками: якістю та кількістю підготовленого субстрату, схемою подачі сировини в реактор, якістю попередньої підготовки (компостування) рослинної сировини, а також втратами, що виникають під час компостування.

Далі – аналіз етапу зброджування й розкладання субстрату, визначення, наскільки оптимально працює біогазова установка [30]: періодичність завантаження субстрату, якість розкладання в біореакторі, кількість і якість біогазу, що виділяється, стабільність процесів у ферментері, можливі місця витоків біогазу.

Під час аналізу енергоефективності слід також враховувати ККД біогазу в разі його використання для вироблення теплової та електричної енергії, для отримання газомоторного палива. Варто також узяти до уваги налаштування й особливості використовуваних двигунів внутрішнього згоряння, періодичність їх обслуговування.

Далі потрібно визначити можливості для використання сировини, що залишилася після розкладання: потенційний додатковий об'єм отримання біогазу за повторного завантаження, використання як мінерального добрива.

Один з основних моментів – правильний розподіл енергії, споживаної установкою під час процесу виробництва біогазу. Для отримання повної картини важливо розкласти енергоспоживання кожного етапу роботи біоустановки: перемішування, подача в реактор, обігрів реактора, живлення електростанції тощо [31]. Оптимізація має проводитися на кожному етапі за допомогою підстроювання інтенсивності з урахуванням особливостей сировини, застосовуваної технології зброджування, використання попередньої підготовки сировини.

Нерідким випадком у роботі БГУ є неодноразова рециркуляція сировини. У певних обсягах цей процес дає змогу отримати додатковий вихід біогазу. Однак тут варто зіставити об'єм виходу біогазу з витратами на повторну переробку й унеможливити зайве перекачування.

Оптимізація на етапі проєктування. Існують різні види біогазових установок. При цьому ефективна робота будь-якої біогазової установки досягається не тільки шляхом підлаштування

самої БГУ. Робота з оптимізації процесу отримання біогазу починається ще на етапі проектування. Тут потрібно вирішити два завдання.

Перше – важливо вбудувати реактор у технологічний ланцюжок таким чином, щоб забезпечити оптимальну роботу кожного етапу [29]. Друге – кожен агрегат має бути підібраний за такими параметрами, які забезпечать єдину технологічну систему (рис. 1), а не випадковий набір окремих елементів.

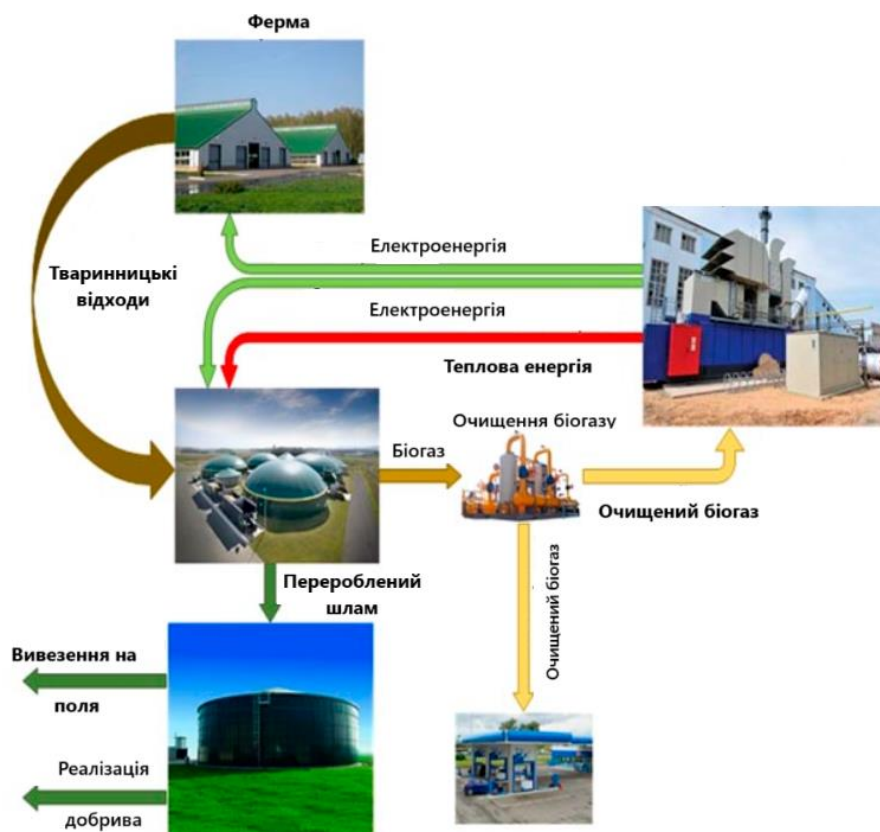


Рис. 1. Технологічна схема виробництва і використання біогазу та продуктів переробки

Оптимізація в роботі. Ще один момент у правильному налаштуванні біогазової установки – виявлення найменш ефективної стадії в роботі, підвищення ефективності. Причому в цьому випадку підвищення ефективності може здійснюватися шляхом підстроювання попередньої або наступної стадії, а також шляхом зміни складу субстрату.

Отже, комплексний підхід до оптимізації біогазових установок, що передбачає вдосконалення технологічного процесу, розширення сировинної бази, модернізацію обладнання й інтеграцію цифрових технологій, дасть змогу значно підвищити ефективність виробництва біогазу [18, 21]. Це сприятиме як енергетичній незалежності, так і екологічній безпеці України, відкриваючи нові можливості для інтеграції на європейський ринок відновлюваної енергії."

Сучасна модернізація біогазових установок орієнтована на використання інноваційних систем рекуперації тепла та когенераційних технологій. Упровадження парокompресійних теплових насосів дає можливість ефективно використовувати тепло, що виділяється в процесі ферментації, для підігріву субстрату, що, зі свого боку, знижує загальні енергетичні витрати. Модернізація теплообмінників (мембранних, кожухотрубних, пластинчастих, спіральних)

сприяє мінімізації тепловтрат, а використання інтегрованих когенераційних установок забезпечує досягнення коефіцієнта корисної дії до 85 %.

Упровадження сучасних систем дистанційного моніторингу й управління є критично важливим для підвищення ефективності біогазових установок. Сучасні датчики дають можливість контролювати концентрацію ключових компонентів біогазу, а саме H_2S , CO_2 і вологи, а системи SCADA та IoT забезпечують оперативне регулювання технологічних процесів. Використання алгоритмів машинного навчання сприяє прогнозуванню відхилень від оптимальних режимів роботи, що знижує експлуатаційні витрати та підвищує надійність установок.

Для подальшого розвитку біогазових технологій в Україні важливо створити сприятливе інвестиційне середовище [22]. Запровадження державних програм стимулювання, «зеленого тарифу», грантових програм і пільгового кредитування дасть змогу залучити як внутрішні, так і закордонні інвестиції. Створення чіткої нормативно-правової бази, розробка стандартів якості біометану й удосконалення систем сертифікації сприятимуть інтеграції українського ринку в європейський енергетичний простір.

Однією з найбільш перспективних галузей застосування біогазових технологій є переробка відходів птахівництва. Пташиний послід завдяки своїй високій біологічній активності та місткості органічних речовин є відмінною сировиною для виробництва біогазу. Сучасні технології утилізації птахівницьких відходів передбачають такі підходи, як попереднє механічне подрібнення, регулювання вологості та коферментація з іншими видами органічних відходів [11, 24]. Завдяки оптимізації процесів ферментації пташиного посліду можна досягнути високих виходів метану, що робить цей напрям особливо привабливим для великих птахофабрик. Крім того, ефективна переробка пташиного посліду сприяє отриманню високоякісних органічних добрив [32], що може бути використано для покращення якості ґрунтів у сільському господарстві. Використання сучасних біогазових установок із спеціальними адаптованими режимами для птахівницьких відходів дає змогу забезпечити постійне виробництво біогазу з огляду на специфіку цієї сировини, що часто характеризується високою концентрацією органічних речовин і неоднорідністю.

Розширення біогазової індустрії має стратегічне значення для України. Упровадження сучасних технологій оптимізації, що базуються на автоматизації, модернізації обладнання та розвитку нормативно-правової бази, дасть можливість значно підвищити ефективність виробництва біогазу. Використання біометану як альтернативного джерела енергії сприятиме зниженню залежності від імпорتنих енергоносіїв, що має велике значення для енергетичної незалежності країни. Розбудова інфраструктури, стимулювання інвестицій і підтримка з боку держави сприятимуть створенню нових робочих місць, особливо в сільських регіонах, і розвитку місцевої економіки. Інтеграція українських технологій із європейськими стандартами якості відкриє можливості для експорту біометану, що стане додатковим джерелом доходу та підвищить конкурентоспроможність галузі на глобальному ринку відновлюваної енергії.

Висновки. Комплексна оптимізація біогазових установок в Україні, що передбачає вдосконалення технологічних процесів, модернізацію обладнання, автоматизацію і розвиток нормативно-правової бази, є ключовою умовою для підвищення якості біогазу та зниження енергетичних витрат. Особливу увагу слід приділити ефективним технологіям утилізації відходів птахівництва, адже пташиний послід є перспективною сировиною для виробництва біогазу. Розробка оптимальних режимів ферментації для птахівницьких відходів, використання коферментації, модернізація систем рекуперації тепла та впровадження сучасних методів контролю значно підвищать вихід метану й економічну ефективність біогазових установок. Успішна інтеграція цих заходів сприятиме енергетичній незалежності України, зниженню негативного екологічного впливу та відкриттю нових ринкових можливостей на глобальному ринку відновлюваної енергії.

Список використаних джерел.

1. Болтянський Б. В. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві : підручник / Б. В. Болтянський та ін. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2020. 410 с.
2. Біотехнологія відходів тваринницьких підприємств : монографія / Захаренко М. О. та ін. Київ, 2015. 380 с.
3. Geletukha G.G., Zheliezna T.A., Drahniyev S.V., Kucheruk P.P. Prospects for the production of advanced biofuels in Ukraine. *Energy Technol. Resour. Sav.* 2023. Vol. 76 (3). P. 71–82. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.06>.
4. Болтянський Б., Сиротюк С., Коробка С., Стукалець І. Аналіз методів удосконалення процесу переробки органічних відходів тваринництва у метантенках. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 14 (1). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-6>.
5. Войтов В. А. Аналіз технологій утилізації відходів птахівництва за кордоном. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь : ТДАТУ, 2019. Вип. 19. Т. 4. С. 100–109. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-100-109.
6. Григоренко С. М. Способи переробки пташиного посліду для виробництва теплової енергії. *Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки»*. МОН України, НУБіП України, ЖАТФК. Київ, Житомир, 2022. С. 126–129.
7. Болтянський Б. В. Аспекти вдосконалення технології виробництва біогазу. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 1. С. 89–100. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-1-6.
8. Komar A.S. Methodological approaches to the optimization of machine technologies of animal waste disposal. *Scientific research in the modern world. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference*. Perfect Publishing. Toronto, Canada. 2023. P. 194–198.
9. Komarysta B., Dzhygyrey I., Bendiyuh V., Yavorovska O., Andreeva A., Berezenko K., Meshcheriakova I., Vovk O., Dokshyna S., & Maidanskyi I. Optimizing biogas production using artificial neural network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2. No. 8 (122). P. 53–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276431>
10. Hajiyev R.M., Saidov R., Mammadov G., Allahverdiyeva G., & Taghiyev U. Utilization of poultry droppings in terms of non-waste technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. Vol. 3. No. 10 (117). P. 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258493>.
11. Біотехнологія утилізації відходів птахівництва з одержанням біогазу : автореф. дис. ... кандидата технічних наук 03.00.20 «Біотехнологія» / С. О. Жадан. *Національний університет біоресурсів і природокористування України*. Київ.
12. Maksymov M.M., Beglov K.V., Maksymova O.B., Maksymov O.M. The method of finding the most natural structure of a biotank power plant. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2020. Iss. 1 (60). P. 82–95. DOI: 10.15276/opu.1.60.2020.09.
13. Golub N., Kozlovets O. Technology of anaerobic-aerobic purification of wastewater from nitrogen compounds after obtaining biogas. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2016. Vol. 10. No. 3. P. 35–40.
14. Brone I., Allen E., Murphy J. Evaluation of the BMP from multiple waste streams for a proposed community scale anaerobic digestion. *Fuel*. Kidlington: Elsevier Sci Ltd. 2011. Vol. 90. No. 7. P. 2404–2412.
15. Schlegel M. Essential technical parameters for effective biogas production *Agronomy Research*. 2008. No. 6 (Special issue). P. 341–348.
16. Nielfa A. Theoretical methane production generated by the codigestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*. 2015. Vol. 5. No. 1. P. 14–21.
17. Пришляк Н. В., Токарчук Д. М., Паламаренко Я. В. Забезпечення енергетичної та екологічної безпеки держави за рахунок біопалива з біоенергетичних культур і відходів. Вінниця : ТОВ «Консоль», 2019. 248 с.
18. Комар А. С. Шляхи підвищення якості виробництва біодобрив. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2024. Вип. 14 (2). <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-2>.
19. Komar A. Definition of priority tasks for agricultural development. *Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference. "Multidisciplinary research"*. Bilbao, Spain 2020. P. 431–433.
20. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23. Т. 1. С. 104–114. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115.
21. Акулов В. Д. Шляхи підвищення енергетичної ефективності біогазової установки. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 2. С. 27–36. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-3.



22. Гелетука Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва 224 та використання біогазу в Україні : аналітична записка БАУ № 4. Біоенергетична асоціація України, 2013. 22 с.
23. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. Lublin, 2014. Vol. 16. No. 2, b. P. 183–188.
24. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Біоконверсні технології прискореної переробки відходів тваринництва в екологічно безпечні добрива. *Науковий вісник ТДАТУ*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. № 3. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-3.
25. Xiao G.Y. and Ganczarzyk J. Structural features of biomass in a hybrid MBBR reactor. *Environ. Technol.* 2006. Vol. 27. P. 289–298. <https://doi.org/10.1080/09593332708618643>.
26. Skliar O. Directions of increasing the efficiency of energy use in livestock. *Current issues of science and education*. Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference. Rome. 2021. P. 171–176.
27. Скляр О. Г. Теоретичні дослідження режимів і параметрів метантенку біогазової установки. *Науковий вісник ТДАТУ* [Електронний ресурс]. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. Вип. 10, том 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-14.
28. Скляр Р. В. Аналіз методів визначення часу перебування та навантаження на метантенк. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2014. Вип. 148. С. 405–412.
29. Комар А. С. Удосконалення конструкції біогазової установки з рекуперацією теплоти зброженої біомаси. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24. Т. 3. С. 62–70. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-5.
30. Скляр О. Г., Комар А. С. Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. *Праці ТДАТУ : наукове фахове видання*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 1. С. 104–114. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115.
31. Куріс Ю. В. Біоенергетичні установки. Обладнання та технології переробки органомісних енергоресурсів : підручник [для наук, інжен. – техн. прац. та фахівців з альтерн. джерел енергії, як навч. посібн. для студ. вищих навч. закл.]. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 348 с.
32. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Аналіз технологій підготовки залишків після анаеробного бродіння. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Харків, 2015. Вип. 156. С. 649–655.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.

O. Skliar, R. Skliar, A. Komar, V. Akulov
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF OPTIMIZATION OF BIOGAS PLANTS

Summary

The article discusses the current state of biogas production and use in Ukraine, with a focus on the prospects for optimizing biogas plants and efficient utilization of poultry waste. The main technological aspects of improving the operation of biogas complexes are analyzed, including the introduction of highly efficient biogas treatment systems, optimization of fermentation processes, and the use of digital technologies for plant management. Particular attention is paid to the use of poultry waste as a promising raw material for biogas plants, which reduces the environmental burden and increases the economic efficiency of bioenergy projects. Comprehensive ways to increase the productivity of biogas plants are proposed, including the use of multi-stage gas purification, improvement of organic waste processing systems, and the use of innovative materials for biofilters. Comprehensive optimization of biogas plants in Ukraine, including process improvement, equipment modernization, automation and development of the regulatory framework, is a key condition for improving biogas quality and reducing energy costs. Particular attention should be paid to efficient technologies for the utilization of poultry waste, as poultry manure is a promising feedstock for biogas production. The development of optimal fermentation regimes for poultry waste, the use of cofermentation, the modernization of heat recovery systems and the introduction of modern control methods will significantly increase the methane yield and economic efficiency of biogas plants. The successful integration of these measures will contribute to Ukraine's energy independence, reduce negative environmental impacts, and open up new market opportunities in the global renewable energy market.

Keywords: biogas, biogas plants, waste utilization, process optimization, bioenergy, biogas purification, poultry farming.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-16>

УДК 631.362.6

С. П. Степаненко, д-р техн. наук

В. Г. Мироненко, д-р техн. наук

С. П. Погорілий, д-р техн. наук

А. Я. Кузьмич, канд. техн. наук

В. О. Швидя, канд. техн. наук

І. С. Попадюк, мол. наук. співр.

Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8331-4632

ORCID: 0000-0002-1227-2471

ORCID: 0000-0002-9701-2678

ORCID: 0000-0003-3102-0840

ORCID: 0000-0002-8113-2173

ORCID: 0000-0001-5138-9499

АНАЛІЗ ТА РОЗВИТОК МОДЕЛЕЙ ВІБРАЦІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗЕРНІВКИ В ПРОЦЕСАХ СЕПАРУВАННЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Удосконалення технологічного процесу підготовки зернового матеріалу та технічних пристроїв на базі узагальнення наявних математичних моделей процесів вібраційного розділення є актуальною задачею. Метою досліджень є побудова математичної моделі для часткового випадку вібраційного переміщення зернівки в процесах сепарування з урахуванням повздовжнього переміщення зернового матеріалу. Дослідження проведено з використанням методів математичного моделювання, в основі яких формалізований опис у вигляді диференціальних рівнянь, нестационарного процесу сепарування зернових матеріалів на вібраційній поверхні сепаратора з урахуванням повздовжнього переміщення. У результаті проведених досліджень сформовано математичний опис процесу вібраційного переміщення зернівки в процесах сепарування зернових матеріалів на коливній поверхні сепаратора з урахуванням повздовжнього переміщення зернівки у вигляді математичної моделі для визначення розподілу траєкторій руху матеріалу за довжиною опорної поверхні. Отримані результати досліджень указують на складність математичного моделювання процесів сепарування зернових матеріалів і відсутність загального підходу до вирішення проблем взаємодії твердих тіл обмежених розмірів із шорсткою поверхнею та між собою. Незважаючи на це, деякі роботи присвячено аналізу різних режимів руху часток, як-от ковзання без перекошування, перекошування без ковзання та їх поєднання. Для подальшого розвитку досліджень необхідно вдосконалити математичні моделі та розширити аналіз режимів руху часток для врахування більш широкого спектру сценаріїв. Перспективним є вивчення взаємодії твердих тіл обмежених розмірів із шорсткою поверхнею з урахуванням різних форм тіл і різних типів коливань поверхні, які дозволять краще узгоджувати теоретичні результати з експериментальними даними.

Ключові слова: рівняння рівноваги, сили тертя, зерновий матеріал, математична модель, переміщення, швидкість.

Постановка проблеми. Попереднє очищення свіжозібраного зернового матеріалу, який має велику кількість бур'янів та зазвичай підвищену вологість, є найважливішою технологічною операцією в післязбиральному обробленні зерна. Численні дослідження показують, що попередня підготовка зернового матеріалу перед подачею на основні органи машин підвищує ефективність подальшого процесу сепарування. Пошук математичних моделей, які описують даний процес, показав, що існують технічні рішення для здійснення попередньої підготовки зернового матеріалу, а також моделі, які частково описують цей процес. Тому вдосконалення технологічного процесу підготовки зернового матеріалу та технічних пристроїв на базі уза-

гальнення наявних математичних моделей процесів вібраційного розділення є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема моделювання руху частинок у потоці зернового матеріалу є важливою в контексті процесу вібротранспортування, а також очищення та розділення неоднорідних сумішей [1–3]. Ці процеси відіграють велику роль у таких галузях промисловості, як видобуток вугілля, охорона навколишнього середовища та перероблення відходів АПК, а також сільське господарство та харчова промисловість, особливо враховуючи великий обсяг матеріалів, що залучені у ці процеси [4–5]. Математична модель, розроблена належним чином, може бути використана для підтримки цих процесів, передбачаючи поведінку оброблюваного матеріалу під час їх перебігу.

Такі якості, як форма, текстура поверхні та маса частинок, неодмінно пов'язані з їх гідродинамічними властивостями [6; 8–10]. Це дозволяє використовувати їх як дискримінаційні ознаки для розділення частинок схожих розмірів, що не можна повністю досягти іншими засобами. Цей метод, відомий як вібраційне розділення, особливо важливий тоді, коли між бажаним матеріалом та відходами відбуваються значні відмінності у формі та масі, а також спостерігаються різні розміри частинок [7; 11–13]. Це часто має місце в сільському господарстві (наприклад, зерно порівняно з оболонками та шкаралупою), а також за сортування частково біомаси для виробництва відновлювальної енергії та управління відходами [4; 8; 16]. Із цієї причини вібраційне розділення оцінюється як основний та додатковий метод розділення.

Складність рівнянь гідродинаміки значно ускладнює будь-який теоретичний опис процесів вібраційного транспортування та розділення. Таким чином, практично обов'язковою є база будь-якої моделі на експериментально вимірних параметрах, як-от критична швидкість. Проте справедливе порівняння можливе лише між різними дослідженнями та різними експериментальними умовами, коли надається повний безрозмірний аналіз.

Слід зазначити, що в проведених дослідженнях [8–10] оцінено вплив вологості, розміру частинок та швидкості повітря на ефективність розділення. Хоча автори заявили, що їх результати дозволяють розраховувати параметри для різних складових частинок, вони не навели жодних прикладів таких розрахунків.

Набагато кращим теоретичним фундаментальним дослідженням є робота [17], де надано опис загальної моделі циркуляції (GCM) як складної системи багатодисперсного двофазного потоку повітря – тверде тіло, що враховує силу тяжіння, тертя та опір повітряного потоку, але не враховано кут введення матеріалу в потік.

Це було виправлено Б. І. Котовим і С. П. Степаненком [6], які запропонували модель взаємодії між частинкою та масовим потоком, виражену у вигляді набору диференціальних рівнянь, із частковим описом твердого тіла.

Комп'ютерне моделювання є визнаним методом у дослідженнях багатодисперсних середовищ. Приклад такого підходу в контексті оброблення сільськогосподарської продукції можна знайти, наприклад, у праці [18].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета дослідження – побудова математичної моделі для часткового випадку вібраційного переміщення зернівки в процесах сепарування з урахуванням повздовжнього переміщення зернового матеріалу.

Результати дослідження. Розглядається проблема переміщення твердого тіла по шорсткій поверхні, що здійснює гармонійні коливання. Теоретично переміщення матеріальної частинки у вібраційному режимі найбільш детально вивчено у випадку прямолінійного руху частинки по нахилений поверхні, де вона здійснює поступальні коливання [1]. Такий рух частинки включає етапи ковзання вперед і назад, етапи польоту та відносного спокою. Наявність кож-

ного із цих етапів і послідовність їх чергування визначаються параметрами системи «вібро-площина – частка».

Для подальшого аналізу виберемо координатні вісі Oxz , які жорстко пов'язані з віброуючою поверхнею (рис. 1). Етапи ковзання частинки можна описати рівнянням:

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin \gamma + F_T + F_i, \quad (1)$$

де m – маса частки;

γ – кут нахилу коливальної площини;

F_T – сила тертя; $F_T = -f \cdot N \cdot \text{sign}(\dot{x})$; $\dot{x} \neq 0$;

f – коефіцієнт тертя ковзання;

N – нормальна реакція коливальної площини;

F_i – переносна сила інерції.

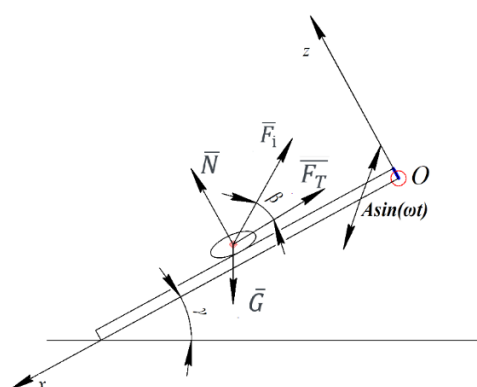


Рис. 1. Схема сил, які діють на матеріальну частинку, за умов прямолінійного руху

Нормальну реакцію коливальної площини можна обчислити за допомогою рівняння:

$$N = m \cdot g \cdot \cos \gamma - F_{iz} \quad (2)$$

У випадку, коли значення N менше за нуль, частинка (наприклад, насіння) відокремлюється від віброуючої площини і рухається в стиснутому стані в зерновому середовищі (стиснений політ частки).

Важливо відзначити, що стан спокою відповідає таким умовам:

$$\dot{x} = 0; |F_T| \leq f_0 \cdot N; \quad (3)$$

де f_0 – коефіцієнт тертя у стані спокою.

Однією з основних характеристик вібраційного переміщення частинки є середня швидкість переміщення ϑ_s за період T коливань площини, яка визначається такою формулою:

$$\vartheta_s = T^{-1} \cdot \int_0^T \vartheta(t) dt \quad (4)$$

Формула (4) визначає характер та інтенсивність технологічного процесу. У науковій літературі зазвичай досліджується залежність середньої швидкості переміщення ϑ_s від параметрів процесу під час прямолінійного руху частинки на коливальній площині.

Визначення ϑ_s пов'язано з інтегруванням нелінійного диференціального рівняння (1), яке на кожному окремому етапі руху є лінійним і може бути легко інтегровано. Головна складність полягає у визначенні моментів переходу t_j від одного етапу руху частинки до іншого. Найбіль-

ший практичний інтерес становлять режими руху частинок, які характеризуються циклічним чергуванням етапів руху. Часто такі режими встановлюються через певний час після того, як частинка потрапила на коливну поверхню. Особливу увагу слід звернути на так звані регулярні режими, в яких частинка переміщується з постійною середньою швидкістю протягом періоду. Вивчення характеру та навіть зон існування різних стійких усталених режимів руху частинки є однією з основних задач теорії.

Досить детально досліджено безвідмовний рух частинки за умов гармонійних прямолінійних коливань площини [2–4], якому:

$$F_i = m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin[\omega \cdot t] \quad (5)$$

де A, ω – амплітуда та частота коливань віброуючої поверхні.

У наукових дослідженнях [3; 4; 5] детально розглядається, що всі регулярні режими безвідмовного руху мають період «перемикань», який збігається з періодом коливань поверхні T . Крім тривіального випадку відносного спокою, можна виділити всього чотири режими. У трьох режимах частинка зупиняється на певний час, а в одному режимі вона ковзає вперед і назад з миттєвими зупинками.

В окремому режимі частинка ковзає лише в одному напрямку, тоді як в інших режимах є етапи ковзання як у позитивному, так і в негативному напрямку. Дослідження стійкості [6–8] показують, що всі можливі режими руху частинки, що встановилися, стійкі щодо моментів переходу t_j у всій області їх існування. У роботах [9–10] приводиться алгоритм для визначення середньої швидкості переміщення частинки для встановлених режимів.

Поставлення завдань вібраційного переміщення часток впливає з особливостей досліджуваних процесів. Наприклад, ефективність вібраційної сепаруючої машини залежить від швидкості переміщення часток зернового матеріалу на поверхні коливної площини. Тому пошук оптимальних параметрів процесу (як-от кут вібрації, амплітуда, частота, форма коливань тощо) за відповідних обмежень пов'язаний з досягненням максимальної середньої швидкості переміщення. Ця мета визначається в дослідженнях режимів із підкиданням, за встановлення ідеальних законів руху коливної площини та використання двокомпонентних коливань віброплощини.

У випадку двовимірного руху матеріальної частки по віброплощині етапи ковзання можна описати рівняннями (див. рис. 2):

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin \gamma + F_{Tx} + F_{ix}, \\ m \cdot \ddot{y} = F_{Ty} + F_{iy}, \end{cases} \quad (6)$$

де $F_T = -f \cdot N \cdot k$; $k = \frac{v}{g}$; $v \neq 0$; $N = m \cdot g \cdot \cos \gamma - F_{iz}$;

v – відносна швидкість частинки.

Стан відносного спокою визначається умовою, аналогічною (3):

$$\dot{x} = 0; |F_T| \leq f_0 \cdot N$$

Рівняння (6) є нелінійними та, в загальному випадку, не піддаються інтегруванню у квадратах. Існує лише одне точне рішення цих рівнянь, яке відрізняється від рішень, що відповідають прямолінійному руху та руху по нерухомій площині. Це розв'язання відоме як класична задача Жуковського про плоский розсів [11]. У цій задачі розглядається рух частинки по горизонтальній площині, що здійснює поступальні кругові коливання. При цьому точки площини рухаються в цій же площині по кругових траєкторіях із радіусом r та рівномірною частотою ω . Таким чином, узагальнені рівняння руху можна отримати з рівняння (4), припускаючи, що:

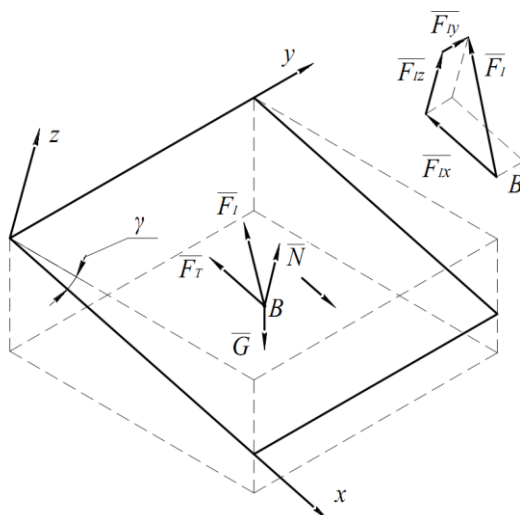


Рис. 2. Схема сил, яка діє на матеріальну частку за умов плоского руху

$$\gamma = 0;$$

$$F_{ix} = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos[\omega \cdot t], \quad (7)$$

$$F_{iy} = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin[\omega \cdot t], \quad (8)$$

$$F_{iz} = 0, \quad (9)$$

Слід відмітити, що частка може знаходитися на поверхні в стані спокою, якщо $f_0 \cdot g \geq r \cdot \omega^2$, де (f_0 – коефіцієнт тертя спокою); та за $f_0 \cdot g < r \cdot \omega^2$, рівняння (6) з урахуванням (7–9) отримає рішення:

$$x = r \cdot \sqrt{1 - z^2} \cdot \sin[\omega \cdot t - \vartheta], \quad (10)$$

$$y = r \cdot \sqrt{1 - z^2} \cdot \cos[\omega \cdot t - \vartheta], \quad (11)$$

$$z = \frac{f \cdot g}{r \cdot \omega^2}, \quad (12)$$

Отже, рівняння (10–11) відповідають руху частинки відносно площини з коловою траєкторією з радіусом r_0 :

$$r_0 = r \cdot \sqrt{1 - z^2}, \quad (13)$$

Рух частинки відстає по фазі від коливань поверхні на величину:

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \cosh[z], \quad (14)$$

У численних розвідках [8; 10–14] досліджується розв’язання задачі Жуковського. Методом малого параметра вивчаються такі аспекти:

- вплив кута нахилу площини;
- випадок коливань площини, що наближаються до колових;
- випадок додаткових малих поперечних коливань;
- випадок похилої прецесії площини навколо вертикальної осі.

Варто відзначити, що обмежена кількість досліджень щодо двовимірного руху частки пояснюється, з одного боку, неочевидністю практичного застосування результатів цих досліджень, а з іншого – складністю отримання будь-яких кінцевих співвідношень і залежностей.

Загалом, теорія вібраційного переміщення матеріальної частинки, що має самостійне значення, також може служити основою для вивчення руху твердого тіла з кінцевими розмірами. Чим більше відстань, яку проходить тверде тіло, порівняно з його розмірами, тим менші відмінності між його інтегральними характеристиками та відповідними характеристиками матеріальної частинки.

Процес об'ємної вібраційної обробки зернових матеріалів відбувається за рахунок відносного прослизання і зіткнень між точками віброуючої поверхні й зернового матеріалу (часток). З точки зору механіки це можна розглядати як переміщення одного твердого тіла по поверхні іншого. У науковій літературі наразі відсутній системний підхід до вирішення проблем взаємодії твердого тіла кінцевих розмірів із шорсткою поверхнею. В опублікованих роботах розглядаються лише окремі випадки цієї взаємодії. Відомі класичні завдання аналітичної механіки про кочення твердих тіл по нерухомій площині. Наприклад, у теорії гіроскопів досліджується рух тіл, що швидко обертаються та спираються однією точкою на шорстку поверхню (як дзига). У низці робіт розглядаються окремі етапи руху твердого тіла або його граничний стан під час переходу від одного етапу руху до іншого; основна увага в даних працях приділяється питанням використання різних моделей системи з поверхневими силами тертя.

Відсутність загального підходу до розв'язання цих завдань може бути пояснена декількома причинами: різноманітністю усіх можливих форм твердих тіл, складністю процесів, які відбуваються в області контакту тіла з поверхнею, та слабкою узгодженістю граничних випадків у застосуванні методів їх дослідження.

Кількість робіт, в яких вивчається рух твердого тіла по шорсткій поверхні, досить різноманітна. Наприклад, у роботах [16–17] наведено результати експериментальних досліджень вібраційного транспортування зернових матеріалів. Однією з характерних особливостей руху таких матеріалів є виникнення ефекту самоорієнтації на коливаючих поверхнях, коли вони прагнуть розвернутися так, щоб їхні поздовжні осі збігалися з напрямом коливань.

На основі результатів досліджень [1–6], які стосуються закону руху матеріалу по площині, що коливається, та аналізу залежності сили опору руху від швидкості ковзання, виявлено, що ця сила складається із двох частин: сили безпосереднього контакту та сили в'язкого опору руху об'єкта (твердого тіла) по віброуючій поверхні, що зумовлена наявністю деякого прошарку на цій поверхні.

Рівняння руху об'єкта (твердого тіла) у вигляді одномасової в'язкопластичної моделі з різними значеннями коефіцієнтів опору на етапах руху вперед і назад має вигляд (припускаючи горизонтальність робочої поверхні та кут вібрації, що дорівнює нулю) [8; 9]:

$$\ddot{x} = A \cdot \omega^2 \cdot \sin[\omega \cdot t] \mp f_{\pm} \cdot g - \frac{\varepsilon_{\pm}}{m} \cdot \dot{x}, \quad (15)$$

де $\varepsilon_{\pm}$ – коефіцієнт в'язкого опору зернового середовища [10];

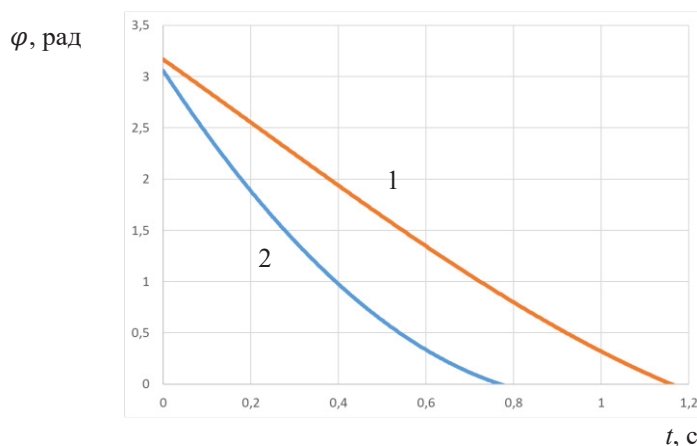
$$\varepsilon_{\pm} = 17 \cdot 10^{-3} - 44 \cdot 10^{-3} \text{ нс/м};$$

Результати чисельного розв'язання рівняння (15) добре корелюють з експериментальними даними [15].

Спеціальні дослідження [16–18] було проведено для визначення залежності кута повороту частки (твердого тіла) за її орієнтації на коливній площині від часу та параметрів коливань.

Виявлено ефект кращого розвороту (самоорієнтації) частки в напрямку, протилежному до «злому» частки. Автори [16–17] пояснюють це як результат незбігу осі інерції частки та

осі симетрії площини контакту, а також нерівномірність розподілу тиску частинок зернового середовища на площину. Зміна кута повороту частки φ з часом показана на рис. 3 для окремих значень амплітуди і частоти коливань.



$$1 - A = 0,005 \text{ м, } \omega = 45 \text{ с}^{-1}; 2 - A = 0,005 \text{ м, } \omega = 66 \text{ с}^{-1}$$

Рис. 3. Закон зміни кута орієнтації частки за вібраційного переміщення

У дослідженні [18] аналізується рух плоских часток, що мають бічну поверхню, складену з різних сегментів: плоских різної довжини або криволінійних, включаючи відрізки циліндричної форми, що працюють на «кутовій» вібруючій поверхні.

Ця поверхня представлена як плоска площина з вбудованою перепоною (див. рис. 4), де поздовжні лінії утворюють кут α з осью Oy , а поперечні – кут γ з горизонтальною віссю Ox площини Oxy .

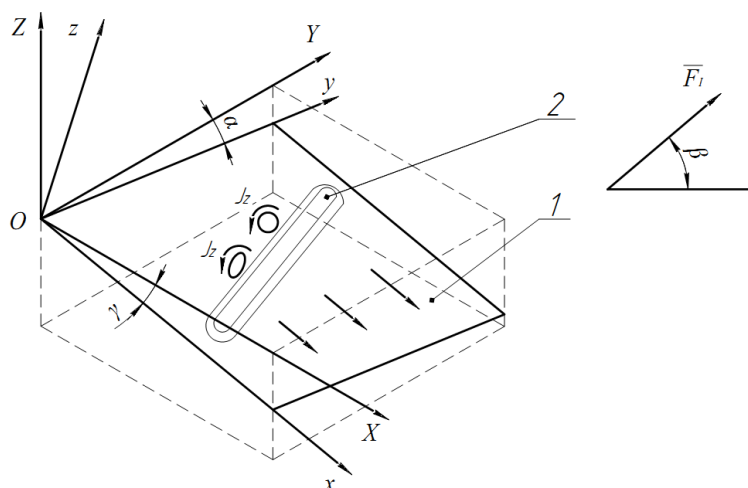


Рис. 4. Рух частки на «кутовій» вібруючій поверхні

Поверхня здійснює прямолінійні поступальні коливання, орієнтовані під кутом β до площини Oxy . Відношення розмірів частки таке, що вона може перекинутися тільки по штучно сформованій «перепоні» поверхні, тоді як по вібруючій поверхні вона може лише ковзати.

Під час руху частки діють сила тяжіння G , нормальні реакції N_1, N_2 та сили тертя F_1, F_2 , відповідно, на першу та другу поверхні. Безвіддільний відносний рух частки описується трьома диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin \gamma \cdot \cos \alpha + F_i \cdot \sin(\alpha - \beta) \cdot \sin \gamma - N_2 \pm N_1 \cdot f_{\pm} \cdot c_1, \\ m \cdot \ddot{y} = -m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_i \cdot \cos(\alpha - \beta) \mp F_2 \mp N_1 \cdot f_{\pm} \cdot c_2, \\ J_0 \cdot \ddot{\phi} = [\pm F_2 \cdot \cos(\delta - \phi) - N_2 \cdot \sin(\delta - \phi) \pm N_1 \cdot f_{\pm} \cdot c_3] \cdot h / \cos(\delta), \end{cases} \quad (16)$$

де h – відстань від центра мас частки до штучної перепони, на якій знаходиться насінина перед її обертанням на поверхні;

F_i – переносна сила інерції;

c_1, c_2, c_3 – коефіцієнти, які залежать від розташування точок дотику частки до штучної перепони та положення частки на віброуючій поверхні.

Кінцеве рішення системи рівнянь (16) у загальному випадку неможливо. Оскільки для орієнтації часток найбільш істотним є сам характер руху, автори обмежуються визначенням умов, за яких здійснюються можливі режими руху: ковзання без перекочування, перекочування без ковзання, перекочування з ковзанням.

У роботі [5; 9] досліджується ефект самоорієнтації частинок під час їх ковзання по похилій площині вібролотка. Аналізується рух частки з трьома точками опори. Варто відзначити, що для пояснення ефекту самоорієнтації за допомогою закону тертя Амонтона – Кулона неможливо, тому автори використовують двочленний закон тертя. Це означає, що сили молекулярного тяжіння між дотичними поверхнями додають додатковий складник N_0 нормального тиску, який прикладено в центрі опорної площини. Це призводить до виникнення моменту сил тертя щодо центру мас C , який прагне надати частинці усталеного положення $\phi = 0$.

$$M_B = -N_0 \cdot f_{\pm} \cdot c_4 \cdot \sin \phi \quad (17)$$

де c_4 – відстань до центру мас від центру опорної площини;

ϕ – кут повороту частки.

На підставі теоретичних досліджень можна зробити висновок, що тіло під час ковзання намагається зайняти таке положення, коли центр мас розташований виключно попереду геометричного центру опорних реакцій. При цьому чим ближче центр мас та геометричний центр опорних точок тіла (частки), тим менше проявляється ефект самоорієнтації.

Для визначення часу t та довжини l ділянки віброповерхні, необхідних для повороту частки з штучною перепорою від ϕ_0 до ϕ , введемо відповідні формули:

$$t = \frac{2 \cdot J_z \cdot T}{c_4 \cdot N_0 \cdot f_{\pm} \cdot [\tau^2 - \delta^2]} \cdot \ln \left| \frac{\tan \left[\frac{\phi_0}{2} \right]}{\tan \left[\frac{\phi}{2} \right]} \right|, \quad (18)$$

$$l = \vartheta_s \cdot t, \quad (19)$$

де ϑ_s – середня швидкість переміщення частки;

τ, δ – час ковзання частки за напрямом руху та проти напрямку руху за період коливань опорної поверхні T ;

J_z – момент інерції частки відносно центра мас.

Для орієнтації частки з імовірністю p у межах кута α за надходження зернового матеріалу з рівною ймовірністю їх положення необхідно мати довжину віброуючої поверхні, яку можна визначити залежністю:

$$l = \frac{2 \cdot J_z \cdot T \cdot g_s}{c_4 \cdot N_0 \cdot f_{\pm} \cdot [\tau^2 - \delta^2]} \cdot \ln \left| \frac{\tan \left[\frac{\varphi_0}{2} \right]}{\tan \left[\frac{\varphi}{2} \right]} \right|, \quad (20)$$

Отримані залежності в основному мають якісний характер, оскільки не впливають безпосередньо з диференціальних рівнянь руху частки. Математичні моделі руху часток по шорсткій поверхні лише частково розвинулися в завданнях вібропереміщення зернових матеріалів. Складність розрахунку сил тертя в цих моделях ускладнює можливість дослідження режимів руху, що включають етапи спокою чи кочення без ковзання.

Також варто зазначити, що в деяких літературних джерелах [3; 6] досліджується більш загальний підхід до проблеми взаємодії твердого тіла (частки) обмежених розмірів з робочою поверхнею. У цих джерелах розглядаються завдання для тіл різної форми за участю як прямих, так і кутових коливань.

Висновки. Отримані результати досліджень указують на складність математичного моделювання процесів сепарування зернових матеріалів і відсутність загального підходу до розв'язання проблем взаємодії твердих тіл обмежених розмірів із шорсткою поверхнею та між собою. Незважаючи на це, деякі роботи присвячено аналізу різних режимів руху часток, як-от ковзання без перекочування, перекочування без ковзання та їх поєднання.

Для подальшого розвитку досліджень у цій області можна запропонувати:

- 1) Подальше вдосконалення математичних моделей, які дозволять краще узгоджувати теоретичні результати з експериментальними даними;
- 2) Розширення аналізу режимів руху часток для врахування більш широкого спектру сценаріїв, включаючи етапи спокою та кочення без ковзання;
- 3) Вивчення взаємодії твердих тіл обмежених розмірів із шорсткою поверхнею у більш загальному контексті, з урахуванням різних форм тіл і різних типів коливань поверхні;
- 4) Проведення додаткових експериментів для підтвердження отриманих теоретичних результатів і отримання нових даних щодо руху часток на віброуючій поверхні;
- 5) Розвиток нових методик та алгоритмів для більш точного прогнозування поведінки часток зернового матеріалу під час вібраційного переміщення.

Стаття надійшла до редакції 06.03.2025 р.

Список використаних джерел

1. Моделювання процесу переміщення зернового матеріалу в робочій зоні сепаратора / С.П. Степаненко та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Т. 14. № 1. <http://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-1-3>
2. Jagusiak-Kocik M, Bohomolov O, Hurskyi P, Bredykhin V, Lukyanov I, Shchur T, Dzhidzhora O. Optimizing the Separation Process of Difficult-to-Separate Wheat and Barley Grain Mixtures Using Vibrofriction Technology. *System Safety: Human – Technical Facility – Environment. Sciendo*. 2024; Vol. 6, (1). P. 360–370. <http://doi.org/10.2478/czoto-2024-0038>
3. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology. *Applied Sciences* 2022. Vol. 12, Issue. 10: 5190. <http://doi.org/10.3390/app12105190>

4. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / за ред. Г. Гелетути. Київ : Академперіодика, 2022. 373 с. <http://doi.org/10.15407/akademperiodyka.464.373>
5. Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна О.М. Васильковський та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2021. Вип. 51. С. 104–110. <http://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110>
6. Степаненко С.П., Котов Б.І. Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 50. С. 122–133. <http://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.122-133>
7. Cujbescu D, Nenciu F, Persu C, Găgeanu I, Gabriel G, Vlăduț N-V, Matache M, Voicea I, Pruteanu A, Bularda M, Paraschiv G., Boruz S. Evaluation of an Optical Sorter Effectiveness in Separating Maize Seeds Intended for Sowing. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 12, Issue. 13(15) :8892. <http://doi.org/10.3390/app13158892>
8. Mykhailov Y., Golebiewski J., Kiurchev S., Hutsol T., Kolodii O., Nurek T., Glowacki Sz., Zadosna N., Verkhohantseva V., Palianychka N., Kucher O. Economic and technical efficiency of sunflower seed processing. Monograph. Warszawa: 2020. 158 с. <http://doi.org/10.22630/SGGW.WE.9788375839340>
9. Tishchenko L, Kharchenko S, Kharchenko F, Bredykhin V, Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, no. 7(80). P. 63. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920>
10. Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduev M., Miernik A., Popardowski E., Kielbasa P. (2021). Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Applied Sciences*, 11(10), 4383. <http://doi.org/10.3390/app11104383>
11. Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Denisenko S., Bredykhina K. Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. 4(1(112)), 54–60. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938>
12. Palamarchuk I, Rogovskii I., Titova L., Omelyanov O. Experimental evaluation of energy parameters of volumetric vibroseparation of bulk feed from grain. *Eng. Rural Devel.* 2021, 20, 1761–1767. <http://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF386>
13. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Kalinichenko R., Hryshchenko V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal Of Central European Agriculture*. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 225–235. <http://doi.org/10.5513/jcea01/24.1.3732>
14. Adamchuk V., Bulgakov V., Ivanovs S., Holovach I., Ihnatiev Y. Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow. *Engineering for Rural Development*. No. 20. P. 657–664. <http://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF139>
15. Степаненко С.П., Волик Д.А. Математичне моделювання та результати експериментальних досліджень процесу вібропневмоімпульсного поділу насіння за густиною. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кропивницький : ЦНТУ*, 2023. Вип. 53. С. 138–148. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148>
16. Study of grain flow in a cylindrical vibrating sieve / М. Slipchenko та ін. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 27–33. <http://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3>
17. Adamchuk V., Bulgakov V., Gadzalo I., Ivanovs S., Stepanenko S., Holovach I., Ihnatiev Y. Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine. *Rural Sustainability Research*, 2021, Vol. 46, no. 341. P. 116–124. <http://doi.org/10.2478/plua-2021-0023>
18. Kryszak D., Bartoszewicz A., Szufa S., Piersa P., Obraniak A., Olejnik T. Modeling of transport of loose products with the use of the non-grid method of discrete elements (DEM). *Processes*. 2020, 8, 1489. <http://doi.org/10.3390/pr8111489>

Стаття надійшла до редакції 06.03.2025 р.



S. Stepanenko, V. Myronenko, S. Pohorilyi, A. Kuzmych, V. Shvydia, I. Popadiuk
Institute of Mechanics and Automation of AgroIndustrial Production of the National Academy
of Agrarian Sciences of Ukraine

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF MODELS OF VIBRATIONAL GRAIN DISPLACEMENT IN GRAIN MATERIAL SEPARATION PROCESSES

Summary

Improvement of the technological process of grain material preparation and technical devices based on generalization of existing mathematical models of vibration separation processes is an urgent task. The aim of the research is to build a mathematical model for a special case of vibration movement of a grain in separation processes, taking into account the longitudinal movement of the grain material. The study was carried out using mathematical modeling methods, based on a formalized description in the form of differential equations of the unsteady process of separating grain materials on the vibrating surface of the separator, taking into account the longitudinal movement. As a result of the studies, a mathematical description of the process of vibration movement of a grain in the processes of separating grain materials on the oscillating surface of the separator was formed, taking into account the longitudinal movement of the grain in the form of a mathematical model to determine the distribution of material movement trajectories along the length of the bearing surface. The obtained research results indicate the complexity of mathematical modeling of grain separation processes and the lack of a general approach to solving the problems of interaction of solids of limited dimensions with a rough surface and with each other. Despite this, some works are devoted to the analysis of various modes of particle motion, such as sliding without rolling, rolling without sliding, and their combination. For further development of research, it is necessary to improve mathematical models and expand the analysis of particle motion modes to take into account a wider range of scenarios. It is promising to study the interaction of solids of limited size with a rough surface, taking into account different body shapes and different types of surface vibrations, which will allow better matching of theoretical results with experimental data.

Keywords: equilibrium equation, friction forces, grain material, mathematical model, displacement, velocity.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-17>

УДК 669.01:621.9

О. О. Червоткіна, асист.

ORCID: 0009-0002-6814-0566

О. П. Прокопенко, асист.

ORCID: 0009-0005-7304-923X

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-8510-7146

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: olena.prokopenko@tsatu.edu.ua

ГРАНЮЛЮВАННЯ ВТОРИННИХ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ

Анотація. Побічними продуктами є маси продукту, що утворюються безпосередньо під час обробки та переробки основного продукту. Гранулювання рослинних відходів має особливі переваги під час зберігання та транспортування цього, в іншому випадку досить об'ємного матеріалу, що є джерелом поживних речовин у кормах для тварин. Із залишків цукрових буряків також можна виробляти гранули. Вони відзначаються високою поживною цінністю, що робить їх ідеальною добавкою у виробництві концентрованого комбікорму. До загального поняття «висівки» належать усі оболонки зерна, які утворюються, наприклад, під час помелу зерна для отримання борошна. Зернові висівки здебільшого мають високий вміст клітковини, тому чудово підходять як для харчування людей, так і для годівлі тварин. Завдяки гранулюванню висівки набувають вищої насипної щільності, що дає змогу більш точно дозувати цей продукт.

Олійний макух утворюється під час обробки та переробки олійного насіння, зокрема сої та ріпаку. Він є важливим компонентом у виробництві комбікормів, оскільки містить багато поживних речовин.

Ключові слова: грануляція, гранули, комбікорм, харчові відходи, навколишнє середовище, екструзія.

Постановка проблеми. У разі конкуренції зниження витрат є одним з основних завдань підприємств будь-якого сектора. Фактично навіть запобіжний захід, який знизить витрати на 1 відсоток, має істотне значення для великих компаній.

У такий період існує ще один дуже економічний шлях, який просувається повільно, але робить впевнені кроки вперед як альтернатива виробленню комбікормів: виробництво органічних кормів. За допомогою цього методу, заснованого на переробці харчових відходів, можна виробляти корми для великої рогатої худоби, овець, птиці та риби.

З погляду рентабельності ми маємо можливість отримати сировину за дуже низькою ціною або навіть безплатно. Цей фактор також приносить добрий прибуток бізнесу. З іншого боку, за допомогою цього методу харчові відходи переробляються в харчовий ланцюжок, а переробка органічних кормів дуже корисна для захисту навколишнього середовища.

Органічні корми та всі корми, виготовлені з натуральних відходів, подобаються всім тваринам у природі, але, звичайно ж, нашим пріоритетом є корм для тварин. Ми можемо вказати нашу цільову групу як велику рогату худобу, вівці, свійську птицю та рибу. Жодної шкоди навколишньому середовищу немає. Навпаки, ми очищаємо навколишнє середовище та природу від відходів і перетворюємо їх на продукти. Що стосується рентабельності, то в цій системі ми маємо можливість отримати сировину за дуже низькою ціною або безплатно. Цей фактор також приносить добрий прибуток бізнесу.

Аналіз останніх досліджень. Світова наукова спільнота вже тривалий час досліджує питання продовольчих втрат і харчових відходів, тоді як в Україні ця проблема почала привертати увагу відносно недавно. Водночас існує низка міжнародних досліджень, які оцінюють ефективність

політики, спрямованої на зменшення харчових втрат, і можуть бути корисними для застосування в українських реаліях.

Так, у дослідженні Albizzati P. та співавторів [1] аналізується досвід Франції, де на законодавчому рівні зобов'язали компанії зменшувати обсяги харчових відходів шляхом передачі надлишкових продуктів до благодійних організацій або використання їх як корму для тварин. Виявлено, що такий підхід має не лише екологічні, а й економічні переваги, оскільки дає змогу роздрібним мережам скорочувати витрати. Разом із тим причини виникнення продовольчих втрат і методи їх мінімізації різняться залежно від рівня економічного розвитку країни. Це зазначають Adam A. та інші [2], підкреслюючи, що в країнах, що розвиваються, основні втрати припадають на етапи виробництва та зберігання, тоді як у розвинених державах значну роль відіграють надмірне споживання та нераціональна поведінка населення.

Британські дослідники Jack L. і Hammans H. [3] вивчали формування цін на продовольчі товари та дійшли висновку, що більш справедливий розподіл витрат уздовж усього ланцюга постачання сприяє не лише доступності харчових продуктів, а й підвищенню доходів працівників сільськогосподарського сектора. На думку Ghosh R. та Eriksson M. [4], більшість наукових праць фокусуються на кількісному аналізі харчових відходів, враховуючи вплив роздрібної торгівлі на постачальницькі ланцюги. Однак для ефективного застосування світового досвіду в Україні потрібно не лише оцінювати масштаби втрат, а й розробляти практичні підходи для їхнього скорочення, що позитивно вплине на економіку країни.

В Україні проблему продовольчих втрат і харчових відходів досліджували Седікова І. О., Дьяченко Ю. В. [5], Коваленко О., Яценко Л. [6], Теодорович Л., Кияниця М. [7]. Вони проаналізували причини втрат на різних етапах харчового ланцюга – від виробництва до кінцевого споживання. Котикова О. та співавтори [8] запропонували заходи щодо зменшення харчових відходів, а Хахула Б. [7] розглянув економічні аспекти розвитку безвідходного виробництва й утилізації харчових залишків.

Формування мети статті. Гранулювання є ключовим процесом у переробці харчових відходів, який дає змогу отримувати зручні у використанні гранули. Існує кілька основних методів гранулювання, які застосовуються в промисловості залежно від типу сировини, необхідних характеристик кінцевого продукту та виробничих умов.

Основна частина. Пресове (механічне) гранулювання. Цей метод передбачає використання спеціальних пресів, які під високим тиском формують гранули. Він використовується для сухих або злегка зволжених матеріалів. Гранули отримують шляхом продавлювання матеріалу через отвори матриці. Цей спосіб забезпечує високу щільність і міцність гранул.

Гранули, сформовані таким способом, використовують у виробництві паливних пелет з харчових і сільськогосподарських відходів, а також для виготовлення кормових добавок.

Екструзійне гранулювання здійснюється за допомогою екструдерів, які нагрівають матеріал і продавлюють його через спеціальну матрицю, надаючи йому форми гранул. Особливостями цього гранулювання є використання теплових і механічних зусиль для формування гранул. Також цей спосіб дає змогу отримувати гранули з покращеними характеристиками, як-от водостійкість та рівномірність розміру, і підходить для вологих та жирних матеріалів. Застосовують його для виготовлення кормів для тварин і отримання харчових добавок.

Вихрове (псевдозріджене) гранулювання ґрунтується на утриманні дрібних частинок у псевдозрідженому стані за допомогою повітряного потоку та їх покритті рідкими або порошковими зв'язуючими речовинами. Цей спосіб дає можливість отримати сферичні гранули з рівномірною структурою. Підходить для чутливих до високих температур матеріалів і використовується для тонкодисперсних порошків. Застосовують цей спосіб у виробництві гранульованих



добрих із харчових відходів та у фармацевтичній промисловості (гранулювання порошкових компонентів).

Агломераційне (мокре) гранулювання передбачає склеювання дрібнодисперсних частинок за допомогою рідких зв'язуючих компонентів. Особливостями цього способу є використання вологи або спеціальних зв'язуючих агентів (крохмаль, гелі, білки). Він дає змогу регулювати пористість та розмір гранул, проте гранули можуть потребувати додаткового сушіння. Цей спосіб використовують у виробництві кормових гранул і гранулювання продуктів харчування (наприклад, какао або сухого молока).

Гранулювання в барабанних грануляторах відбувається у спеціальному обертовому барабані, де частинки матеріалу поступово злипаються у гранули під впливом зволоження та механічної взаємодії. Особливостями цього способу є використання для матеріалів із середньою та високою вологістю, також він дає можливість отримувати гранули різного розміру залежно від швидкості обертання барабана. Прикладом застосування є виробництво добрив та кормових гранул і виготовлення гранульованих продуктів харчової промисловості.

Висновки. Гранулювання харчових відходів є ефективним способом їх переробки, що дає змогу не тільки зменшити кількість відходів, але й створити корисні продукти для подальшого використання. Основні методи гранулювання, зокрема пресове, екструзійне, вихрове, агломераційне та барабанне, мають свої переваги та застосовуються в різних галузях – від виробництва кормів і добрив до отримання біопалива та харчових добавок.

Запровадження технологій гранулювання в харчовій промисловості дає низку суттєвих переваг:

Екологічна безпека – значне скорочення харчових відходів, зменшення навантаження на полігони та покращення стану довкілля.

Економічна вигода – можливість створення нових ринків для перероблених продуктів, зниження витрат на утилізацію та отримання прибутку від продажу гранульованої продукції.

Рациональне використання ресурсів – повторне застосування відходів у вигляді кормових добавок, органічних добрив або палива, що зменшує потребу в первинній сировині.

Підвищення ефективності харчової промисловості – підприємства можуть скоротити втрати, підвищити прибутковість і покращити імідж завдяки впровадженню екологічно відповідальних рішень.

У майбутньому розвиток технологій гранулювання стане ще більш актуальним, особливо в контексті посилення екологічних норм і потреби в рациональному використанні ресурсів. Інноваційні підходи, зокрема використання біополімерів як зв'язуючих агентів, покращення енергоефективності процесів та автоматизація виробництва, сприятимуть підвищенню ефективності гранулювання.

Список використаних джерел

1. Червоткіна О. О., Олексієнко В. О., Фучаджи Н. О. Рациональне використання відходів виробництва морквяного соку. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2012. Вип. 12, т. 4. С. 216221.
2. Олексієнко В. О., Червоткіна О. О., Циб В. Г. Дослідження механізмів гранулювання. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2016. Вип. 16, т. 1. С. 269–273.
3. Назаров В. І., Макаренков Д. А., Булатов І. А. Дослідження процесу гранулювання дисперсних відходів на роторних пресах з плоскою матрицею. *Вісник КПІ*. 2010. Т. 5. № 6. С. 13–16.
4. Модін Н. А., Єрошкін О. М. Брикетування подрібненої деревини та деревної кори. Київ : Ліра, 2020. 112 с.
5. Модін Н. А., Єрошкін О. М., Мурзіч Р. М., Гудців Р. І. Зусилля, що розпирають та коефіцієнти тертя при пресуванні подрібненої деревини в матрицях. Технічна інформація. Харків : Видання ХНТУСГ, 2018. С. 23–26.



6. Івін Є. Л., Глухівський В. М. Гранулювання деревини. Практичні та теоретичні основи або що відбувається всередині гранулятора. *Біоенергетика* 2007. № 3. С. 15–19.
7. Завражнов А. А. Пресування деревних композиційних матеріалів з продувкою парою і вакуумуванням : автореферат кандидатської дисертації. 2020. 19 с.
8. Юдіна Р. В. Розробка режимів гідравлічного вібратора преса підвищення фізико механічних властивостей ущільненої деревини. Автореферат кандидатської дисертації. 2017. 16 с.
9. Ялпачик В. Ф., Буденко С. Ф., Олексієнко В. О., Червоткіна О. О. Дослідження коефіцієнта тертя гранульованого жому моркви. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2018. Вип. 18. Том 1. С. 112–118.
10. Червоткіна О. О., Стручаєв М. І., Тарасенко В. Г. Дослідження процесу гранулювання овочевих відходів за допомогою пресгранулятора з плоскою матрицею. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету : наукове фахове видання*. ТДАТУ: гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 21, т. 1. С. 160–168.

Стаття надійшла до редакції 14.04.2025 р.

O. Chervotkina, O. Prokopenko, N. Palyanychka
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

GRANULATION OF SECONDARY PROCESSING PRODUCTS

Summary

By-products are product masses that are formed directly during the processing and processing of the main product. Granulation of plant waste has particular advantages during storage and transportation of this otherwise rather bulky material, which is a source of nutrients in animal feed. Sugar beet residues can also be produced into pellets. They are characterized by high nutritional value, which makes them an ideal additive in the production of concentrated compound feed. The general concept of “bran” includes all the shells of grains that are formed, for example, during the grinding of grain to obtain flour. Cereal bran mostly has a high fiber content, so it is excellent for both human and animal nutrition. Granulation gives the bran a higher bulk density, which allows for more accurate dosing of the product. Oilcake is formed during the processing and refining of oilseeds such as soybeans and rapeseed. It is an important component in the production of compound feed, as it contains many nutrients, that have a positive effect on animal health.

Keywords: granulation, pellets, compound feed, food waste, environment, extrusion.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-18>

УДК 633.16:631.523

С. С. Швець, аспірант

ORCID: 0009-0000-2040-5724

В. С. Калина, к.т.н., доцентка

ORCID: 0000-0002-3061-3313

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: viktoriya-kalina@ukr.net

МЕХАТРОННИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМУ: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ІННОВАЦІЇ

У сучасних умовах розвитку сільськогосподарського виробництва питання забезпечення тварин якісними кормами є надзвичайно актуальним. Важливим складником кормової бази є комбікорми, що виготовляються з різних видів рослинної сировини, зокрема з кукурудзяних початків. Використання біологічно активних добавок дозволяє значно підвищити поживність кормів, їх засвоюваність та ефективність використання. У цьому контексті актуальним є розроблення нових підходів до виробництва комбікормів, зокрема шляхом впровадження мехатронних систем та автоматизованих технологій.

Роботу зосереджено на дослідженні виробничих процесів створення комбікорму з кукурудзяних початків з додаванням біологічно активних добавок, а також на розробленні мехатронного комплексу для забезпечення цього процесу. Проведено теоретичні дослідження, а також розроблено практичні рішення щодо впровадження автоматизованих комплексів для підвищення продуктивності та ефективності виробництва комбікормів.

Ключові слова: комбікорми, кукурудзяні початки, біологічно активні добавки, мехатронні системи, автоматизовані технології, виробництво кормів, засвоюваність кормів, кормова база.

Постановка проблем. Виробництво кормів із використанням кукурудзяних початків є перспективним напрямом розвитку тваринницької галузі. Кукурудза – один із найпоширеніших і найефективніших кормових ресурсів, який забезпечує високу поживність корму. Однак її ефективне використання можливе лише за умови впровадження новітніх технологій оброблення та виробництва.

Використання біологічно активних добавок у комбікормах дозволяє поліпшити їх засвоюваність та вплив на тваринницьку продуктивність. Це зменшує витрати кормів та покращує екологічність тваринницької продукції. Тому впровадження нових механізованих комплексів для виготовлення таких комбікормів є нагальною необхідністю [16].

Аналіз останніх досліджень. У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється вдосконаленню технологій виробництва комбікормів та використанню мехатронних систем у цьому процесі. Вивчення сучасних підходів до комбікормового виробництва показує, що важливими аспектами є якість сировини, зокрема кукурудзяних початків, використання біологічно активних добавок та автоматизація технологічних процесів.

І.В. Бондаренко та А.О. Коваль [1] аналізують сучасні підходи до виробництва комбікормів у сільському господарстві, наголошуючи на необхідності застосування інноваційних технологій для підвищення ефективності виробництва. Дослідження В.С. Коваленка [3] акцентує увагу на важливості біологічно активних добавок у кормах, що дозволяє поліпшити засвоюваність поживних речовин і продуктивність тварин.

Робота П.М. Сидоренка та О.І. Остапенка [2] висвітлює перспективи автоматизації технологічних процесів у тваринництві, зокрема впровадження мехатронних систем для оптиміза-

ції управління виробничими лініями. І.П. Марчук та Ю.В. Гавриленко [4] запропонували підхід до оптимізації виробництва комбікормів через використання мехатронних комплексів, що сприяє енергоефективності та зниженню втрат сировини.

Дослідження О.М. Шевченка [6] містить огляд інноваційних рішень у виробництві комбікормів, які передбачають інтеграцію мехатронних технологій. Зокрема, автори розглядають переваги автоматизованих систем контролю складу кормових сумішей. Аналогічні питання розглядають І.В. Сидоров та В.П. Заяць [7], які обґрунтовують необхідність широкого застосування мехатронних комплексів у комбікормовому виробництві.

Окрему увагу приділено питанням енергоефективності. О.Д. Філіпчук [5] аналізує екологічні аспекти мехатронних систем у сільському господарстві, підкреслюючи їх роль у зниженні витрат електроенергії. Подібні аспекти висвітлені в роботах В.І. Крамаренка [12] та А.О. Харченка і П.В. Мазура [18], які розглядають можливості мінімізації енерговитрат у процесі комбікормового виробництва.

Таким чином, аналіз наукових джерел свідчить про актуальність дослідження нових підходів до виробництва комбікормів, зокрема шляхом використання мехатронних комплексів та біологічно активних добавок. Це дозволяє підвищити якість кормів, їх засвоюваність і продуктивність тварин, що є важливими факторами для аграрної галузі.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження процесу виробництва комбікормів на основі кукурудзяних початків із додаванням біологічно активних добавок, а також розроблення мехатронного комплексу для автоматизації цього процесу. Основними завданнями є аналіз впливу біологічно активних добавок на поживність і засвоюваність кормів, розроблення та обґрунтування технічних рішень для мехатронної системи виробництва, а також оцінювання ефективності автоматизованих технологій у підвищенні продуктивності кормовиробництва.

Основна частина. Мехатронний комплекс для виробництва комбікорму з кукурудзяних початків із додаванням біологічно активних добавок має низку суттєвих переваг у порівнянні з традиційними машинами, що використовуються в сільському господарстві [8]. Основні переваги полягають у високій точності, автоматизації процесів, зниженні витрат енергії та підвищенні ефективності виробництва.

Однією з головних переваг мехатронного комплексу є повна автоматизація основних етапів виробництва комбікорму. Це дозволяє значно скоротити час виконання завдань і зменшити необхідність у ручній праці. Автоматизовані системи управління забезпечують: **постійний контроль за технологічними процесами:** комплекс оснащений сенсорами та датчиками, що відслідковують параметри роботи в реальному часі (температура, тиск, вологість сировини, рівень зносу елементів тощо); **зменшення людського фактора:** автоматизація знижує ймовірність помилок, що можуть виникати через недоліки у кваліфікації оператора або втому; **швидке реагування на зміни умов:** завдяки інтеграції із сучасними цифровими системами управління комплекс можна швидко адаптувати до змін в умовах виробництва або технологічних параметрів без зупинки всього процесу [11; 13].

Мехатронні комплекси значно підвищують продуктивність у порівнянні з традиційними методами виробництва комбікорму. Сучасні приводи, керовані комп'ютерними системами, дозволяють здійснювати точне управління рухом механічних частин та процесом виробництва і **точне дозування біологічно активних добавок.** Завдяки автоматичним системам додавання необхідної кількості добавок у комбікорм забезпечує рівномірність їх розподілу й оптимізує ефективність кінцевого продукту. Також високоточні ріжучі механізми дозволяють ефективно та швидко подрібнювати кукурудзяні початки, що зменшує час оброблення однієї партії матеріалу, завдяки чому зростає загальна продуктивність комплексу.

Однією з ключових переваг мехатронного комплексу є зниження енергоспоживання за одночасного збільшення продуктивності. Системи автоматизації дозволяють оптимально керувати процесами, зокрема:

- **оптимізація енергоспоживання:** у мехатронних комплексах застосовуються сучасні алгоритми, які дозволяють знижувати енергоспоживання шляхом автоматичного регулювання швидкості роботи механізмів залежно від обсягу та якості сировини;

- мехатронні комплекси можуть використовувати системи рекуперації енергії, що дозволяє частково повертати витрачену енергію в систему, що особливо важливо за великих обсягів виробництва;

- **раціональне використання потужності:** завдяки датчикам і системам контролю мехатронний комплекс може автоматично налаштовувати потужність двигунів, знижуючи її під час малих навантажень та підвищуючи під час інтенсивних робіт [14].

Мехатронний комплекс може легко налаштовуватися для оброблення різних видів сировини або для виробництва комбікорму з різними добавками. Це забезпечує високу гнучкість виробничого процесу та можливість швидкої адаптації до різних умов:

- **можливість зміни складу комбікорму:** система управління дозволяє швидко змінювати пропорції компонентів комбікорму, підлаштовуючись під конкретні вимоги або потреби замовника;

- **масштабованість:** комплекс може бути розширений або модернізований залежно від вимог до обсягів виробництва. Додавання нових модулів або вдосконалення програмного забезпечення дозволяють швидко адаптувати комплекс до нових завдань [7; 9].

Завдяки інтеграції систем діагностики комплекс має підвищену надійність і тривалий термін експлуатації:

- **системи самодіагностики:** комплекс оснащений системами самодіагностики, які в реальному часі відслідковують стан основних вузлів та компонентів. Це дозволяє оперативно виявляти проблеми та попереджати поломки, що значно знижує кількість простоїв;

- використання сучасних матеріалів і технологій змащування зменшує рівень зносу робочих елементів комплексу, що збільшує період між технічними обслуговуваннями та продовжує термін експлуатації обладнання;

- **прогнозування поломок:** завдяки збиранню та аналізу даних про роботу комплексу, система може прогнозувати можливі поломки, що дозволяє заздалегідь провести необхідні ремонтні роботи.

Автоматизовані системи діагностики та контроль технічного стану дозволяють значно знизити витрати на технічне обслуговування. Системи самодіагностики допомагають:

- попереджати про необхідність проведення технічного обслуговування, що дозволяє уникати аварійних ситуацій і мінімізувати зупинки виробництва;

- в **оптимізації витрат на запчастини:** завдяки системі контролю зносу елементів можна точно визначити, коли необхідна заміна компонентів, що допомагає уникати передчасних замін та скорочує витрати [4].

Мехатронний комплекс відповідає сучасним вимогам щодо екологічної безпеки:

- **зменшення викидів та споживання ресурсів:** комплекс використовує ефективні системи фільтрації та утилізації відходів, що знижує вплив на навколишнє середовище. Зменшення споживання енергії також сприяє екологічній ефективності;

- **мінімізація впливу на навколишнє середовище:** завдяки точному контролю за виробничим процесом зменшуються викиди шкідливих речовин і нераціональне використання природних ресурсів [15].

Проведення досліджень є ключовим етапом у розробленні мехатронного комплексу для виробництва комбікорму на основі кукурудзяних початків із додаванням біологічно активних добавок. Нижче детально описано основні експериментальні напрями і результати досліджень.

Першим етапом стало дослідження фізичних параметрів кукурудзяних початків, оскільки їхня форма, структура і вологість суттєво впливають на процес подрібнення і подальшого перероблення в комбікорм. Основні параметри, які були вивчені:

- фракційний склад: оцінювання середніх розмірів частинок після подрібнення. Визначено, що оптимальний розмір фракцій для подальшого змішування становить 0,5–1,0 мм;
- вологість початків: залежність якості подрібнення від вологості матеріалу показала, що сировина з вологістю понад 15% значно ускладнює процес подрібнення, потребуючи додаткового оброблення або попереднього сушіння;
- твердість і щільність сировини: вимірювалися механічні властивості кукурудзяних початків для вибору оптимальних режимів роботи подрібнювачів і дробарок. Висока щільність вимагає збільшення енергії на подрібнення, тому необхідно налаштовувати обладнання відповідно до цих параметрів [19].

Результати цих досліджень дозволили оптимізувати параметри роботи комплексу, вибравши відповідний режим для досягнення максимальної ефективності за мінімальних енерговитрат.

Другим важливим напрямом досліджень стало тестування сенсорних систем, які забезпечують автоматичний контроль за процесами:

- вагові дозатори: протестовано систему вагових дозаторів для точного вимірювання кількості сировини і добавок. Випробування показали, що точність дозування може варіювати в межах $\pm 1\%$ залежно від типу сировини;
- сенсори рівня змішування: використовувалися різні датчики (оптичні, ультразвукові) для визначення однорідності суміші комбікорму. Дослідження продемонстрували, що оптичні сенсори забезпечують кращу точність під час контролю рівня змішування, знижуючи ризик нерівномірного розподілу добавок;
- сенсори контролю якості подрібнення: ці датчики визначають розмір частинок після подрібнення і автоматично коригують режим роботи подрібнювача, забезпечуючи стабільний фракційний склад. Випробування показали, що завдяки автоматизації цього процесу можна зменшити відсоток відходів на 10–15%.

З метою визначення оптимальних добавок для покращення якості комбікорму було проведено серію експериментів із використанням різних біологічно активних речовин. Дослідження включали:

- Вивчення впливу на поживні властивості комбікорму. Додавання добавок на основі мікроелементів, ферментів і пробіотиків суттєво покращувало кінцевий продукт. Виявлено, що певні добавки підвищують поживну цінність комбікорму на 5–10% залежно від пропорцій.
- Дослідження на стабільність суміші. Одна з ключових проблем – це рівномірне розподілення добавок у комбікормі. Після серії тестів встановлено, що для досягнення рівномірного розподілу необхідно підтримувати певний температурний режим у процесі змішування, що було враховано в налаштуванні мехатронного комплексу [17; 18].
- Вплив на конверсію корму у тварин. Проведено дослідження згодовування різних варіантів комбікорму тваринам, що дозволило оцінити ефективність використаних добавок у порівнянні з традиційними рецептами. Виявлено, що додавання ферментів знижує витрату корму на одиницю приросту маси на 8–12%.

Одним із важливих аспектів роботи мехатронного комплексу є мінімізація зношування компонентів і збільшення терміну служби:



– Дослідження зношуваності ріжучих елементів. Ріжучі елементи подрібнювачів підлягали інтенсивним випробуванням на зносостійкість. Використання високоякісної сталі та спеціальних покриттів продемонструвало можливість збільшення терміну служби елементів на 20% порівняно з традиційними рішеннями.

– Дослідження впливу температури на механічні частини. Системи автоматичного охолодження були протестовані для забезпечення стабільної роботи під час високих навантажень. Дослідження показали, що підтримка оптимальної температури підвищує надійність механізмів і запобігає передчасному зносу.

– Випробування системи змащення. Розроблено і протестовано автоматичну систему змащування, яка працює в режимі реального часу і запобігає перегріву підшипників і редукторів. Це дозволило значно зменшити простой для обслуговування та ремонту комплексу.

Оскільки одна з ключових задач мехатронного комплексу – це енергетична ефективність, проведено низку досліджень з оптимізації енергоспоживання:

– Аналіз споживання електроенергії під час різних етапів виробництва. Виявлено, що найбільше енергії споживає подрібнювач, а процес змішування та дозування потребує значно менше ресурсів.

– Моделювання сценаріїв оптимізації. Випробувано кілька режимів роботи мехатронного комплексу, щоб знайти найбільш енергоефективні параметри. За допомогою програмного моделювання вдалося знизити загальне енергоспоживання на 15%, не жертвуючи продуктивністю.

У процесі розроблення мехатронного комплексу для виробництва комбікорму з кукурудзяних початків із додаванням біологічно активних добавок виконано ряд розрахунків і побудовано графіки для визначення оптимальних параметрів його роботи. Усі ці розрахунки базуються на результатах експериментальних досліджень.

Енергетична ефективність є одним із ключових параметрів роботи мехатронного комплексу. Для оптимізації споживання електроенергії проведено розрахунок витрат електроенергії на різних етапах виробництва комбікорму.

Формула для розрахунку енергоспоживання кожного етапу:

$$E = P \times t$$

де:

- E – енергоспоживання, кВт·год;
- P – потужність обладнання, кВт;
- t – час роботи обладнання, год.

Приклад розрахунку енергоспоживання для подрібнювача:

- Потужність подрібнювача – 15 кВт.
- Час роботи подрібнювача на обробку однієї партії кукурудзяних початків – 0,5 години.

$$E = 15 \text{ кВт} \times 0,5 \text{ год} = 7,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Для кожного етапу проведено аналогічні розрахунки, що дозволило оцінити загальне енергоспоживання комплексу.

Подрібнення: 7,5 кВт·год (найбільший споживач).

Змішування: 3,0 кВт·год.

Дозування: 1,5 кВт·год.

Транспортування сировини: 2,0 кВт·год.

Згідно з графіком, найбільше енергії витрачається на подрібнення сировини, тому було проведено додаткові дослідження для зниження енерговитрат на цьому етапі шляхом оптимізації режиму роботи і покращення якості ріжучих елементів.

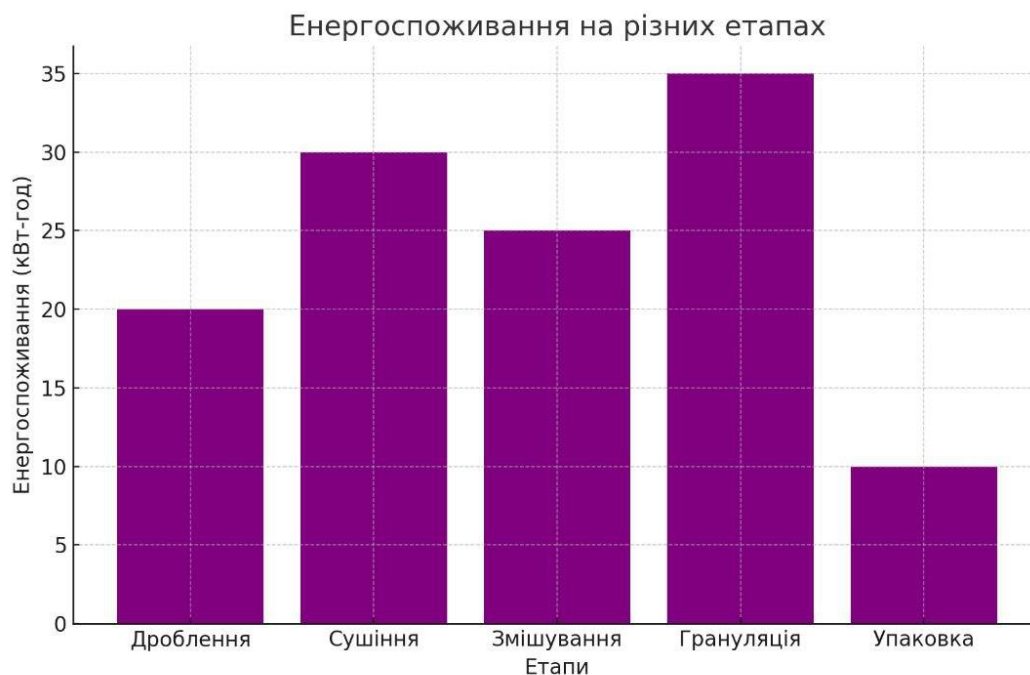


Рис. 1. Графік енергоспоживання на різних етапах

Для визначення загальної продуктивності мехатронного комплексу було враховано час, який витрачається на кожен етап виробничого циклу.

Формула для розрахунку продуктивності:

$$P = \frac{M}{T},$$

де:

P – продуктивність, кг/год;

M – маса обробленого матеріалу, кг;

T – загальний час оброблення, год.

Приклад розрахунку продуктивності для однієї партії:

- Маса кукурудзяних початків, які обробляються за один цикл – 500 кг.
- Час на оброблення однієї партії – 1,5 години.

$$P = \frac{500 \text{ кг}}{1,5 \text{ год}} = 333,3 \text{ кг/год}$$

Розрахунок продуктивності дозволив визначити, що за один робочий день (8 годин) комплекс може обробляти до 2,666 кг сировини.

На основі розрахунків побудовано графік, що показує залежність продуктивності від часу роботи комплексу. Продуктивність залишається стабільною за умови дотримання рекомендованих режимів роботи і своєчасного обслуговування обладнання [8; 7].

Знос ріжучих і механічних елементів комплексу було визначено як важливий параметр, що впливає на термін служби обладнання та потреби в технічному обслуговуванні.

Формула для розрахунку зносу елементів:

$$W = \frac{F \times N}{K}$$

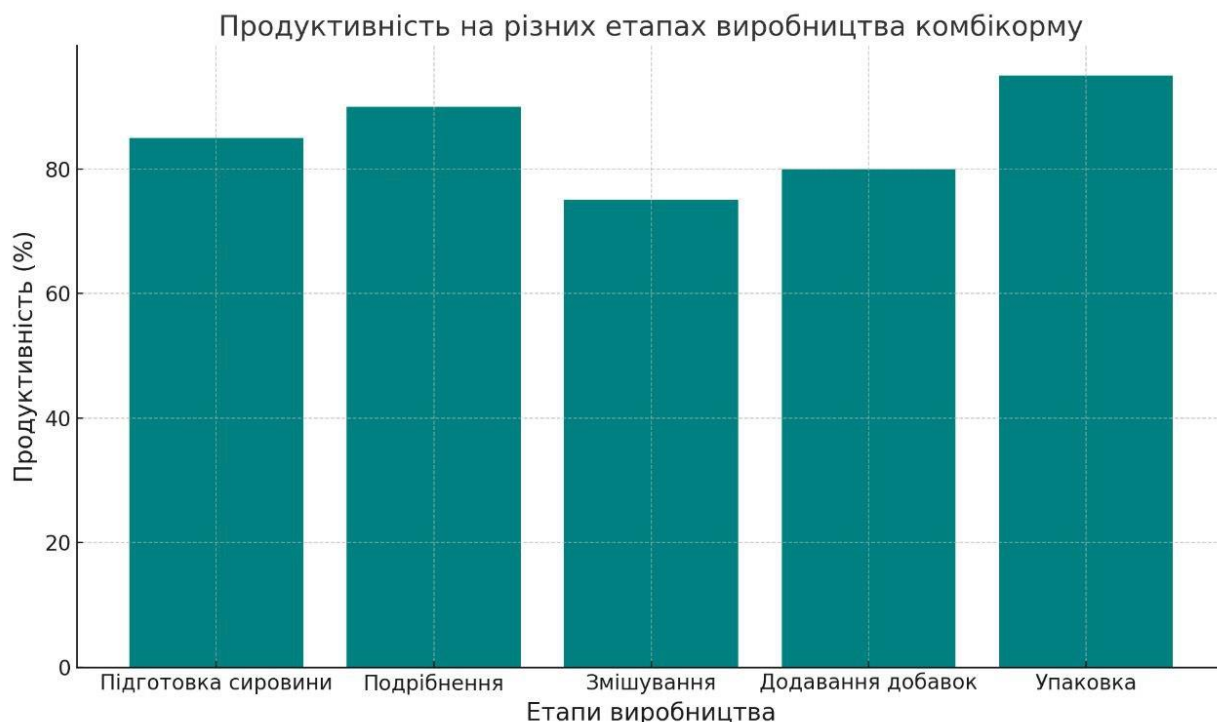


Рис. 2. Графік продуктивності

де:

- W – знос, мм;
- F – сила тертя, Н;
- N – кількість циклів роботи;
- K – коефіцієнт зносостійкості матеріалу.

Приклад розрахунку для ріжучих елементів:

- Сила тертя під час роботи – 500 Н.
- Кількість циклів роботи – 1000 циклів.
- Коефіцієнт зносостійкості для матеріалу ріжучих елементів – 300.

$$W = \frac{500 \times 1000}{300} = 1,67 \text{ мм}$$

Ці розрахунки дозволили оцінити термін служби ріжучих елементів, а також визначити інтервали для їх заміни чи заточування.

На графіку видно, що знос елементів збільшується лінійно з кількістю циклів роботи, однак його можна зменшити, використовуючи матеріали з високими зносостійкими властивостями або змащувальні системи.

Для досягнення найкращих результатів у виробництві комбікорму було проведено дослідження та розрахунки оптимальних пропорцій біологічно активних добавок. Експериментальні дані було зведено в таблиці залежності ефективності від кількості добавок [20].

Формула для розрахунку впливу добавок:

$$E_d = \frac{\Delta Q}{A}$$

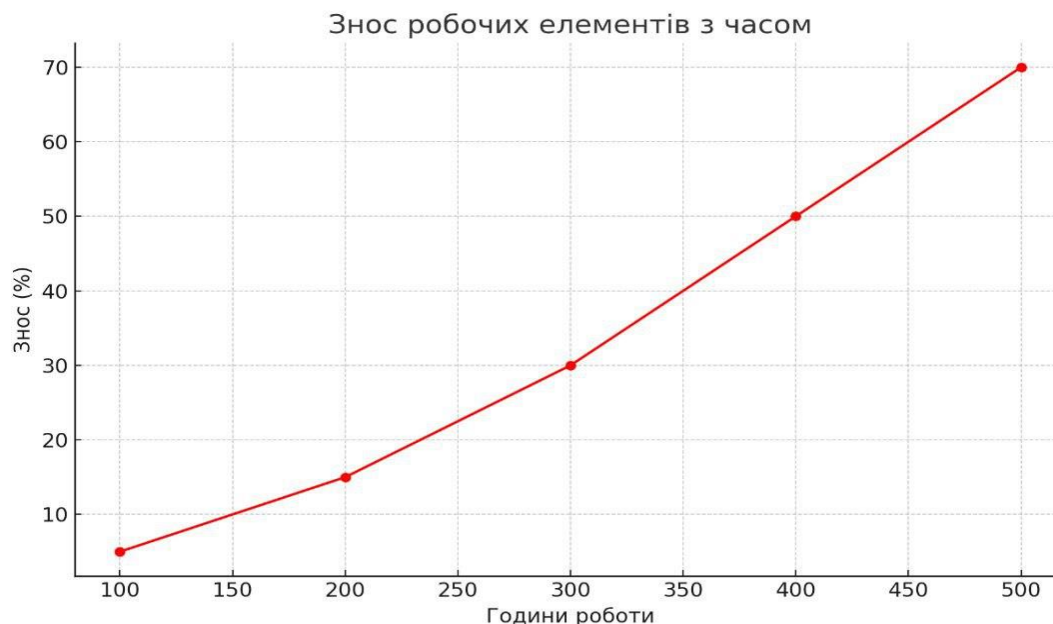


Рис. 3. Графік зносу робочих елементів

де:

- E_d – ефективність добавки;
- ΔQ – приріст якості корму;
- A – кількість добавки, % від загальної маси.

Приклад розрахунку ефективності:

- Приріст якості комбікорму – 10%.
- Кількість добавки – 5% від загальної маси.

$$E_d = \frac{10}{5} = 2$$

Ці розрахунки дозволили оптимізувати склад комбікорму, досягнувши максимальної ефективності за мінімальних витрат на добавки.

На графіку видно, що ефективність значно зростає в разі збільшення кількості добавок до певного рівня, після якого ефект стає менш вираженим, що дозволяє визначити оптимальні пропорції добавок для різних видів корму.

Для оптимізації роботи комплексу розраховано логістичні витрати, включаючи транспортування сировини і продукції. Проведено моделювання різних сценаріїв доставлення для мінімізування витрат [11].

Формула для розрахунку логістичних витрат:

$$C_t = D \times R \times V$$

де:

- C_t – загальні витрати на транспортування;
- D – відстань, км;
- R – вартість транспортування за км;
- V – обсяг транспортування, т.

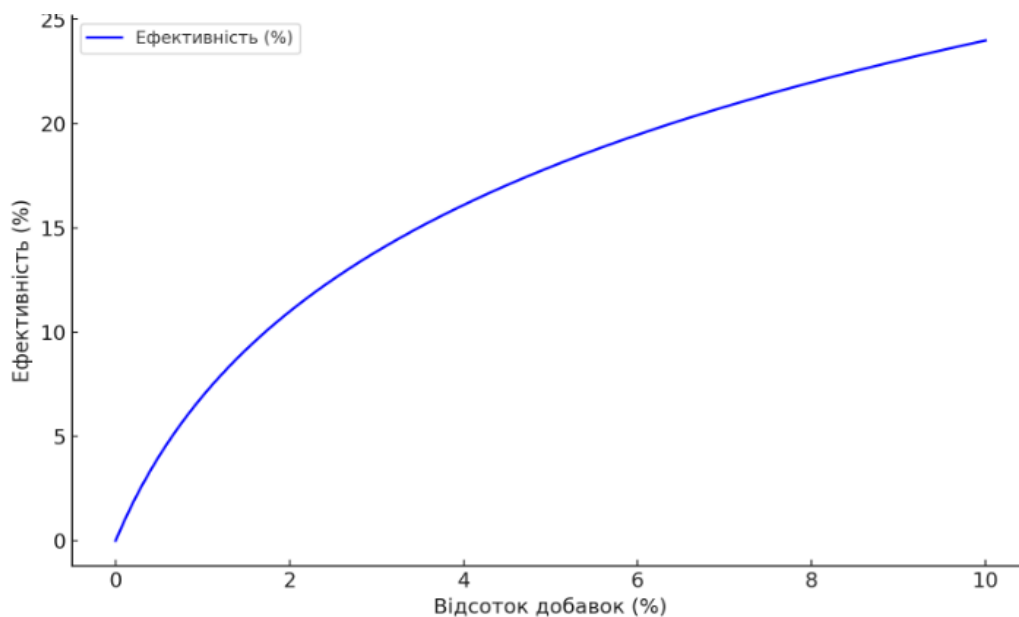


Рис. 4. Графік залежності ефективності від кількості добавок

Приклад розрахунку для доставки сировини:

- Відстань – 50 км.
- Вартість транспортування – 2 грн/км.
- Обсяг транспортування – 10 тонн.

$$C_t = 50 \times 2 \times 10 = 1000 \text{ грн}$$

Цей розрахунок дозволив оцінити витрати на транспортування і вибрати оптимальні маршрути для доставлення сировини.

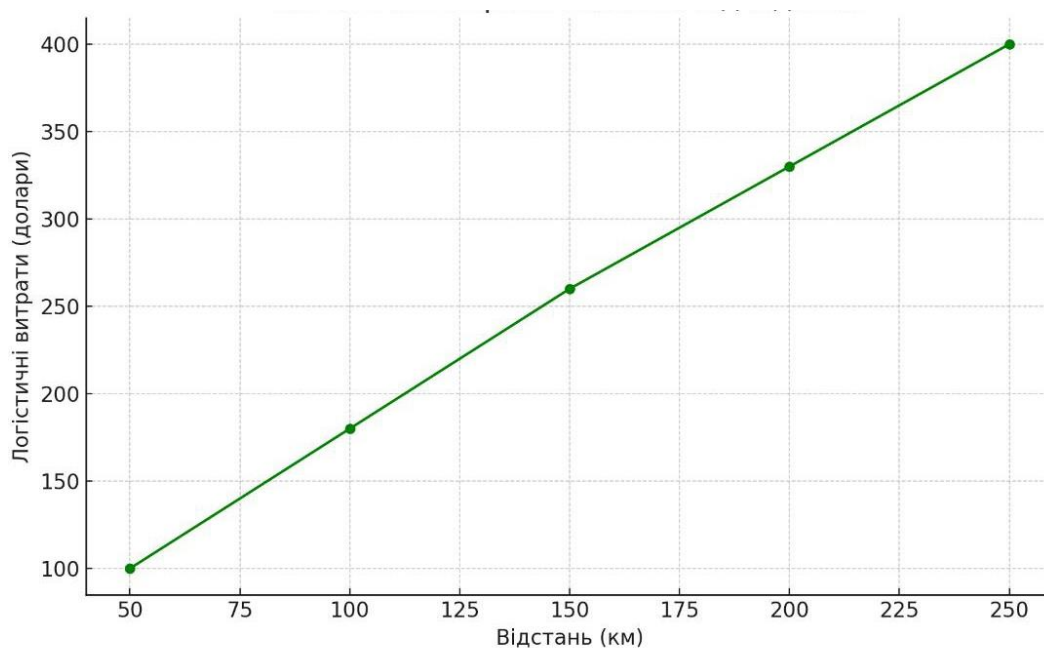


Рис. 5. Графік логістичних витрат

Висновки. Мехатронний комплекс для виробництва комбікорму з кукурудзяних початків з додаванням біологічно активних добавок має суттєві переваги над традиційними системами завдяки високому рівню автоматизації, продуктивності, надійності, а також енергетичній та екологічній ефективності.

Проведені дослідження дозволили приблизити створення високоефективного мехатронного комплексу для виробництва комбікорму з кукурудзяних початків. Завдяки використанню сучасних сенсорів, оптимізації процесів змішування і подрібнення, а також підбору біологічно активних добавок комплекс може забезпечити високу продуктивність, економію енергії і стабільну якість продукції.

Список використаних джерел

1. Бондаренко І.В., Коваль А.О. Сучасні підходи до виробництва комбікормів у сільському господарстві. *Аграрна наука*. 2019. № 4(25). С. 34–45.
2. Сидоренко П.М., Остапенко О.І. Автоматизація процесів у тваринництві: можливості мехатронних систем. *Технічні науки в агропромисловому комплексі*. 2021. № 12(3). С. 56–68.
3. Коваленко В.С. Біологічно активні добавки в кормах: сучасні тенденції та перспективи. *Журнал ветеринарної медицини та тваринництва*. 2020. № 7(9). С. 24–38.
4. Марчук І.П., Гавриленко Ю.В. Оптимізація процесу виробництва комбікормів за допомогою мехатронних комплексів. *Вісник аграрної техніки та технологій*. 2022. № 15(1). С. 29–41.
5. Філіпчук О.Д. Енергозбереження та екологічні аспекти мехатронних систем у сільському господарстві. *Агроінженерія*. 2021. № 8(2). С. 70–82.
6. Шевченко О.М. Інноваційні підходи до виробництва комбікормів: огляд технологій та мехатронних рішень. *Сільськогосподарські машини та обладнання*. 2020. № 5(6). С. 15–26.
7. Сидоров І.В., Заяць В.П. Теоретичні основи та практичне застосування мехатронних комплексів у виробництві кормів. *Мехатронні системи в агроінженерії*. 2020. № 9(2). С. 45–58.
8. Власенко О.В., Петренко М.П. Системи керування мехатронних комплексів для виробництва комбікормів. *Технічні науки: теорія та практика*. 2019. № 7(3). С. 34–47.
9. Єрмоленко А.К. Використання біологічно активних добавок у комбікормах для тваринництва: нові перспективи. *Технології кормовиробництва*. 2022. № 3(9). С. 13–25.
10. Григорович М.І. Ефективність застосування біологічно активних добавок у виробництві комбікорму з кукурудзи. *Агроінженерія та агротехнології*. 2020. № 4(8). С. 67–79.
11. Клименко О.Г. Технологічні аспекти використання мехатронних систем у виробництві комбікормів. *Агропромислові технології*. 2021. № 14(4). С. 91–101.
12. Крамаренко В.І. Роль мехатронних систем в оптимізації енергоефективності виробництва кормів. *Енергетика та агротехнології*. 2019. № 3(5). С. 45–53.
13. Семенченко Д.М., Борщук М.К. Інноваційні технології обробки сільськогосподарської сировини з використанням мехатронних комплексів. *Сільськогосподарська інженерія*. 2020. № 10(2). С. 59–72.
14. Остапчук І.О., Гончарук Ю.П. Технологічні процеси мехатронних комплексів у сільському господарстві: особливості та перспективи. *Техніка та автоматизація в АПК*. 2021. № 11(1). С. 38–50.
15. Кравченко В.А. Комплексне використання біологічно активних добавок у кормовиробництві для підвищення продуктивності тварин. *Сучасні аграрні технології*. 2022. № 6(12). С. 23–34.
16. Дяченко С.П. Експериментальні дослідження мехатронних комплексів для виробництва кормів із кукурудзяних початків. *Інженерія та машинобудування*. 2020. № 5(3). С. 18–30.
17. Мельник В.Г., Сухомлин О.С. Оцінка ефективності виробництва комбікорму з використанням мехатронних технологій. *Технології в аграрному секторі*. 2019. № 9(4). С. 77–86.
18. Харченко А.О., Мазур П.В. Впровадження мехатронних комплексів у виробництво комбікормів для підвищення ефективності. *Машини та обладнання для сільського господарства*. 2021. № 15(1). С. 62–74.
19. Лебедев В.І., Корнев О.П. Біологічно активні добавки у комбікормах: нові підходи та технології. *Агробіотехнології*. 2022. № 8(2). С. 45–55.



20. Зінченко Ю.В., Ткаченко В.М. Проблеми та перспективи мехатронних комплексів у виробництві кормів: аналіз і рішення. *Інновації в аграрній інженерії*. 2019. № 4(1). С. 55–64.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.

S. Shvets, V. Kalyna
Dnipro State Agrarian and Economic University

MECHATRONIC COMPLEX FOR FEED PRODUCTION: AUTOMATION, EFFICIENCY, INNOVATIONS

Summary

In the context of modern agricultural production, the issue of providing animals with high-quality feeds is extremely relevant, as it directly affects animal productivity and health. An important component of the feed base is compound feeds, which are produced from various types of plant raw materials, particularly from corn cobs, which are affordable and efficient resources for feed production. The use of biologically active additives significantly improves the nutritional value of feeds, their digestibility, and ensures better conditions for animal development. These additives help increase the efficiency of feed utilization, reducing feeding costs and providing animals with the necessary nutrients for optimal growth and development.

An essential condition for improving the production of compound feeds is the implementation of new approaches to their production. In this context, the development and application of mechatronic systems and automated technologies allows for high efficiency, reduced energy consumption, and improved product quality. Mechatronic complexes automate the processes of compound feed production, which helps reduce production time, improve the accuracy of ingredient dosing, and ensure consistent feed quality.

This paper focuses on the study of production processes for compound feed made from corn cobs with the addition of biologically active additives to improve feed quality. Special attention is given to the development of a mechatronic complex to automate the production process. The paper includes theoretical studies on the impact of biologically active additives on the nutritional value of compound feeds, as well as practical solutions for implementing automated complexes in feed production. This will significantly increase productivity, efficiency, and ecological safety in the feed production process.

Keywords: compound feeds, corn cobs, biologically active additives, mechatronic systems, automated technologies, feed production, feed digestibility, feed base.



ЕНЕРГОВИРОБНИЦТВО (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЄЮ)

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-19>

УДК 621.313.3.025.3-78

О. Ю. Вовк, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: Oleksandr.vovk@tsatu.edu.ua

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ РОБОЧИХ МАШИН В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

Анотація. У роботі отримано метод діагностування робочих машин з електроприводом. Він полягає у визначенні відносних втрат потужності в електродвигуні й механічній частині робочої машини за допомогою дослідів холостого ходу та короткого замикання. Ці досліді запропоновано проводити без застосування регулятора напруги, пристрою для загальмовування ротору і графічної побудови залежностей. Експериментальна перевірка встановила, що він здатен виявляти несправності, які можуть виникати в процесі експлуатації робочих машин. При цьому його технічна реалізація порівняно з існуючими є більш простою і не потребує специфічного обладнання і проведення значних розрахунків.

Ключові слова: асинхронний двигун, механічна частина, дослід холостого ходу, дослід короткого замикання, втрати потужності.

Постановка проблеми. На сьогодні для виробництва різноманітної продукції застосовується значна кількість робочих машин і механізмів з електроприводом. Найбільш розповсюджені електроприводи базуються на асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором [1]. Їх загальна кількість становить приблизно 70 % від усіх електричних машин, задіяних у різноманітних технологічних процесах [2]. Чимале застосування асинхронні двигуни отримали через високу конструкційну надійність і порівняно незначну вартість виготовлення й монтажу [3]. Проте на європейських підприємствах щорічно виходять з ладу до 4 % асинхронних двигунів приводу робочих машин [4]. На їх відновлення витрачається близько 8 % грошового обігу галузей економіки [5]. Крім того, додатково виникають певні витрати, пов'язані з раптовою зупинкою технологічних процесів [6]. Виходи з ладу електродвигунів в експлуатаційних умовах відбуваються внаслідок недосконалості пристроїв керування й захисту, а також системи обслуговування асинхронних двигунів [7]. На сьогодні вони не забезпечують підтримання конструкційної надійності асинхронних двигунів в умовах різноманітних експлуатаційних впливів (відхилення й асиметрії живлячої напруги [8], технологічних перевантажень з боку робочих машин, вібрації, вологості, агресивності та температури навколишнього середовища тощо [9]). На функціональний стан приводних електродвигунів також впливає ступінь роботоздатності механічної частини робочої машини. Будь-які несправності, погіршення тертя між її окремими частинами призводять до додаткового навантаження на приводний електродвигун і до прискорення його зношення. Тому дослідження проявів аномальності функціонального стану як приводного електродвигуна, так і механічної частини робочої машини, а також розробка методу їх діагностування є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Однією зі складових системи обслуговування асинхронних двигунів є діагностування. Воно дає змогу визначати функціональний стан електродвигунів і запобігати виникненню їх раптових виходів з ладу. Існуючі методи діагностування згідно [10–14] можна поділити так: часові, частотні, на основі штучного інтелекту. Часові методи діагностування полягають у вимірюванні одного або декількох параметрів через певні проміжки часу і порівнянні їх із базовими значеннями. За відхиленнями поточних значень від базових роблять висновок про справність асинхронних двигунів. Зазвичай методи не є складними в реалізації, але не дають можливості виявляти несправності, які зароджуються, і є чутливими до шумів мережі. Частотні методи діагностування полягають у розкладанні виміряного сигналу (струму, напруги, потужності тощо) у спектральний ряд і порівнянні його з еталонним. За спектрами сигналу, що відрізняються від еталона, виявляють певну несправність. Методи доволі точно дають змогу встановити несправність, що виникає під час експлуатації, але потребують наявності бази еталонних сигналів для кожного електродвигуна і значних розрахунків у разі наявності шумів мережі. Методи на основі штучного інтелекту базуються на штучній нейронній мережі й нечіткій логіці. За умови правильного навчання нейронної мережі такі методи є досить точними, але для здійснення такого навчання потрібно мати суттєвий обсяг даних для конкретного асинхронного двигуна щодо проявів його ймовірних несправностей.

Таким чином, існуючі методи діагностування мають певні недоліки, які призводять до обмеженого їх використання на практиці. До них належать такі: діагностування не всього електродвигуна, а тільки одного з його елементів; у разі діагностування електродвигуна загалом не вказується конкретний вузол, у якому з'явилося пошкодження; відсутність діагностування механічної частини робочої машини; значна вартість технічної реалізації процесу діагностування.

Формулювання мети статті (постановка завдання). У статті поставлено за мету розробку методу діагностування приводного електродвигуна й механічної частини робочої машини, який має просту технічну реалізацію і незначну вартість. Для цього потрібно обґрунтувати діагностичні параметри, методику їх визначення та застосування для встановлення функціонального стану робочої машини.

Основна частина. Розглянемо приводний асинхронний двигун як електромеханічний перетворювач енергії. З перетворенням електричної енергії у механічну в елементах його конструкції відбуваються втрати потужності, які обумовлені різними фізичними явищами. Причому кожен вид втрат локалізований у певних частинах об'єму асинхронного двигуна: електричні втрати в обмотці статора – у провідниках обмотки статора; електричні втрати в обмотці ротора – у провідниках обмотки ротора; втрати в магнітопроводі – переважно в осерді статора; механічні втрати – головню в підшипниках; додаткові втрати мають місце практично у всіх елементах електродвигуна (як у статорі, так і в роторі). Більшість несправностей, які виникають в електродвигуні під час його експлуатації, супроводжуються збільшенням втрат потужності в елементах його конструкції. Наприклад, виткове замикання в обмотці статора призводить до зменшення опору цієї обмотки і до збільшення сили струму у ній, як наслідок, збільшуються втрати потужності в обмотці статора. Зменшення перерізу стрижня обмотки ротора або його відрив у місці приєднання до кільця призводить до збільшення ковзання і, як наслідок, до збільшення втрат потужності в цій обмотці. Порушення ізоляції між листами магнітопроводу статора призводить до зменшення опору магнітопроводу вихровим струмам, до зростання вихрових струмів і, як наслідок, до збільшення втрат потужності в магнітопроводі статора. Погіршення змащення в підшипниках призводить до збільшення сил тертя і, як наслідок, до збільшення механічних втрат. Таким чином, відношення поточного значення втрат потужності в певному елементі конструкції до його базового значення є діагностичним параметром функціонального стану цього елемента. Отже, відношення поточного значення сумарних втрат

потужності в електродвигуні до його базового значення є діагностичним параметром функціонального стану електродвигуна загалом. Назвемо ці діагностичні параметри відносними втратами потужності й запишемо так:

$$B_{oc} = \frac{\Delta P_{e1}}{\Delta P_{e1(\delta)}} \cdot 100; B_{op} = \frac{\Delta P_{e2}}{\Delta P_{e2(\delta)}} \cdot 100; B_{m2} = \frac{\Delta P_{m2}}{\Delta P_{m2(\delta)}} \cdot 100; B_{mx} = \frac{\Delta P_{mx}}{\Delta P_{mx(\delta)}} \cdot 100, \quad (1)$$

де B_{oc} , B_{op} , B_{m2} , B_{mx} – відносні втрати потужності відповідно в обмотці статора, в обмотці ротора, в магнітопроводі, в механічній системі, %;

$\Delta P_{e1(\delta)}$, ΔP_{e1} – відповідно базові та поточні електричні втрати в обмотці статора,

Bm ; $\Delta P_{e2(\delta)}$, ΔP_{e2} – відповідно базові та поточні електричні втрати в обмотці ротора,

Bm ; $\Delta P_{m2(\delta)}$, ΔP_{m2} – відповідно базові та поточні втрати в магнітопроводі, Bm ;

$\Delta P_{mx(\delta)}$, ΔP_{mx} – відповідно базові та поточні механічні втрати, Bm ;

$$B_{\Sigma} = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma(\delta)}} \cdot 100, \quad (2)$$

де B_{Σ} – відносні сумарні втрати потужності у електродвигуні, %; $\Delta P_{\Sigma(\delta)}$, P_{Σ} – відповідно базові та поточні сумарні втрати потужності, Bm .

Асинхронний двигун вважається несправним, якщо виконується така умова [15]:

$$B_{\Sigma} > \frac{P_n}{\Delta P_n} \cdot \frac{1,15 - 0,85 \cdot \eta_n}{0,85 \cdot \eta_n - 0,15} \cdot 100, \quad (3)$$

де ΔP_n – номінальне значення сумарних втрат потужності електродвигуна (за паспортними даними),

Bm ; P_n – номінальна потужність електродвигуна (за паспортними даними), Bm ;

η_n – номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна (за паспортними даними).

Визначати втрати потужності в окремих вузлах приводного електродвигуна в умовах експлуатації найбільш доцільно за допомогою дослідів холостого ходу й короткого замикання. Дослід холостого ходу пропонується проводити спочатку за з'єднання обмотки статора зіркою, а потім – трикутником. Це дає змогу отримати значення споживаної потужності і струму за двох різних значень прикладеної напруги без застосування регулятора напруги. За допомогою вольтметра, амперметра та ватметра вимірюють таке: $U_{x(1)}$, $U_{x(2)}$ – фазні напруги на затискачах електродвигуна в досліді холостого ходу за з'єднання відповідно зіркою і трикутником, B ; $I_{x(1)}$, $I_{x(2)}$ – сили фазних струмів електродвигуна в досліді холостого ходу за з'єднання відповідно зіркою і трикутником, A ; $P_{x(1)}$, $P_{x(2)}$ – активні потужності, споживані електродвигуном в досліді холостого ходу за з'єднання відповідно зіркою і трикутником, Bm . Після дослідів вимірюється r_{1x} – активний опір фази обмотки статора, Om . За результатами вимірювань визначаються втрати потужності в механічній системі:

$$\Delta P_{mx} = \frac{U_{x(2)}^2 \cdot (P_{x(1)} - 3 \cdot r_{1x} \cdot I_{x(1)}^2) - U_{x(1)}^2 \cdot (P_{x(2)} - 3 \cdot r_{1x} \cdot I_{x(2)}^2)}{U_{x(2)}^2 - U_{x(1)}^2}, \quad (4)$$

та втрати потужності у магнітопроводі:

$$\Delta P_{m2} = P_{x(2)} - 3 \cdot r_{1x} \cdot I_{x(2)}^2 - \Delta P_{mx}. \quad (5)$$

Дослід короткого замикання пропонується проводити за з'єднання обмотки статора відкритим трикутником. Унаслідок цього опори асинхронного двигуна збільшуються в 3 рази, що дає змогу проводити дослід короткого замикання за номінальної напруги мережі без

застосування регулятора напруги. За таких умов сила струму в обмотках статора приблизно в 1,5–2 рази перевищує номінальне значення, що дає можливість електродвигуну витримати нетривалий підвищений температурний вплив під час проведення досліду короткого замикання. Тому за таких умов проведення досліду короткого замикання регулятор напруги не потрібен. Крім того, за з'єднання обмотки статора відкритим трикутником і подачі на неї фазної напруги в обмотці протікатиме однофазний синусоїдний струм. Він обумовить утворення в електродвигуні пульсуючого магнітного поля, тому ротор буде нерухомий і загальмовувати його немає потреби.

У досліді за допомогою вольтметра, амперметра й ватметра вимірюють таке: U_{κ} – напруга на затискачах електродвигуна в досліді короткого замикання, B ; I_{κ} – сила струму в обмотці статора електродвигуна в досліді короткого замикання, A ; P_{κ} – активна потужність, яку споживає електродвигун у досліді короткого замикання, $Вт$. Після досліду вимірюється $r_{1\kappa}$ – активний опір фази обмотки статора, $Ом$. За результатами вимірювань визначаються електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta P_{e1} = 3 \cdot r_{1\kappa} \cdot I_{\kappa}^2, \quad (6)$$

та електричні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta P_{e2} = P_{\kappa} - \Delta P_{e1} - \Delta P_{m2} \cdot \left(\frac{U_{\kappa}}{3 \cdot U_{x(2)}} \right)^2. \quad (7)$$

Сумарні втрати потужності у електродвигуні визначаються як сума (4) – (7), тобто

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{e2} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{mx}. \quad (8)$$

Наведена методика визначення втрат потужності в електродвигуні має певний недолік, пов'язаний із точністю визначення їх абсолютних значень. Це обумовлено тим, що характеристики холостого ходу асинхронного двигуна потрібно знімати для більшої кількості точок, а дослід короткого замикання – проводити за його номінального струму. Тобто методика має деяку методичну похибку визначення абсолютних значень втрат потужності. Ця похибка має постійне значення в разі встановлення базових і поточних значень втрат потужності, що обумовлено незмінністю умов проведення досліду та розрахунку. У разі ділення одного абсолютного значення втрат потужності на інше методична похибка скорочується й отримується точне значення діагностичного параметра. Тобто наведена методика дає змогу точно встановлювати відносні втрати потужності у приводному електродвигуні та не потребує застосування регулятора напруги і пристрою для загальмовування ротора.

Діагностування асинхронного двигуна полягає у фіксації змін його функціонального стану протягом експлуатації за допомогою дослідів холостого ходу й короткого замикання за методикою, наведеною вище. Назвемо ці досліді випробуванням приводного електродвигуна. На початку експлуатації електродвигун, встановлений на новій робочій машині, вважається справним. На цьому етапі на ньому проводять базове випробування, за результатами якого встановлюють базові значення окремих втрат потужності за (4)–(7) та сумарних втрат за (8). Через деякий час експлуатації (індивідуальний для кожного типу робочих машин) проводять поточне випробування, за результатами якого встановлюють поточні значення окремих втрат потужності за (4)–(7) та сумарних втрат за (8). Потім визначають відносні сумарні втрати потужності в електродвигуні за (2) і порівнюють їх з допустимим значенням (3). Якщо нерівність (3) виконується, то електродвигун є несправним і його виводять у ремонт. Для полегшення пошуку несправного вузла визначають відносні втрати потужності в окремих вузлах електродвигуна за (1). Вузол, у якому найбільша відносна втрата потужності, вважається несправним і йому

потрібно приділити найбільшу увагу під час дефектації. Таких вузлів може бути декілька, якщо декілька відносних втрат суттєво відрізняються від інших. Таким чином, блок-схема визначення функціонального стану приводного електродвигуна за періодичного контролю в експлуатації має вигляд, наведений на рис. 1.

Розглянемо механічну частину робочої машини як електромеханічний перетворювач енергії. За перетворення електричної енергії у механічну в елементах її конструкції відбуваються втрати потужності, які обумовлені явищем тертя.

Якщо електродвигун, який приводить у рух механічну частину робочої машини, працює без приєднання до неї, то механічна потужність на його валу дорівнює механічним втратам у ньому, тобто

$$P_{mx(x.x.\partial\theta)} = \Delta P_{mx}, \quad (9)$$

де $P_{mx(x.x.\partial\theta)}$ – механічна потужність на валу електродвигуна, який працює на холостому ході, Вт.

Значення ΔP_{mx} (а відповідно і $P_{mx(x.x.\partial\theta)}$) визначається за (4) згідно з наведеною вище методикою.

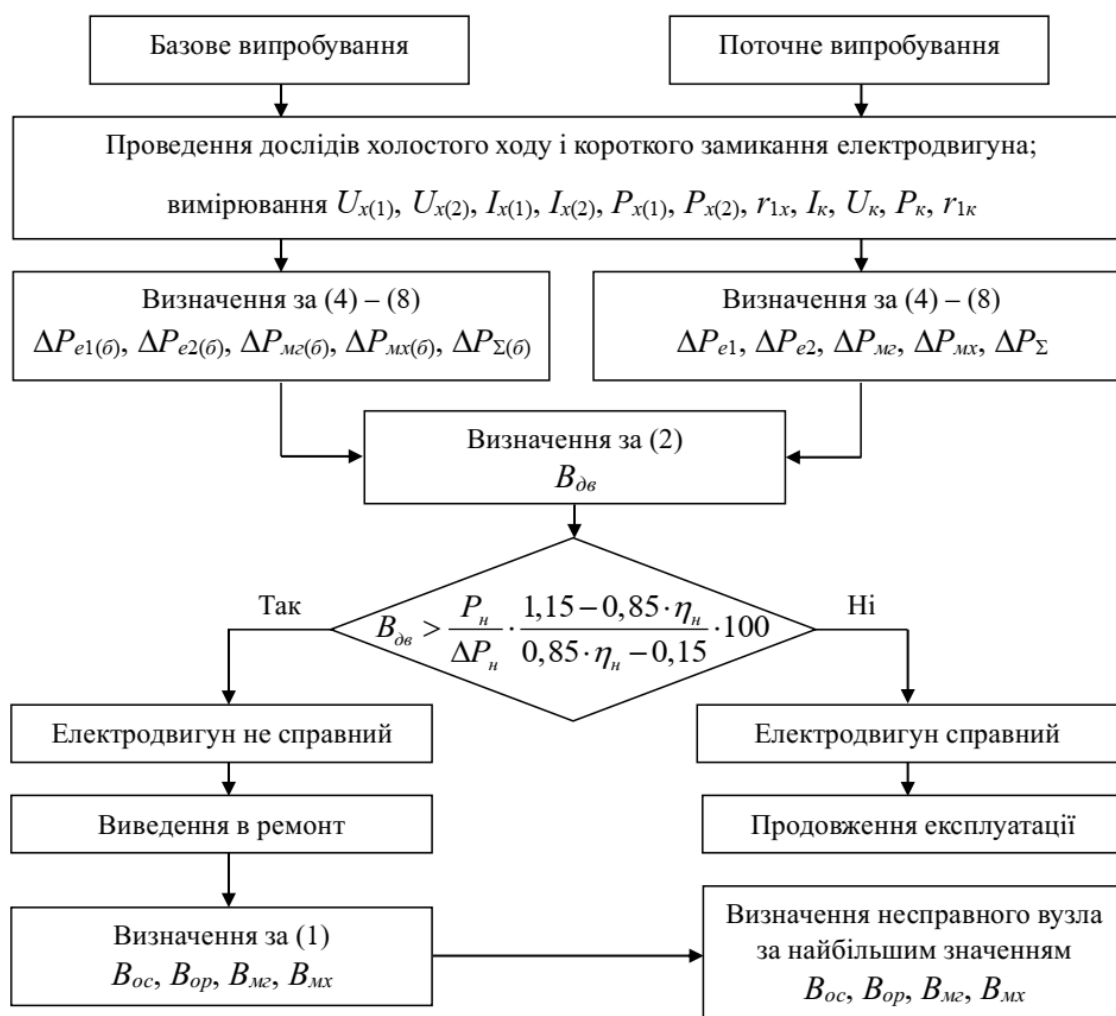


Рис. 1. Блок-схема визначення функціонального стану приводного електродвигуна за періодичного контролю в експлуатації

Якщо приводний електродвигун працює з приєднаною до нього робочою машиною, яка працює на холостому ході (тобто не завантажена сировиною, що у ній переробляється), то механічна потужність на його валу дорівнює:

$$P_{mx(x.x.pm)} = \Delta P_{mx} + P_{x.x.pm}, \quad (10)$$

де $P_{mx(x.x.pm)}$ – механічна потужність на валу електродвигуна, який працює з приєднаною незавантаженою робочою машиною, Вт; $P_{x.x.pm}$ – потужність, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, Вт.

Для визначення механічної потужності на валу електродвигуна, який працює з приєднаною незавантаженою робочою машиною, проводять його дослід холостого ходу за методикою, описаною вище, і розраховують $P_{mx(x.x.pm)}$ за (4).

З (10) випливає, що

$$P_{x.x.pm} = P_{mx(x.x.pm)} - \Delta P_{mx}. \quad (11)$$

У разі погіршення змащування окремих елементів механічної частини робочої машини або виникнення їх механічних ушкоджень збільшуватимуться втрати потужності в таких елементах, що обумовить зростання $P_{x.x.pm}$. Тому діагностичним параметром функціонального стану механічної частини робочої машини є відносна потужність, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, тобто

$$B_{pm} = \frac{P_{x.x.pm}}{P_{x.x.pm(b)}} \cdot 100, \quad (12)$$

де B_{pm} – відносна потужність, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, %;

$P_{x.x.pm(b)}$, $P_{x.x.pm}$ – відповідно базова та поточна потужність, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, Вт.

Механічна частина робочої машини вважається несправною, якщо виконується така умова:

$$B_{pm} > \frac{M_0}{M_0 + \Delta M_{0(don)}} \cdot 100, \quad (13)$$

де M_0 – момент зрушення робочої машини, Н·м;

$\Delta M_{0(don)}$ – допустиме абсолютне відхилення моменту зрушення робочої машини (вказується у паспортних даних), Н·м.

Діагностування механічної частини робочої машини полягає у фіксації змін її функціонального стану протягом експлуатації за допомогою дослідів роботи приводного електродвигуна без приєднаної механічної частини робочої машини (дослід холостого ходу електродвигуна) і з приєднаною незавантаженою механічною частиною робочої машини (дослід холостого ходу механічної частини робочої машини) аналогічно досліді холостого ходу електродвигуна, показаному вище. Назвемо ці досліді випробуванням механічної частини робочої машини. На початку експлуатації механічна частина нової робочої машини вважається справною. На цьому етапі на ній проводять базове випробування. За результатами цього випробування встановлюють базове значення потужності, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, за (4) і (11). Через деякий час експлуатації (індивідуальний для кожного типу робочих машин) проводять поточне випробування. За його результатами встановлюють поточне значення потужності, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, за (4) і (11). Потім визначають відносну потужність, яка витрачається на тертя елементів механічної частини незавантаженої робочої машини, за

(12) і порівнюють його з допустимим значенням (13). Якщо нерівність (13) виконується, то механічна частина робочої машини є несправною і її спрямовують на профілактичне обслуговування або виводять у ремонт. Таким чином, блок-схема визначення функціонального стану механічної частини робочої машини за періодичного контролю в експлуатації має вигляд, наведений на рис. 2.

У лабораторних умовах запропонований метод діагностування було перевірено на стрічковому транспортері. У нього було спочатку введено погіршення змащування механічної частини, а потім виткове замикання обмотки статора приводного електродвигуна. В обох випадках запропонований метод діагностування виявив ці несправності.

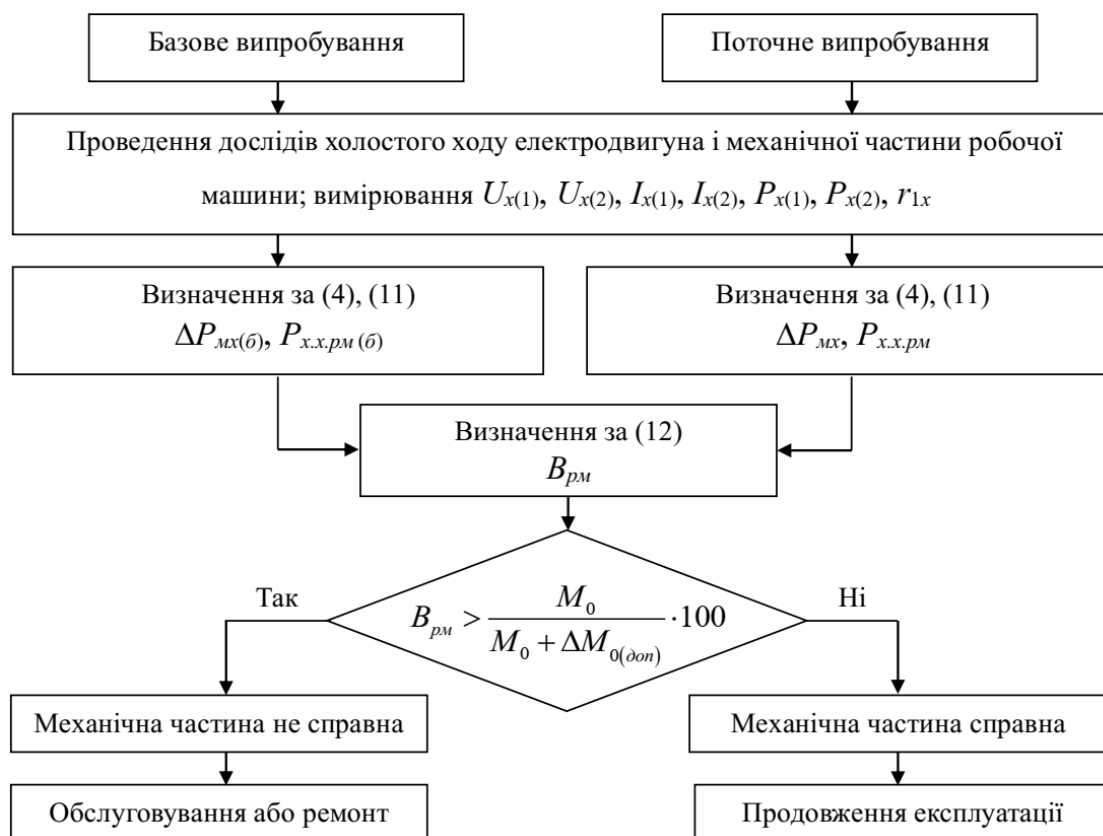


Рис. 2. Блок-схема визначення функціонального стану механічної частини робочої машини за періодичного контролю в експлуатації

Висновки. Таким чином, у роботі запропоновано метод діагностування робочих машин, які приводяться у дію електроприводом з асинхронним двигуном. Він спрямований на контроль функціонального стану як приводних електродвигунів, так і механічних частин робочих машин за періодичного контролю в експлуатаційних умовах. Метод ґрунтується на оригінальній методиці проведення дослідів холостого ходу й короткого замикання, яка не передбачає наявності регулятора напруги, пристрою для загальмовування ротору і графічних побудов. Як діагностичні параметри застосовано відносні втрати потужності в електродвигуні й механічній частині робочої машини. Складено блок-схеми для визначення несправності електрифікованих робочих машин. Недоліком запропонованого у статті методу є те, що його можна застосовувати тільки для робочих машин, у яких приводні асинхронні двигуни мають шість вивідних затисків. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методу діагностування несправностей окремих елементів механічних частин робочих машин.

Список використаних джерел

1. Cherif H., Benakcha A., Khechekhouché A., Menacer A., Chehaidia S.E., Panchal H. Experimental diagnosis of inter-turns stator fault and unbalanced voltage supply in induction motor using MCSA and DWER. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2020. Vol. 8 (3). P. 1202–1216. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v8i3.1058>.
2. Maestre-Cambronel D., Rojas J.P., Duarte-Forero J. Evaluation of Faults in the Squirrel Cage Three-Phase Induction Motors. *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*. 2022. Vol. 21 (40). P. 126–142. <https://doi.org/10.22395/rium.v21n40a8>.
3. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-Saving Control of Asynchronous Electric Motors for Driving Working Machines. In *Modern Development Paths of Agricultural Production*; Springer: Cham, Switzerland. 2019. P. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43.
4. Ferreira F.J.T.E., Baoming G., de Almeida A.T. Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2016. Vol. 52 (6). P. 4628–4637. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2600677>.
5. Sudhakar I., Adi Narayana S., Anil Prakash M. Condition Monitoring of a 3- ϕ Induction Motor by Vibration Spectrum analysis using Fft Analyser – A Case Study. *Mater. Today: Proc.* 2017, Vol. 4 (2/A). P. 1099–1105. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.125>.
6. Tareq M.A. Al-Quraan, Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Nurul Mohammad Zayed, K. M. Anwarul Islam. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*. 2022. Vol. 7 (92). <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>.
7. Misra S., Kumar S., Sayyad S., Bongale A., Jadhav P., Kotecha K., Abraham A., Gabralla L.A. Fault Detection in Induction Motor Using Time Domain and Spectral Imaging-Based Transfer Learning Approach on Vibration Data. *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 8210. <https://doi.org/10.3390/s22218210>.
8. Rodriguez-Blanco M.A., Golikov V., Vazquez-Avila J.L., Samovarov O., Sanchez-Lara R., Osorio-Sánchez R., Pérez-Ramírez A. Comprehensive and Simplified Fault Diagnosis for Three-Phase Induction Motor Using Parity Equation Approach in Stator Current Reference Frame. *Machines*. 2022. Vol. 10. P. 379. <https://doi.org/10.3390/machines10050379>.
9. Al_Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. Vol. 13 (3). P. 2323–2334. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>.
10. Yiqi Liu, Ali M. Bazzi. A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art. *ISA Transactions*. 2017. Vol. 70. P. 400–409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2017.06.001>.
11. Terron-Santiago C., Martinez-Roman J., Puche-Panadero R., Sapena-Bano A. A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling. *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 4855. <https://doi.org/10.3390/s21144855>.
12. Garcia-Calva T., Morinigo-Sotelo D., Fernandez-Cavero V., Romero-Troncoso R. Early Detection of Faults in Induction Motors – A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 7855. <https://doi.org/10.3390/en15217855>.
13. Gultekin M.A., Bazzi A. Review of Fault Detection and Diagnosis Techniques for AC Motor Drives. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 5602. <https://doi.org/10.3390/en16155602>.
14. Frosini L. Monitoring and Diagnostics of Electrical Machines and Drives: a State of the Art. *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Athens, Greece, 2019. P. 169–176. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2019.8887815>.
15. IEC60034-1. International standard. Rotating electrical machines. Part 1: Rating and performance.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025 р.



O. Vovk
Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

DIAGNOSTICS OF ELECTRIFIED WORKING MACHINES IN OPERATING CONDITIONS

Summary

The work considers the control of the functional state of electrified working machines, which are driven by asynchronous motors. It is shown that they are the most widespread due to the high structural reliability of the drive electric motors. However, in practice, many cases of their failure are observed due to the presence of certain operational influences that are difficult to predict during design. One of the ways to correct this situation is to use periodic diagnostics of these working machines. Analysis of existing diagnostic methods revealed their imperfection, which complicates the application of these methods in production operation. Therefore, the paper substantiates rational diagnostic parameters relative power losses in the asynchronous motor and the mechanical part of the working machine, changes in which are caused by their malfunctions. These parameters allow assessing the functional state of the specified elements of the working machine during its periodic control under operating conditions. It is proposed to determine the specified diagnostic parameters using idling and short-circuit experiments. For the drive electric motor, both experiments are conducted, for the mechanical part of the working machine an idle test. The work proposes an original method for conducting the specified experiments, which allows you to get rid of the voltage regulator and the device for braking the rotor. The method of calculating diagnostic parameters based on the results of the specified experiments makes it possible not to perform graphical constructions of the characteristics of the electric motor. The work consists of block diagrams for detecting faults in the drive electric motor and the mechanical part of the working machine. Using the specified diagnostic parameters, the method of their determination and the block diagram for detecting faults, a method for diagnosing working machines with an electric drive based on asynchronous motors has been developed. Its technical implementation, in comparison with existing methods, is simpler and does not require specific equipment and significant calculations. Experimental verification of this diagnostic method has shown its ability to detect the most common faults in working machines. The disadvantage of the method is that it can be used only for asynchronous motors with six output terminals.

Keywords: asynchronous motor, mechanical part, no-load test, short-circuit test, power loss.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-20>

УДК 621.311:621.311.25

С. В. Галько¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

О. В. Сотнік², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-2518-3726

О. О. Мірошник², д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

О. В. Сотнік², аспірант

ORCID: 0009-0000-4575-5114

Д. М. Зеленков¹, аспірант

ORCID: 0009-0002-9685-9196

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Державний біотехнологічний університет, м. Харків

e-mail: galkosv@gmail.com

ЗБАЛАНСУВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ СІЛЬСЬКИХ КОМУНАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Анотація. У роботі проведено аналіз змін у добовому графіку електричних навантажень лінії трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА в Харківській області, яка живить сільські житлові будинки взимку та влітку. Для згладжування піків навантаження й оптимізації енергоспоживання проведено розрахункової ефективності використання пристроїв накопичення енергії для визначення можливостей їх використання. Виконано аналіз добового споживання енергії по двадцяти приватних будинках, включно з розрахунком і оцінкою енергії, необхідної для забезпечення роботи побутових електроприладів протягом 24 годин. На основі отриманих даних побудовані графіки добового навантаження, що відображають зміни в споживанні енергії протягом доби. Запропоновано метод збалансування графіків навантажень за допомогою сонячної панелі та накопичувача енергії. Цей метод дає змогу підвищити ефективність таких електричних мереж.

Ключові слова: низьковольтні сільські електричні мережі, сільські житлові будинки, графік електричного навантаження, зелена енергетика, сонячна панель, накопичувач електричної енергії.

Постановка проблеми. Зміна електричного навантаження в побутовому секторі є випадковим процесом і потребує ретельного вивчення та побудови графіків зміни споживання за добу для різних сезонів року. Для покращення якості електроенергії у споживачів, згладжування піків навантаження та оптимізації енергоспоживання побутовими споживачами відомі різні способи й технічні рішення. Один із таких способів – це використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) разом із накопичувальними пристроями. Ключовою проблемою ВДЕ є їх залежність від погодних умов, що призводить до нестабільного виробництва енергії. Дослідження показують, що найефективнішим універсальним підходом для збалансування цієї мінливості є використання їх з буферними акумуляторними батареями.

Аналіз останніх досліджень. ВДЕ перебувають на шляху стрімкого розвитку. Великий відсоток ВДЕ надходить від сонячних електростанцій (СЕС). У 2022 році кількість СЕС у всьому світі зросла на 239 ГВт нових сонячних панелей. Це на 45 % більше, ніж роком раніше. Експерти прогнозують глобальний прогноз розвитку сонячної енергетики на рівні близько 800 ГВт енергії від сонячних панелей у 2027 році [1].

Також в Україні діє Закон «Про відновлювальні джерела енергії», який встановлює правові відносини між постачальниками та споживачами електричної енергії. Незважаючи на всі свої недоліки, він стимулює виробництво електричної енергії із сонячної енергії в Україні [2].

Україна також має значний потенціал сонячної енергетики, близько $1235 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$, що сприяло стрімкому розвитку сонячної енергетики [3, 4]. Проте відбулося зниження інвестиційної привабливості України в розвитку ВДЕ. Уперше з 2015 року спостерігався відтік інвестицій, який у 2020 році становив \$868,2 млн [5]. Підвищення тарифів на електричну енергію та нестабільність у роботі традиційних електричних мереж є основними факторами, які роблять попит на СЕС в Україні значним [6, 7].

Виробництво електричної енергії СЕС багато в чому залежить від інтенсивності сонячної радіації, яка дуже нерівномірна як протягом доби, так і протягом усього року [8–10]. Для підвищення надійності та стабільності роботи СЕС доцільно вибирати відповідні технічні рішення для зберігання електричної енергії в системі електропостачання [11, 12]. Технічні рішення, що дають змогу резервувати енергію, можуть бути різноманітними, але повинні задовольняти можливості й потреби електрогенераторів і споживачів у кожному конкретному випадку [13–15].

Формулювання мети статті. Обґрунтувати метод збалансування добових графіків навантажень за допомогою сонячної генерації та накопичувачів енергії та розробити рекомендації щодо його використання.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі *завдання досліджень*:

- провести аналіз добового споживання енергії приватними будинками, включно з розрахунком і оцінкою енергії, необхідної для забезпечення роботи побутових електроприладів протягом 24 годин;
- для згладжування піків навантаження й оптимізації енергоспоживання виконати розрахунок ефективності використання пристроїв накопичення енергії для визначення можливостей їх використання;
- обґрунтувати метод збалансування добових графіків навантажень із використанням сонячних панелей і акумуляторів енергії;
- розробити рекомендації щодо практичного застосування методу збалансування добових графіків навантажень із використанням сонячних панелей і акумуляторів енергії.

Основна частина. Пристрої накопичення енергії відіграють важливу роль у роботі СЕС [16, 17]. Вони допомагають зменшити залежність від традиційних джерел енергії, як-от газ, нафта та вугілля, та сприяють переходу на відновлювані джерела енергії, зокрема сонце та вітер. Це могло б зменшити навантаження на енергосистему та зробити її незалежною від традиційних джерел, що дуже важливо для України. Це також може скоротити викиди парникових газів, що особливо важливо для боротьби зі зміною клімату [18–20]. Вони дають можливість зберігати енергію, вироблену з відновлюваних джерел, у періоди, коли виробництво перевищує споживання, і використовувати в пікові періоди для зниження навантаження на електромережу й запобігання перевантажень [21, 22].

Пристрої накопичення енергії також можуть використовуватися для управління навантаженнями в системі Smart Grid [23, 24]. Вони можуть заряджатися в періоди низького попиту та використовуватися для згладжування пікових навантажень шляхом постачання додаткової енергії під час пікового попиту, що допомагає збалансувати навантаження на систему й підвищити енергоефективність [25, 26]. Накопичувач енергії є важливим елементом у розвитку Smart Grid, що дає змогу створити більш ефективну та стійку систему енергопостачання на основі відновлюваних джерел енергії з використанням сучасних технологій.

Для згладжування піків навантаження й оптимізації енергоспоживання було проведено розрахунок ефективності використання пристроїв накопичення енергії для визначення можливостей їх використання. Із цією метою був проведений аналіз добового споживання енергії по двадцяти приватних будинках, включно з розрахунком і оцінкою енергії, необхідної для забез-

печення роботи побутових електроприладів протягом 24 годин. На основі отриманих даних був побудований графік добового навантаження, що відображає зміни в споживанні енергії протягом доби. Ці 20 житлових будинків розташовані в сільській місцевості та мають живлення від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА в Харківській області.

На основі теорії ймовірностей розроблено метод дослідження комунальних побутових електричних навантажень. В основі методу розрахунку електричних навантажень лежить принцип врахування ймовірності включеного стану приладів, дані про які беруться зі служб обслуговування електричних мереж.

Електричне навантаження на трансформатор визначається за рівнянням [27]:

$$S_{(y)} = \sum_{i=1}^r P_i m_i p_i + \bar{z}(y) \left[\sum_{i=1}^r P_i^2 m_i p_i q_i \right]^{0.5}, \quad (1)$$

де p – ймовірність включення приладу;

q – ймовірність знаходження пристрою у вимкненому стані;

m – кількість пристроїв, що живляться від цієї трансформаторної підстанції, од;

P – навантаження цього пристрою, кВт;

y – кількість добових максимумів, од.;

$\bar{z}(y)$ – поправочний коефіцієнт (міра відхилення від середнього значення найбільшого добового піку);

i – індекс, що відображає кількість одного типу пристрою, од.;

r – кількість різних типів пристроїв, од.

Для формування сумарного електричного навантаження однієї лінії або трансформаторної підстанції (ТП) загалом може бути застосована схема незалежних випробувань і властивостей адитивності. При цьому число електричних споживачів (m), які одночасно беруть участь у максимальному електричному навантаженні, визначається з біноміального закону розподілу [28–30]. У фіксований момент часу групове електричне навантаження створюється сумою окремих навантажень, випадково включених m споживачами електроенергії [31]:

$$P_{(t)} = \sum_{i=1}^m P_i(t), \quad (2)$$

де P_i – активна потужність споживача електроенергії, кВт.

Тобто зміна електричного навантаження в побутовому секторі є випадковим процесом і потребує ретельного вивчення та побудови графіків зміни споживання за добу для різних сезонів року [32–34].

За середнє значення електричного навантаження шляхом погодинного запису показань лічильника прийняті дані для побудови добових змін електричного навантаження 20 будинків у сільській місцевості на зимовий та літній періоди. Це здійснювалося протягом 24 годин чотири рази на місяць (грудень, січень, лютий і червень, липень, серпень) на лінії, яка відходить від ТП, що забезпечує електроживлення.

У таблиці 1 представлені можливі споживачі електроенергії в приватних житлових будинках у сільській місцевості і їх робочий час за добу.

Результати вимірювань потужності ТП наведені в таблиці 2. За вимірними даними потужності побудований графік зміни потужності протягом доби для лінії, що відходить від ТП, яка забезпечує електроенергією 20 будинків.



Таблиця 1

Результати вимірювань електричних навантажень ТП 10/0,4 кВ

Найменування споживача електромережі	Активна потужність, кВт/год, на одиницю	Час роботи за добу, год
Лампа світлодіодна	0,02	5
Лампа розжарювання	0,6	3
Холодильник	0,3	24
Електричний насос	1,0	0,5
Електричний насос	1,2	0,2
Посудомийна машина	1,2	1,0
Чайник	2,0	0,2
Кавоварка	2,0	0,2
Пральна машина автомат	1,3	1,5
Телевізор	0,2	6
Кондиціонер	1,0	1,5
Комп'ютер	0,4	5
Електричний водонагрівач	2,0	4
Зарядний пристрій	0,02	1
Пилосос	1,3	0,5
Мікрохвильова піч	2,0	0,2
Обігрівач	1,0	5,0
Маслозбивальна машини	0,7	0,2
Дробарка	1,2	0,2
Кухонна техніка з електроприводом	0,35	0,3

Таблиця 2

Результати вимірювань зміни потужності літнього та зимового сезонів лінії, що відходить від ТП 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА в Харківській області

Години доби	Потужність, кВт, літо	Потужність, кВт, зима
1	14,6	28,4
2	12,7	23,5
3	14,9	16,2
4	13	12,8
5	15,8	16,8
6	16,4	18,4
7	28,8	38,5
8	37,1	39,9
9	33,9	42,1
10	29,1	33,6
11	23	28,7
12	15,1	28
13	19,6	27,9
14	22,3	28,9
15	22,2	28,8
16	22,6	38,4
17	22,6	42,6
18	36,8	47,3
19	33	52,4
20	33,3	48,4
21	40,1	44,2
22	31	41,6
23	25,3	39,3
24	18,6	32,6

Максимальний час використання навантаження дорівнює [35]

$$T_{\max} = \frac{\Delta W}{P_{\max}}, \quad (3)$$

- для літа: $T_{\max} = \frac{581,8}{40,1} = 14,51$, год;

- для зими: $T_{\max} = \frac{799,3}{52,4} = 15,25$, год,

де ΔW – різниця показань лічильника на початку і наприкінці вимірювань;

$P_{\max}$ – максимальна середня потужність.

Визначимо середнє навантаження:

$$P_{\text{av}} = \frac{\Delta W}{24}, \quad (4)$$

- для літа: $P_{\text{av}} = \frac{581,8}{24} = 24,24$ кВт;

- для зими: $P_{\text{av}} = \frac{799,3}{24} = 33,3$ кВт.

У розрахунках також враховувалися показники й аналітичні вирази для розрахунків, які наведені нижче.

Середньоквадратичне значення потужності [36]:

$$P_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\Delta t \sum_{i=1}^{23} P_i^2}{T}}. \quad (5)$$

Форм-фактор діаграми:

$$k_{\text{gsf}} = \frac{P_{\text{RMS}}}{P_{\text{av}}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт заповнення графіка:

$$k_{\text{gff}} = \frac{P_{\text{av}}}{P_{\max}}. \quad (7)$$

Коефіцієнт нерівномірності заповнення:

$$k_{\text{fuc}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (8)$$

Для того щоб зменшити нерівномірність графіка електричного навантаження, можна використовувати акумуляторні батареї [37, 38], потужність яких розраховується за формулою:

$$P = UCn, \quad (9)$$

де U – напруга акумуляторної батареї, В;

C – ємність акумуляторної батареї, А·год.,

n – кількість акумуляторних батарей, шт.

Якщо взяти 20 акумуляторних батарей ємністю 200 А·год. з напругою 12 В, то їх потужність дорівнює:

$$P=12 \cdot 200 \cdot 20 = 48 \text{ кВт.}$$

Згідно з правилами експлуатації хімічних акумуляторів, їх рівень заряду не повинен знижуватися нижче за 25 %, тобто потужність становитиме 36 кВт.

Для підбору сонячної панелі з метою заряджання акумуляторних батарей її потужність можна визначити за формулою:

$$P_{\text{сон}} = SE\eta \frac{t}{1000}, \quad (10)$$

де S – площа однієї сонячної панелі, м^2 ;

E – щільність освітленості поверхні, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

η – ККД панелі, в. о.;

t – кількість сонячних годин.

Сонячна панель генеруватиме електричну енергію нерівномірно, залежно від погодних умов, скажімо, приблизно одна сонячна панель виробляє в середньому 1,5 кВт на добу. 20 сонячних панелей забезпечать приблизно 30 кВт на добу в літній день (рис. 1). Взимку, припустимо, одна панель генерує 0,7 кВт·год на добу, тоді за добу 20 сонячних панелей генеруватимуть 14 кВт·год на добу (рис. 2).

Висновки. Використання пристроїв накопичення електричної енергії дає можливість знизити пікові електричні навантаження в низьковольтній мережі. Це дуже актуально в умовах, коли значна частина генерації електричної енергії знищується внаслідок російської військової агресії.

Добова зміна електричних навантажень лінії ТП 10/0,4 кВ для забезпечення електроенергією 20 будинків з використанням сонячної генерації та акумуляторних батарей для вирівнювання графіка навантаження в літній сезон показала ефективність використання пристроїв накопичення електричної енергії, а саме вранці та ввечері, під час пікових електричних навантажень вдалося знизити їх рівень майже на 40 %.

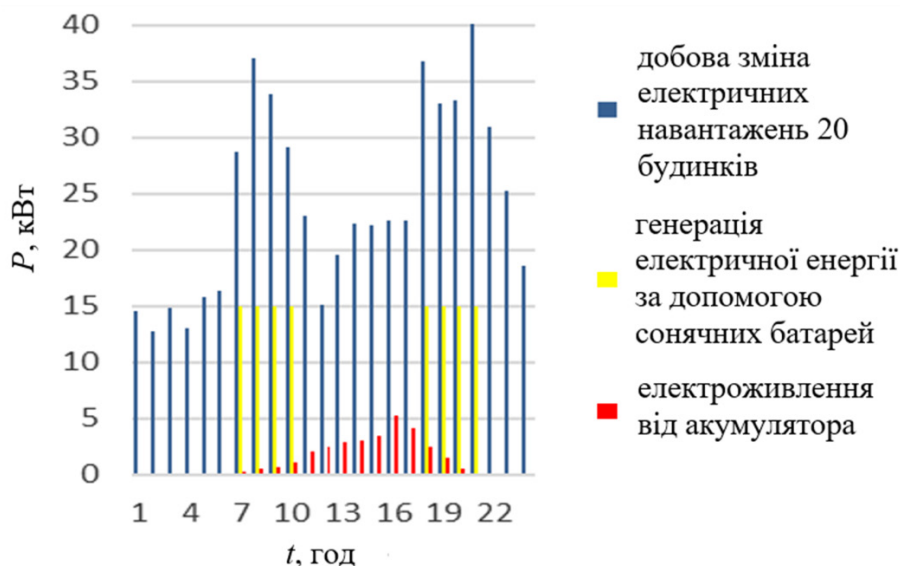


Рис. 1. Добова зміна електричних навантажень лінії ТП 10/0,4 кВ для забезпечення 20 будинків за допомогою сонячної генерації та акумуляторних батарей для вирівнювання графіка навантаження в літній сезон

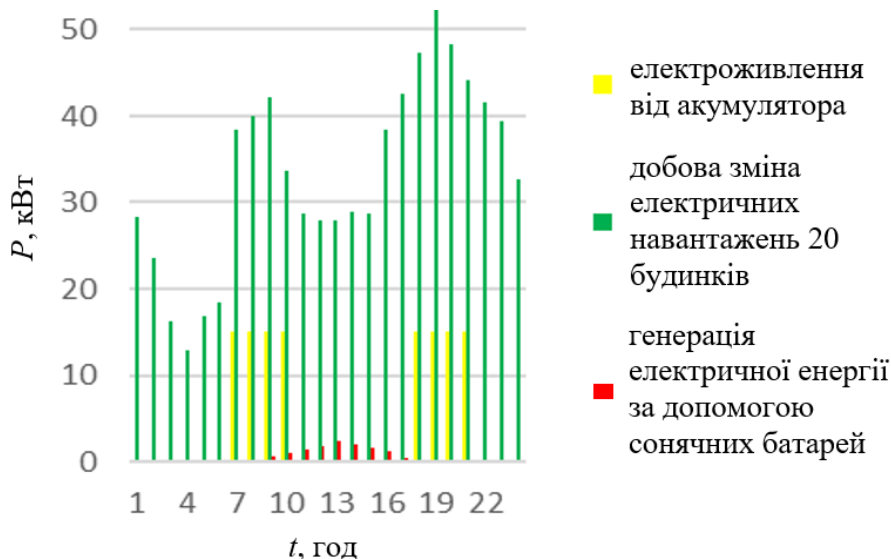


Рис. 2. Добова зміна електричних навантажень лінії ТП 10/0,4 кВ для забезпечення 20 будинків за допомогою сонячної генерації та акумуляторних батарей для вирівнювання графіка навантаження в зимовий сезон

Добові зміни в електричній лінії ТП 10/0,4 кВ для живлення 20 будинків, що використовують сонячну генерацію та акумуляторні батареї, взимку показали недостатнє виробництво електричної енергії сонячними батареями для зменшення нерівномірних графіків. Максимальне електричне навантаження в зимовий сезон під час досліджень становило 52,4 кВт, і середнє навантаження в зимовий сезон перевищило середнє навантаження в літній сезон на 26,2 %. У зимову пору року рекомендується заряджати акумулятори від електричної мережі під час низьких електричних навантажень, щоб зменшити нерівномірність графіка електричних навантажень.

Ці методи балансування можна використовувати в Smart Grid. Хоча сьогодні Smart Grid є дорогим заходом, але з урахуванням того, що тарифи в Україні на електроенергію вже значно зросли і для побутових споживачів вони становлять понад 1\$, це є доцільним. Також спостерігається дуже великий дефіцит виробництва електричної енергії, тому в майбутньому використання Smart Grid може бути економічно виправданим.

Список використаних джерел

1. Renewable Energy Statistics 2022. IRENA. 2022. URL: <http://surl.li/pfuxg> (дата звернення 23.02.2025).
2. Kabir E., Kumar P., Kumar S., Adelodun A., Kim Ki-Hyun. Solar energy: Potential and future prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82 (1). P. 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.094>.
3. Галько С. В., Жарков В. Я., Жарков А. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств : монографія. Мелітополь : Люкс. 2019. 215 с.
4. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos “ΛΟΓΟΣ” con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. Vol. 2. P. 39–44.
5. Оцінка збитків енергетичного сектору України – VI (станом на січня 2025 року). URL: <https://cutt.us/clzZG> (дата звернення 28.01.2025).
6. Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та придбання електричної енергії за «зеленим» тарифом та за аукціонною ціною. Документ v0641874-19, чин-

ний, чинна редакція – редакція від 28.04.2023, підстава – v0758874-23. URL: <https://cutt.us/Hh6XX> (дата звернення 28.01.2025).

7. Komada P., Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Shchur T. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95 (5). P. 79–82. <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.20>.

8. Chub A., Vinnikov D., Stepenko S., Liivik E., Blaabjerg F. Photovoltaic Energy Yield Improvement in Two-Stage Solar Microinverters. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 3774. <https://doi.org/10.3390/en12193774>.

9. Lezhniuk P., Komar V., Belik M., Rubanenko O., Smaglo I. Analysis of technical conditions influencing the operation of PV power stations cooperating with controlled power grids. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine. 2022. 1–6, <https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005686>.

10. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф.*, 10 квіт. 2020 р. Луцьк: МЦНД. 2020. Т. 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.

11. Ciriminna R., Meneguzzo F., Pecoraino M., Pagliaro M. Rethinking solar energy education on the dawn of the solar economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 63. P. 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.008>.

12. Миколук О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. Вип. 3 (1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>.

13. Barath J.N., Soundarrajan A., Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Nguyen M.-K. Topological Review of Quasi-Switched Boost Inverters. *Electronics*. 2021. Vol. 10. P. 1485. <https://doi.org/10.3390/electronics10121485>.

14. Shevchenko S. Finding Software Ways to Reduce the Error for the Solar Power Plant Simulation Model. *Proceedings – 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET*. 2022. P. 277–280. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766844>.

15. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. Мелітополь : ТДАТУ. 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 130–141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.

16. Miroshnyk O., Moroz O., Shchur T., Chepizhnyi A., Qawaqzeh M., Kocira S. Investigation of Smart Grid Operation Modes with Electrical Energy Storage System. *Energies*. 2023. Vol. 16 (6). P. 2638. <https://doi.org/10.3390/en16062638>.

17. Mahto T., Mukherjee V., Energy storage systems for mitigating the variability of isolated hybrid power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51. P. 1564–1577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.012>.

18. Gundebommu S.L., Rubanenko O., Cosovic M. Determination of Normative Value Power Losses in Distribution power grids with Renewable Energy Sources using Criterion Method. *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*. East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/10.1109/INFOTEH48170.2020.9066302>.

19. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 137–140, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>.

20. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine. 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>.

21. Belik M., Rubanenko O. PV system for emergency power supply of cattle-farm in war conditions. *2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia. 2023. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/10.1109/RTUCON60080.2023.10412928>.

22. Belik M., Rubanenko O., Rubanenko O. Optimization of PV-system design for household. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2023. P. 1–6 <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312893>.
23. Molderink A., Bakker V., Bosman M.G.C., Hurink J.L., Smit G.J.M. Management and Control of Domestic Smart Grid Technology. *In IEEE Transactions on Smart Grid*, Sept. 2010. Vol. 1 (2). P. 109–119. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2055904>.
24. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 4. P. 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>.
25. Sansaniwal S., Sharma V., Mathur J. Energy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82 (1). P. 1576–1600. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.003>.
26. Viacheslav B., Roman B., Andrij S., Volodymyr T. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2019. P. 84–87. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>.
27. Al Issa H.A., Khasawneh A., Sotnik O., Miroshnyk O., Sotnik O., Tymchuk S. Influence of the Value of the Power Factor of Electricity Consumers in the Residential Sector of the Village on the Technical and Economic Indicators of Low-Voltage Electrical Networks. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598687>.
28. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>.
29. Перевірочний розрахунок силового трансформатора : метод. вказівки до виконання розрахункових робіт з дисц. «Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання систем електропостачання» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочн. форм навч., спец.: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Державн. біотехнолог. ун.-т; упоряд.: В. Г. Пазій, І. М. Трунова. Харків : ДБТУ. 2022. 35 с.
30. Zamulko A., Chernetska Y. Benchmarking method for analyzing the efficiency of the electricity distribution system operators. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2018. Vol. 3. P. 35–44. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2018.164264>.
31. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. Vol. 12 (3). P. 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>.
32. Dwarakesh K., Jeyasekar C. Design and Implementation of Low-cost Remote Monitoring of Distribution Transformer with Consumer wise Energy recording, *Load control & Power theft detection using Internet of Things. IJAREE*, July 2018. Vol. 1 (1). P. 71–79.
33. Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Technical Electrodynamics*. 2016. Vol. 4. P. 23–25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>.
34. Kennedy O., Elizabeth A., Robert O., John S. Monitoring and Fault Detection System for Power Transmission Using GSM Technology. *World Congress in Computer Science Computer Engineering & Applied Computing*, July 2017. P. 93–97.
35. Matukhno V., Baidak Yu., Tomlein P. Thermal subsystem of voltage distribution transformer. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2016. Vol. 52 (6). P. 58–64.
36. Методичні вказівки з обліку та аналізу в енергосистемах технічного стану розподільних мереж напругою 0,38–20 кВ з повітряними лініями електропередачі: СОУ-Н МПЕ 40.1.20.576:2005. Київ : ГРІФРЕ, 2005. 67 с.
37. Krynke M., Klimecka-Tatar D. The use of Computer Simulation Techniques in Production Management. *Materials Research Proceedings*. 2022. Vol. 24. P. 126–133. <https://doi.org/10.21741/9781644902059-19>.
38. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. Vol. 35. P. 2587–2595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2025 р.



S. Halko¹, O. Sotnik², O. Miroshnik², Ol. Sotnik², D. Zelenkov¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²State Biotechnological University

BALANCING THE LOAD SCHEDULE OF RURAL COMMUNAL CONSUMERS WITH THE USE OF SOLAR PANELS AND ENERGY STORAGE

Summary

The paper analyzes changes in the daily schedule of electrical loads of the 10/0.4 kVA transformer substation line with a capacity of 100 kVA in the Kharkiv region, which supplies rural residential buildings in winter and summer. To smooth out load peaks and optimize energy consumption, the efficiency of energy storage devices was calculated to determine the possibilities of their use. An analysis of daily energy consumption in twenty private houses was carried out, including the calculation and assessment of the energy required to ensure the operation of household electrical appliances for 24 hours. Based on the data obtained, daily load graphs were built, reflecting changes in energy consumption during the day. A method for balancing load schedules using a solar panel and energy storage is proposed. This method allows you to increase the efficiency of such electrical networks.

The daily change in electrical loads of the 10/0.4 kV transformer substation line to provide electricity to 20 houses using solar generation and batteries to equalize the load schedule in the summer season showed the efficiency of using electrical energy storage devices, namely in the morning and in the evening, during peak electrical loads, it was possible to reduce their level by almost 40%.

Daily shifts in the electrical line of the 10/0.4 kV transformer substation to power 20 houses using solar generation and batteries in winter showed insufficient electricity production by solar panels to reduce uneven schedules. The maximum electrical load in the winter season during the studies was 52.4 kW, and the average load in the winter season exceeded the average load in the summer season by 26.2%. In the winter season, it is recommended to charge batteries from the mains during low electrical loads to reduce the unevenness of the electrical load schedule.

Keywords: low-voltage rural power grids, rural residential buildings, electric load schedule, green energy, solar panel, electric energy storage.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-21>

УДК 620.97: 697.329

С. Й. Мисак, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-2064-7015

С. П. Шаповал, д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0003-4985-0930

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua

РОЗРОБЛЕННЯ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА ТА АНАЛІЗ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. Статтю присвячено дослідженню ефективності гібридних теплових фотоелектричних геліоколекторів (ГТФГК), які поєднують функції теплових геліоколекторів і фотоелектричних панелей. Основною метою є розроблення конструктивних і технологічних рішень для максимально ефективного використання сонячної енергії. Досліджено вплив кута нахилу ГТФГК, питомої масової витрати теплоносія та азимутального кута відхилення на теплову й електричну ефективність системи. Проведено експериментальні вимірювання залежності ефективності від інтенсивності сонячного випромінювання. Виявлено, що правильний вибір параметрів дозволяє підвищити продуктивність запропонованої конструкції геліосистеми. Отримані результати підтверджують перспективність ГТФГК у сфері відновлюваної енергетики, сприяючи зниженню споживання викопного палива та екологічній стабільності.

Ключові слова: гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор, фотоелементи, тепловий акумулятор, сонячна енергія, відновлювальні джерела енергії.

Постановка проблеми. Основною науковою проблемою, що розглядається в дослідженні, є підвищення ефективності перетворення сонячної енергії в теплову та електричну за допомогою гібридних теплових фотоелектричних геліоколекторів (ГТФГК). Завдання полягає в розробленні оптимальних конструктивних і технологічних рішень, які забезпечать максимальне поглинання сонячної енергії та мінімізують енергетичні втрати. Це передбачає об'єднання теплових геліоколекторів і електричних сонячних панелей в єдину систему, застосування нових, сучасних матеріалів, оптимізацію теплоізоляції та теплообміну завдяки вдосконаленню конструкції ГТФГК. Розв'язання цієї проблеми сприятиме ефективнішому використанню чистої енергії з відновлюваних джерел, зменшенню викидів парникових газів завдяки скороченню споживання викопного палива, зробить такі системи та отримання з них енергії дешевшими і доступнішими для споживачів.

Аналіз останніх досліджень. Зміни клімату, що відбуваються в глобальному масштабі, а також прогнози провідних кліматичних організацій [1] наголошують на нагальній потребі скорочення шкідливих викидів і зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Це змушує світове співтовариство впроваджувати заходи [2], спрямовані на екологічну стійкість і розвиток чистих технологій. Перехід на відновлювані джерела енергії є не просто бажаним, а критично необхідним для забезпечення збереження природних ресурсів та створення безпечного енергетичного майбутнього для наступних поколінь [3].

Сучасні наукові розробки демонструють значний прогрес у сфері гібридних сонячних систем, які перевершують традиційні фотоелектричні та теплові установки за коефіцієнтом корисної дії [4; 5]. Вивчення наукової літератури, присвяченої вдосконаленню конструктивних рішень та створенню інтегрованих енергетичних комплексів [6; 7], підтверджує перспективність комбінованих технологій у сонячній енергетиці [8]. Гібридні сонячні колектори поєднують

ють дві принципово важливі технології – фотоелектричну генерацію електроенергії [9; 10] та теплове перетворення сонячної енергії [11]. Це дозволяє досягти ефективного використання енергетичного потенціалу сонця, оптимізувати процеси поглинання випромінювання та мінімізувати енергетичні втрати.

Проте існує певне обмеження таких систем: як відомо, від 80% до 90% сонячної енергії поглинається поверхнею сонячних електричних панелей, але лише від 10% до 15% цієї поглинутої енергії перетворюється в електричну, а від 5% до 10% – у теплову. Це свідчить про значний невикористаний потенціал, який може бути реалізований шляхом використання інноваційних матеріалів, удосконалення конструктивних та технологічних рішень з метою підвищення ефективності теплообміну [12; 13]. Запропонованим підходом є впровадження спеціальних концентраторів, які посилюють тепловий вихід і сприяють ефективнішому використанню сонячної енергії [14].

Гібридні геліоколектори відіграють центральну роль у розвитку сонячної енергетики як ключового компонента у стратегії переходу на відновлювані джерела енергії. Вони сприяють стабілізації енергопостачання [15] та підвищенню адаптивності енергосистем до сезонних змін у попиті [16], зменшенню споживання викопного палива, зниженню рівня викидів CO₂ [17]. Розроблення та впровадження новітніх інтегрованих гібридних сонячних колекторів, які ефективно перетворюють сонячну енергію як у теплову [18; 19], так і в електричну форму, є стратегічно важливим напрямом досліджень, що забезпечить можливість використання таких систем у сучасних енергоефективних будівлях та сприятиме подоланню наявних кліматичних проблем.

Формулювання цілей статті. Головною метою дослідження є розроблення науково обґрунтованих методів підвищення ефективності використання сонячної енергії шляхом створення вдосконалених гібридних геліоколекторів. У межах цього дослідження запропоновано конструкцію, яка об'єднує теплові та фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії в єдину систему, що забезпечує оптимальне співвідношення між виробництвом теплової та електричної енергії. Особлива увага приділяється покращенню, інтенсифікації теплообміну, оптимізації конструкції теплового модуля ГТФГК та вибору матеріалів, що забезпечують високий рівень енергетичної ефективності та екологічної безпеки.

У дослідженні було поставлено завдання вивчити вплив питомої масової витрати теплоносія в геліосистемі та кутів нахилу запропонованої конструкції ГТФГК на його теплову та електричну ефективність. Об'єктом дослідження є процес трансформації сонячного випромінювання в теплову енергію в геліосистемі, а предметом – ефективність роботи цього геліоколектора.

Основна частина. У дослідженні розглянуто функціонування гібридної енергетичної системи (ГСЕ) на основі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК). Принципову схему цієї системи наведено на рисунку 1.

На рисунку 1 зображено гібридну систему енергопостачання (ГСЕ), що складається з гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) та теплового акумулятора (ТА) 12, який виконує функцію накопичення тепла від поглинутого сонячного випромінювання. ГТФГК складається із двох модулів: теплофотоелектричного 2 і теплового 6. Теплова енергія циркулює між ГТФГК та ТА через трубопроводи, що транспортують нагрітий 10 та охолоджений 13 теплоносії.

Переміщення теплоносія, роль якого виконує вода, здійснюється за допомогою циркуляційного насоса 12, що транспортує нагріту рідину від ГТФГК до ТА, звідки тепло передається споживачам. Функціонування циркуляційного насоса автоматично контролюється контролером управління системою 14, який обробляє дані датчиків температури 9, установлених після ГТФГК та ТА.

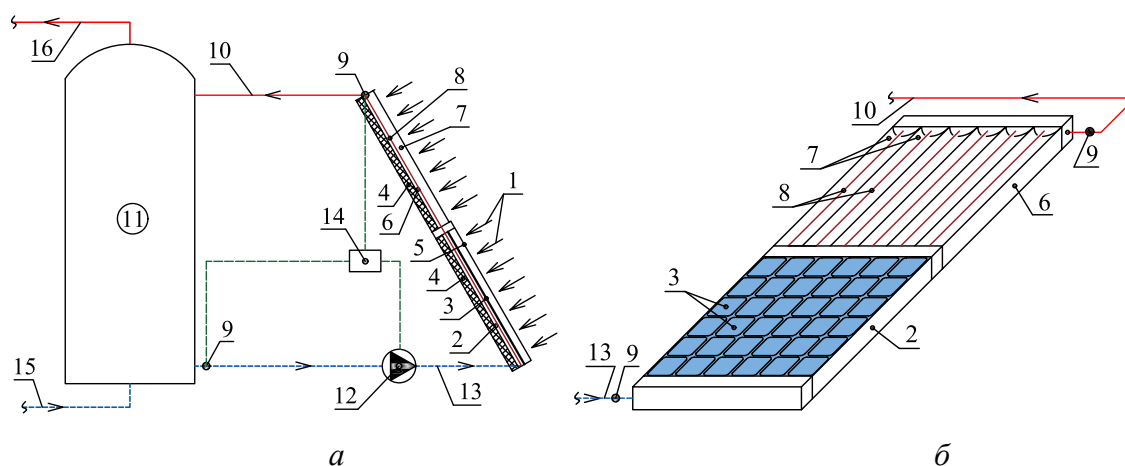


Рис. 1. Принципова схема ГСЕ з ГТФГК: а – вигляд збоку, б – вигляд зверху

1 – сонячне випромінювання; 2 – теплофотоелектричний модуль гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – фотоелементи; 4 – утеплювач; 5 – світлопрозоре захисне покриття; 6 – тепловий модуль ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні трубки; 9 – датчики температури; 10, 13 – трубопроводи для нагрітого та охолодженого теплоносія; 11 – тепловий акумулятор (ТА); 12 – циркуляційний насос; 14 – контролер управління системою; 15, 16 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в системі споживача

Щоб підвищити ефективність роботи системи та мінімізувати тепловтрати, конструкція ГТФГК містить утеплювач 4 у теплофотоелектричному та тепловому модулі та концентратори сонячного випромінювання 7, які спрямовують сонячну енергію на теплопоглинальні трубки 8. Виробництво електроенергії здійснюється за допомогою фотоелементів 3, що отримують сонячне випромінювання крізь світлопрозоре захисне покриття 5.

Експериментальні дослідження системи проводилися за температури довкілля 15°C . ГТФГК був налаштований таким чином, щоб поглинальна площа його лицевої поверхні залишалася строго перпендикулярною до сонячних променів. Усі робочі параметри реєструвалися з інтервалом у 5 хвилин, при цьому масова витрата теплоносія залишалася незмінною.

Перші шість дослідів, залежності вихідних параметрів яких представлено на рисунках 2–7, проводилися за сталих значень азимутального кута нахилу ГТФГК до місцевого меридіана $\pm 30^{\circ}$ та питомої масової витрати теплоносія в його контурі $G = 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Другі шість дослідів, зміни вихідних параметрів яких зображено на рисунках 8–13, проводилися за сталих значень кута нахилу ГТФГК до горизонту $\beta = 30^{\circ}$ та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_t = 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_t , $\text{Вт}/\text{м}^2$, а також кута нахилу ГТФГК до горизонту β побудовано на рисунку 2.

З рисунка 2 випливає, що зміна кута нахилу ГТФГК до горизонту β не сильно впливає на його теплову ефективність $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$, зменшуючи її на 0,02 за збільшення β з 30° до 70° , а збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t з $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$ зменшує $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ на 42%.

На рисунку 3 знаходяться графіки зміни теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t , $\text{Вт}/\text{м}^2$.

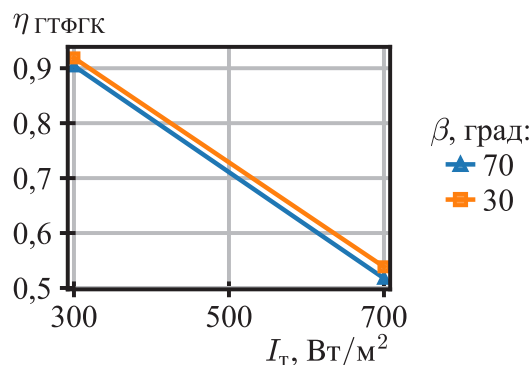


Рис. 2. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_t та кута нахилу ГТФГК до горизонту β за $\pm 30^\circ$, $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

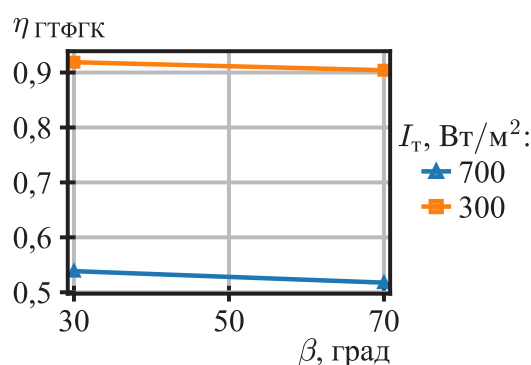


Рис. 3. Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t за $\pm 30^\circ$, $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

На основі аналізу експериментальних даних, зображених на рисунку 3, виявлено зменшення на 0,02 теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ за збільшення кута його нахилу до горизонту β з 30° до 70° , при цьому зростання інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 зменшує $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42%.

Теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, яка є функцією інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t , Вт/м^2 , та кута його нахилу до горизонту β зображена на рисунку 4.

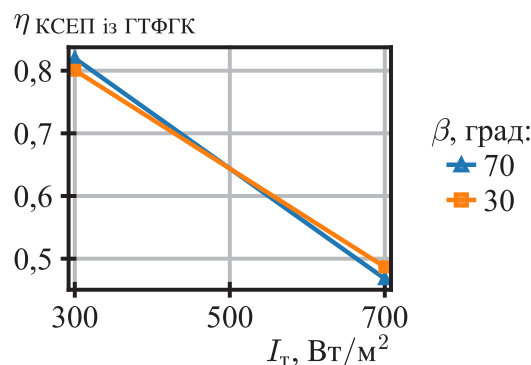


Рис. 4. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t та кута його нахилу до горизонту β за $\pm 30^\circ$, $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

З рисунка 4 напрошується висновок, що зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшується на 39% при куті нахилу ГТФГК до горизонту β , рівному 30° , і на 43% за β дорівнює 70° . За значення I_T , рівного 500 Вт/м^2 , ефективність ГСЕ із ГТФГК не залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту і становить 0,64.

Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м^2 представлено на рисунку 5.

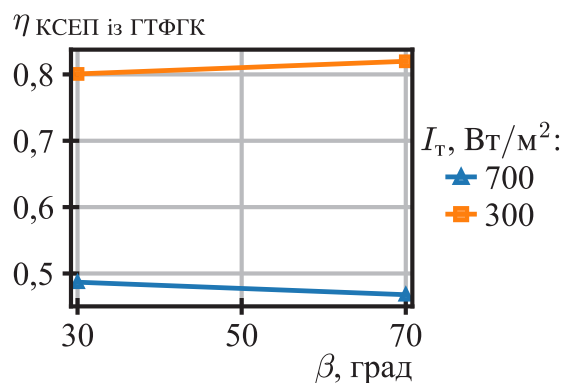


Рис. 5. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T за $\pm 30^\circ$, $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Згідно зі схемою (рис. 5), зі збільшенням кута нахилу ГТФГК до горизонту β теплова ефективність ГСЕ із ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не сильно змінюється і спадає в разі збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T . Для I_T , що дорівнює 300 Вт/м^2 , $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 2,5%, а для 700 Вт/м^2 – на 4,1% спадає.

Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м^2 та кута нахилу ГТФГК до горизонту β представлено на рисунку 6.

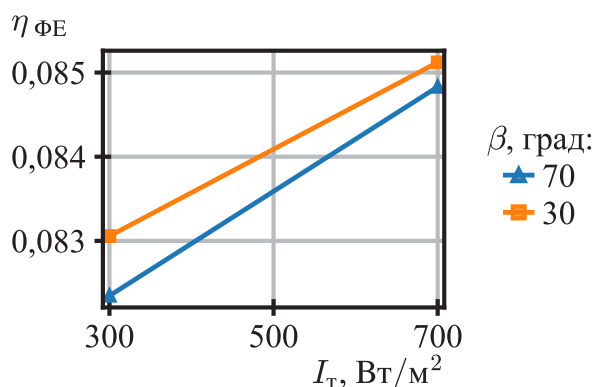


Рис. 6. Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T та кута нахилу ГТФГК до горизонту β за $\pm 30^\circ$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

З рисунка 6 видно, що зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ також зростає, а за збільшення кута нахилу ГТФГК до горизонту β – спадає. Для β дорівнює 30° $\eta_{\text{ФЕ}}$ збільшується на 2,4%, а для 70° – на 3,7%.

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t , Вт/м², побудована на рисунку 7.

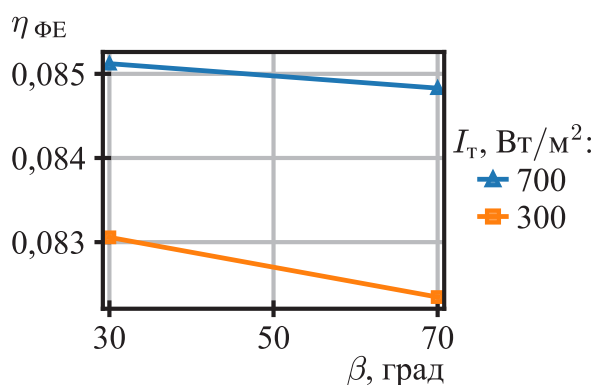


Рис. 7. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від кута нахилу його до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t за $\pm 30^\circ$, $G = 0,01$ кг/(м² · с)

Як видно на рисунку 7, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ трохи спадає (до 1%) за збільшення з 30° до 70° кута нахилу його до горизонту β і від 2,4% до 3,7% зростає в разі збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

Графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G , кг/с, та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ побудовано на рисунку 8.

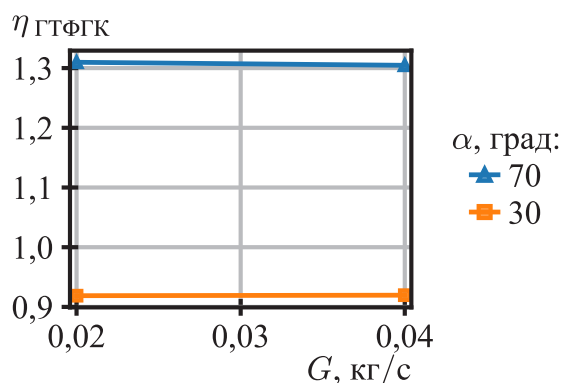


Рис. 8. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{т,ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $\beta = 30^\circ$ та $I_t = 300$ Вт/м²

Зі схеми на рис. 8 можна зробити висновок, що зміна масової витрати теплоносія в контурі ГТФГК G не впливає на значення його теплової ефективності $\eta_{\text{ГТФГК}}$, а збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm 30^\circ$ до 70° збільшує $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42%.

Оскільки на зміну теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ не впливає зміна питомої масової витрати теплоносія в його контурі G , то на рисунку 9 знаходиться графік зміни $\eta_{\text{ГТФГК}}$ залежно від азимутального кута відхилення нормалі до нього від місцевого меридіана $\pm$, наприклад, для $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

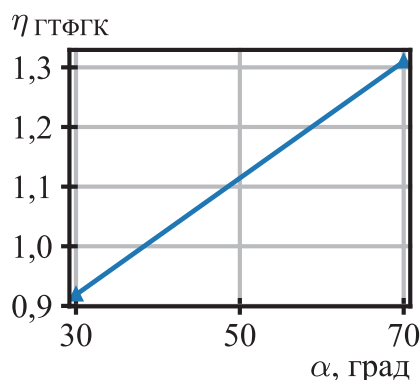


Рис. 9. Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до нього від місцевого меридіана $\pm$ за $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$

На основі аналізу експериментальних даних, що наведені на рисунку 9, виявлено зростання теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ на 42% за збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ від 30° до 70° .

На рисунку 10 зображено теплову ефективність ГСЕ із ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$, яка залежить від масової витрати теплоносія $G, \text{кг}/\text{с}$ та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, град.

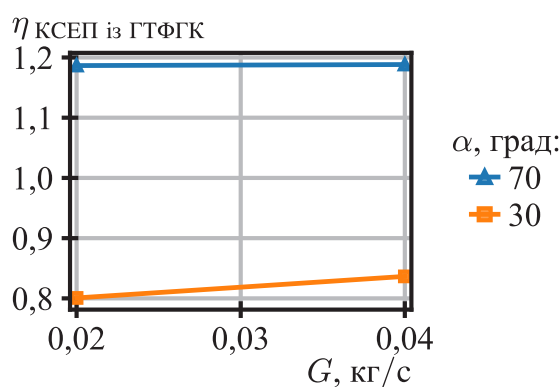


Рис. 10. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Згідно зі схемою на рис. 10, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при азимутальному куті відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, рівному 70° , не залежить від масової витрати теплоносія в системі G , а за $\pm$, рівному 30° , зростає на 5%.

Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, та масової витрати теплоносія $G, \text{кг/с}$, наведена на рисунку 11.

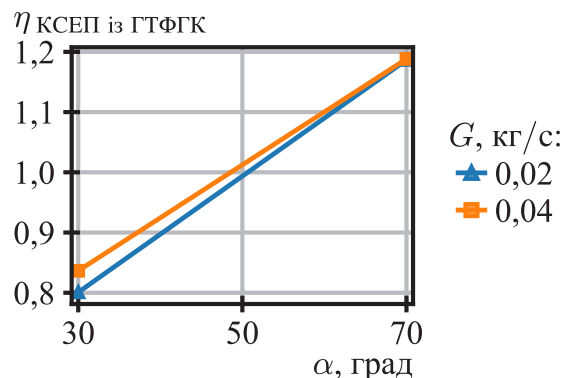


Рис. 11. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ та масової витрати теплоносія G за $\beta = 30^\circ$ та $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$

Як показано на рисунку 11, для питомої масової витрати теплоносія G , рівній $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ та $0,012 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, за збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ від 30° до 70° теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 48,7% та 41,7% відповідно.

На рисунку 12 представлено графіки зміни електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія $G, \text{кг/с}$ та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$, град.

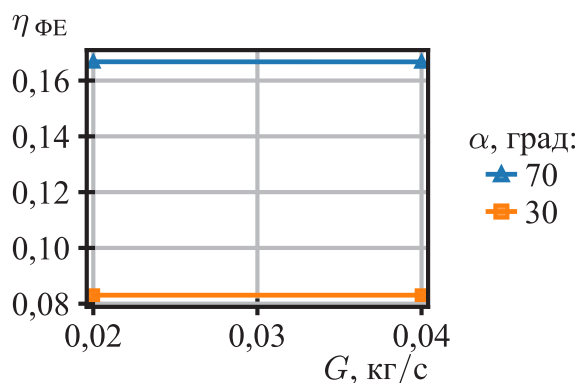


Рис. 12. Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $\beta = 30^\circ$ та $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$

Згідно з графіком на рис. 12, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G та збільшується вдвічі в разі збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ з 30° до 70° .

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ для $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, представлена на рисунку 13.

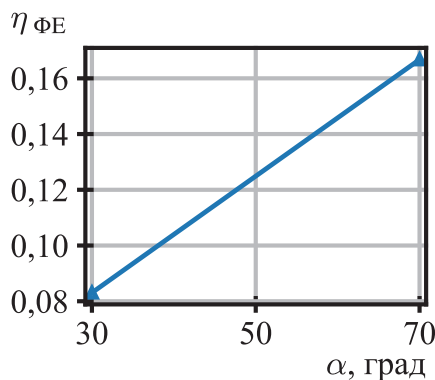


Рис. 13. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ за $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Згідно зі схемою (рис. 13), електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ вдвічі зростає за збільшення азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ з 30° до 70° .

Висновки. Для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm=30^\circ$ та питомої масової витрати теплоносія в ньому $G=0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ збільшення кута нахилу ГТФГК до горизонту β з 30° до 70° призводить до зміни теплових його ефективностей $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ на 2–4% та електричної ефективності фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ лише на 1% для інтенсивностей сонячного випромінювання в його площині I_t , рівних $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ та $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$ відповідно. У разі збільшення I_t з $300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ до $700 \text{ Вт}/\text{м}^2$ $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшуються в середньому на 42%, а $\eta_{\text{ФЕ}}$, навпаки, збільшується на 2–4% для $\beta=30^\circ$ і $\beta=70^\circ$. Отже, інтенсивність сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_t є визначальним фактором впливу на $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Для $\beta=30^\circ$ та $I_t=300 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ефективності $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ФЕ}}$, для $\pm=30^\circ$ і $\pm=70^\circ$ не залежать від зміни питомої маси теплоносія в контурі ГТФГК G з $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. За цієї зміни G і $\pm=70^\circ$ $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ також не змінюється, а для $\pm=30^\circ$ $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ – на 5% зростає. Однак у разі збільшення $\pm$ з 30° до 70° $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$ також збільшуються на 42%, на 42–49% та у 2 рази відповідно. Отже, на відміну від питомої масової витрати G зміна азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\pm$ значно впливає на зміну $\eta_{t,\text{ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Таким чином, дослідження демонструє високий потенціал гібридних геліоколекторів у контексті підвищення ефективності сонячної енергетики та її інтеграції в сучасні енергетичні системи.

Список використаних джерел

1. Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. *IPCC 2018*. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf (date of access: 25.02.2025).
2. Paris Agreement. *United Nations*. URL: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XX_VII-7-d.pdf (date of access: 25.02.2025).
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. *United Nations*. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf> (date of access: 25.02.2025).
4. Abdullah A. L., Misha S., Tamaldin N., Rosli M. A. M., Sachit F. A. Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2019. Vol. 59, no. 1. P. 107–141. ISSN 2289-7879.
5. Zhelykh V., Venhryn I., Kozak K., Shapoval S. Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*. 2020. Vol. 26, no. 3. P. 84–87. ISSN 2353-5156. URL: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17> (date of access: 25.02.2025).
6. Diwania S., Agrawal S., Siddiqui A. S., Singh S. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2020. Vol. 11, no. 5. P. 33–54. URL: <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y> (date of access: 25.02.2025).
7. Said Z., Alshehhi A. A., Mehmood A. Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 118. P. 779–789. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.075> (date of access: 28.03.2025).
8. Hamdan M. A., Abdelhafez E., Ahmad R., Alaboushi A. R., Eman A. Solar Thermal Hybrid Heating System. *Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*: conference, Beirut, Lebanon, Dec. 2014.
9. Zhelykh V., Venhryn I., Kozak K., Shapoval S. Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*. 2020. Vol. 26, no. 3, P. 84–87. URL: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17> (date of access: 25.02.2025).
10. Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*. 2007. Vol. 81, no. 9. P. 1117–1131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.002> (date of access: 25.02.2025).
11. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. Comparison of solar collector testing methods – theory and practice. *Processes*. 2020. No. 8, P. 1–29. URL: <https://doi.org/10.3390/pr8111340> (date of access: 25.02.2025).
12. Ramos F., Cardoso A., Alcaso A. Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2010. Vol. 314. P. 477–484. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-11628-5_53 (date of access: 25.02.2025).
13. Mysak S., Shapoval S., Matiko H. Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 61–62.
14. Shapoval S., Spodyniuk N., Zhelykh V., Shepichak V., Shapoval P. Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation. *Pollack Periodica*. 2021. Vol. 16, no 1. P. 132–137.
15. Ploskyi V., Sergeychuk O., Usenko V., Tereschuk M. Improving efficiency energy systems-photovoltaic modules and solar collectors in construction. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology*: conference, KhPI, Week 2022.
16. Sergeychuk O., Martynov V., Usenko D. The definition of the optimal energy-efficient form of the building. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7, no 3. P. 667–671.
17. Shapoval S., Mysak S., Shapoval P., Matiko H. Analysis of Current Use of Renewable and Alternative Energy Sources by European Countries. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. No. 438, P. 381–391.
18. Склянюк А., Кучер А. Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* : зб. матеріалів IV-ї Всеукр. студент. наук.-техн. конф., 19–20 квіт. 2011 р. Тернопіль : ТНТУ, 2011. Том 1. С. 275.
19. Суржик О.М. Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами : дис. ... канд. техн. наук. : 05.14.08. Київ, 2016. 159 с.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2025 р.



S. Mysak, S. Shapoval
Lviv Polytechnic National University

DEVELOPMENT OF A HYBRID THERMAL PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR AND ANALYSIS OF ITS EFFICIENCY

Summary

This paper investigates the efficiency of hybrid thermal photovoltaic solar collectors (HTPSC), which integrate the functions of thermal solar collectors and photovoltaic panels to maximize the conversion of solar energy into thermal and electrical forms. The study aims to develop optimal design and technological solutions that enhance energy absorption and minimize thermal losses. Experimental research focuses on evaluating the impact of key operational parameters, including the tilt angle of the HTPSC, the specific mass flow rate of the heat transfer fluid, and the azimuthal deviation angle, on the system's thermal and electrical performance.

The study analyzes the influence of solar radiation intensity on the efficiency of HTPSC, measuring variations in thermal and electrical energy conversion under different conditions. The results show that adjusting the tilt angle and optimizing the heat transfer process significantly improve energy utilization. Additionally, the integration of advanced heat exchange materials and solar concentrators has been tested to enhance overall system performance. The findings indicate that solar radiation intensity is a dominant factor affecting both thermal and electrical efficiency, while the azimuthal deviation of the collector normal to the local meridian significantly influences energy conversion rates.

Experimental data demonstrate that increasing the azimuthal deviation angle improves energy efficiency, whereas changes in the specific mass flow rate have a negligible effect. The study also confirms that hybrid solar collectors can effectively reduce dependency on fossil fuels and greenhouse gas emissions by increasing the share of renewable energy sources in modern energy systems. The results contribute to the advancement of solar energy applications, supporting the integration of high-efficiency hybrid systems in sustainable energy infrastructure.

By implementing optimized HTPSC configurations, energy systems can achieve greater adaptability to seasonal variations in solar radiation, ensuring stable power and heat generation. These findings reinforce the strategic importance of hybrid solar collector development in the transition toward eco-friendly and energy-efficient technologies, offering practical solutions for modern energy-efficient buildings and sustainable energy management.

Keywords: hybrid thermal photovoltaic solar collector, efficiency, photovoltaic cell, thermal accumulator, solar energy, renewable energy sources.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-22>

УДК 621.311.1.004.18

T. Shchur¹, cand. of techn. sciencesK. Wittek², PhDO. Miroshnyk¹, d-r of techn. sciencesS. Halko³, cand. of techn. sciencesD. Zelenkov³, graduate student

ORCID: 0000-0003-0205-032X

ORCID: 0009-0001-6217-0342

ORCID: 0000-0002-6144-7573

ORCID: 0000-0001-7991-0311

ORCID: 0009-0002-9685-9196

¹ State Biotechnological University, Kharkiv² Silesian University of Technology, Gliwice, Poland³ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Zaporizhzhia

e-mail: wittek@polsl.pl

THE EFFECT OF TOXIC AND HARMFUL EMISSIONS OF EXHAUST GASES FROM AVIATION ENGINES ON THE ENVIRONMENT

Summary. The rapid growth of aviation makes a realistic assessment of harmful emissions crucial. The growing demand for air transportation is leading to an increase in aircraft production, which significantly affects the environment. The priority of modern aviation technology is to reduce noise, fuel consumption and exhaust emissions, especially carbon dioxide and particulate matter. Modern research is focused on finding environmentally friendly solutions to reduce the negative effects of aircraft operation. The introduction of modern technologies and more efficient combustion systems is key to the sustainability of air transport and environmental protection.

Key words: aviation engines, exhaust gases, harmful emissions, toxic emissions, aircraft engines.

Statement of the problem. The biggest challenge is to reduce emissions of nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), carbon monoxide (CO) and unburned hydrocarbons (HC) [1, 2]. Their presence in the atmosphere contributes to smog, acid rain and increases in tropospheric ozone concentrations [3]. The engines of passenger and transport aircraft generate the most pollution because they consume huge amounts of fuel relative to the thrust achieved. Long-haul flights taking place at an altitude of 8–12 km, where the highest concentrations of toxic compounds are observed, have a particularly significant impact on the environment. At lower altitudes, up to 1 km, only 5–10% of the world's aviation fuel is consumed, but it is in the areas around airports that air pollution has a direct impact on human health.

Although aviation accounts for about 2% of global greenhouse gas emissions, its impact on air quality and human health is significant, especially in regions with heavy air traffic [4]. Global emissions from the sector increased by more than 75% between 1990 and 2012, and projections indicate that they could increase 2 to 7 times by 2050, accounting for up to 20% of global emissions [1]. Further efforts are therefore needed to reduce aviation's negative impact on the environment.

The future of aviation involves research into electric and hybrid propulsion systems, which can significantly reduce emissions [5–7]. At the same time, CAEP standards regulate engine emissions, but the problem of exhaust toxicity affects not only high altitudes, but also areas around airports, where it affects the quality of life of local communities.

Analysis of recent research. Reducing environmental impact is a key goal of modern aviation technology. As a rapidly developing field, transportation is subject to constant improvements, including both the modernization of existing machinery and the implementation of new emission-reducing designs. Aviation, growing at a rapid pace, competes with road transport as a major

transportation industry. In more than a century of existence, the industry has undergone numerous changes and continues to evolve. In Poland, environmental deterioration can be linked to the increase in aircraft use. Exhaust emissions regulations focus mainly on passenger and transport aircraft, which are responsible for the largest toxic emissions into the atmosphere. Carbon monoxide and carbon dioxide have a key impact on the environment, contributing to the greenhouse effect and permanent climate change.

Task statement. The introduction of modern technologies and more efficient combustion systems for sustainability of air transport and environmental protection.

The main part. Studies of toxic emissions in aviation focus mainly on turbine engines. Modern jet engine development seeks to maximize thrust, minimize fuel consumption and optimize exhaust emissions [8]. The efficiency of these engines has always been a key concern for designers, affecting the range and payload of aircraft [9].

We divide the combustion products from aviation turbine engines into:

- natural products of combustion such as: carbon dioxide, water, nitrogen oxides;
- incomplete combustion products: carbon monoxide, hydrocarbons, soot;
- products related to fuel quality: sulfides and metals [10].

The approximate values of the compounds from burning 1 kg of aviation kerosene in 3.4 kg of oxygen are presented in the following Table 1 [10]:

Table 1

Values of compounds from burning 1 kg of kerosene in 3.4 kg of oxygen [10]

3,16 kg	CO_2
1,29 kg	H_2O
< 0,6 g	CO
< 15 g	NO_x
< 0,8 g	SO_2
< 0,01 g	CH
< 0,03 g	C

The table shows that the main products of combustion are carbon dioxide (58% of the exhaust mass) and water vapor (41% of the exhaust mass). The largest power units, used in passenger and transport aircraft, emit pollutants at an altitude of about 10 km [1]. According to the source [11], between 5 and 15% of global fuel consumption is attributable to flights up to 1 km above sea level. Aviation kerosene has a heating value of about 43 MJ, a low freezing point and a cetane number that facilitates engine starting [1].

The products of combustion contribute to adverse phenomena such as acid rain, increased ozone concentrations and smog. An important issue is estimating the environmental impact of air transportation due to the continued growth of air traffic. Research is currently being conducted on the implementation of electric aircraft propulsion, which will result in significantly lower emissions in the future [12, 13]. However, it should be remembered that the average lifetime of an aircraft is 15–20 years.

In the international aspect, between 1990 and 2014, the number of flights increased by 80% [8]. Accordingly, carbon dioxide emissions increased from 88 million tons to 156 million tons between 1990 and 2005 [14]. For nitrogen oxides, the increase in emissions during these years was from 316,000 tons to 516,000 tons. According to estimates [14], nitrogen oxides emissions will double by 2035, reaching 920,000 tons. Emission projections over 20 years are shown in the table below (Table 2).

Table 2

Emissions of flue gas over a 20-year period [14]

	2005	2014 (Percent change from 2005)	Forecast in 2035 Advanced technology – existing technology (percentage change from 2005)
Average fuel burned per passenger-kilometer [kg]	0.0388	0.0314 (–19%)	0.0209–0.0222 (–46%) (–43%)
CO ₂ [Mt]	144	151 (+5%)	207–219 (+44%) (+53%)
NO _x [kt]	650	732 (+13%)	920–1049 (+42%) (+61%)
NO _x under 1 km [kt]	53.3	58.8 (+10%)	73.3–83.1 (+37%) (+56%)
HC [kt]	20.8	17.0 (–18%)	22.9 (+10%)
HC under 1 km [kt]	7.8	6.4 (–18%)	11.0 (+40%)
CO [kt]	143	133 (–7%)	206 (+44%)
CO under 1 km [kt]	52.4	48.2 (–8%)	85.5 (+63%)
PM 2,5 [kt]	4.18	4.47 (+7%)	6.93 (+66%)
PM 2,5 under 1 km [kt]	0.27	0.27 (–1%)	0.41 (+50%)
PM 10 [kt]	2.67	2.38 (–11%)	3.16 (+18%)
PM 10 under 1km [kt]	0.15	0.13 (–14%)	0.17 (+11%)

Although the aviation industry is responsible for 2% of greenhouse gas emissions, the problem should not be underestimated, as deterioration of air quality affects both the environment and human health. Approximately five thousand premature deaths are recorded annually among residents of areas around airports due to particulate emissions [15, 16].

Unlike road transport, where internal combustion engines meet EURO standards, aircraft engine emissions are classified by the CAEP standard.

The development of the LTO acronym comes from the Landing/Take OFF cycle. The LTO cycle (Fig. 1) includes the various phases of flight [10]:

- Take-off – thrust setting 100%; time about 1 min,
- Climbing – thrust setting 85%; time about 2 min,
- Approach to landing – thrust setting 30%; time about 4 min,
- Taxiing – thrust setting of 7%; time approx. 26 min.

The LTO cycle focuses on measuring aircraft emissions. Tests should be conducted at specific thrust levels and durations. It is crucial that the test conditions correspond to the International Standard Atmosphere (ISA).

The jet engine's operating parameters change in proportion to the thrust setting. The LTO cycle includes measurements up to one kilometer above airport level.

Exhaust emissions are tested by placing a measuring probe in the stream of escaping gases. An example of a mobile exhaust gas analyzer is Semtech-DS, which measures the concentration of carbon dioxide, carbon monoxide, hydrocarbons and nitrogen oxides. An example photo of the analyzer is shown below (Fig. 2).

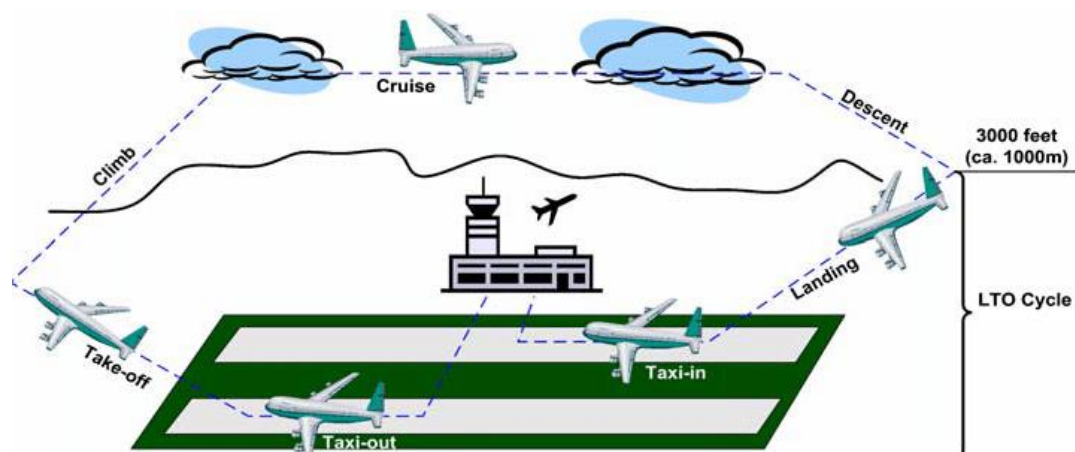


Fig. 1. LTO cycle [18]



Fig. 2. Overview photo of Semtech analyzer

Due to the limited possibilities of mounting the apparatus on the aircraft, the tests are carried out stationary on the tarmac. The analyzer (Fig. 3) additionally allows measurement of the exhaust flow rate.

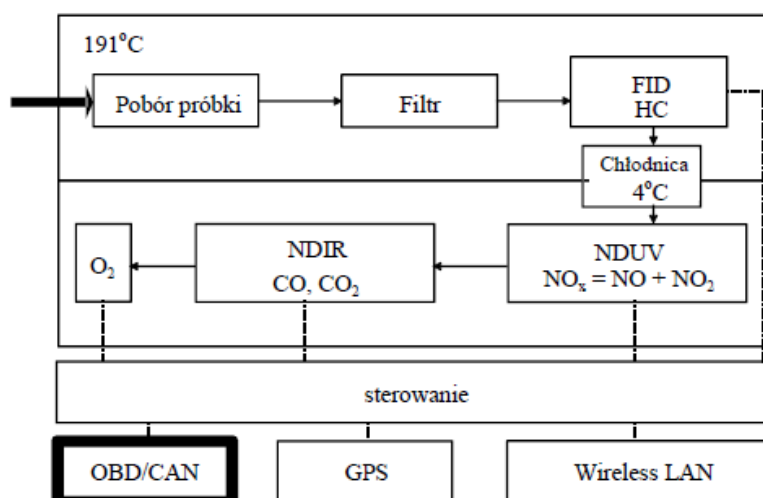


Fig. 3. Schematic of the exhaust gas analyzer [15]

A comparative analysis of carbon dioxide emissions was conducted on the engines of two types of aircraft: Boeing 737–800 and Airbus A320. For this purpose, an emission calculator was used [10] for the Warsaw-London route. The emission calculator makes it possible to determine how large the carbon footprint is, i.e. carbon dioxide emissions per passenger. This footprint will, of course, depend on how full the plane is with passengers. Our designated route is 1475 km and takes an average of 2h and 20 min, while the plane is filled to 100% capacity. The chart below shows a comparison of carbon dioxide emissions for two types of aircraft (Fig. 4).

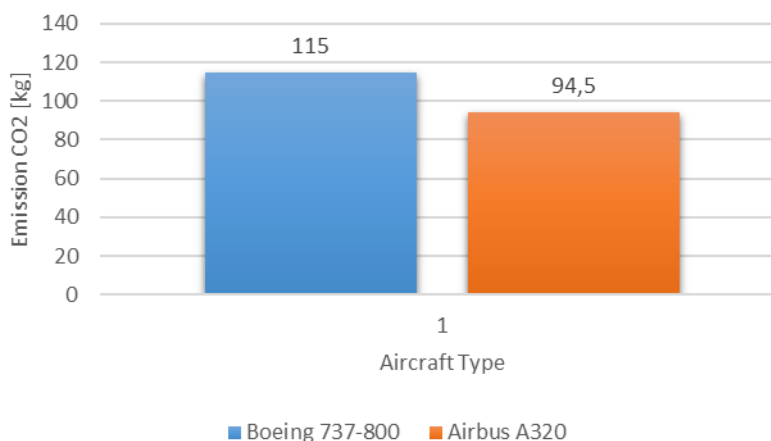


Fig. 4. Comparison of carbon emissions on the Warsaw-London route

For the same number of passengers, carbon dioxide emissions on the Warsaw-London route for a Boeing 737–800 aircraft were 115 kg, while for an Airbus A320 aircraft they were 94.5 kg.

Toxic compounds include carbon monoxide, hydrocarbons, and nitrogen and sulfur oxides [17]. The emissions of these substances can be determined mathematically, but the values obtained are for ideal ISA conditions [18]. Based on the author's research [1], the emission factors of CFM56 (Airbus A320) and Pratt & Whitney JT8D engines are presented for carbon monoxide (Table 3), nitrogen oxides (Table 4) and hydrocarbons Table 5) in the LTO cycle.

Table 3

LTO cycle carbon monoxide emissions for Boeing 737 and Airbus A320 engines

Engine	CO_{START} [g/kg]	CO_{CLIMB} [g/kg]	$CO_{APPROACH}$ [g/kg]	CO_{IDLE} [g/kg]	Dp/Foo dla CO [g/kN]
CFM56-7B26/3	0.25	0.16	3.07	30.94	46.81
PW JT8D	1.2	1.9	9.4	35.0	134.7

The data presented shows that during idling, carbon monoxide emissions into the atmosphere increase significantly.

Table 4

LTO cycle nitrogen oxide emissions for Boeing 737 and Airbus A320 engines

Engine	NOX_{START} [g/kg]	NOX_{CLIMB} [g/kg]	$NOX_{APPROACH}$ [g/kg]	NOX_{IDLE} [g/kg]	Dp/Foo dla NOX [g/kN]
CFM56-7B26/3	21.79	17.8	8.93	4.27	40.71
PW JT8D	18.9	14.6	5.8	2.75	56.1

Observing the data in Table 4, we note that for takeoff and climb, nitrogen oxide emissivity is the highest. This is the opposite phenomenon to carbon monoxide emissions [18].

Table 5

LTO cycle hydrocarbon emissions for Boeing 737 and Airbus A320 engines

Engine	HC_{START} [g/kg]	HC_{CLIMB} [g/kg]	$HC_{APPROACH}$ [g/kg]	HC_{IDLE} [g/kg]	Dp/Foo dla HC [g/kN]
CFM56-7B26/3	0.02	0.02	0.05	1.75	2.58
PW JT8D	0.4	0.45	1.4	10.0	36.8

The hydrocarbon content of the exhaust gas is lowest for takeoff and climb. For idling, these values are already dozens of times higher [9].

Based on the tables shown, it can be concluded that as engine thrust increases, carbon monoxide and hydrocarbon emissions decrease, while nitrogen oxides increase. This is due to the higher combustion temperature at higher engine power, which promotes the combustion of these compounds [19].

The toxic content was also evaluated for two types of engines: Pratt & Whitney JT8D and CFM56 on the Warsaw-London route (Fig. 5, Fig. 6).

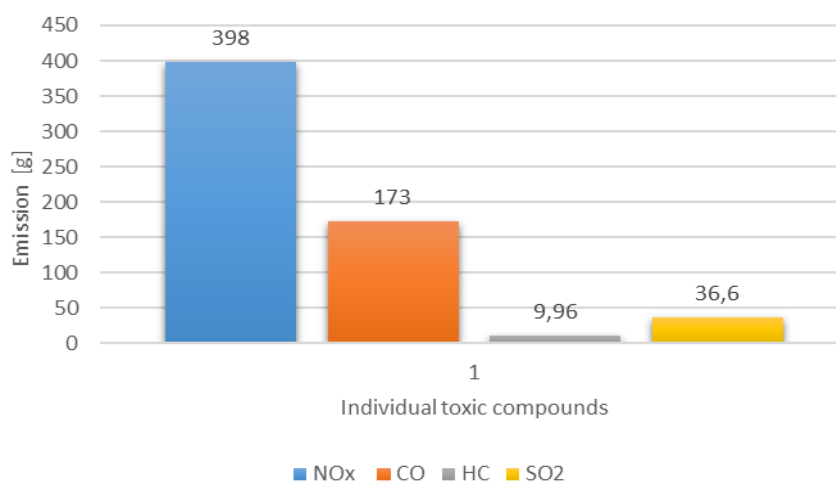


Fig. 5. Toxic emissions on the Warsaw-London route for a Boeing 737 aircraft

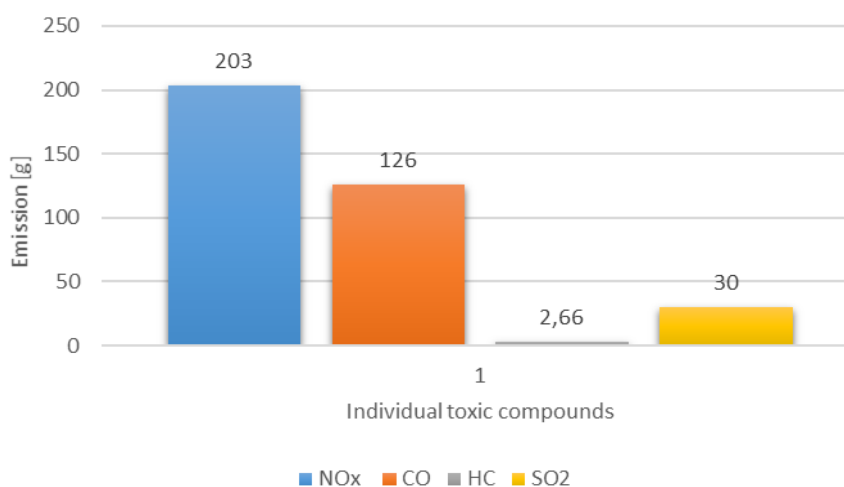


Fig. 6. Toxic emissions on the Warsaw-London route for an Airbus A320 aircraft

All toxic emissions values are lower for the Airbus A320 engine. However, it should be noted that the thrust of the CFM56 engine is almost 10 kN less than that of the Boeing engine [20, 21]. Water vapor was omitted from the comparative analysis because it is not a toxic compound [22, 23]. For Boeing 737–800 engines, the water vapor emission on the set route is 45 kg, while for Airbus A320 engines it is 37 kg [24–26].

Conclusions. According to forecasts, the increase in air traffic will continue for decades to come. In 2019, the number of passengers served at Warsaw-Okecie Airport was 18,844,591, an increase of 6.2% compared to 2018. Therefore, it is worth considering the impact of aircraft emissions on human health and the environment. The problem is not just emissions at cruising altitudes, but also at airports. Some airlines report on their websites the amount of carbon dioxide emitted per passenger on a particular flight. This gas contributes to the greenhouse effect. Per statistical inhabitant of our planet, the average carbon dioxide emission is 4.5 tons. For comparison, such a standard per passenger is realized by a seven-flight from Warsaw to Chicago.

Improvements in aircraft engines, based on changes in combustion chambers and raising exhaust gas temperatures, result in decreases in carbon monoxide and hydrocarbon emissions. Through comparative analysis for engines : Pratt & Whitney JT8D (Boeing 737–800) and CFM56 (Airbus A320), it can be concluded that during takeoff and climb, the values of carbon monoxide and hydrocarbons are negligible. It is during taxiing and parking that CO and HC values will be highest. For nitrogen oxides, the relationship is the opposite, i.e., as the exhaust gas temperature increases, there is a higher emission value. To accurately manage the emissions of compounds contained in the exhaust gas, it is necessary to have a thorough understanding of the flow and thermal processes taking place inside the combustion chamber.

Bibliography

1. Environmental Protection Agency, Control of Air Pollution from Aircraft and Aircraft Engines. Proposed Emission Standards and Test Procedures. *Proposed Rule*. Part II. Federal Register, 2012, 76 (144), 74–81.
2. Schafler W. A., Waitz A. I. Air transportation and environment. *Transport Policy*. 2014, 34, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.012>.
3. Pawlak M., Kuźniar M. Problematyka emisji toksycznych składników spalin silników lotniczych. *Bezpieczeństwo i ekologia*. 2017, 12, 338–344.
4. Tolga E. Estimation of Engine Emissions from Commercial Air-craft at a Midsized Turkish Airport. *Journal of Environmental Engineering*. 2008, 134 (3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:3\(210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:3(210)).
5. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023, 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>.
6. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*, 2019, 132, 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>.
7. Alrefo I.F., Rawashdeh M.O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, 3, 72–78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>.
8. Balicki W., Korczewski Z., Szczeciński S. Obszary zastosowań i tendencje rozwojowe turbinowych silników spalinowych. *Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa*, 2007, 3.
9. Merola S., Tornatore C., Iannuzzi S.E., Marchitto L., Valentino G. Combustion process investigation in a high speed diesel engine fuelled with n-butanol diesel blend by conventional methods and optical diagnostics. *Renewable Energy*. 2014, 64, 225–237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.017>.
10. Emission calculator. <https://www.flysas.com/en/sustainability/emission-calculator>.
11. Fellner A. Ewolucja nawigacji powietrznej determinuje rozwój transportu lotniczego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport*. 2017, 119, 113–125.

12. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskiy O., Buinyi R., Halko S. Improving the efficiency of solar power plants based on forecasting the intensity of solar radiation using artificial neural networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2021, 137–140. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>.
13. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>.
14. Fellner A. Program PBN ICAO w aspekcie efektywności portów lotniczych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport*. 2018, 122, 17–28.
15. Fellner A., Osowski M. Uwzględnienie czynnika ludzkiego w analizie bezpieczeństwa procesu zarządzania zasobami ludzkimi. *Problemy Kryminalistyki*. 2015, 290, 35–45. <https://doi.org/10.1061/10.34836/pk.2015.290.4>.
16. Rosing M., Ulrik F. Use case of carbon footprint reduction – Use case from European aviation industry. *The Sustainability Handbook*. 2025, 1, 115–150. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90110-9.00008-8>.
17. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S., Buinyi R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2022, 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>.
18. Jaworski B.M., Dietlaf A.A. Физика. Poradnik encyklopedyczny. *Wydawnictwo Naukowe PWN*. Warszawa, 2000, 657 p.
19. Lefebvre A. Gas Turbine Combustion. Second Edition, *Taylor & Francis Philadelphia*. 1998, 393 p.
20. Majka A., Sybilski K. Emission and greenhouse effects related to the GABRIEL concept. *Journal of Environmental Engineering*. Project, 2014, 93–101.
21. Jagadish D., Nageswara Rao A.V., Sreenivasa Kumar M. Engine combustion and emission analysis using optical methods: An overview. *Materials Today Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.588>.
22. Maxson J., Oppenheim A. Pulsed Jet Combustion – Key to a refinement of the stratified charge concept. *Symposium (International) on Combustion*, 1991, 23, 1, 1041–1046. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(06\)80362-0](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(06)80362-0).
23. Szuman B., Lipka P., Reklewski T. Emisja spalin z silników lotniczych. *Opracowanie Urzędu Lotnictwa Cywilnego. Departament Techniki Lotniczej Wydział Ochrony Środowiska*, 2013, 47–52.
24. Kanti Das S., Kim K., Lim O. Experimental study on non-vaporizing spray characteristics of biodiesel-blended gasoline fuel in a constant volume chamber. *Fuel Processing Technology*. 2018, 178, 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.05.009>.
25. Cui Z., Ye M., Zhang H., Tian J., Zhang X., Yin S. Optical study on the combustion process of diesel/natural gas dual fuel engine with in-cylinder swirl. *Fuel*. 2025, 392, 134915. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134915>.
26. Pejovic T., Noland R., Williams V. Estimates of UK CO₂ emissions from aviation using air traffic data. *Climatic Change*. 2008, 88 (3), 367–384. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9370-0>.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025 р.

Т. Г. Щур¹, К. Вігтек², О. О. Мірошник¹, С. В. Галько³

¹Державний біотехнологічний університет

²Silesian University of Technology

³Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

ВПЛИВ ТОКСИЧНИХ ТА ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ ВИХЛОПНИХ ГАЗІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Анотація

Швидке зростання авіації робить реалістичну оцінку шкідливих викидів вирішальною. Зростаючий попит на авіап перевезення призводить до збільшення виробництва літаків, що значно впливає на навколишнє середовище. Пріоритетом сучасних авіаційних технологій є зниження шуму, споживання палива й викидів



вихлопних газів, особливо вуглекислого газу та твердих часток. Сучасні дослідження спрямовані на пошук екологічно чистих рішень для зменшення негативних наслідків експлуатації літаків. Найбільшою проблемою є скорочення викидів оксидів азоту (NOx), оксидів сірки (SOx), оксиду вуглецю (CO) і незгорілих вуглеводнів (НС). Їх присутність в атмосфері сприяє утворенню смогу, кислотних дощів і збільшення концентрації озону в тропосфері. Найбільше забруднюють двигуни пасажирських і транспортних літаків, оскільки вони споживають величезну кількість палива порівняно з досягнутою тягою. Особливо значний вплив на навколишнє середовище мають далекі перельоти, що здійснюються на висоті 8–12 км, де спостерігаються найвищі концентрації токсичних сполук. На менших висотах, до 1 км, споживається лише 5–10 % світового авіаційного палива, але саме в районах навколо аеропортів забруднення повітря безпосередньо впливає на здоров'я людини. Хоча на авіацію припадає близько 2 % світових викидів парникових газів, її вплив на якість повітря та здоров'я людей є значним, особливо в регіонах з інтенсивним повітряним рухом. Глобальні викиди в цьому секторі зросли більш ніж на 75 % між 1990 і 2012 роками, і прогнози вказують на те, що вони можуть зрости у 2–7 разів до 2050 року, становлячи до 20 % глобальних викидів. Тому потрібні подальші зусилля для зменшення негативного впливу авіації на навколишнє середовище. Упровадження сучасних технологій і більш ефективних систем спалювання є ключовим фактором стійкості повітряного транспорту та захисту навколишнього середовища.

Ключові слова: авіаційні двигуни, вихлопні гази, шкідливі викиди, токсичні викиди, авіадвигуни.



КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-23>

УДК 004.4:004.9(043.3)

Д. В. Букатов¹, викладач

ORCID: 0009-0009-9320-2181

Я. О. Колодінська¹, старший викладач

ORCID: 0000-0002-3330-7565

О. І. Романенко¹, викладач

ORCID: 0009-0008-4703-217X

Д. О. Гудаков², аспірант

ORCID: 0009-0000-3003-842X

¹ *Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»*

e-mail: yanina.kolodinska@e-u.edu.ua

² *Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

e-mail: denysgud@gmail.com

**ВИКОРИСТАННЯ ПРОЦЕДУРНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ
ТА ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ**

Анотація. У статті розглянуто застосування процедурної генерації для створення й адаптації інтерфейсів користувача в сучасних ІТ-проєктах. Особливу увагу приділено аналізу інструментів і підходів, які дозволяють автоматизувати розроблення окремих UI-компонентів (кнопок, панелей, карток тощо) з використанням параметризованих виразів, скриптів, візуального компонування, спеціалізованих мов або систем на базі штучного інтелекту. Розглянуто технології SeExpr, Node-RED, Unreal Engine Blueprints, Framer, а також AI-асистовані сервіси, що дедалі частіше використовуються для генерації варіативних і персоналізованих інтерфейсів.

Обґрунтовано доцільність використання процедурного підходу в проєктах із високими вимогами до адаптивності, швидкості розроблення та повторного використання компонентів. У роботі висвітлено переваги таких рішень – зниження навантаження на дизайнерів і розробників, підтримка цілісного візуального стилю, а також можливість масштабування рішень у мультиплатформенних середовищах. Описано приклади впровадження процедурної логіки в прикладних середовищах (Unity, Web, IoT-панелі), а також наведено порівняльний аналіз інструментів за критеріями гнучкості, інтеграції в робочі процеси та можливостей кастомізації.

Результати дослідження свідчать про зростання ролі процедурної генерації як засобу підвищення ефективності UI-розробки в умовах високої варіативності користувацьких сценаріїв і швидких ітерацій продуктового дизайну. Запропоновані класифікація інструментів та рекомендації щодо їх вибору створюють практичну основу для застосування процедурних рішень у командах із різним рівнем технічної підготовки. Також окреслено перспективи розвитку теми – зокрема, інтеграція процедурної логіки в Low-Code/No-Code середовища та використання адаптивних систем генерації на основі користувацьких даних [7].

Ключові слова: процедурна генерація, інтерфейс користувача, персоналізація, SeExpr, UI-компоненти, AI-генерація, візуальне програмування, автоматизація інтерфейсів, Low-Code, UI-шаблони.

Постановка проблеми. В умовах щораз більшої складності сучасних ІТ-проєктів та високих вимог до якості й адаптивності користувацького інтерфейсу, постає проблема пошуку ефективних підходів до створення та масштабування візуальних компонентів. Одним із перспектив-

них напрямів є використання процедурної генерації окремих елементів інтерфейсу, що дозволяє зменшити обсяг ручної роботи, забезпечити узгодженість стилів та підвищити гнучкість компонування.

У цьому контексті вивчення та використання процедурної генерації має важливе практичне значення, оскільки дозволяє визначити продуктивність, гнучкість, простоту використання задля підвищення загальної якості, ефективності та швидкості розроблення графічного контенту для більшої та різноманітнішої персоналізації інтерфейсів.

Аналіз останніх досліджень. Процедурна генерація елементів інтерфейсу користувача останнім часом привертає все більшу увагу з боку розробників прикладного програмного забезпечення, особливо у зв'язку з необхідністю масштабування дизайну, підтримки адаптивності та зменшення витрат на розроблення. У фаховому середовищі все частіше підкреслюється доцільність використання параметризованих підходів для опису вигляду окремих UI-компонентів, зокрема кнопок, карток, панелей або іконок.

Акцентується на скороченні часу розроблення завдяки повторному використанню логіки створення візуально подібних елементів. Замість того, щоб створювати кілька окремих версій одного й того ж компонента з варіаціями кольору, розміру чи форми, пропонується використовувати умовні вирази або математичні формули, що керують візуальними властивостями без потреби ручного втручання. Це, зокрема, дозволяє централізовано змінювати параметри – наприклад, змінити відтінок або масштаб усіх кнопок одночасно, лише коригуючи базове правило генерації.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета статті полягає в дослідженні можливостей використання процедурної генерації для підвищення ефективності створення та адаптації окремих елементів інтерфейсу користувача в контексті сучасних IT-проектів. Завданням статті є визначення переваг впровадження процедурної логіки в проектуванні UI-компонентів, що повторюються або змінюються залежно від контексту використання.

Основна частина. У сфері комп'ютерної графіки та тривимірного моделювання відтворення автентичних візуальних характеристик поверхонь є фундаментальним завданням. Процедурне текстурювання є методом генерації текстур для 3D-моделей за допомогою математичних алгоритмів, на відміну від використання завантажених зображень, що забезпечує гнучкість і масштабованість.

Процедурна генерація у сфері розроблення інтерфейсів користувача – це підхід, за якого візуальні елементи інтерфейсу (кнопки, панелі, картки, декоративні блоки тощо) створюються або стилізуються на основі алгоритмічно описаних правил, а не шляхом статичного проектування. Замість використання фіксованих шаблонів або зображень, зовнішній вигляд компонента формується через вирази, формули чи умовні залежності, що визначають, наприклад, колір, розмір, відступи або взаємне розташування елементів.

Такий підхід дає змогу гнучко реагувати на контекст застосування – пристрій, роздільну здатність, тип користувача або режим роботи застосунку – без дублювання стилів або ручного створення численних варіацій UI-компонентів [10]. Залежно від структури вхідних даних чи умов один і той самий елемент може набувати різного вигляду.

Розглянемо значення процедурної генерації в сучасному UI-дизайні.

Процедурна генерація елементів UI забезпечує низку переваг:

1. Скорочення обсягів ручної праці. Замість створення десятків подібних компонентів вручну, розробник або дизайнер описує логіку, яка автоматично варіює параметри візуалізації [2];

2. Безшовність і масштабованість. Процедурні текстури можуть бути безшовними, що усуває видимі стики на великих поверхнях. Вони також можуть бути масштабованими до будь-

якого рівня деталізації без утрати якості, що є значною перевагою в порівнянні з традиційними текстами;

3. Персоналізація. Процедурна генерація дозволяє створювати елементи, які можуть змінюватися в залежності від профілю користувача, наприклад: роль, мова інтерфейсу, пріоритети взаємодії;

4. Цілісність оформлення. Єдина логіка генерації забезпечує узгодженість стилів у межах проєкту без необхідності дублювати CSS або шаблони;

5. Кросплатформеність. Процедурні елементи можуть бути використані на різних проєктах і в різних додатках – від комп'ютерних ігор до анімаційних фільмів та VR/AR.

Варто розглянути підходи процедурної генерації UI та UX елементів. Розділимо їх на категорії.

Категорія 1. Виразні мови та скриптові підходи. Такий тип процедурної генерації ґрунтується на використанні мов виразів або компактних скриптів, які описують логіку побудови візуальних елементів. Вони добре підходять для створення параметризованих ефектів, стилів чи патернів і дозволяють дизайнерам експериментувати з формою, кольором чи позиціонуванням без складного програмування.

Категорія 2. Візуальне компонування (Node-based) включає інструменти, що реалізують процедурну логіку за допомогою візуального програмування – через функціональні блоки (ноди), які об'єднуються у вигляді вузлів та зв'язків. Побудова логіки відбувається шляхом поєднання цих вузлів у відповідності до заданих сценаріїв. Такий підхід дозволяє створювати комплексні варіації елементів без написання коду, що робить його особливо зручним для дизайнерів та фахівців без глибоких технічних знань, зокрема у сфері мультимедійних та інтерактивних додатків.

Категорія 3. Доменно-специфічні мови (DSL) створені для опису інтерфейсів у конкретному домені або екосистемі. DSL дозволяють досягти високого рівня повторюваності, контролюваності та автоматизації, особливо у великих проєктах з чітко формалізованими вимогами до структури й поведінки UI-компонентів [3].

Категорія 4. Інструменти зі штучним інтелектом та генерацією з шаблонів. За цим підходом передбачається використання моделей машинного навчання або наперед визначених шаблонів для автоматичного створення інтерфейсів. Основна перевага полягає у швидкості генерації та можливості враховувати контекст або дані користувача в побудові UI.

Категорія 5. UI-фреймворки з підтримкою процедурної логіки, які можуть бути інтегровані безпосередньо в кодову базу проєкту. Такі готові середовища підтримують гнучке компонування елементів, стилізацію на основі змінних або даних і забезпечують високу масштабованість для складних продуктів із великою кількістю інтерфейсних станів.

Розглянемо варіанти використання інструментів процедурної генерації.

SeExpr використовується для створення патернів за допомогою математичних виразів. Хоча SeExpr виникла в анімації, ідея вбудованих виразів може підвищити ефективність і в UI-проєктах, де потрібно генерувати варіативні візуальні елементи. Замість статичних зображень розробники можуть задати процедуру (вираз) для малюнку фону, візерунку чи переходу – це спрощує персоналізацію інтерфейсу: достатньо змінити кілька параметрів, і той самий вираз відтворює новий стиль або тему оформлення.

Unreal Engine Blueprints – візуальна скриптова система Unreal Engine, що дозволяє розробникам створювати поведінку і логіку UI/гри за допомогою графічних блок-схем замість написання коду C++. Це значно пришвидшує і спрощує розроблення інтерактивних елементів. Blueprints забезпечує миттєве прототипування та ітерацію: ідеї можна тестувати майже одразу. Інтерфейс побудови графів доступний навіть для розробників без досвіду програмування, що

значно розширює коло учасників розроблення – до створення логіки можуть долучатися дизайнери рівнів чи UI-дизайнери. Інді-ігри часто повністю побудовані на Blueprints – розробники самотужки створюють весь геймплей і UI без написання коду. У комерційних AAA-проектах Blueprints застосовують для прототипування та скриптів ігрових подій. Відомо, що навіть у Fortnite від Epic Games значну частину геймплейних подій реалізовано через Blueprints для гнучкості в разі оновлення.

Node-RED – це інструмент flow-based programming з відкритим кодом, який використовується для з'єднання апаратних пристроїв, веб-сервісів та створення логіки застосунків за допомогою візуального редагування потоку даних. Інтерфейс Node-RED побудований у вигляді полотна, де користувач перетягує вузли (node) – кожен вузол виконує якусь дію або представляє компонент (датчик, API, елемент UI) – і з'єднує їх дротами, визначаючи потік даних і подій. Такий підхід є надзвичайно інтуїтивним: платформа спеціально розроблена для легкості та наочності і також має модуль Dashboard, що дозволяє створювати панелі моніторингу та керування так само просто, як й інші потоки [8]. Розробник може вибрати вузли UI (графіки, кнопки, текстові поля тощо) і зв'язати їх з потоками даних.

Framer – це інтерактивний інструмент дизайну інтерфейсів, що поєднує можливості графічного редактора та середовища прототипування з кодом. Первинно відомий як Framer Studio для створення прототипів з CoffeeScript, нині Framer еволюціонував у платформу, де дизайнери можуть будувати повністю функціональні макети вебсторінок чи додатків і навіть публікувати їх як готові сайти. Крім кейсу Lemni, відомо, що компанії на кшталт Uber, Dropbox, Google використовували Framer для прототипування інтерфейсів.

DSL для UI часто забезпечують реактивність «із коробки». Це означає, що інтерфейс автоматично оновлюється в разі зміни стану моделі, що усуває значну кількість рутинного коду синхронізації. Розробники можуть створювати повторно використовувані компоненти легше: наприклад, у QML та Compose компоненти описуються один раз і потім багаторазово викликаються з різними параметрами. Таке повторне використання і модульність сприяють масштабованості – великі інтерфейси будуються з менших блоків, написаних DSL, що спрощує командне розроблення і тестування [4]. Використання спеціалізованих мов для UI виправдане, коли проект вимагає швидких змін інтерфейсу, підтримки кількох платформ або командного розроблення. Власний DSL має сенс розробляти у великих компаніях, де десятки продуктів мають уніфікований стиль, тоді інвестиція у DSL окупається завдяки уніфікації і швидшому старту нових проектів. Якщо ж проект невеликий або команда не має ресурсу на підтримку власної мови, варто придивитися до наявних рішень (на кшталт Compose, QML, Flutter's Dart DSL)

Prototype2Code охоплює засоби генерації коду інтерфейсу на основі дизайнерських макетів. Вони дозволяють дизайнерам створювати прототипи у Figma або Sketch, після чого система трансформує їх у адаптивний HTML/CSS [1]. Цей підхід використовують, зокрема, в середовищах із формалізованими дизайн-системами [9].

Spacewalker – експериментальний інструмент (Google Research, CHI 2021), призначений для швидкого дослідження просторів дизайну UI за допомогою легкого розширення розмітки та генетичних алгоритмів у поєднанні з оцінками користувачів. Він реалізує концепцію еволюційного дизайну, генеруючи варіанти UI і відбираючи найуспішніші через зворотний зв'язок від користувачів. Цей метод має потенціал для дослідження оптимальних конфігурацій інтерфейсів у продуктах, орієнтованих на ефективну UX-концептуалізацію.

AI-асистовані інструменти на зразок Figma AI або Uizard дозволяють створювати макети за текстовим описом, зменшуючи навантаження на дизайнерів і скорочуючи час на генерацію



варіантів оформлення [6]. Це особливо корисно для швидкого отримання первинних прототипів або демо-інтерфейсів.

Unity UI Toolkit – сучасний набір інструментів для створення UI в Unity, який приніс у світ розроблення ігор концепції веброботки інтерфейсів. Він складається з UXML (мови розмітки інтерфейсу, подібної до HTML/XAML), USS (на зразок CSS) та програмної частини на C# для логіки і реагування на події. Цей підхід дозволяє різним учасникам команди ефективно працювати над UI-проектами.

Web Components із використанням шаблонізаторів (Stencil, Lit) дозволяють створювати ізольовані повторно використовувані елементи, сумісні з будь-яким фреймворком. Такі рішення широко застосовують у створенні масштабованих UI-бібліотек, зокрема в компаніях GitKraken, Adobe, Microsoft.

У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз процедурних підходів зазначених категорій, їхні переваги та недоліки.

Таблиця 1

Порівняння підходів до процедурної генерації UI-елементів і UX-шаблонів у контексті підвищення ефективності розроблення та персоналізації інтерфейсів

Категорія	Метод	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Виразні мови та скриптові підходи	SeExpr (Short Expressions). Основні особливості та функціональність SeExpr	– Простий синтаксис, що дозволяє швидко створювати параметризовані візуальні елементи; – Інтерактивність: зміни одразу візуалізуються; – Ідеально підходить для створення фонів, декоративних патернів, варіативних ефектів; – Можна використовувати без глибоких знань програмування	– Не підтримує створення повноцінного UI або логіки поведінки компонентів; – Не інтегрується напряму у більшість сучасних фреймворків UI; – Призначена переважно для графічного рендерингу, потребує адаптації до UI-завдань
Візуальне компонування (Node-based)	Unreal Engine Blueprints	– Зручність для дизайнерів, не потребує навичок програмування; – Візуалізація зв'язків і логіки взаємодії компонентів; – Можливість швидко створювати прототипи та інтерактивні шаблони	– Складна підтримка на великих проєктах – зростає навантаження на структуру; – Висока залежність від екосистеми Unreal Engine; – Менш придатна для класичних бізнес-додатків або вебінтерфейсів
	Node-RED	– Орієнтований на інтеграцію даних, автоматизацію і IoT-сценарії; – Має візуальне середовище, що дозволяє створювати реактивні інтерфейси; – Підтримує гнучке налаштування логіки взаємодії між модулями	– Основний фокус – автоматизація, а не UI-розробка; – Потребує додаткових налаштувань для створення сучасного вигляду інтерфейсу; – Не є нативним фреймворком для побудови UI, що ускладнює стилізацію та кастомізацію
	Framer	– Поєднує дизайнерський підхід із можливістю додавання логіки через код або візуальні зв'язки; – Підтримує створення адаптивних, інтерактивних UI з високим рівнем персоналізації; – Добре інтегрується з Figma та іншими дизайнерськими інструментами	– Має криву навчання через змішану логіку дизайну і програмування; – Частину функціоналу приховано за пропріетарною платформою; – Незручно експортувати результати у формат, придатний для продакшену без доопрацювання

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Доменно-специфічні мови (DSL)	Custom DSL для UI-рендерінгу	– Гнучкість у формалізації інтерфейсу під специфіку проєкту; – Можливість інтеграції з CI/CD, генерації документації, автотестуванням; – Добре підходить для розроблення складних інтерфейсів з персоналізацією	– Висока вартість розроблення та підтримки; – Вимагає високої компетенції в команді (DSL-дизайн, парсери, документація); – Обмежене повторне використання між проєктами
Інструменти зі штучним інтелектом та генерацією з шаблонів	Prototype2Code	– Автоматичне перетворення макету в адаптивний код; – Економія часу в розробленні типових інтерфейсів; – Зменшує залежність між дизайнерами та розробниками	– Залежність від якості вихідного макету; – Не підтримує складну логіку взаємодії між компонентами; – Може потребувати ручного доопрацювання результату
	Spacewalker	– Інноваційний підхід: еволюційні алгоритми + фідбек від користувача; – Швидка оптимізація UX на основі зібраних даних	– Високі обчислювальні вимоги; – Складність у налаштуванні та калібруванні моделей; – Експериментальний характер, слабка документація
	AI-асистовані генератори UI (Figma AI, Uizard)	– Швидке створення прототипів з нуля чи з опису; – Персоналізація на основі контексту або даних користувача; – Інтеграція з популярними середовищами (Figma, Webflow)	– Можливі помилки в логіці або структуруванні елементів; – Обмежена контрольованість над вихідним кодом; – Залежність від закритих платформ
UI-фреймворки з підтримкою процедурної логіки	Unity UI Toolkit	– Підтримка стилізації та компонування з використанням C# і USS; – Інтеграція з іншими системами Unity (анімація, інтерфейс, логіка); – Можливість створення складних UI-структур із динамічними змінами	– Високий поріг входження в середовище Unity; – Не призначено для класичних веб або мобільних UI
	Web Components + шаблонізатори (Lit, Stencil)	– Можливість створення власних динамічних елементів інтерфейсу; – Підтримка реактивності, модульності та повторного використання; – Легко інтегруються в сучасні фреймворки (React, Angular, Vue)	– Вимагає знань вебархітектури та компонентної моделі; – У складних структурах – додаткове навантаження на підтримку

Висновки. На основі проведеного аналізу встановлено, що використання процедурної генерації під час розроблення інтерфейсів користувача сприяє підвищенню ефективності, масштабованості та гнучкості цифрових продуктів. Завдяки параметризації компонентів, повторному використанню логіки та можливості адаптації під різні сценарії використання розробники можуть суттєво скоротити час на реалізацію візуальних рішень, забезпечуючи при цьому послідовність дизайну і відповідність потребам кінцевого користувача.

Серед переваг таких підходів – зменшення обсягу ручної роботи, спрощення підтримки UI-системи, швидке створення варіативних шаблонів і можливість персоналізації без дублювання коду. Успішні приклади використання інструментів на кшталт SeExpr, Node-RED, Framer або AI-асистованих платформ засвідчують актуальність теми в практиці сучасної IT-розробки [5].

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- 1) удосконалення інтеграції процедурної логіки в стандартні UI-фреймворки;
- 2) розроблення метрик для оцінювання ефективності таких рішень у командному розробленні;

- 3) вивчення впливу процедурної генерації на UX у багатокористувацьких та персоналізованих системах;
- 4) адаптацію процедурних інструментів до Low-Code/No-Code середовищ.

Список використаних джерел

1. Xiao, S., Zhang, Y., Li, J. J., Mooney, R. J. Prototype2Code: An End-to-End System for Generating Frontend Code from Design Prototypes *Proceedings of the 2024 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL)*. ACL, 2024.
2. Архітектурні підходи до розробки масштабованих вебзастосунків / О.В. Складенко та ін. *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. Вип. 24. Т. 4. С. 341–350.
3. Imarazene D., Kauffmann A., Nielsen J., Willis J. Declarative UI with Jetpack Compose: A Practical Guide for Android Developers. *O'Reilly Media*, 2021.
4. Литвиненко Л.О., Складенко О.В., Колодінська Я.О. Логіка побудови інтерфейсів у програмному забезпеченні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 1(3). С. 54–59. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.07
5. White Z., Brookman J., Barnes R. Designing for Privacy and Personalization in Web Interfaces. *ACM Transactions on the Web (TWEB)*. 2023. Vol. 17, No. 1. Article 3.
6. Uizard Technologies ApS. Building Interfaces with Generative AI: UX Strategies and Technical Constraints. Uizard Research Division, 2022. Whitepaper.
7. Гончаренко О.І., Мельник В.В. Інтелектуальні інтерфейси: методи проєктування та персоналізації. Київ : КНЕУ, 2021. 288 с.
8. Нестеренко М.С. Візуальне програмування та генеративні підходи в сучасних UI-системах. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Серія: Прикладна математика. 2023. № 2 (42). С. 68–74.
9. Figueroa L., Rodríguez J., Restrepo M. Low-Code Development Platforms and UI Customization in Practice. *Journal of Systems and Software*. 2021. Vol. 178. pp. 110970.
10. Zhao H., Wang Y., Li T. Designing Adaptive Interfaces in AI-Driven Platforms: From User Signals to Layout Logic. *Journal of Human–Computer Interaction*. 2023. Vol. 39, No. 2. P. 198–213. <https://doi.org/10.1080/07370024.2023.2001234>

Стаття надійшла до редакції 18.04.2025 р.

D. Bukatov¹, Y. Kolodinska¹, O. Romanenko¹, D. Gudakov²
¹ Private Higher Educational Establishment “European University”
² Taras Shevchenko National University of Kyiv

USING PROCEDURAL GENERATION TO ENHANCE THE EFFICIENCY OF DEVELOPMENT AND PERSONALIZATION OF SOFTWARE INTERFACES

Summary

The use of procedural generation for the creation and adaptation of user interfaces in modern IT projects has been examined by the author. Special attention has been paid to the analysis of tools and approaches that allow automating the development of individual UI components (such as buttons, panels, cards, etc.) using parameterized expressions, scripting languages, node-based systems, domain-specific languages, or AI-driven solutions. Technologies such as SeExpr, Node-RED, Unreal Engine Blueprints, Framer, as well as AI-assisted services increasingly used for generating varied and personalized interfaces, have been reviewed.

The relevance of applying procedural methods in projects with high demands for adaptability, rapid development, and component reusability has been substantiated. The article highlights the advantages of such approaches—reduced workload for designers and developers, consistent visual style, and scalability across multi-platform environments. Examples of procedural logic implementation in practical contexts (such as Unity, Web environments, and IoT



dashboards) are described, along with a comparative analysis of tools based on their flexibility, workflow integration, and customization potential.

The findings of the study indicate the growing role of procedural generation as a means of improving UI development efficiency in the context of highly variable user scenarios and accelerated design iterations. The author proposes a classification of tools and offers recommendations on selecting appropriate solutions, providing a practical foundation for implementation in teams with diverse technical backgrounds. Future perspectives are also outlined, including the integration of procedural logic into Low-Code/No-Code platforms and the application of adaptive generation systems based on user data.

Keywords: procedural generation, user interface, personalization, SeExpr, UI components, AI-based generation, visual programming, interface automation, Low-Code, UI templates.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-24>

УДК 004.94

О. Г. Зінов'єва, ст. викл.

ORCID: 0000-0003-3760-8952

С. В. Шаров, канд. пед. наук

ORCID: 0000-0001-5732-9980

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: olha.zinovieva@tsatu.edu.ua

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИКИ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ

Анотація. Імітаційне моделювання дає можливість ефективно аналізувати й оптимізувати логістичні процеси в аграрному секторі. У статті описана модель, яка дає змогу оцінити вплив різних факторів на ефективність системи, включно з продуктивністю техніки, ємністю складів та станом транспортної інфраструктури. Результати моделювання можуть бути використані для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на мінімізацію втрат урожаю та підвищення ефективності всього ланцюжка постачання. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення моделі, врахування додаткових факторів (наприклад, погодних умов) та валідацію моделі на основі реальних даних.

Статтю присвячено застосуванню імітаційного моделювання для аналізу й оптимізації логістичних процесів та управління ланцюгами поставок в аграрному секторі. Аграрний сектор характеризується високим ступенем невизначеності, яка пов'язана з кліматичними умовами, коливаннями врожайності, сезонністю попиту й іншими факторами, що суттєво ускладнює планування та прийняття рішень. Традиційні методи оптимізації часто виявляються недостатньо ефективними в умовах такої невизначеності. Імітаційне моделювання дає можливість подолати ці обмеження, надаючи інструмент для аналізу складних систем та оцінки впливу різних факторів на ефективність роботи сільськогосподарського підприємства.

Ключові слова: моделювання, логістика, імітаційна модель, оптимізація, GPSS.

Постановка проблеми. Аграрний сектор характеризується сезонністю виробництва, значними втратами врожаю на етапах збору, зберігання та транспортування, а також складністю прогнозування обсягів виробництва. Неефективність логістики може привести до втрат продукції, що не тільки загрожуює стабільності попиту на сільськогосподарську продукцію, але й створює загрозу для фінансових втрат для аграрних підприємств. Однією з важливих задач у цьому контексті є оптимізація збору, зберігання та транспортування зерна. Для вирішення цих проблем потрібне впровадження сучасних технологій, серед яких особлива увага приділяється імітаційному моделюванню. Імітаційні моделі допомагають менеджерам краще зрозуміти та передбачити динаміку процесів, що, зі свого боку, сприяє більш ефективному управлінню ресурсами.

В умовах аграрного сектора, де прогнозування попиту та пропозицій часто пов'язане з великим ступенем невизначеності, використання імітаційних моделей відкриває нові можливості. Це дає змогу фермерам і сільгосппідприємствам оцінити ризики й адаптувати свої стратегії поведінки до постійно мінливих умов ринку.

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом зростає цікавість до питань імітаційного моделювання в агрономії та логістиці. Останні дослідження демонструють широке застосування імітаційного моделювання в аграрному секторі для вирішення завдань різного рівня складності: від оптимізації окремих процесів до моделювання всього ланцюжка постачання, включно з обліком ризиків та невизначеностей, та інтеграцію з іншими методами (машинне навчання). У роботах Коковіхіна С. В. [1], Сербія В. К [2], Ушкаленко І. М. [3] розглядалися

питання моделювання окремих агротехнічних процесів. Проблематика логістичних процесів в аграрному секторі також знайшла своє відображення у працях Великодного Д. О. [4], Солодихіна С. В., Хорошуна В. В. [5], де розглядаються підходи до підвищення ефективності управління ланцюгами постачання в агропромисловому комплексі шляхом застосування імітаційного моделювання.

Дослідження в цій галузі також стосуються використання різних інструментів імітаційного моделювання. Наприклад, робота Лубко Д. В., Зінов'євої О. Г. [6] присвячена використанню GPSS в імітаційному моделюванні в сільськогосподарському виробництві.

У міжнародній практиці також багато уваги було присвячено питанню оптимізації логістичних ланцюгів постачання в аграрній сфері. У роботах Ebadian M. et al. [7], Chen I., Yu H. [8], Nilsson D. [9], Yang B. [10], Garcia-Flore R. et al. [11] акцентовано увагу на можливості зниження витрат і покращення швидкості поставок завдяки використанню методів комп'ютерного моделювання.

Однак багато досліджень обмежені використанням спільних імітаційних платформ або не враховують специфіки окремих аграрних культур і регіонів. Недостатньо уваги приділяється розробці та валідації моделей на основі реальних даних.

Формулювання мети статті. Метою статті є аналіз сучасних підходів до використання імітаційного моделювання в логістичних процесах аграрного сектора. У дослідженні розглядаються основні методи та моделі, що дають змогу оптимізувати транспортування, складське зберігання й управління ресурсами. Також визначаються перспективи впровадження імітаційного моделювання для підвищення ефективності логістичних систем у сільському господарстві.

Основна частина. Ефективність роботи будь-якого сільськогосподарського підприємства залежить від раціональної організації всіх виробничих етапів. Особливу увагу слід приділити процесу збирання врожаю, який традиційно є найбільш трудомістким та витратним, що потребує ретельного планування та контролю матеріальних, фінансових і трудових ресурсів. Оптимізацію цього складного процесу, як і багатьох інших аспектів сільськогосподарського виробництва, можна досягти за допомогою імітаційного моделювання. Імітаційне моделювання дає можливість створювати детальні та реалістичні віртуальні моделі виробничих процесів, що відображають усі нюанси, починаючи від моменту збирання врожаю та закінчуючи зберіганням і транспортуванням зібраної продукції. Така модель дає змогу програвати різні сценарії, варіюючи параметри (наприклад, кількість задіяної техніки, чисельність робочої сили, графіки роботи, методи збирання тощо). Це дає можливість оцінити вплив кожного із цих факторів на загальну ефективність процесу, виявити вузькі місця та потенційні проблеми ще до їх виникнення в реальному виробництві. Наприклад, імітаційна модель може відобразити вплив різних погодних умов на швидкість збирання, оцінити оптимальну кількість комбайнів для забезпечення максимальної продуктивності без простоїв, прогнозувати втрати врожаю за різних варіантів зберігання, а також змодельовати логістичні ланцюжки, оптимізуючи маршрути транспортування зерна до елеваторів і складів. Ба більше, модель дозволяє оцінити економічну ефективність різних стратегій, порівнюючи витрати на ресурси з обсягом зібраного та збереженого врожаю.

В організації зберігання зібраного врожаю імітаційне моделювання допомагає вибрати найбільш ефективні методи та технології, що гарантують збереження якості продукції та мінімізацію втрат. Завдяки цьому можна заздалегідь передбачити та запобігти виникненню можливих проблем, забезпечивши максимально ефективні умови зберігання та збереження високої якості продукції. Зрештою використання імітаційного моделювання дає змогу сільськогосподарському підприємству підвищити рентабельність виробництва, знизити витрати та збіль-

шити прибуток, забезпечуючи раціональне використання всіх доступних ресурсів. Це особливо актуально в сучасних умовах, коли ефективність та оптимізація є ключовими факторами успіху в сільському господарстві.

Комп'ютерне моделювання відіграє все більш важливу роль в оптимізації різних процесів, і однією з ефективних платформ для цього є система імітаційного моделювання GPSS (General Purpose Simulation System). За допомогою GPSS можна створювати детальні моделі складних систем, вона надає можливість дослідникам вивчати їхню поведінку в різних умовах і сценаріях. Ця гнучкість є дуже цінною під час аналізу динамічних систем, де традиційні методи аналізу можуть бути неефективними. Зокрема, застосування GPSS в аграрному секторі, а саме в оптимізації логістичних ланцюжків, відкриває широкі можливості підвищення ефективності та прибутковості.

Розглянемо застосування GPSS для моделювання логістичної системи, пов'язаної зі збиранням, зберіганням і транспортуванням зернових культур. Модель описує процес від збирання врожаю до постачання на елеватор. Результати моделювання можуть показати, які вузькі місця існують у системі, де можна оптимізувати роботу техніки та як покращити координацію між різними етапами процесу. Використання моделі GPSS для аналізу логістичної системи дає змогу не тільки оцінити поточний стан системи, але і спрогнозувати ефективність різних змін і стратегій, що істотно знижує ризики, пов'язані з впровадженням нових рішень. Результати моделювання, отримані за допомогою GPSS, надають цінну інформацію для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

На рис. 1 представлено фрагмент моделі GPSS.

```
A      GENERATE ,20
        TRANSFER FN$P_polomki
        ADVANCE 120,60
        MARK M1
        TEST L X$Ubr,5000
        SAVEVALUE Ubr_S+, (1.65+(RN1/1000)#3)
        ADVANCE 40
        QUEUE Cher_tran
        SEIZE RozpK
        SAVEVALUE Bunker,1
        TEST E X$Bunker,0
        DEPART Cher_tran
        RELEASE RozpK
        ADVANCE 20,5
        TRANSFER ,A
        GENERATE ,13
        ASSIGN 2,P1
```

Рис. 1. Фрагмент моделі GPSS

Моделювання починається, коли комбайни і транспорт у полі, а завершується, коли зерно вивезено на елеватор. Модель передбачає можливі поломки комбайнів, після ремонту або оминаючи його, транзакт (комбайн) приступає до збиранню врожаю. Після збору та вивантаженню зерна на транспорт комбайни містяться в список користувача DOM.

Другий сегмент моделі описує модель забезпечення перевезення зерна з поля до елеватора. Таким чином, до кінця збирання всі комбайни перебувають у списку користувача DOM, а весь транспорт – у черзі перед елеватором. Після обслуговування транзактів в пристрої ELEVATOR вони знищуються в блоці TERMINATE і процес моделювання завершується.

Після декількох прогонів моделі система GPSS надає статистичні дані: середній час очікування транспорту на завантаження та вивантаження зерна, коефіцієнт використання ресурсів (комбайнів, вантажівок).

Побудована модель дає змогу проаналізувати ефективність використання ресурсів та оптимізувати часові витрати на кожному етапі.

Висновки. Імітаційне моделювання стає потужним інструментом для оптимізації логістики й управління ланцюжками постачання в аграрному секторі. Вона дає можливість ідентифікувати слабкі місця в системі, прогнозувати зміни попиту та пропозиції, а також оптимізувати процеси зберігання й транспортування.

Застосування мов програмування, зокрема GPSS, дає змогу створити високоточну модель, що сприятиме підвищенню ефективності та рентабельності. Приклади успішних випадків застосування свідчать, що правильна адаптація імітаційних моделей може призвести до значних економічних вигод.

Проте для досягнення позитивних результатів потрібно враховувати безліч факторів і забезпечувати високу якість вхідних даних. Розвиток і застосування імітаційного моделювання сприятиме кращому розумінню виробничих процесів, а отже, підвищенню ефективності аграрного сектора загалом.

Список використаних джерел

1. Коковіхін С. В. Оптимізація режимів зрощення основних сільськогосподарських культур з використанням імітаційного моделювання та програмних засобів. *Зрошуване землеробство*. 2010. № 53. С. 107–116.
2. Сербій В. К. Імітаційне моделювання роботи ґрунтообробних робочих органів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. № 8. С. 18–24.
3. Ушкаленко І. М. Особливості моделювання в сільськогосподарському виробництві з врахуванням ризику. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2020, № 1. С. 119–134. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2020-1-8>.
4. Великодний Д. О. Підвищення ефективності управління ланцюгом постачання в АПК з використанням імітаційного моделювання в логістичних процесах. *Проблеми та перспективи розвитку технічних та біоенергетичних систем природокористування. XIX Міжнародна конференція науково-педагогічних працівників, наукових співробітників та аспірантів : збірник тез*. м. Київ, Україна, 25–29 березня 2019 року. Київ, 2019. С. 98–100.
5. Солодухін С. В., Хорошун В. В. Використання імітаційних моделей в управлінні логістичними процесами на підприємстві. *Економіка та суспільство*. 2018. С. 1096–1107.
6. Лубко Д. В., Зінов'єва О. Г. Проектування імітаційної моделі роботи зернового збирально-транспортного комплексу. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 13, т. 1.
7. Ebadian M. et al. A new simulation model for multi-agricultural biomass logistics system in bioenergy production. *Biosystems engineering*. 2011. Vol. 110. No. 3. P. 280–290.
8. Chen J., Yu H. Performance simulation and optimization of agricultural supply chains. *2013 International Conference on Information Science and Cloud Computing*. IEEE, 2013. P. 131–137.
9. Nilsson D. Discrete event simulation as a performance analysis tool in agricultural logistics systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 2001. Vol. 34. No. 26. P. 19–24.
10. Yang B. Machine learning-based evolution model and the simulation of a profit model of agricultural products logistics financing. *Neural Computing and Applications*. 2019. Vol. 31. P. 4733–4759.
11. García-Flores R. et al. Using logistic models to optimize the food supply chain. *Modeling food processing operations*. Woodhead Publishing, 2015. P. 307–330.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.



O. Zinovieva, S. Sharov
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

SIMULATION MODELING OF LOGISTICS IN THE AGRICULTURAL SECTOR

Summary

Simulation modeling allows for effective analysis and optimization of logistics processes in the agricultural sector. The article describes a model that allows for the assessment of the impact of various factors on the efficiency of the system, including equipment productivity, warehouse capacity, and the state of transport infrastructure. The modeling results can be used to make informed management decisions aimed at minimizing crop losses and increasing the efficiency of the entire supply chain. Further research can be aimed at improving the model, including additional factors (for example, weather conditions) and validating the model based on real data.

The article is devoted to the application of simulation modeling for the analysis and optimization of logistics processes and supply chain management in the agricultural sector. The agricultural sector is characterized by a high degree of uncertainty associated with climatic conditions, yield fluctuations, seasonality of demand, and other factors, which significantly complicates planning and decision-making. Traditional optimization methods often prove to be insufficiently effective in conditions of such uncertainty. Simulation modeling overcomes these limitations by providing a tool for analyzing complex systems and assessing the impact of various factors on the efficiency of an agricultural enterprise.

Keywords: modeling, logistics, simulation model, optimization, GPSS.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-25>А. А. Клєпцов¹, магістр з інженерії програмного забезпечення ORCID: 0009-0008-3147-0618В. А. Гусєва-Божаткіна², старший викладач

кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем ORCID: 0000-0002-1117-3391

¹ ТОВ «28Software»² Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

e-mail: mrlcros1@gmail.com, GusevaBozh@meta.ua

АЛГОРИТМ ПОКРАЩЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОРИСТУВАЧІВ У МОБІЛЬНИХ ІГРАХ ЧЕРЕЗ АДАПТИВНИЙ ПЕРЕЗАПУСК ГРИ

Анотація. Кількість випущених ігор на ринку прямо пропорційно залежить від вибагливості користувачів. Якщо ще 10–20 років тому багато гравців могли не звертати уваги на недоліки, баги або нестабільність гри, то зараз продукт, скоріш за все, буде видалений і забутий. Розробники отримують погані відгуки в маркеті, а гравець із легкістю знайде альтернативу. Звичайно, значна частина багів виправляється в процесі розроблення в тандемі спеціалістів по розробкам і Quality Assurance, але все виправити неможливо. Особливо у великих проектах існують мільйони різних комбінацій взаємодії з грою, які можуть призвести до нестабільності, виходу з ладу основних механік або взагалі аварійному закриттю застосунку. Щоб розв'язати такі проблеми, компанією Google було розроблено додаткові інструменти під назвою Firebase Crashlytics, які інтегруються безпосередньо в гру. Пізніше такий підхід отримання звітів про помилки набув розповсюдження як загальний, який можна назвати терміном «крашлітика». Крашлітика допомагає в реальному часі бачити в програмному коді гри помилки, з якими стикаються реальні користувачі. Відповідно, розробники можуть вчасно реагувати на проблеми, які часто трапляються, і виправляти їх. Водночас крашлітика не є магічною пігулкою до успіху. Зазвичай User Experience (UX) від помилок у грі є негативним. Користувача просять надіслати скріншот, описати, що він робив, коли сталась помилка і т. ін. Як показує практика, цим будуть займатись одиниці. У статті запропоновано альтернативний підхід до взаємодії користувача з помилками у грі, розроблений на рушії Unity. Розроблено алгоритм збереження стану гри, імітації завантаження, або це ще можна назвати «втратою зв'язку» та плавного повернення гравця до точки, де відбулася помилка в логіці. Таким чином, більшість гравців навіть не зрозуміють, що в грі щось пішло не так, а можуть списати це на свій поганий інтернет, необхідність завантаження додаткового контенту в грі тощо.

Ключові слова: Firebase Crashlytics, Cloud Diagnostics, крашлітика, помилка, UX, скріншот, Unity.

Постановка проблеми. Індустрія мобільних ігор стала невід'ємною частиною нашого світу. Незважаючи на те, що індустрія мобільних ігор зазнала кардинальних змін за останні роки, у 2023 році глобальний ринок ігор згенерував понад US\$184 мільярди доходу, з яких саме мобільні ігри принесли близько US\$90 мільярдів. Ця частка становить 49% від загального обсягу [1]. Можна з упевненістю сказати, що ринок мобільних ігор дуже великий, а проблема якості продуктів стоїть дуже гостро. Через велику кількість продуктів гравці просто не будуть звертати увагу на ігри з низьким рейтингом, відповідно, компанія-розробник може понести величезні збитки. Зазвичай провальні релізи на ігрових платформах не набувають великого розголосу, але це не означає, що їх немає.

Оскільки геймдев під мобільні платформи та ПК/консолі дуже пов'язані, можна розглянути приклад таких ігор. Наприклад, гра Cyberpunk 2077 – одна з найочікуваніших ігор десятиліття – розроблена польською компанією CD Projekt RED. Анонс гри відбувся у 2012 році, й вона привертала увагу завдяки обіцянкам інноваційного геймплея, глибокої RPG-системи

та масштабного відкритого світу. На релізі гра зіткнулася із серйозною критикою, особливо на консолях попереднього покоління (PS4 та Xbox One). Основні проблеми включали: збої, низьку продуктивність, вирізаний контент, помилки в логіці. Результат такого провального релізу: гравці масово залишали негативні відгуки, гра була знята з продажу в PlayStation Store, численні повернення коштів за гру, акції компанії-розробника впали на 50% [2]. Компанії знадобилось близько 2,5 років для виправлення гри та стабілізації оцінок у маркетах, і близько 4 років – для відновлення ціни на акції.

Звичайно, цього можна було запобігти, випускаючи більш якісний продукт. Але не завжди час грає на руку. Тому в таких ситуаціях треба думати, як покращити взаємодію гравця з технічними проблемами в грі.

Аналіз останніх досліджень. Існують багато статей щодо покращення User Experience (UX) в іграх, але, на жаль, вони не стосуються саме сприйняття користувачем помилок у грі. Найчастіше вони описують UX у загальній перспективі, наприклад: плавне занурення гравця в гру, пояснення механік, зрозумілий User Interface (UI). Наприклад, Герда Губер і Давид Рюкель у своїй науковій доповіді «UX and Serious Games – A Research Agenda» описують важливість UX у іграх [3].

Німмі Рашініка Віраддана, Сарра Хабчі та Шейн Макінтош у своїй науковій статті «Crash Report Prioritization for Large-Scale Scheduled Launches» розглядають методіку пріоритизації звітів про збої в програмному забезпеченні для великих запланованих запусків [4].

Деді Прасеця Крістіаді та його співавтори в доповіді «The effect of UI, UX and GX on video games» аналізують вплив дизайну інтерфейсу користувача (UI), досвіду користувача (UX) та ігрового досвіду (GX) на ефективність та сприйняття відеоігор [5].

Пейї Ін у роботі «Research on design and optimization of Game UI framework based on Unity3D» досліджує процеси проєктування та оптимізації фреймворку інтерфейсу користувача для ігор, створених на основі Unity3D [6].

Вказані роботи не охоплюють важливий аспект – сприйняття користувачем помилок у грі та можливостей їх подолання. Саме тому в цій статті розглядається підхід, який фокусується на покращенні досвіду користувача шляхом упровадження механізму адаптивного перезавантаження гри. Цей підхід дозволяє зменшити рівень фрустрації у гравців, сприяючи більш позитивному сприйняттю гри загалом.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є:

- 1) дослідження наявних методів взаємодії користувача з помилками під час ігрового процесу;
- 2) розроблення алгоритму для покращення UX-методом збереження стану гри, підміною зображення й тихого перезавантаження гри у фоновому режимі;
- 3) дослідження ефективності розробленого методу.

Основна частина. Спочатку треба розглянути вже наявні методи відлову помилок під час ігрового процесу та дослідити, як вони впливають на UX.

Якщо брати до уваги ігри, розроблені на рушії Unity, – найпопулярнішому рушію для розроблення ігор під мобільні платформи, то прямо «з коробки» можна підключити Cloud Diagnostics: Game Code Debugger & Reporting [7]. Це інструмент Unity, що дозволяє розробникам ефективно виявляти, аналізувати та виправляти помилки в ігровому коді. Він автоматично збирає інформацію про краші (збої в грі, після яких вона закривається) та помилки, надаючи детальні звіти з такими ключовими даними, як стек викликів, інформація про пристрій, версію операційної системи (ОС) та інше.

Інструмент підтримує логування подій і створення власних звітів, а також групування та фільтрацію помилок для швидшого аналізу. Це дає змогу розробникам відстежувати непо-

ладки в реальному часі, зосереджуючись на найважливіших проблемах.

Cloud Diagnostics інтегрується з Unity Dashboard, де розробники можуть легко переглядати та аналізувати помилки. Завдяки цьому UX стає стабільнішим, а час на пошук і виправлення багів суттєво скорочується, що особливо важливо для великих проєктів із широкою аудиторією.

Другий інструмент, котрий також користується попитом, – Firebase Crashlytics [8]. Цей інструмент для моніторингу та діагностики помилок у мобільних застосунках та іграх, який є частиною платформи Firebase від Google. Він автоматично фіксує збої, надає детальні звіти в реальному часі та допомагає розробникам швидко визначати й усувати критичні проблеми.

Crashlytics створює звіти про помилки з ключовою інформацією, як-от стек викликів, параметри пристрою, версія застосунку та ОС. Інструмент автоматично групує схожі помилки, визначаючи їх вплив на користувачів, і дозволяє додавати власні логи для кращого розуміння контексту подій перед крашем.

Проста інтеграція SDK Firebase робить Crashlytics зручним для використання в застосунках на iOS, Android та Unity. Це дозволяє розробникам швидко реагувати на помилки, покращуючи стабільність і загальний досвід користувачів, а також заощаджує час на діагностику та розв'язання проблем.

На основі багаторічного досвіду роботи з обома інструментами можна зробити висновок, що вони обидва забезпечують високий рівень функціональності. Firebase пропонує широкий спектр корисної інформації та модульність, яка дозволяє видаляти або додавати потрібні функції через пакети. Проте в багатьох випадках, зокрема в контексті відлову винятків (Exceptions), пакет Firebase Crashlytics поступається можливостям Cloud Diagnostics. Багато винятків просто не логуються пакетом. Також стек викликів (Stack trace) не дає корисної інформації на відміну від Cloud Diagnostics. Отже, під час дослідження вирішено використовувати інструмент Cloud Diagnostics від Unity.

На цьому етапі також варто зазначити, що обидві системи вміють працювати з двома типами помилок у коді: виняток (Exception) та збій (Crash). Дослідимо різницю між ними.

Exception – це програмна помилка, яка виникає під час виконання коду, але не призводить до повного завершення роботи програми. Наприклад, це може бути спроба доступу до неіснуючого індексу масиву або виклик методу для null-об'єкта. У таких випадках програма може продовжувати працювати, якщо виняток буде належним чином оброблено.

Crash, на відміну від Exception, є критичною помилкою, яка призводить до аварійного завершення роботи програми. Це може відбуватися, наприклад, через неправильну роботу пам'яті або критичні збої у взаємодії із системними компонентами. Такі помилки потребують негайної уваги розробників, оскільки вони суттєво впливають на користувацький досвід.

Розуміння різниці між винятками та збоями дозволяє розробникам ефективніше діагностувати та виправляти проблеми, використовуючи відповідні інструменти, як-от Firebase Crashlytics або Cloud Diagnostics.

На перший погляд, може здатися, що Exception – це щось неважливе і його можна ігнорувати, але це не так. Розглянемо простий приклад.

Припустимо, в грі є економічна система. Розробник урахував, що кількість грошей у гравця не може бути від'ємною. Однак у певній ситуації це правило не оброблено належним чином, що призводить до виникнення винятка.

Короткий приклад коду на C# наведено у [9]. У цьому прикладі, якщо метод SpendMoney викликається із сумою, яка перевищує поточний баланс гравця, тоді генерується виняток *InvalidOperationException*. Якщо цей виняток не буде оброблено, гра може зупинитися, подальші дії користувача будуть ігноруватись програмним кодом або призводити до інших винятків, тим самим генеруючі нескінченну чергу помилок. З огляду на це винятки мають пря-

ний вплив на користувацький досвід, навіть якщо вони не є фатальними для всієї програми. Їх оброблення дозволяє створювати стабільніші й надійніші продукти. Якщо під час збоїв (crash) розробник ніяк не може вплинути на UX, бо гра банально закрийється, то з винятками можна щось зробити.

Зазвичай розробники роблять подібні універсальні вікна (рис. 1), які просто відображають помилку та мають одну або декілька кнопок. Іноді також додається текстове поле для опису проблеми, яка виникла у гравця.



Рис. 1. Приклад UI, який сповіщає гравця про помилку

Як показує практика, це поганий UX. Гравців відлякують незрозумілі вікна, а також додаткові прохання описати проблему. Це напряму впливає на статистику та оцінку гри в маркеті.

Отже, для реалізації було створено тестовий проєкт Unity. Проєкт складається з кількох сцен і скриптів, що реалізують функціонал оброблення помилок у грі з покращеним UX. Ключова ідея полягає у створенні механізму, який обробляє помилки, затемнює екран, робить скріншот поточного стану, відображає його користувачу, перезавантажує основну сцену і водночас зберігає та відновлює стан об'єктів.

Сутності, які використано в проєкті, та алгоритм роботи:

1. Сцени

1.1. MainScene: Основна сцена гри, яка містить об'єкти, що змінюють свій стан у реальному часі, наприклад, змінюють колір, рухаються або відображають різні спрайти. Спрайт – це двовимірне растрове зображення в комп'ютерній графіці, яке можна відобразити на екрані.

1.2. ExceptionHandler: Сцена для оброблення помилок. Вона містить логіку, що перехоплює винятки та відображає спеціальне затемнення й скріншот стану гри.

1.3. Bootstrap: Початкова сцена, яка ініціалізує необхідні ресурси та відповідає за завантаження основних сцен.

2. Основні скрипти

2.1. ExceptionsHandler.cs: Реалізує перехоплення помилок за допомогою *Application.logMessageReceived*.

У разі помилки: Робить скріншот поточного стану. Відображає скріншот на UI Image. Потім активує затемнення і запускає перезавантаження основної сцени.

2.2. SaveManager.cs: Зберігає та відновлює стан об'єктів через PlayerPrefs. Використовує

інтерфейс ISavable, щоб визначити об'єкти, які можуть зберігати свій стан.

2.3. ISavable.cs: Інтерфейс для збереження та відновлення стану об'єктів. Реалізований у таких класах:

2.3.1. SavableImage: Зберігає стан спрайту (назву файлу).

2.3.2. SavableMover: Зберігає позицію об'єкта.

2.3.3. SavableColor: Зберігає колір об'єкта.

2.4. FakeException.cs:

2.4.1. Скрипт для тестування оброблення винятків.

2.4.2. Викликає штучну помилку для демонстрації механізму.

2.5. Bootstrap.cs: Скрипт для завантаження сцен. Перевіряє, чи завантажена сцена ExceptionHandler, і завантажує її лише за необхідності.

3. Логіка роботи

3.1. Ініціалізація: Bootstrap завантажує ExceptionHandler і MainScene.

3.2. Робота в грі:

3.2.1. Гравець взаємодіє з об'єктами, які змінюють свій стан.

3.2.2. Об'єкти зберігають свої стани через SaveManager.

4. Оброблення помилки:

У разі винятку ExceptionsHandler:

4.1. Перехоплює повідомлення через *Application.logMessageReceived*.

4.2. Робить скріншот екрана.

4.3. Відображає скріншот на UI Image в сцені ExceptionHandler.

4.4. Потім запускає затемнення і викликає перезавантаження MainScene.

5. Перезавантаження:

5.1. SaveManager зберігає стани об'єктів перед вивантаженням сцени.

5.2. Після перезавантаження MainScene об'єкти відновлюють свої стани.

5.2.1. Ключові елементи UI:

6. Canvas для ExceptionHandler:

6.1. Містить Image, на який накладається скріншот.

6.2. Має затемнення, яке відображає прогрес перезавантаження.

7. Затемнення:

7.1. Створюється на Canvas у вигляді чорного напівпрозорого зображення.

7.2. Анімується через DOTween для плавного затемнення.

Роботу алгоритму представлено на рис. 2.

Для ознайомлення проєкт викладений у вільний доступ на платформі GitHub [10].

Для оцінювання ефективності імплементованого алгоритму адаптивного перезапуску в разі помилок було проведено експеримент на демоверсії мобільної гри для Android. В експерименті взяли участь 1418 унікальних користувачів. Середня щоденна аудиторія (Daily Active Users, DAU) становила приблизно 200 користувачів на день.

Основною метрикою ефективності вибрано One Day Retention (1-day retention) – показник, що вимірює частку користувачів, які повернулися до гри через 24 години після першої взаємодії. Чим вищий цей показник, тим краще гра утримує гравців, що може свідчити про зменшення фрустрації через можливі технічні проблеми та покращення користувацького досвіду.

Для коректного аналізу впливу алгоритму було проведено A/B тест:

1) Група А (контрольна) – стандартний механізм оброблення помилок без алгоритму адаптивного перезапуску;

2) Група В (експериментальна) – алгоритм адаптивного перезапуску активовано.

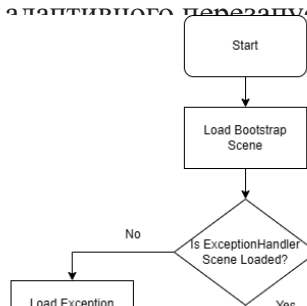


Рис. 2. Блок-схема роботи адаптивного перезапуску

Експеримент тривав 7 днів, і за цей період було зібрано дані щодо повернення користувачів та оброблення помилок. Для збору статистики використовувалися Unity Dashboard, Unity Crashlytics та Unity A/B Testing.

Для тестування механізму оброблення помилок у грі були навмисно введені тестові експешени під час дії купівлі предмета в магазині з ймовірністю 15%. Це дозволило проаналізувати, як алгоритм адаптивного перезапуску впливає на користувацький досвід у критичних сценаріях.

Таблиця 1

Порівняння 1-day retention між групами

Група	Кількість гравців	One Day Retention, %
A (контрольна)	703	35,4
B (експериментальна)	715	47,2

Таблиця 2

Кількість крашів та експешенів у кожній групі

Група	Загальна кількість крашів	Загальна кількість експешенів	Тестові експешени (під час купівлі)
A (контрольна)	15	102	50
B (експериментальна)	13	98	48

З отриманих даних видно, що кількість крашів та експешенів у двох групах залишалася приблизно однаковою, що свідчить про коректність умов тестування. Однак ключова метрика One Day Retention у групі з імплементованим алгоритмом адаптивного перезапуску значно покращилася, що підтверджує позитивний вплив цього рішення на користувацький досвід.

Висновки. Упровадження адаптивної системи значно покращує UX гравця, що підтверджено результатами експерименту. У результаті роботи було розроблено і протестовано алгоритм на базі рушія Unity, який дозволяє ефективно мінімізувати вплив технічних збоїв на користувацький досвід.

Даний підхід надає розробникам можливість збирати статистику, відстежувати помилки та уникати перевантаження користувача негативними сценаріями. Експеримент показав, що в разі збереження рівня технічних помилок основна метрика утримання користувачів (One Day Retention) значно покращується. Це дозволяє розробникам і компаніям отримувати більше часу на виправлення критичних помилок у продукті, тоді як більшість гравців будуть менш критично ставитися до проєкту, сприймаючи можливі збої у грі як проблеми зі своїм інтернет-з'єднанням або пристроєм.

Список використаних джерел

1. Udonis. Статистика мобільного геймінгу URL: <https://www.blog.udonis.co/mobile-marketing/mobile-games/mobile-gaming-statistics>
2. The Gamer. Cyberpunk 2077 Ultimate Edition для PS5 та Xbox: історія багів та помилок від CDPR URL: <https://www.thegamer.com/cyberpunk-2077-ultimate-edition-ps5-xbox-bugs-glitches-cdpr-history/>
3. Guber G., Rukel D. UX and Serious Games—A Research Agenda Games and Learning Alliance (GaLA 2023). Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol. 14475. Cham : Springer, 2023. С. 214–222. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49065-1_21
4. Weeraddana N.R., Habchi S., McIntosh S. Crash Report Prioritization for Large-Scale Scheduled Launches.



URL: https://rebels.cs.uwaterloo.ca/papers/icse2025seip_weeraddana.pdf

5. Kristiadi D. P. et al. The effect of UI, UX and GX on video games 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (CyberneticsCom). IEEE, 2017. C. 158–163. <https://doi.org/10.1109/CYBERNETICSCOM.2017.8311702>

6. Yin P. Research on design and optimization of Game UI framework based on Unity3D // 2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). – IEEE, 2019. – C. 221–223. <https://doi.org/10.1109/EEI48997.2019.00055>

7. Unity. Cloud Diagnostics URL: <https://unity.com/products/cloud-diagnostics>

8. Firebase. Документація Crashlytics. URL: <https://firebase.google.com/docs/crashlytics>

9. GitHub. Скрипт Economy.cs. URL: <https://github.com/MrlCrosI/Economy/blob/main/Economy.cs>

10. GitHub. Проект ScreenshotReload. URL: <https://github.com/MrlCrosI/ScreenshotReload>

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025 р.

A. Klieptsov¹, V. Guseva-Bozhatkina²

¹28Software

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ALGORITHM FOR IMPROVING USER INTERACTION IN MOBILE GAMES THROUGH ADAPTIVE GAME RESTART

Summary

Abstract. The growing number of games on the market raises user expectations. Ten to twenty years ago, players tolerated flaws, bugs, or instability. Today, such issues often lead to uninstalls and poor app store reviews, as alternatives are easy to find. Although many bugs are addressed during development through collaboration with QA specialists, it's impossible to catch them all. Especially in large projects, millions of different interaction combinations can lead to instability, malfunction of core mechanics, or even app crashes. Additional tools known as Crashlytics were developed and integrated directly into games to address such issues. These tools enable developers to monitor errors in the game's code in real time, encountered by real users. This allows developers to address recurring problems and fix them promptly. At the same time, crashlytics is not a magic pill for success. The user experience (UX) of encountering errors in a game is generally negative. Users are often asked to send a screenshot, to describe their actions when the error occurred, and so on. In practice, very few users engage in such activities. This article proposes an alternative approach to user interaction with in-game errors, developed for the Unity engine. The proposed solution includes an algorithm for saving the game state, simulating a loading process – also referred to as a “connection loss” – and seamlessly returning the player to the point where the logical error occurred. This way, most players will not even realize that something went wrong in the game and may attribute the interruption to a poor internet connection or the need to load additional game content.

Keywords: Firebase Crashlytics, Cloud Diagnostics, error, UX, screenshot, Unity.



DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-26>

UDC 004.4'2

D. Lubko, Ph.D.

ORCID: 0000-0002-2506-4145

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

e-mail: dmytro.lubko@tsatu.edu.ua

DESCRIPTION OF THE DATABASE DEVELOPMENT METHODOLOGY FOR CREATING A DIGITAL PORTAL FOR FARM HOLDINGS

Many farms face many problems when selling their products. Here are the main ones: low product prices; lack of access to markets; transportation costs and logistics; seasonality and storage of products; price instability; administrative and legal barriers; lack of knowledge of modern marketing tools; insufficient support from the state;

All these problems are interrelated and require a comprehensive approach to solving them, including through infrastructure development, new technologies, improved logistics, and government support.

Note: A farm is an enterprise that carries out agricultural activities based on the use of land and other natural resources for the production of agricultural products. It can be small, medium or large in size, and is usually focused on producing products for its own consumption and/or sale.

Keywords: database, digital portal, development methodology, farming, agriculture.

Statement of the problem. Database development for farms is extremely important for optimizing business processes, automating management tasks, and increasing operational efficiency.

Here are the most relevant areas for developing databases for the country's farms:

1. Production management and product accounting.

Creating a database to record all types of products grown by the farm (vegetables, fruits, grains, meat, etc.). This allows you to track the quantity, yield, and availability of products in the warehouse, and also helps in production planning.

2. Accounting for machinery and equipment.

Maintaining a database of machinery and equipment used on the farm (tractors, seeders, combines, etc.). This allows you to monitor maintenance, operating times, and ensures efficient use of resources.

3. Accounting for employees and their schedules.

A database that stores information about farm employees, their functional responsibilities, work schedules, salaries, and other data that allows for effective human resource management.

4. Yield analysis and forecasting.

Using a database to collect and analyze data on the yield of different crops under different seasons and conditions. This allows you to predict future harvests and plan production resources.

5. Monitoring of agricultural crops and soils.

Development of a database for tracking the condition of crops, diseases, pests, as well as monitoring soil parameters (moisture, acidity, nutrients). This helps to quickly respond to problems and optimize growing technologies.

6. Inventory of material resources.

A database for accounting for material resources (seeds, fertilizers, pesticides, plant protection products, etc.). This allows you to control stocks, expiration dates, and the need for purchases.

7. Control over finances and expenses.

A database for tracking financial transactions, costs for crops, land cultivation, material purchases, employee salaries, and other expenses. This allows for detailed accounting and analysis of the farm's financial results.

8. Control over suppliers and partners.

Creating a database to store information about suppliers (seeds, fertilizers, machinery), partners, and contacts with other farms. This facilitates procurement management and creates the basis for effective business relationships.

9. Sales and customer accounting.

Development of a system for keeping records of sales and customer data. This includes information about customers, their orders, purchase history, and delivery features, which allows you to improve customer interaction and personalize offers.

10. Data collection for reporting and analysis.

A database for automated collection of information for state and internal reporting. This includes information on production and financial indicators required for reporting to regulatory authorities or for internal performance analysis.

There are also additional features, namely:

1) Integration with geographic information systems (GIS). Using GIS for spatial analysis of land plots and monitoring of agricultural crops, which helps optimize land use.

2) Automation of warehouse management. Maintaining a database of warehouses, maintaining stocks, and movement of goods and materials. This allows you to minimize storage costs and control shipments.

3) The development of such databases helps farms improve the efficiency of their operations, reduce costs, automate routine processes, and make more informed decisions based on analytics.

That is why, based on the above, the relevance of this topic of work is determined, which in turn implies that to solve it, it is necessary to analyze and give a detailed description of the methodology for developing a database when creating a digital portal for farms.

Analysis of recent research. Recent research in the field of creating databases for farms highlights the importance of integrating information technology to improve the management and development of the agricultural sector.

The main areas include:

1. Institutional transformation and regulatory framework. The research analyzes the stages of development of farms in Ukraine, in particular through the prism of institutional changes and the influence of the regulatory environment. It examines aspects of legal support for farmers' activities, which are key to the formation of effective databases.

2. Analysis of the state and prospects for the development of farms. The research focuses on the current state of farms in Ukraine, identifying key problems and prospects for their development. The results can be used to form databases that reflect the real state of the agricultural sector.

3. Methodological approaches to researching farm development. Research methods are considered, which include statistical data analysis and other approaches that can be integrated into database systems to improve management decisions.

4. Planning of farm activities. The research focuses on production planning issues in the context of rural development. The proposed methodological frameworks can be implemented through appropriate databases to support planning processes.

Overall, recent studies highlight the need to implement integrated farm databases that take into account institutional, legal and economic aspects, contributing to the sustainable development of the agricultural sector. The creation of farm databases is an important topic in agricultural research, information technology and agronomy.

Here are some famous names of domestic and foreign scientists and researchers who have worked and are working on this topic:

Ukrainian scientists: Igor Kravets (Ukrainian scientist in the field of agronomy and information technologies, who studies the issues of automation and information support of agricultural enterprises); Serhiy Boyko (professor in the field of agricultural sciences, author of research on the informatization of agriculture, including the design and use of databases); Oleksandr Ganzha (specialist in the field of agronomy and digital technologies, who worked on the creation of intelligent systems to support agricultural business); Mykhailo Ivanenko (researcher engaged in the development of information systems for the agricultural sector of Ukraine, including databases for managing production processes on farms).

Foreign scientists: John A. Taylor (professor of agronomy and information technology, who worked on the development of information systems and databases for agriculture, to optimize the use of natural resources); Henry D. Smith – (scientist who deals with the use of information technology and automation in the agricultural sector, in particular the design of databases for farms); Benedict AL Lee (author of numerous studies in the field of information technology for agriculture, including the use of databases for monitoring and managing production processes on farms); David M. Reiley (scientist in economics and agronomy, who studies the use of databases to optimize agricultural production processes and the effective management of agricultural enterprises); Klaus JH Rech (specialist in the field of computer science, who developed systems for data management in agriculture and the creation of databases that contribute to the effective management of land and production resources).

These scientists and many others have made a significant contribution to the development of active implementation of databases for digital farm portals, which allows increasing the efficiency of agricultural production through the use of the latest technologies and management methods.

Also the following scientists are actively involved in the issues of scientific research in this area: Pasichnik V.V. [1], Reznichenko V.A. [1], Gaidarzhi V.I. [2], Izvariv I.V. [2], Chubuk V.V. [3], Balik N.R. [4], Shpenik T.B. [5], Zinovieva O.G. [6], Sharov S.V. [6], Redko I.V. [7], Lisenko O.M. [7], Lubko D.V. [8], Ben Forta [9], Sylvia Moestl Vasilik [10], Anthony Molinaro [11], John Viescas [12], Alan Beaulieu [13], Allen Taylor [14].

Formulation of the purpose of the article. The purpose of this article is to analyze, develop, and describe a database development methodology for creating a digital portal for farms.

The main part. Developing a database for a digital farm portal/website is important for organizing, storing, and effectively managing information on the portal/website. Let's develop a step-by-step methodology that will help you create a database for such a digital portal/website:

Stage 1. Requirements analysis and planning.

Defining the purpose of the database: Start by understanding what information you need to store and process. This could be data about products (vegetables, fruits), orders, customers, suppliers, employees, etc.

Data types: Determine what data you want to store. For example:

Products: Name, description, price, quantity, photos.

Customers: Name, phone, email, shipping address.

Order: Order date, quantity of goods, order status.

Employees: Name, role, work schedule.

Stage 2. Designing the database structure

Tables: Design tables to store different types of data. For example:

- Table products (for products).
- Table customers (for customers).
- Table orders (for orders).



- Table employees (for employees).
- Field in the table: For each table, define the fields.
For example, for a table products these could be:

- id (unique product identifier),
- Name (product name),
- description (description),
- price (price),
- quantity (quantity in stock),
- image (link to photo).

Relationships between tables: Determine how the tables will interact with each other:

For example, the table orders must have a field customer_id, which will refer to the table customers.

There can also be a relationship between the table orders and products to record which products are ordered.

Stage 3. Choosing a database management system

Choose a database management system to implement your database. If you don't have specific requirements, you can use:

- MySQL or PostgreSQL for large or medium-sized projects.
- SQLite for simple and small projects.

If your portal/site is developed on WordPress, you will use the default MySQL database.

Stage 4. Creating tables and defining relationships.

Creating tables: Use SQL queries to create tables. For example, to create a table products:

```
CREATE TABLE products (  
id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,  
name VARCHAR(255) NOT NULL,  
description TEXT,  
price DECIMAL(10, 2),  
quantity INT,  
image VARCHAR(255)).
```

Indexing: Create indexes on important fields for faster searching. For example, an index on fields name for products and email for customers.

```
CREATE INDEX id_x_name ON products (name);  
CREATE INDEX id_x_email ON customers (email).
```

Stage 5. Filling the database (recording data).

Insert test data into the table using SQL queries:

```
INSERT INTO products (name, description, price, quantity, image)  
VALUES ('Tomatoes', 'Fresh Organic Tomatoes', 20.5, 100, 'tomatoes.jpg').
```

Indicate which fields are required and which are not.

Stage 6. Development of mechanisms for interacting with the database.

Data Retrieval Queries: Write queries to retrieve data from the database. For example, to view all products:

```
SELECT * FROM products;
```

Insert, update, delete data queries: Provide functions to add new products, update existing ones, or delete.

```
UPDATE products SET price = 18.5 WHERE id = 1;  
DELETE FROM products WHERE id = 10.
```

Stage 7. Development of an API or interface for working with the database.

API: To connect the portal/site to the database, create an API that will handle requests from users.

This can be a simple REST API that interacts with the database through the server.

PHP/Node.js/JavaScript: Server-side languages can be used to process requests, for example:

In PHP, you can use PDO to work with the database.

In Node.js, you can use libraries like mysql or pg for PostgreSQL.

Stage 8. Database testing.

Query testing: Check that all SQL queries (add, edit, delete, and search queries) work correctly.

Check relationships: Make sure that relationships between tables are working correctly (for example, orders are linked to customers).

Stage 9. Database Optimization and Security

– Indexes: Make sure all queries used for searching have indexes on the appropriate fields.

– Backups: Set up regular automatic database backups to avoid losing important information.

– Security: Use parameterized queries to avoid SQL injections. This will protect your database from malicious attacks.

Stage 10. Database integration with the portal/site.

Connect your database to the portal/website. It must be able to interact with the database via server-side code (e.g. PHP, Node.js).

Ensure that users can easily place orders, browse products, and administrators can update information.

Stage 11. Monitoring and support

– Monitoring: Keep an eye on database performance. If you notice that performance is slowing down, you may need to optimize your queries or indexes.

– Update: Regularly update the database and add new functionality, taking into account changes in business needs.

These are the basic steps for developing a database for a farm portal/website. You need to carefully plan the structure and storage of the data so that the database is efficient and easily scalable.

Some examples of developed database tables for digital farm portals are shown in Figures 1–3.

№	Назва послуг	Опис послуг	Ціна послуги	Релагувати	Видалити
1	Заблева обробка та поглиблення орного шару на зрошуваних землях	Вибір прийомів заблевої обробки ґрунту при зрошенні обумовлений ступенем зволоження ґрунту, засміченістю поля, застосовуваними способами зрошення (поверхневий та ін), видами поливу (вологозарядковий, предпахотний та ін.)	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити
2	Передпосівна обробка ґрунту	Для забезпечення гарної якості посіву і проведення вегетаційних поливів ґрунт перед посівом повинен бути добре розпушеному, а в поверхні випрівняною. Це дозволяє краще зберегти воду від випаровування та отримати дружні сходи.	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити
3	Оранка ґрунту	Основний прийом механічної обробки ґрунту відвальними плугами. Відбувається одночасно обертання, кришіння і перемішування ґрунту. Обертанням досягається закладення дернини, добрив та насіння.	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити
4	Культивація ґрунту	Обробка ґрунту культиватором і фрезою. В процесі культивування обробляють, власне, вже оброблений раніше ґрунт. При культивуванні спускають на певну глибину ґрунт.	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити
5	Обробка ґрунту поверхнево	Поверхнєве поліпшення ґрунту і пасовищ передбачає систему заходів з підвищення їх продуктивності, поліпшення якості кормів при повному або частковому збереженні природної рослинності. Його проводять на незакустарених, незакопча-рених луках, пасовищах.	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити
6	Мікроякова обробка ґрунту	Первинна обробка в лісостеповій та степовій зонах включає обробку дернини дисковими знаряддями, оранку плугами з переплужниками на глибину гумусового шару, частіше всього на 20 - 22 см.	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити
7	Обробка осушених ґрунтів	Під ярові зернові культури, льон, однорічні трави глибина оранки не перевищує 20 - 22 см. При підсіву багаторічних трав глибину оранки під покривні культури збільшують до 23 - 25 см або заміняють оранку мизькою позитивним, особливо на	Договірна (техніка наша або ваша)	Релагувати	Видалити

Fig. 1. Example of the table “Goods in the store” with tabular data on the services provided by the farm for soil cultivation

№	Назва товару	Сорт	Кількість, кг	Ціна, грн	Редагувати	Видалити
1	Огірок	"Дар"	1 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
2	Огірок	Кустовий	1 г	0,90 грн	Редагувати	Видалити
3	Огірок	Вололей	1 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
4	Салат	Майська Королева	1 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
5	Салат	Ева	1 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
6	Томат	Атласний	0,3 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
7	Томат	Бичье сердце золотое	0,2 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
8	Томат	Баллада	0,2 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
9	Томат	Дружба	0,2 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
10	Свекла	Египос	2 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
11	Свекла	Красный шар	3 г	0,70 грн	Редагувати	Видалити
12	Свекла	Риваль	3 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
13	Кавун	Кароліна	1 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
14	Кавун	Сахарный малыш	1 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
15	Кавун	Чарльстоун Грей	1 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
16	Кавун	Красень	3 г	0,80 грн	Редагувати	Видалити
17	Капуста брокколі	Романеска	0,5 г	1,00 грн	Редагувати	Видалити

Fig. 2. Table “Goods in the store” with tabular data on new arrivals of crop seeds offered for sale by the farm

Назва послуги

опис послуги

ціна послуги

Назва товару

Сорт

Кількість, кг

Ціна, грн

Fig. 3. Table "Goods in the store" of the administrative menu of the digital portal in the editing mode of the seed sales service

Let's make some preliminary important conclusions and recommendations on the topic of the importance of creating databases for digital platforms (websites) of farms. Namely, these are:

1. Improving agricultural production management.

Creating databases for farms allows for the efficient storage and processing of information about production processes, including acreage, crop yields, soil conditions, and animal health. This helps optimize resources, reduce production costs, and increase farm efficiency.

Recommendation: Implementing monitoring and data management systems will help farmers make more informed decisions about their agricultural activities.

2. Optimization of the use of natural resources.

Thanks to databases, farmers can track the use of water, fertilizers, pesticides, and other resources, which contributes to a more rational and sustainable use of these resources. As a result, the negative impact on the environment is reduced.

Recommendation: It is recommended to integrate systems for monitoring and analyzing the use of natural resources into databases, which will help reduce their costs and improve the environmental situation.

3. Improving financial planning and reporting.

Databases allow farms to keep detailed financial records, analyze profits and expenses, and plan future budgets. This helps reduce financial risks and improve financial stability.

Recommendation: Farmers should consider using specialized programs for financial accounting and planning based on data stored in centralized databases.

4. Increasing competitiveness.

Agricultural enterprises that actively use databases for market analysis can better predict demand for their products and adapt sales strategies. Information about market conditions and prices helps reduce the risk of losses.

Recommendation: Farms should integrate modules for collecting and analyzing market data into databases, which will allow them to better adapt business strategies to market changes.

5. Increasing transparency and access to information.

Creating a single digital data repository helps improve interaction between farmers, suppliers, buyers, and government agencies. This contributes to increased transparency, which is especially important for accessing financial assistance, grants, and government subsidies.

Recommendation: It is worth considering the possibility of open databases for farmers, allowing for effective interaction with authorities, suppliers and other market participants.

6. Development of agricultural technologies and innovations.

Databases are becoming an important tool for integrating the latest agricultural technologies. They allow the use of automated systems for processing data on plant and animal health, soil conditions, which makes it possible to apply precision agriculture and reduce costs for protection products.

Recommendation: Farmers should actively implement databases to integrate modern agricultural technologies such as drones, sensor systems for monitoring and use of information for precision farming.

Conclusions. The creation and effective use of databases is an integral part of modern agribusiness. They help increase production efficiency, reduce costs, improve the environmental situation and contribute to the development of sustainable agriculture. The integration of digital solutions into farming allows farmers to be competitive, optimize their operations and reduce risks.

Bibliography

1. Пасічник В. В., Резніченко В. А. Організація баз даних та знань. Київ : Видавнича група ВНУ, 2020. 384 с.
2. Гайдаржи В. І., Ізварів І. В. Бази даних в інформаційних системах : підручник. Київ : Ун-т Україна, 2021. 418 с.
3. Чубук В. В., Чен Р. М., Павленко Л. А. та ін. Бази даних у питаннях і відповідях : навчальний посібник. Харків : Вид. ХНСУ, 2021. 288 с.
4. Балік Н. Р., Мандзюк В.І. MySQL: лабораторний практикум [Керівництво для студентів]. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2021. 88 с.
5. Шпеник Т. Б. Організація баз даних. Логічне проектування та робота з віддаленими базами даних : методичні вказівки і завдання до лабораторних робіт для студентів 2-го курсу інженерно-технічного факультету спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія». Ужгород : АУТДОРШАРК, 2021. 79 с.
6. Зінов'єва О. Г., Шаров С. В., Гешева Г. В. Проектування інформаційних систем. ТДАТУ. Запоріжжя, 2023. 150 с.
7. Редько І. В., Лисенко О. М. Композиційні засади проектування баз даних. 2019.
8. Лубко Д. В., Нестеренко Є. В. Проектування інформаційного сайту. *Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем : матеріали IV Всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції пам'яті В. В. Овчарова*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 122–123.
9. Ben Forta. SQL in 10 Minutes a Day, Sams Teach Yourself. Edition 5th. Publisher: Sams Publishing, 2020. 256 p.



10. Sylvia Moestl Vasilik. SQL Practice Problems: 57 beginning, intermediate, and advanced challenges for you to solve using a “learn-by-doing”. 2017. 125 p.
11. Anthony Molinaro. SQL Cookbook. First Edition. Publisher: O'Reilly, 2012. 595 p.
12. John Viescas. SQL Queries for Mere Mortals: A Hands-On Guide to Data Manipulation in SQL. Edition 4th. Publisher: Publisher, 2018. 960 p.
13. Alan Beaulieu. Learning SQL: Master SQL Fundamentals. 2nd Second Edition. Publisher: O'Reilly Media, 2012. 336 p.
14. Allen Taylor. SQL For Dummies. 9th edition. Publisher: Omega, 2018. 544 p.

The article was received by the editorial office of 22.03.2025.

Д. В. Лубко

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

ОПИС МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРОБКИ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ПОРТАЛУ ДЛЯ ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВ

Анотація

Багато фермерських господарств стикаються з багатьма проблемами під час реалізації своєї продукції. Ось основні з них: низька ціна на продукцію; відсутність доступу до ринків збуту; транспортні витрати та логістику; сезонність та зберігання продукції; нестабільність цін; адміністративні та правові бар'єри; незнання сучасних маркетингових інструментів; недостатня підтримка від держави. Усі ці проблеми взаємопов'язані й потребують комплексного підходу до вирішення, зокрема через розвиток інфраструктури, новітні технології, покращення логістики та державну підтримку.

Створення й ефективне використання баз даних є невід'ємною частиною сучасного аграрного бізнесу. Вони допомагають підвищити ефективність виробництва, зменшити витрати, поліпшити екологічну ситуацію та сприяти розвитку сталого сільського господарства. Інтеграція цифрових рішень у фермерське господарство дає змогу фермерам бути конкурентоспроможними, оптимізувати свої операції та зменшити ризики.

Ключові слова: база даних, цифровий портал, методологія розробки, фермерське господарство, сільське господарство.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-27>

УДК 378.091.33:004.421:004.421.2

Ю. О. Сіциліцин^{1,2}, Ph. D.

ORCID: 0000-0002-3888-5575

М. В. Шлофаст¹, здобувач¹ Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного² Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького

e-mail: yurii.sitsilitsin@tsatu.edu.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ВЕЛИКИХ ТАБЛИЧНИХ ДАНИХ: EXCEL/VBA ПРОТИ PYTHON

Анотація. У статті проведено порівняльний аналіз ефективності оброблення великих табличних даних із застосуванням Excel/VBA та Python. Дослідження базується на експериментальному моделюванні умов оброблення 500 000 запитів, що імітують реальні сценарії роботи інформаційних систем. Розглянуто ключові параметри: час виконання, продуктивність, споживання пам'яті, масштабованість та легкість підтримки коду. Експериментальні результати демонструють, що рішення на Python дозволяє обробляти дані за 13.55 секунд із споживанням 120–150 МБ оперативної пам'яті, тоді як Excel/VBA потребує 188 секунд і використовує 250–300 МБ. Отримані дані свідчать про значні переваги сучасних технологій, що сприяють оптимізації систем оброблення інформації та підвищенню ефективності робочих процесів у реальному часі. Результати дослідження можуть бути використані для розроблення інноваційних інформаційних платформ, які відповідають високим вимогам продуктивності та масштабованості, забезпечуючи стабільну роботу аналітичних центрів і підприємств у сучасному конкурентному середовищі.

Ключові слова: Excel, VBA, Python, оброблення даних, продуктивність, пам'ять, maintainability.

Постановка проблеми. Сучасні інформаційні системи працюють із щораз вищими обсягами табличних даних, що охоплюють численні сфери: від фінансової звітності та клієнтської бази до наукових досліджень і статистичних аналізів. При цьому традиційні засоби, зокрема Excel із вбудованою мовою VBA, незважаючи на їх популярність і зручність для невеликих обсягів даних, стикаються з критичними обмеженнями під час роботи з мільйонними наборами записів. Основні проблеми включають повільну швидкість виконання обчислень, високий рівень споживання оперативної пам'яті та складність підтримки коду, що суттєво обмежує їх застосування в сучасних масштабованих системах.

З іншого боку, Python набув значної популярності завдяки своїй гнучкості та широкій екосистемі бібліотек (pandas, numpy), що забезпечують високу продуктивність під час оброблення великих даних. Ці засоби дозволяють не лише зменшити час обчислень, але й підвищити зручність адаптації та підтримки програмних рішень завдяки модульній архітектурі та зрозумілому синтаксису.

Проте існує недостатньо комплексних досліджень, які систематично порівнюють традиційний підхід Excel/VBA та сучасний підхід на базі Python за ключовими критеріями: час виконання скриптів, споживання пам'яті та легкість підтримки коду. Аналіз останніх публікацій показує, що більшість досліджень зосереджені на окремих аспектах оптимізації або розробленні специфічних алгоритмів для однієї з технологій, але комплексне порівняння залишається невирішеним питанням.

Таким чином, актуальність дослідження полягає у визначенні переваг та обмежень кожного з підходів у контексті оброблення великих табличних даних, що дозволить сформулювати прак-

тичні рекомендації для розробників інформаційних систем. Визначення оптимального рішення має стратегічне значення для підвищення продуктивності, економії ресурсів та спрощення підтримки програмних продуктів у сучасних умовах високих обчислювальних навантажень.

Аналіз останніх досліджень. Оброблення великих табличних даних є актуальною проблемою, що привертає увагу як дослідників, так і практиків у галузі інформаційних технологій. У літературі дослідження зосереджені на аналізі продуктивності різних технологій, серед яких традиційний Excel/VBA та сучасні платформи, зокрема Python з його бібліотеками (pandas, numpy). Excel разом із VBA протягом десятиліть залишається основним інструментом для аналізу та візуалізації даних у бізнес-середовищі. Автори підручника з аналізу даних [1] демонструють, що під час оброблення невеликих та середніх наборів даних Excel забезпечує зручний інтерфейс та простоту використання завдяки інтегрованим можливостям. Однак низка робіт підкреслює, що в разі збільшення обсягів даних виникають значні обмеження. Наприклад, низька швидкість виконання циклічних обчислень та обмежені можливості оптимізації алгоритмів у VBA обмежують застосування цієї технології у випадках, коли оброблення даних перевищує сотні тисяч записів. Крім того, розширення функціональності VBA часто призводить до зростання складності коду, що ускладнює його підтримку та модифікацію. У другій половині останнього десятиліття Python став популярною альтернативою завдяки відкритості коду, активній спільноті та розвиненій екосистемі бібліотек для аналізу даних. Дослідження [2] Lee et al. відзначають, що використання бібліотек pandas та numpy дозволяє значно скоротити час оброблення даних завдяки векторизованим операціям та оптимізованим алгоритмам. Багато сучасних робіт підтверджують, що Python демонструє кращі показники в обробленні великих обсягів даних, забезпечуючи більш ефективне управління пам'яттю та масштабованість обчислень. Наприклад, порівняльні експерименти, проведені у [3] Zumstein, свідчать про те, що Python здатен обробляти дані, що перевищують обсяги, з якими ефективно працює Excel/VBA, без суттєвого зниження продуктивності. Існує низка публікацій, присвячених порівнянню продуктивності різних підходів до оброблення даних. Зокрема, дослідження орієнтовані на вимірювання часу виконання скриптів та споживання пам'яті під час роботи з великими наборами даних. Такі методики включають профілювання з використанням спеціалізованих інструментів, як-от memory_profiler для Python, що дозволяють точно оцінити ресурси, які споживаються у виконанні алгоритмів. У деяких працях підкреслюється, що модульна архітектура Python-коду сприяє легшій підтримці та адаптації програмних рішень, що є важливим аспектом для довгострокового впровадження в комерційних системах. Незважаючи на переваги Python, окремі дослідження вказують на необхідність урахування специфіки завдань. Наприклад, для невеликих обчислювальних задач Excel/VBA може бути більш доцільним через простоту використання та відсутність потреби в додаткових знаннях програмування [4]. Проте зростання обсягів даних та щораз вищі вимоги до швидкодії роблять Python більш привабливим варіантом для сучасних інформаційних систем. Отже, аналіз досліджень свідчить про те, що вибір технології має базуватися на конкретних завданнях і обсягах даних, а також урахувати перспективи подальшого масштабування та інтеграції з іншими системами. Загалом, огляд літератури показує, що, хоча Excel/VBA залишається популярним інструментом для рутинних обчислень і аналізу даних, його обмеження стають очевидними під час роботи з великими наборами даних. Python завдяки своїй масштабованості та потужним бібліотекам демонструє значні переваги в ефективності оброблення, що підтверджується як експериментальними дослідженнями, так і теоретичними розрахунками. Подальші дослідження спрямовані на оптимізацію алгоритмів, розроблення гібридних рішень та інтеграцію сучасних технологій у традиційні інформаційні системи.

Формулювання мети статті. Метою статті є проведення порівняльного аналізу ефективності оброблення великих табличних даних за допомогою Excel/VBA та Python.

Основна частина. Розглянемо більш детально параметри тестових даних, інструменти профілювання продуктивності та споживання пам'яті, а також критерії оцінювання. Для експериментів будемо генерувати набори даних від 500 000 до 1 000 000 записів, що відповідає реальним умовам оброблення великих таблиць. Дані мають містити поля «Дисципліна», «ППБ», «Група» та «Семестр». Дані створимо із застосуванням фіксованих списків дисциплін, імен, прізвищ та груп, що забезпечує однорідний та рівномірний розподіл значень, а використання генератора випадкових чисел дозволяє імітувати повторюваність типових реальних сценаріїв. Для досягнення реплікації результатів важливо фіксувати насіння генератора, що забезпечує можливість відтворення експериментів. Таким чином, структура даних спрямована на тестування алгоритмів агрегації та сортування в умовах рівномірного розподілу, що відповідає вимогам сучасних інформаційних систем. Для Python застосуємо різні інструменти профілювання продуктивності та споживання пам'яті. Наприклад, для вимірювання часу виконання окремих блоків коду використовуватимемо бібліотеку `timeit`, що дозволяє з високою точністю оцінити швидкодію, а вбудований профайлер `cProfile` допоможе визначити, які частини коду споживають найбільше ресурсів. Детальний моніторинг використання пам'яті здійснюватиметься за допомогою `memory_profiler`, який дозволяє відстежувати споживання пам'яті на рівні рядка, а бібліотека `psutil` надасть інформацію про системні ресурси, зокрема CPU та оперативну пам'ять, у режимі реального часу. Для Excel/VBA застосуємо вбудовану функцію `Timer` для вимірювання часу виконання макросів, а також скористаємося зовнішніми засобами, як-от `Windows Performance Monitor`, для відстеження використання системних ресурсів. Крім того, логування часу виконання через запис даних у текстовий файл дозволить більш детально аналізувати продуктивність і споживання пам'яті. Критерії оцінювання розглядаються як комплексна характеристика ефективності алгоритмів оброблення даних. Загальний час оброблення є критичним показником, оскільки навіть незначні зменшення можуть суттєво підвищити продуктивність систем у роботі з великими наборами записів [1]. Аналіз споживання пам'яті дозволяє оцінити оптимізацію використання ресурсів, що має вирішальне значення в масштабуванні обчислень, як зазначено в роботах [2] та [3]. Легкість підтримки коду та його структурна модульність є важливими для забезпечення довгострокової адаптивності та можливості розширення функціональності, що також підтверджується сучасними публікаціями [5]. Окрім цього, масштабованість алгоритмів і здатність до відтворення експериментальних результатів забезпечують стабільність системи в різних умовах навантаження. Таким чином, вибір даних критеріїв обґрунтовано їх впливом на загальну ефективність і стійкість інформаційних систем, що знаходять підтвердження у відповідних наукових дослідженнях. У результаті аналізу було виділено такі критерії:

1. Час виконання
2. Споживання пам'яті
3. Продуктивність алгоритмів
4. Легкість підтримки коду
5. Масштабованість
6. Відтворюваність результатів

Створимо математичну модель, яка буде описувати оптимізацію оброблення даних для обох підходів.

Для Excel/VBA можна розглядати модель часу оброблення даних у вигляді:

$$T_{VBA} = T_{read} + n \cdot T_{loop} + T_{write}, \quad (1)$$

де T_{read} – час на читання даних, n – кількість записів, T_{loop} – середній час оброблення одного запису (циклічна оброблення), а T_{write} – час на запис результатів.

У Python із застосуванням бібліотеки pandas оптимізацію можна описати такою моделлю:

$$T_{Python} = T_{read} + T_{vectorized} \cdot (n) + T_{write}, \quad (2)$$

де $T_{vectorized}(n)$ – приблизно дорівнює $C \cdot n$ з дуже малою константою C завдяки векторизованим операціям, що виконуються на рівні C-коду.

Для оцінювання переваг використання одного підходу над іншим вводять коефіцієнт прискорення:

$$S = \frac{T_{VBA}}{T_{Python}}, \quad (3)$$

що дозволяє кількісно оцінити зниження часу оброблення.

Щодо споживання пам'яті, можна використовувати модель:

$$M = n \cdot m_{record} + M_{overhead}, \quad (4)$$

де m_{record} – пам'ять, яку займає один запис, а $M_{overhead}$ – системні витрати пам'яті. Завдяки оптимізованим структурам даних у pandas значення m_{record} може бути значно меншим, що сприяє ефективнішому використанню оперативної пам'яті.

Ці моделі дозволяють кількісно обґрунтувати оптимізацію оброблення даних для обох підходів та підтверджують результати, наведені в наукових дослідженнях [1; 2; 3].

Для формування тестових даних було розроблено спеціальний скрипт, що згенерував файл у форматі.xlsx із 500 000 записів (рис. 1). У створеній таблиці містяться чотири основні колонки: «Назва дисципліни», «ПІБ», «Група» та «Семестр». Така структура дозволяє імітувати умови реальної освітньої бази, де кожен рядок відповідає поєднанню певної дисципліни, конкретного студента, належності до групи та семестру.

	A	B	C	D	E	F
1	Назва дисципліни	ПІБ	Група	Семестр		
2	Англійська	Мельник Іван	Група А	2		
3	Фізика	Бондаренко Дмитро	Група В	1		
4	Історія	Мельник Олег	Група Е	1		
5	Хімія	Шевченко Андрій	Група В	2		
6	Англійська	Мельник Олег	Група Е	2		
7	Історія	Мельник Петро	Група Д	1		
8	Історія	Мельник Дмитро	Група С	1		
9	Фізика	Марченко Іван	Група Е	2		
10	Математика	Бондаренко Іван	Група С	1		
11	Англійська	Шевченко Іван	Група А	2		
12	Фізика	Шевченко Дмитро	Група А	2		
13	Англійська	Ткаченко Олег	Група Е	1		
14	Біологія	Ткаченко Петро	Група Е	1		
15	Математика	Шевченко Дмитро	Група С	1		
16	Хімія	Мельник Тарас	Група В	1		
17	Біологія	Бондаренко Андрій	Група А	1		
18	Історія	Бондаренко Дмитро	Група А	1		
19	Історія	Марченко Олег	Група Е	2		
20	Хімія	Бондаренко Іван	Група А	2		
21	Математика	Ткаченко Тарас	Група А	1		
22	Фізика	Шевченко Дмитро	Група А	2		
23	Математика	Бондаренко Дмитро	Група Е	2		
24	Математика	Мельник Дмитро	Група Е	2		

Рис. 1. Згенеровані тестові дані

Для заповнення полів використовувалися випадкові комбінації імен і прізвищ із заздалегідь заданого списку, а також розподіл за групами та семестрами, що забезпечує достатній рівень



варіативності. Генерація такого обсягу даних (пів мільйона записів) дає змогу виявити особливості та недоліки різних підходів до оброблення інформації, адже значні масиви даних дають більш наочний ефект під час порівняння швидкодії та використання ресурсів.

Файл із 500 000 записів є досить великим для того, щоб підкреслити відмінності між алгоритмами та підходами, а також виявити потенційні «вузькі місця» в процесі зчитування, групування чи сортування даних. Завдяки цьому можна отримати об'єктивні результати про продуктивність різних систем і методів оброблення табличної інформації, а також перевірити, як вони поведуться в реалістичних сценаріях.

Далі представлено результати експериментального оцінювання ефективності оброблення великих табличних даних за допомогою двох підходів: Python та VBA. Метою експерименту було порівняти час виконання, продуктивність, споживання оперативної пам'яті, легкість підтримки коду та масштабованість вибраних технологій на основі оброблення 500 000 запитів.

Для дослідження було розроблено два окремих рішення. Одне з них реалізоване мовою Python із використанням бібліотек pandas та openpyxl, що дозволяють швидко зчитувати, обробляти та зберігати великі обсяги даних у форматі XLSX. Інше рішення – реалізація на VBA для Microsoft Excel – використовує стандартні засоби VBA, як-от об'єкти Dictionary та цикли для групування, сортування та запису даних. Вхідний набір даних містить 500 000 записів та описаний вище.

Для проведення експерименту було використано комп'ютер із такими характеристиками:

- Процесор: Intel Core i7 (8 ядер, 12 потоків);
- Оперативна пам'ять: 40 ГБ DDR4;
- Операційна система: Windows 11 Pro;
- Версія Python: 3.9 з бібліотеками pandas та openpyxl;
- Версія Excel: Microsoft Excel 365 з підтримкою VBA.

Обидва рішення запускалися на одному й тому самому комп'ютері, що дозволяло порівняти їх продуктивність в однакових умовах. Для вимірювання часу виконання у Python використовувалися модулі time та timeit, а у VBA – вбудована функція Timer. Крім того, для оцінювання споживання оперативної пам'яті використовувалися зовнішні інструменти, зокрема Windows Task Manager та Resource Monitor, що дозволило зафіксувати пікові значення використання пам'яті процесами Python та Excel.

Результати вимірювання часу виконання та інших показників представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експерименту

Показник	Python	VBA	Примітки
Час виконання	13,55 с	188 с	Загальний час оброблення 500 000 запитів
Продуктивність (запитів/с)	≈ 36 900 запитів/с	≈ 2 659 запитів/с	Розраховано як 500 000 / час виконання
Споживання пам'яті	120–150 МБ	250–300 МБ	Оцінка за типові навантаження
Легкість підтримки коду	9/10	5/10	Сучасні стандарти розроблення та читабельність коду
Масштабованість	Висока	Низька	Підходить для роботи з великими наборами даних

Як видно з таблиці, рішення на Python забезпечує значно кращі показники продуктивності, що дозволяє обробляти до 36 900 запитів за секунду порівняно з VBA, яке здатне обробити лише 2659 запитів за секунду. Крім того, Python використовує менше оперативної пам'яті, що є критичним у масштабуванні системи для роботи з ще більшими наборами даних. Щодо

підтримки коду Python також набуває перевагу завдяки сучасним стандартам програмування, високій читабельності коду та широкій екосистемі бібліотек, що дозволяє швидко адаптувати рішення до змінних умов.

Зважаючи на проведені вимірювання, зробимо висновки. Рішення на Python виконало оброблення 500 000 запитів за 13.55 секунд, тоді як VBA потребувало 188 секунд. Така різниця в часі оброблення свідчить про значну перевагу використання векторизованих операцій та оптимізованих бібліотек у Python. Більш висока швидкість обчислень дозволяє використовувати Python у системах, де критичним є час реакції. Показник запитів за секунду для Python становить близько 36 900, що значно перевищує VBA. Цей критерій має особливе значення під час оброблення даних у режимі реального часу або виконання складних аналітичних задач, де навіть невеликі затримки можуть впливати на загальну продуктивність системи. Експеримент показав, що Python споживає менше оперативної пам'яті (120–150 МБ) порівняно з VBA (250–300 МБ). Ефективне управління пам'яттю є важливим фактором за оброблення великих обсягів даних, оскільки зниження витрат пам'яті сприяє кращій масштабованості та зменшує ризик зупинки процесів через перевантаження ресурсів. З точки зору розроблення та подальшої підтримки рішення на Python отримало оцінку 9 із 10, що свідчить про його зручність для розробників, легкість модифікації та розширення функціональності. У порівнянні, код на VBA має складнішу структуру та меншу гнучкість, що відображається в оцінці 5 із 10. Python продемонстрував високу масштабованість, що дозволяє ефективно працювати з наборами даних, що перевищують 500 000 записів. Це особливо важливо для сучасних інформаційних систем, де обсяги даних постійно зростають, а вимоги до продуктивності стають дедалі суворішими.

Результати експерименту однозначно вказують на те, що використання Python є більш ефективним підходом для оброблення великих табличних даних у порівнянні з традиційним рішенням на VBA. Основна перевага Python пов'язана із застосуванням високопродуктивних бібліотек, які використовують векторизовані операції, що значно знижують час виконання алгоритмів. Крім того, сучасна екосистема Python забезпечує оптимальне управління пам'яттю та можливість легкого розширення функціональності за рахунок додаткових модулів.

З іншого боку, рішення на VBA демонструє суттєві обмеження, зокрема повільний час виконання та високе споживання ресурсів, що робить його менш придатним для сценаріїв із високими навантаженнями. Хоча VBA може бути зручним для розроблення невеликих та середніх рішень, його використання в умовах оброблення мільйонних наборів даних є неефективним.

Важливим аспектом експерименту є також оцінювання легкості підтримки коду. Сучасні програмні засоби, зокрема Python, дозволяють розробляти модульний, легко масштабований та підтримуваний код, що є ключовою вимогою під час розроблення інформаційних систем, які повинні швидко адаптуватися до змін ринку і технологій. Результати експерименту підтверджують, що інвестиції в розроблення рішень на Python окупуваються через значне підвищення продуктивності та зниження витрат ресурсів.

Висновки. Проведений експеримент з оброблення 500 000 запитів показав, що Python є значно ефективнішим засобом оброблення великих обсягів даних порівняно з VBA. Зокрема, час виконання для Python становив 13.55 секунд проти 188 секунд для VBA, що дає приріст продуктивності приблизно у 14 разів. Крім того, ефективне управління пам'яттю в Python дозволило знизити споживання оперативної пам'яті до 120–150 МБ, тоді як VBA спожив близько 250–300 МБ. Ці результати свідчать про можливість використання Python для масштабованих систем, де критично важлива швидкість оброблення та оптимізація ресурсів.

У таблиці 1 наведено основні показники, що дозволяють порівняти продуктивність обох підходів. Розглянуті результати експерименту підтверджують, що для завдань з оброблення



великих табличних даних доцільніше використовувати рішення на базі Python, оскільки воно забезпечує значно вищу швидкість, менше споживання пам'яті та кращу підтримку коду.

Таким чином, результати експерименту відкривають нові можливості для оптимізації процесів оброблення даних у сучасних інформаційних системах. Подальші дослідження можуть зосередитися на розробленні гібридних рішень, які поєднують зручність традиційних засобів Excel/VBA з високою продуктивністю Python, що дозволить розширити спектр застосувань та підвищити ефективність роботи систем в умовах усе вищих обсягів даних.

Список використаних джерел

1. Khadka B. Data analysis theory and practice. Case: Python and Excel Tools. Kokkola : Centria university of applied sciences, 2019. 97 p.
2. Lee J., Chang J., Kao L., Lee C. Essentials of Excel VBA, Python, and R. Bern: Springer, 2023. 696 p.
3. Zumstein F. Python for Excel. A modern environment for automation and data analysis. Sebastopol: O'Reilly Media, 2021. 275 p.
4. Mergel D. Physics with Excel and Python. Bern: Springer, 2023. 482 p.
5. Kelvin K., Wahab W., Wulandari M. Computer Resource Utilization Analysis for Microsoft Excel and Python in Data Processing. *Engineering, Mathematics and Computer Science*, 2024. Vol. 6 No. 2. DOI: <https://doi.org/10.21512/emacsjournal.v6i2.11736>

Стаття надійшла до редакції 18.03.2024 р.

Y. Sitsylitsyn^{1,2}, M. Shelofast¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF PROCESSING LARGE TABULAR DATA: EXCEL/VBA VS PYTHON

Summary

The article presents a comparative analysis of the efficiency of processing large tabular data using Excel/VBA and Python. The study is based on an experimental simulation of processing 500,000 queries that mimic real-world information system scenarios. Key parameters examined include execution time, performance, memory consumption, scalability, and code maintainability. The experimental results demonstrate that the Python solution can process data in 13.55 seconds with a memory consumption of 120–150 MB, whereas Excel/VBA requires 188 seconds and uses 250–300 MB. The data obtained indicate significant advantages of modern technologies that contribute to the optimization of information processing systems and enhance the efficiency of operational processes in real time. The findings of this study can be used for the development of innovative information platforms that meet high performance and scalability requirements, ensuring the stable operation of analytical centers and enterprises in today's competitive environment.

Keywords: Excel, VBA, Python, data processing, performance, memory, maintainability.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-28>

УДК 519.876:004.94:004.056

О. В. Складенко¹, к.ф.-м.н., доц.Г. М. Терещук², асистентО. Ю. Ніколаєвський¹, к.т.н., доц.О. А. Складенко¹, аспірант

ORCID: 0000-0001-6555-1223

ORCID: 0000-0001-7573-9748

ORCID: 0000-0002-0786-5432

ORCID: 0009-0003-4908-0187

¹ Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

e-mail: olena.skliarenko@e-u.edu.ua

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

e-mail: ganna.tereschuk@gmail.com

АНАЛІТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ СЕРВІСНОГО ЦЕНТРУ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ КОМП'ЮТЕРІВ

Анотація. У статті досліджується вплив аналітичного та імітаційного моделювання на ефективність функціонування сервісних центрів технічної підтримки комп'ютерної техніки в умовах зростання попиту на ІТ-послуги та ускладнення структури систем масового обслуговування (СМО). Розглядається актуальність застосування математичних методів для оптимізації структури автоматизованих сервісних систем, зокрема з метою скорочення часу очікування, підвищення ймовірності миттєвого обслуговування заявки та зменшення кількості відмов.

У дослідженні запропоновано поєднання аналітичного підходу з імітаційним моделюванням, що дозволяє комплексно аналізувати функціонування СМО на основі моделей типу M|M|1 та стохастичних мереж Петрі. Виявлено, що таке поєднання забезпечує високу точність прогнозування навантаження, дозволяє виявити вузькі місця системи, сформувати оптимальну структуру обслуговування та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Продемонстровано використання моделювання для визначення критичних параметрів і оцінювання ефективності роботи системи.

Ключові слова: системи масового обслуговування, аналітичне моделювання, імітаційне моделювання, стохастичні мережі Петрі.

Постановка проблеми. У сучасних умовах високої конкуренції та стрімкого розвитку ІТ-технологій сервісні центри технічної підтримки комп'ютерної техніки відіграють важливу роль у забезпеченні стабільної роботи інформаційної інфраструктури. Для ефективного функціонування таких центрів важливо враховувати вплив черг, часових затримок та раціонального використання ресурсів. З цієї метою доцільним є використання методів аналітичного та імітаційного моделювання.

Виникає задача зробити систему масового обслуговування ефективною. В організації роботи тієї або іншої системи масового обслуговування варто прагнути скорочення середнього числа заявок, що знаходяться в черзі, скорочення часу очікування обслуговування. Хотілося б зробити максимальною ймовірність того, що заявка, яка надійшла до системи, буде негайно прийнята до обслуговування, а середній відсоток заявок, яким відмовлено, хотілося б звести до мінімуму. Для цього треба збільшувати продуктивність системи (зменшувати час обслуговування заявки), раціоналізувати режим роботи системи, збільшувати число каналів обслуговування [2; 4].

Будь-яка куплена система вимагає адаптації, а отже, й модернізації. Усі ці особливості зумовлюють необхідність застосування математичних методів для аналізу, моделювання та оцінювання характеристик елементів автоматизованої системи сервісного центру (АССЦ). Виникає задача оптимізації структури системи з метою підвищення її надійності, швидкодії та ефективного використання.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових праць та публікацій свідчить про актуальність використання аналітичного та імітаційного моделювання для оптимізації функціонування систем масового обслуговування (СМО), зокрема у сфері сервісної підтримки комп'ютерних систем. Застосування сучасних математичних моделей, алгоритмів моделювання та симуляційних підходів дозволяє достовірно прогнозувати навантаження на систему, визначати її критичні параметри, а також виявляти можливості для підвищення ефективності обслуговування [1; 3; 5–10; 11].

У наукових працях українських дослідників окрема увага приділяється мультиагентному імітаційному моделюванню як інструменту побудови гнучких моделей реальних СМО [1]. Це дозволяє враховувати поведінку клієнтів, операторів та змінні умови середовища. Такі моделі ефективно використовуються для аналізу організації роботи сервісних центрів, а також для прийняття управлінських рішень на основі результатів моделювання.

Аналітичні підходи до дослідження СМО, зокрема моделі типу GI/M/1 з урахуванням післядії, розглядаються як важливий метод формалізації стохастичних процесів у системах з нерегулярним надходженням заявок [2; 5; 12]. Це сприяє більш точному аналізу показників продуктивності системи та стабільності її функціонування.

Інша частина досліджень зосереджується на побудові імітаційних моделей СМО з очікуванням та без нього, що є важливим для вивчення поведінки клієнтів у чергах, оптимізації кількості обслуговувальних каналів та часу обслуговування [6]. Зокрема, автори також акцентують увагу на змінності інтенсивності інформаційних потоків у СМО та досліджують вплив різких навантажень на продуктивність системи [3].

У роботі [7] розглянуто застосування time-aware шейпера, що адаптується до конкретного користувача. Цей підхід є перспективним для застосування в сервісних системах із високим рівнем навантаження, де необхідно забезпечити QoS (якість обслуговування) залежно від ідентифікатора запиту.

Автори [8] представили інтелектуальну систему моніторингу з використанням алгоритмів класифікації зображень, що може бути адаптовано до оброблення графічних даних у сервісних центрах. Схожим чином у [9] розроблено систему автоматизованого моніторингу викидів вуглецю на базі ШІ-алгоритмів, яка демонструє ефективність оброблення великих потоків інформації в реальному часі.

У роботі [10] автори застосовують алгоритм Isolation Forest для аналізу споживання енергії, що дозволяє виявляти аномалії в даних. Такий підхід можна ефективно адаптувати для виявлення відхилень у системах технічної підтримки, наприклад, для діагностики збоїв чи незвичних шаблонів запитів.

Таким чином, як вітчизняні, так і зарубіжні публікації підтверджують доцільність використання аналітичного та імітаційного моделювання як ефективного інструменту для підвищення якості функціонування СМО. Це дозволяє не лише оптимізувати технічні ресурси, а й забезпечити високу якість обслуговування, мінімізувати час очікування та покращити загальну ефективність сервісної системи.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження впливу аналітичного та імітаційного моделювання на оптимізацію роботи сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів, а також побудова ефективної структури автоматизованої системи

масового обслуговування. Дослідження спрямовано на формалізацію трифазного оброблення заявок, аналіз часових характеристик обслуговування та визначення ключових параметрів, що впливають на якість і швидкість надання технічної допомоги. Особливу увагу приділено оцінюванню ефективності використання моделювання для прийняття управлінських рішень у сфері технічного сервісу в умовах зростання попиту на ІТ-послуги.

Основна частина. Використовуючи імітаційне та аналітичне моделювання для побудови моделі сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів, можна створити різні моделі обслуговування й оцінити їх з погляду вартості й ефективності. Це дозволяє не лише формалізувати процес обслуговування заявок на кожному етапі, а й гнучко враховувати зміни в інтенсивності потоку звернень, доступних ресурсах і умовах функціонування системи. Поєднання підходів дає змогу отримати як точні розрахункові оцінки, так і практичні висновки на основі експериментального моделювання.

У даній роботі запропоновано нові алгоритми розрахунку характеристик систем масового обслуговування на основі мереж Петрі, а також новий підхід до аналізу роботи системи масового обслуговування з поєднанням двох методів дослідження: імітаційного і аналітичного моделювання.

Постановка задачі 1.

Побудувати аналітичну модель сервісного центру технічної підтримки комп'ютерів.

Для розв'язання поставленої задачі доцільно використовувати методи теорії масового обслуговування, теорії випадкових процесів, математичної статистики.

Імітаційна модель дозволяє дослідити поведінку системи за змінних параметрів потоку заявок, часу обслуговування і кількості обслуговувального персоналу. Структуру АССЦ зображено на рис. 1. Вона включає вхідний потік, трифазну чергу та блоки обслуговування для кожної фази.

Вхідним потоком у системі є потік звернень клієнтів, які подають заявки на обслуговування чи ремонт комп'ютерної техніки. Заявки послідовно проходять три етапи оброблення в сервісному центрі:

- 1) первинний прийом і реєстрація заявки адміністратором;
- 2) передача обладнання або інформації до технічного спеціаліста для діагностики;
- 3) ремонт або програмне налаштування техніки відповідно до виявлених проблем.

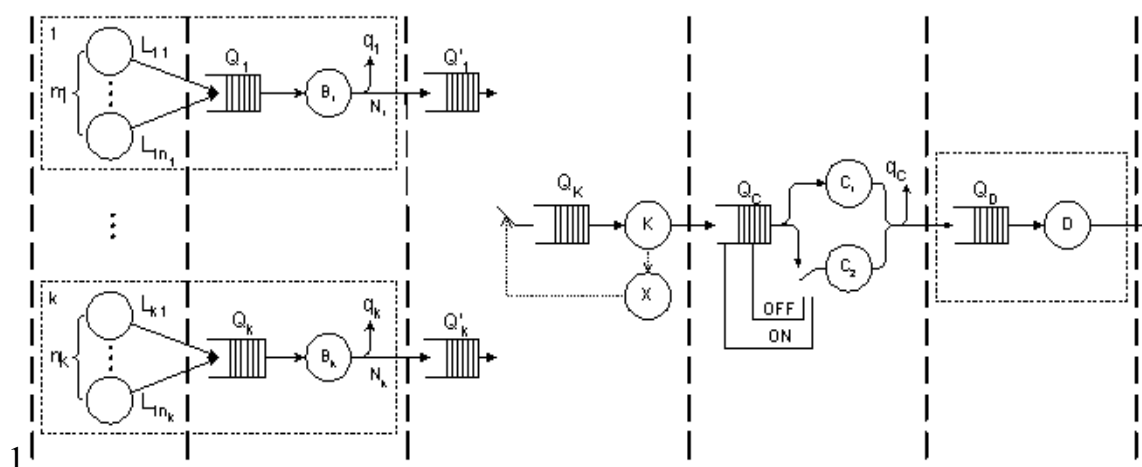


Рис. 1. Структура автоматизованої системи сервісного центру.

Джерело: розроблено авторами

Заявки вводяться на робочих місцях адміністраторів, які здійснюють первинне оцінювання звернень, перевіряють комплектність техніки, правильність заповнення інформації та наявність супровідних документів. У разі виявлення помилок або некоректного оформлення частина заявок відсівається (тобто відбувається проріджування вхідного потоку). Заявки, що пройшли перевірку, передаються у відділ діагностики, де розпочинається другий етап.

На другому етапі технічні спеціалісти здійснюють апаратну та/або програмну діагностику обладнання. Якщо виявлено несправності, що не підлягають ремонту (наприклад, критичні пошкодження або несумісність), заявки також можуть бути відхилені – вторинне проріджування потоку.

Заявки, які пройшли діагностику, переходять до третьої фази обслуговування – ремонту або налаштування. Після завершення робіт техніка повертається адміністратору, а клієнту надсилається сповіщення про готовність до видачі. Таким чином, завершується цикл трифазного оброблення заявки в сервісному центрі.

Першу фазу обслуговування становлять k рівнобіжних систем типу $M|M|1$ (M – марковський процес), на вхід кожної з яких надходить потік L_j ($j=1, \dots, k$), що є суперпозицією n_j ($j=1, \dots, k$) незалежних потоків L_{jr} , ($j=1, \dots, k$). Потік L_{jr} ($j=1, \dots, k$, $r=1, \dots, n_j$) надходить з r -го джерела заявок j -го каналу, незалежного від інших джерел. Заявки стають у чергу Q_j ($j=1, \dots, k$), з якої вибираються приладом B_j ($j=1, \dots, k$) (рис. 1). Час обслуговування на приладі B_j ($j=1, \dots, k$) розподілено експоненціально в загальному випадку з параметром m_j ($j=1, \dots, k$), що підтверджується експериментальними даними. Вихідний потік приладу B_j ($j=1, \dots, k$) незалежно проріджується з імовірністю q_j ($j=1, \dots, k$). Потік, отриманий у результаті проріджування N_j ($j=1, \dots, k$), надходить у другу фазу обслуговування на прилад С.

Вхідним потоком другої фази обслуговування, реалізованою системою $M|M|1$, є суперпозиція k незалежних вихідних потоків першої фази обслуговування N_j ($j=1, \dots, k$). З черги Q_c , до якої попадають заявки, вони вибираються приладом С. Час обслуговування на приладі С розподілено експоненціально з параметром m_c . Вихідний потік приладу С піддається незалежному проріджуванню з імовірністю q_c . Потік, отриманий у результаті незалежного проріджування N_c , є вихідним потоком другої фази і надходить на третю фазу обслуговування.

Третя фаза обслуговування реалізується системою типу $M|M|1$ (прилад D). Заявки надходять у чергу Q_D , з якої вибираються відповідно до дисципліни «перша заявка, що надійшла, обслуговується першою» приладом D. Час обслуговування на приладі D розподілено експоненціально з параметром m .

Пройшовши послідовно три фази обслуговування, заявки залишають систему.

Слід зазначити, що вибір представленої схеми СМО зумовлений насамперед організаційно-функціональною структурою сервісних центрів і тому досить точно для даного рівня деталізації відбиває всю організаційно-функціональну ієрархію системи сервісного центру.

Для знаходження імовірнісних характеристик використано аналітичну модель системи масового обслуговування з чистим очікуванням ($M|M|n$). Для такої моделі кожен канал може одночасно обслуговувати одну заявку. Вважаємо, що час обслуговування однієї заявки є випадковою величиною m , що підкоряється показниковому закону розподілу:

$$p(m < t) = 1 - e^{-mt}. \quad (1)$$

Потік заявок, що знаходяться в системі обслуговування, обмежений, тобто одночасно в системі обслуговування не може знаходитися більш k заявок, де k – скінчене число.

Нехай є n каналів, на які надходить потік заявок з інтенсивністю λ . Потік обслуговувань має інтенсивність μ .

У цьому випадку, якщо $\alpha < n$, де $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$, у системі встановлюється стаціонарний режим і розрахункові формули, за якими програма обчислює імовірнісні характеристики для СМО з чергою, мають вид [4]:

$$p_k = \frac{\frac{\alpha^k}{k!}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}, \quad 0 \leq k \leq n; \quad (2)$$

де p_k – ймовірність того, що k каналів СМО зайняті, а інші $(n-k)$ вільні;

$$p_{n+s} = \frac{\frac{\alpha^{n+s}}{n!n^s}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}, \quad k = n + s, s \geq 0. \quad (3)$$

де p_{n+s} – ймовірність того, що всі n каналів зайняті, а s заявок стоїть у черзі.

Середнє число заявок, що очікують обслуговування (тобто довжина черги), обчислюється за формулою:

$$d = \frac{\frac{\alpha^{n+1}}{nn! \left(1 - \frac{\alpha}{n}\right)^2}}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^{n+1}}{n!(n-\alpha)}}. \quad (4)$$

У нашому випадку, коли СМО одноканальна, у формулах (2)–(4) потрібно прийняти $n=1$ [1].

Постановка задачі 2. Проаналізувати характеристики й оцінити ефективність роботи обчислювальних засобів із застосуванням імітаційного моделювання, побудувати імітаційну модель, використовуючи експериментальні дані.

З розвитком обчислювальної техніки і дискретного аналізу дедалі ширшого розвитку та використання набувають алгоритмічні (імітаційні) моделі.

Етапи процесу імітаційного моделювання такі [2]:

- аналіз характеристик і закономірностей функціонування керованого (досліджуваного) об'єкта;
- конструювання імітаційної моделі: перехід від реального об'єкта до логічних схем та алгоритмів, які імітують його поведінку, формальна постановка задач, що розв'язуються за допомогою імітаційного моделювання;
- підготовка системи даних для моделі: формування інформаційного забезпечення, необхідного для функціонування імітаційної моделі, зокрема, визначення структури та способів подання даних, форм і режимів зберігання, встановлення взаємозв'язків і взаємозалежності між різними масивами та базами даних;
- програмна реалізація імітаційної моделі: створення чи адекватне використання наявних програмних продуктів;
- оцінювання адекватності моделі: порівняння результатів, накопичених у процесі дослідної експлуатації моделі, на підставі інформації, отриманої про реальний об'єкт, виявлення та аналіз розбіжностей і, в разі необхідності, внесення корекцій до моделі;
- проведення імітаційних експериментів.

Під час розгляду АССЦ виникла необхідність у розробленні математичної та імітаційної моделі (рис. 1) для розрахунку низки характеристик. Аналіз результатів моделювання на основі стохастичних мереж Петрі дозволив виділити місця з недостатньою пропускну здатністю та визначити оптимальне завантаження системи.

Мережі Петрі – це графічне і математичне моделювання характеристик багатьох систем. Вони надають можливість опису і вивчення функціонування сучасних систем, що характеризуються як конкретні, здатні, асинхронні, розподілені, рівнобіжні і/чи стохастичні. Аналіз комунікаційних протоколів – це те місце, де мережі Петрі можуть бути використані для показу майбутньої системи.

Маркірування μ є присвоєння фішок позиціями мережі Петрі. Фішка – це примітивне поняття мереж Петрі (подібно позиціям і переходам). Фішки привласнюються (можна вважати, що вони належать) позиціям. Кількість і положення фішок у разі виконання мережі Петрі можуть змінюватися. Фішки використовуються для визначення виконання мережі Петрі.

Маркірування μ мережі Петрі $C = (P, T, I, O)$ є функція (P – позиція, T – перехід, I – вхід, O – вихід), що відображає безліч позицій P у безліч невід’ємних цілих чисел N .

$$\mu: P \rightarrow N.$$

Маркірування μ може бути також визначено як n -вектор $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, де $n = |P|$ і кожне $\mu_i \in N$, $i = 1, \dots, n$. Вектор μ визначає для кожної позиції p_i мережі Петрі кількість фішок у цій позиції. Кількість фішок у позиції $p_i \in \mu_i$, $i = 1, \dots, n$. Зв’язок між визначеннями маркірування як функції і як вектора очевидним чином установлюється співвідношенням $\mu(p_i) = \mu_i$. Позначення його у виді функції є трохи більш загальним і тому вживається набагато частіше.

Маркірована мережа Петрі $M = (C, \mu)$ є сукупністю структури мережі Петрі $C = (P, T, I, O)$ і маркірування μ й може бути записана у виді $M = (P, T, I, O, \mu)$.

На графі мережі Петрі (рис. 2) фішки зображуються маленькою крапкою в кружку, що представляє позицію мережі Петрі.

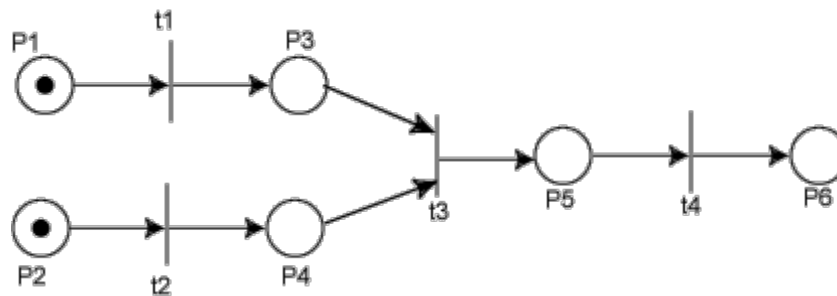


Рис. 2. Маркірування мережі Петрі

Джерело: розроблено авторами

Порівняльний аналіз характеристик наявної мережі, знятих за допомогою вимірів, і характеристик проектованої, отриманих у результаті моделювання, дозволяє виявити недоліки в наявній мережі й розробити проєкт реорганізації з метою поліпшення найбільш важливих характеристик функціонування АССЦ. Проведена побудова стохастичних мереж дозволила отримати і сформулювати оптимальні вимоги до необхідного для реорганізації мережі устаткування і каналів зв’язку.

Без знання характеристик вхідного потоку заявок неможливо провести повноцінний аналіз проектованого об’єкта.

Оскільки імітаційні моделі за своєю природою є лише засобом для проведення деякого числового експерименту, то результати, отримані за їх допомогою, являють собою не що інше, як поодинокі випадки (можливі варіанти) розвитку модельованого об'єкта. Отже, всі висновки та твердження, зроблені на їх підставі, мають евристичний характер і в певних випадках можуть суттєво викривляти дійсний стан речей. Аналітичний метод є закономірним.

Комбінація цих методів дає більш точні результати.

В основу процесу імітації покладено деякий статистичний експеримент, у ході якого використовуються генератори псевдовипадкових величин.

Варто також звернути увагу на пізнавальний зворотний вплив, який дають результати, отримані в межах імітаційних експериментів, на отримання інформації, яку використовують теоретичні (аналітичні) економіко-математичні моделі. Справді, аналіз та узагальнення накопичених у процесі імітаційних експериментів даних досить часто дозволяє краще зрозуміти якісні та кількісні закономірності, притаманні функціонуванню керованих об'єктів, і відобразити їх в аналітичному вигляді. Це додатково вказує на справедливність того, що успішне розв'язання задач моделювання та управління функціонуванням таких складних слабоформалізованих систем, як економічні об'єкти і процеси, потребує комплексного використання цілісної системи моделей і методів як теоретично-аналітичної, так і емпіричної (імітаційної) природи. Нагадаймо, що імітаційні моделі широко використовують аналітичні моделі як органічні складники, котрі є основою, на якій ґрунтуються концептуальні співвідношення, характеристики в структурі будь-якої більш-менш складної імітаційної моделі.

Висновки. Під час розгляду моделі АСЦЦ виникла необхідність у розробленні аналітичної та імітаційної моделі для розрахунку низки характеристик, таких як ступень завантаження каналів зв'язку мережі.

Під час аналітичного моделювання було введено обмеження, і вхідний потік вважався стаціонарним. Це дало можливість використати уже наявний математичний апарат для дослідження, а саме формули Ерланга. Однак у дійсності вхідний потік заявок є нестаціонарним. Тому для одержання характеристик розроблюваної системи з урахуванням нестаціонарності вхідного потоку побудовано імітаційну модель. Розглянуто особливості й задачі застосування імітаційного моделювання. Приведено результати розрахунку характеристик, отримані на основі імітаційної моделі.

За допомогою характеристик можна побудувати оптимальну структуру організації сервісного центру, зокрема оптимізувати розподіл ресурсів та підвищити якість обслуговування клієнтів.

Список використаних джерел

1. Барабаш О.В., Колумбет В.П. Дослідження систем масового обслуговування на основі імітаційного моделювання з урахуванням мультиагентного підходу. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2022. № 4(2). С. 115–121.
2. Склярєнко О.В., Терещук Г.М., Колодінська Я.О. Економіко-математичне моделювання : навч. посібник. Київ : Вид-во Європейського університету, 2024. 200 с.
3. Гнатушенко В.В., Витовтов Г.К. Аналіз СМО при стрибкоподібній зміні інтенсивностей потоків. *Проблеми прикладної математики та моделювання*. 2021. С. 76–83.
4. Колодінська О.В., Медведєв М.Г. Дослідження операцій. навч. посіб. Київ : Вид-во Європ. ун-ту, 2006. 158 с.
5. Послайко Н.І. Дослідження стаціонарного режиму в системі масового обслуговування типу GI/M/1 зі слабкою післядією. *Проблеми математичної моделі мультисервісних систем*. 2021. С. 190–199.
6. Сеник А., Пиріг Ю., Шпур О. Дослідження інтелектуального алгоритму моніторингу якості інформаційного обслуговування користувачів. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології електроніки*. 2024. № 4(2). С. 103–112.



7. Kawakami Y., Kawata H., Kubo T., Yasuhara N., Yoshihara S., Yoshida T. Applying Time-aware Shaper Considering User Identifier to Service Provider Network. *IEEE CCNC*. 2022. pp. 505–506. DOI: 10.1109/CCNC49033.2022.9700587
8. Lina Y., Xiuming Y. Design of Intelligent Pest Monitoring System Based on Image Classification Algorithm. 2020 3rd International Conference on Control and Robots (ICCR), Tokyo, Japan, 2020, pp. 21–24, DOI: 10.1109/ICCR51572.2020.9344213
9. Wang Y., Luo D. Design of Carbon Emission Accounting and Monitoring System Based on Artificial Intelligence Algorithm. *IEEE EASCT*, 2023, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EASCT59475.2023.10393747
10. Yin J., Sun J., Zhao X., Li Q., Li J. Intelligent Monitoring of Power System Electricity Consumption Based on Isolation Forest Algorithm. *IEEE ICNEPE*, 2023, pp. 1051–1054. DOI: 10.1109/ICNEPE60694.2023.10429584
11. Особливості аналітичного забезпечення експлуатації інформаційних систем та обладнання в сучасних умовах / А.В. Невзоров та ін. *Журнал «Прикладні питання математичного моделювання»*. 2023. Т. 6. № 1. С. 117–123. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/38308/62-67-PB%20%281%29.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
12. Lakhno, V.A., Kasatkin, D.Y., Skliarenko, O.V., Kolodinska, Y.O. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*, Springer, Singapore. 2022. vol 269. p. 9–22. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-7996-4_2

Стаття надійшла до редакції 21.04.2025 р.

O. Skliarenko¹, H. Tereshchuk², O. Nikolaievskyi¹, O. Skliarenko¹
¹Private Higher Educational Establishment «European University»
²Taras Shevchenko National University of Kyiv

ANALYTICAL AND SIMULATION MODELING OF A QUEUING SYSTEM BASED ON THE CASE OF A COMPUTER TECHNICAL SUPPORT SERVICE CENTER

Summary

The article examines the impact of analytical and simulation modeling on the operational efficiency of computer technical support service centers under the conditions of increasing demand for IT services and the growing complexity of queuing system (QS) structures. The relevance of applying mathematical methods to optimize the structure of automated service systems is discussed, particularly with the aim of reducing waiting times, increasing the probability of immediate request processing, and minimizing rejection rates.

The study proposes a combination of analytical and simulation modeling approaches, enabling a comprehensive analysis of QS performance using M|M|1 models and stochastic Petri nets. This integrated approach ensures high-precision workload forecasting, identification of system bottlenecks, formation of an optimal service structure, and data-driven decision-making.

The article outlines the request handling mechanisms within a service center, which include three stages: registration, diagnostics, and repair, taking into account the possibility of stream thinning at each phase. The use of modeling for identifying critical system parameters and evaluating performance is demonstrated.

Particular attention is paid to the practical significance of modeling, namely its ability to enhance service reliability and performance, as well as adapt to variable conditions and unstable incoming requests. The findings can be applied to improve service quality in support centers and to implement innovative management approaches in the IT support.

The integration of these modeling techniques facilitates the analysis of resource allocation scenarios and their impact on service continuity. The approach allows for stress testing of system capacity under peak loads, offering valuable insights for contingency planning. Simulation experiments based on real-time parameters enable a more accurate depiction of dynamic behavior within queuing environments. This ensures that management strategies are not only theoretically sound but also practically feasible and responsive to real-world challenges.

Keywords: queuing systems, analytical modeling, simulation modeling, stochastic Petri nets.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-29>

УДК 004.738.5:004.056

Р. О. Яровий, канд. техн. наук

А. В. Подвиженко, ст. викладач

А. М. Переверзєв, ст. викладач

С. В. Левченко, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-8978-8137

ORCID: 0000-0003-1826-7566

ORCID: 0000-0003-0778-9203

ORCID: 0009-0006-8497-0515

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ПУБЛІЧНІ WI-FI МЕРЕЖІ: ЗАХИСТ ОСОБИСТОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. Сучасний світ характеризується невідпинним зростанням мобільності та потребою в постійному доступі до інформації, що робить публічні Wi-Fi-мережі невід'ємною частиною повсякденного життя мільйонів людей. Кафе, аеропорти, готелі, громадський транспорт та міські площі пропонують зручний доступ до інтернету, сприяючи продуктивності, комунікації та розвагам. Однак ця цифрова зручність несе в собі значні ризики для безпеки особистої інформації. Публічні мережі, часто недостатньо захищені або взагалі відкриті, стають привабливим полем діяльності для кіберзлочинців. У статті детально проаналізовано основні загрози, з якими стикаються користувачі публічних Wi-Fi: перехоплення незашифрованих даних (сніфінг), атаки типу «людина посередині» (Man-in-the-Middle), створення фальшивих точок доступу (Evil Twin), розповсюдження шкідливого програмного забезпечення та фішинг. Розглядаються потенційні наслідки таких атак, включаючи крадіжку облікових даних (логінів, паролів), фінансової інформації (номерів банківських карток, даних онлайн-банкінгу), особистого листування, компрометацію корпоративних даних та репутаційні втрати. Наголошується на недостатній обізнаності багатьох користувачів щодо цих ризиків та їх схильності нехтувати базовими правилами безпеки заради зручності. У статті запропоновано комплексний огляд як традиційних, так і новітніх методів захисту персональних даних під час використання публічних Wi-Fi. До класичних рекомендацій відносяться: обов'язкове використання віртуальних приватних мереж (VPN) для шифрування всього трафіку; перевірка автентичності мережі перед підключенням; надання переваги вебсайтам, що використовують протокол HTTPS; вимкнення функції автоматичного підключення до Wi-Fi; своєчасне оновлення операційної системи та програмного забезпечення; використання надійного антивірусного ПЗ та фаєрволу; вимкнення загального доступу до файлів та принтерів. Особливу увагу приділено новітнім технологіям та підходам, що підвищують рівень безпеки: стандарт WPA3, який пропонує індивідуальне шифрування даних навіть у відкритих мережах (через OWE – Opportunistic Wireless Encryption) та покращений захист від атак підбору паролів; технології шифрування DNS-запитів (DNS over HTTPS – DoH, DNS over TLS – DoT), що унеможливають перехоплення інформації про відвідувані сайти; сучасні рішення Endpoint Security, що включають проактивний захист та аналіз поведінки; застосування принципів «нульової довіри» (Zero Trust), які вимагають постійної автентифікації та перевірки навіть у межах знайомих мереж. Підкреслено важливість комбінованого підходу, що поєднує технологічні засоби захисту і свідому поведінку користувача. Статтю призначено для широкого кола читачів: від пересічних користувачів, які прагнуть убезпечити свої дані, до фахівців із кібербезпеки та адміністраторів мереж, відповідальних за налаштування і підтримку публічних точок доступу.

Ключові слова: публічний Wi-Fi, кібербезпека, захист персональних даних, VPN, HTTPS, WPA3, DNS over HTTPS, DoH, DNS over TLS, DoT, Man-in-the-Middle, Evil Twin, сніфінг, інформаційна безпека, цифрова гігієна.

Постановка проблеми. В епоху тотальної цифровізації та мобільності доступ до інтернету став базовою потребою для роботи, навчання, спілкування та доступу до послуг. Публічні Wi-Fi-мережі, що розгорнуті в численних громадських місцях, надають зручну можливість

залишатися онлайн поза домом чи офісом. Ця зручність, однак, має зворотний бік – значні ризики для безпеки даних [1]. На відміну від приватних домашніх або корпоративних мереж, публічні точки доступу часто мають мінімальний рівень захисту, а іноді є повністю відкритими, що робить їх легкою мішенню для зловмисників [2]. Зростання кіберзагроз, зокрема тих, що спрямовані на пересічних користувачів, ставить питання захисту особистої інформації під час використання публічних мереж на одне з перших місць у сфері інформаційної безпеки. Крадіжка облікових даних, фінансової інформації, шпигунство, розповсюдження шкідливого ПЗ – це лише деякі з потенційних наслідків необережного використання незахищених Wi-Fi-з'єднань [2; 3]. Актуальність проблеми посилюється недостатньою обізнаністю значної частини користувачів про реальні загрози та методи протидії їм [4]. Багато хто нехтує елементарними правилами безпеки, підключаючись до будь-якої доступної мережі без належної перевірки та захисту. Таким чином, існує нагальна потреба в систематизації знань про ризики публічних Wi-Fi та ефективні методи захисту, включаючи новітні технологічні рішення, що дозволить підвищити рівень кіберграмотності та безпеки користувачів.

Аналіз останніх досліджень. Проблема безпеки публічних Wi-Fi-мереж активно досліджується науковою спільнотою та фахівцями з кібербезпеки [1; 2]. Дослідження зосереджені на кількох ключових напрямках. Проводиться детальний аналіз векторів атак, характерних для публічних Wi-Fi, як-от Man-in-the-Middle (MitM), створення «злих двійників» (Evil Twin) [5], сесійний хайджекінг (Session Hijacking) та пакетний сніфінг [1], при цьому аналізується ефективність цих атак залежно від конфігурації мережі та поведінки користувача. Значна увага також приділяється оцінюванню ефективності різних засобів захисту, зокрема дослідженню надійності VPN-сервісів, їх впливу на швидкість з'єднання та здатності протистояти різним типам перехоплення даних [6], а також аналізу ролі й обмежень HTTPS у захисті вебтрафіку.

Крім того, дослідження супроводжують розроблення та впровадження нових стандартів бездротової безпеки, наприклад WPA3 [7]. Аналізуються його переваги над попередніми версіями, включаючи покращене шифрування (SAE – Simultaneous Authentication of Equals), захист від офлайн-атак підбору пароля та підвищену безпеку відкритих мереж за допомогою Opportunistic Wireless Encryption (OWE) [8], а також досліджуються його потенційні вразливості [9]. Розробляються також методи та інструменти для автоматичного виявлення фальшивих точок доступу (Evil Twins) та інших аномалій у бездротовому середовищі, що використовують аналіз сигнатур мережі, геолокаційні дані та поведінкові патерни [5], поряд із дослідженням методів аналізу мережевого трафіку для виявлення аномалій [10].

Важливим аспектом є вивчення поведінки користувачів та соціальної інженерії, зокрема рівня обізнаності користувачів про ризики, їхньої поведінки під час підключення до публічних мереж і вразливості до методів соціальної інженерії, як-от фішингові сторінки авторизації [4]. Нарешті, аналізується проблема приватності DNS, зокрема витік інформації через незашифровані DNS-запити, розроблення стандартів для їх шифрування (DoH [11], DoT [12]) та дослідження стану їх впровадження [13].

Аналіз публікацій свідчить про постійний розвиток як методів атак [2], так і засобів захисту. Однак залишається актуальною проблема розриву між технологічними можливостями захисту та рівнем їх застосування та обізнаності серед кінцевих користувачів [4].

Формулювання мети статті. Метою статті є комплексний аналіз проблеми забезпечення безпеки особистої інформації під час використання публічних Wi-Fi-мереж і надання практичних рекомендацій для користувачів.

У статті поставлено завдання детально описати основні типи загроз та вразливостей, характерних для публічних Wi-Fi-мереж, а також проаналізувати потенційні наслідки компрометації даних через незахищені з'єднання [2]. Крім того, в роботі систематизовано та пояснено

ефективні методи захисту, починаючи від базових правил цифрової гігієни до використання сучасних технологій [6]. Особливу увагу приділено новітнім методам захисту, як-от стандарт WPA3, технології шифрування DNS (DoH/DoT), сучасні рішення Endpoint Security та принципи «нульової довіри» [14]. Загалом, статтю спрямовано на підвищення рівня обізнаності користувачів щодо ризиків та способів їх мінімізації, сприяючи формуванню відповідального ставлення до власної кібербезпеки в публічному бездротовому просторі [4].

Основна частина. Публічні Wi-Fi-мережі за своєю природою є менш безпечними, ніж приватні. Основні ризики включають:

1. Незашифровані мережі: багато публічних мереж не використовують шифрування. Це означає, що дані передаються у відкритому вигляді й можуть бути легко перехоплені зловмисником у тій же мережі (сніфінг) [1];

2. Атаки «людина посередині» (Man-in-the-Middle, MitM): зловмисник розміщує себе між користувачем і точкою доступу, перехоплюючи або змінюючи трафік. Такі атаки є поширеною загрозою в публічних мережах [2];

3. Фальшиві точки доступу (Evil Twin): зловмисник створює Wi-Fi-мережу з ім'ям, схожим до легітимної, щоб обманом змусити користувачів підключитися та перехопити їхні дані [5];

4. Пакетний сніфінг (Packet Sniffing): навіть у зашифрованих мережах зі старими протоколами існують вразливості, що дозволяють перехоплювати пакети. У відкритих мережах це зробити ще простіше [1];

5. Розповсюдження шкідливого програмного забезпечення (ПЗ): зловмисники можуть використовувати скомпрометовані мережі для розповсюдження вірусів, троянів та іншого шкідливого ПЗ [3], наприклад, через фальшиві оновлення або перенаправлення на шкідливі сайти [2];

6. Сесійний хайджекінг (Session Hijacking): Перехоплення сесійних файлів cookie в незахищеній мережі може дозволити зловмиснику отримати доступ до облікових записів користувача без пароля.

Стандартні методи захисту

Щоб зменшити потенційні загрози під час підключення до загальнодоступних мереж Wi-Fi, варто вжити певних запобіжних заходів. Насамперед рекомендовано використовувати VPN (віртуальну приватну мережу). VPN створює захищений, зашифрований канал для вашого інтернет-трафіку, що унеможливає його перехоплення в межах локальної мережі; ефективність цього методу для запобігання витокам даних підтверджена дослідженнями [6].

Не менш важливо переконуватися в автентичності мережі, до якої ви підключаєтесь. Завжди уточнюйте офіційну назву (SSID) мережі в закладі та остерігайтеся підключень до мереж із підозрілими назвами, які можуть маскуватися під легітимні точки доступу [5]. Під час перегляду вебсторінок віддавайте перевагу сайтам, що використовують протокол HTTPS, оскільки він забезпечує шифрування даних між вашим браузером та сервером сайту.

Також доцільно відключити функцію автоматичного підключення до Wi-Fi-мереж на вашому пристрої, щоб уникнути ненавмисного з'єднання з невідомими або небезпечними мережами. Регулярне оновлення операційної системи та всіх установлених програм є критично важливим, адже оновлення часто містять виправлення вразливостей, якими можуть скористатися зловмисники [2].

Для базового рівня захисту переконайтеся, що на вашому пристрої активований фаєрвол і встановлено надійне антивірусне програмне забезпечення. Крім того, перебуваючи в публічній мережі, обов'язково вимикайте функцію спільного доступу до файлів та принтерів у налаштуваннях мережі вашого пристрою. Нарешті, намагайтеся обмежувати дії, пов'язані з передачею чутливої інформації (наприклад, онлайн-банкінг, здійснення покупок), коли ви підключені до публічного Wi-Fi, якщо є така можливість.

Найновіші методи захисту інформації в публічних мережах

Крім стандартних рекомендацій щодо захисту інформації в публічних мережах, активно розвиваються та впроваджуються нові технології та підходи. Серед них виділяється стандарт безпеки WPA3, який у версії WPA3-Personal використовує протокол SAE, що підвищує стійкість до офлайн-атак підбору пароля, попри виявлені на ранніх етапах вразливості. Для корпоративних потреб існує WPA3-Enterprise з вищим рівнем безпеки, а технологія Opportunistic Wireless Encryption (OWE) забезпечує індивідуальне шифрування даних навіть у відкритих мережах, захищаючи від пасивного прослуховування [8].

Також набирають популярності протоколи DNS over HTTPS (DoH) та DNS over TLS (DoT), які шифрують DNS-запити, унеможливаючи їх перехоплення зловмисниками. Важливу роль відіграють і сучасні рішення Endpoint Security, що включають проактивний захист, системи виявлення та реагування на загрози на кінцевих точках (EDR), а також захист від фішингу, що є критичним в умовах кіберзагроз, що постійно зростають [13].

Окрім технологічних рішень, поширюється концепція «Нульової Довіри» (Zero Trust), яка базується на принципі «ніколи не довіряй, завжди перевіряй». Цей підхід вимагає постійної автентифікації та ретельної перевірки прав доступу для будь-яких користувачів чи пристроїв, навіть якщо вони перебувають у знайомій мережі [14].

Варто також зазначити, що використання мобільного інтернету через точку доступу (хот-спот) часто є безпечнішою альтернативою публічному Wi-Fi, оскільки мережі 4G/5G зазвичай використовують сильніші механізми шифрування та автентифікації.

Висновки. Публічні Wi-Fi мережі залишаються середовищем із підвищеними ризиками для безпеки даних [1; 2]. Перехоплення трафіку, атаки MitM та Evil Twin [5] є реальними загрозами.

Проведене дослідження підтверджує, що використання таких базових засобів захисту, як VPN [6], та дотримання правил цифрової гігієни значно знижує ризики. Нові технології, як-от WPA3 з OWE та шифрування DNS (DoH/DoT), пропонують суттєві покращення на технічному рівні.

Однак технології не є панацеєю. Людський фактор, зокрема недостатня обізнаність і необережна поведінка користувачів [4], залишається слабкою ланкою.

Перспективи подальших досліджень включають:

- аналіз практичного впровадження та ефективності WPA3/OWE та виявлення нових потенційних вразливостей;
- дослідження ефективності методів виявлення атак типу «Evil Twin» та MitM в умовах шифрованих протоколів;
- розроблення інтелектуальних систем оцінювання ризиків публічних мереж та аналізу аномалій трафіку;
- подальше вивчення поведінкових аспектів кібербезпеки користувачів та розроблення ефективних освітніх програм;
- адаптація та застосування принципів «нульової довіри» [14] для захисту персональних пристроїв.

Організація безпечного інтернету в публічних Wi-Fi-мережах вимагає комплексного підходу та спільних зусиль провайдерів, розробників і користувачів. Поєднання технологічних інновацій та підвищення цифрової грамотності є ключем до безпечного використання зручностей бездротового доступу.

Список використаних джерел

1. Cimpanu C. Most public WiFi networks are insecure, study finds. ZDNet. 2019. URL: <https://www.zdnet.com/article/most-public-wifi-networks-are-insecure-study-finds/> (дата звернення: 15.04.2025).

2. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). ENISA Threat Landscape. 2023. URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-2023> (дата звернення: 15.04.2025).
3. Shabtai A., Elovici Y., Shomron G. Android Malicious Code and Malware // *Information Security and Privacy Research. PRIME* 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol. 7398. Springer, Berlin, Heidelberg. 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-31513-8_1
4. Khan M. A., Siddiqui M. S., Ferens K. A Cognitive Study on Public Wi-Fi Security Risks and Users' Behavior // 2018 IEEE International Conference on Cognitive Computing (ICCC). 2018. pp. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCC.2018.00016>
5. Apolonio K. F., Hernandez A. A. Detection and Prevention of Evil Twin Attack in a Public Wi-Fi Hotspot // 2017 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT). 2017. pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2017.8279046>
6. Singh J., Pasquale J. Understanding the effectiveness of VPNs in mitigating web PII leakages // Proceedings of the 2015 ACM SIGCOMM Conference on Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM '15). 2015. pp. 591–592. DOI: <https://doi.org/10.1145/2785956.2790023>
7. Wi-Fi Alliance. Wi-Fi CERTIFIED WPA3™. 2024. URL: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security> (дата звернення: 15.04.2025).
8. Новітні протоколи бездротових мереж: переваги та недоліки / С. Левченко та ін. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2024. № 335(3(1)). С. 445–449. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-61>
9. Vanhoef M., Piessens F. Dragonblood: Analyzing the Dragonfly Handshake of WPA3 and EAP-pwd // Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '19). 2019. pp. 1993–2007. DOI: <https://doi.org/10.1145/3319535.3354217>
10. Поночовний П., Пепа Ю. Реалізація системи захисту серверів з урахуванням аномалій в пакетах. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 1(81). С. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-6>
11. Hoffman P., McManus P. RFC 8484: DNS Queries over HTTPS (DoH) Internet Engineering Task Force (IETF), 2018. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc8484> (дата звернення: 15.04.2025).
12. Hu Z., Ma Z., Wang H., Zhang G. RFC 7858: Specification for DNS over Transport Layer Security (TLS). Internet Engineering Task Force (IETF), 2016. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7858> (дата звернення: 15.04.2025).
13. Hounsell A., Orme E., Johnson C. Measuring the deployment of DNSSEC, DANE, and DoT // Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference (IMC '22). 2022. pp. 436–449. DOI: <https://doi.org/10.1145/3517745.3561442>
14. Rose S., Borchert O., Mitchell S., Connelly S. NIST Special Publication 800-207: Zero Trust Architecture. National Institute of Standards and Technology. 2020. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-207/final> (дата звернення: 15.04.2025).

R. Yaroviy A. Podvyzhenko, A. Pereverziev, S. Levchenko
Higher Educational Institution “European University”

PUBLIC WI-FI NETWORKS: PROTECTING PERSONAL INFORMATION IN THE AGE OF DIGITAL CONVENIENCE

Summary

The modern world is characterized by relentless growth in mobility and the need for constant access to information, making public Wi-Fi networks an integral part of the daily lives of millions. Cafes, airports, hotels, public transport, and city squares offer convenient internet access, fostering productivity, communication, and entertainment. However, this digital convenience carries significant risks to personal information security. Public networks, often inadequately secured or entirely open, become an attractive field for cybercriminals. This article provides a detailed analysis of the main threats faced by users of public Wi-Fi: interception of unencrypted data (sniffing), Man-in-the-Middle (MitM) attacks, the creation of fake access points (“Evil Twin”), malware



distribution, and phishing. It examines the potential consequences of such attacks, including the theft of credentials (logins, passwords), financial information (bank card numbers, online banking data), personal correspondence, compromise of corporate data, and reputational damage. Emphasis is placed on the lack of awareness among many users regarding these risks and their tendency to neglect basic security rules for the sake of convenience. The article offers a comprehensive overview of both traditional and the latest methods for protecting personal data when using public Wi-Fi. Classic recommendations include: mandatory use of Virtual Private Networks (VPNs) to encrypt all traffic; verifying network authenticity before connecting; preferring websites that use the HTTPS protocol; disabling the automatic Wi-Fi connection feature; timely updating of operating systems and software; using reliable antivirus software and firewalls; disabling file and printer sharing. Special attention is paid to the latest technologies and approaches that enhance security levels: the WPA3 standard, which offers individualized data encryption even on open networks (via OWE – Opportunistic Wireless Encryption) and improved protection against password guessing attacks; DNS query encryption technologies (DNS over HTTPS – DoH, DNS over TLS – DoT), which prevent the interception of information about visited sites; modern Endpoint Security solutions that include proactive protection and behavioral analysis; application of Zero Trust principles, requiring constant authentication and verification even within familiar networks. The importance of a combined approach, integrating technological protection means and conscious user behavior, is underscored. The article is intended for a wide audience: from ordinary users seeking to secure their data to cybersecurity specialists and network administrators responsible for configuring and maintaining public access points.

Keywords: public Wi-Fi, cybersecurity, personal data protection, VPN, HTTPS, WPA3, DNS over HTTPS, DoH, DNS over TLS, DoT, Man-in-the-Middle, Evil Twin, sniffing, information security, digital hygiene.



ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-30>

УДК 640.43:339.944

С. С. Андрєєва¹, канд. техн. наук

Є. П. Пивоваров¹, д-р техн. наук

М. Б. Колеснікова¹, канд. техн. наук

А. М. Дихтярь¹, канд. техн. наук

¹ Державний біотехнологічний університет

e-mail: svetana783@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2981-481X

ORCID: 0000-0002-4964-1568

ORCID: 0000-0002-6223-7105

ORCID: 0000-0002-5430-147X

ВПЛИВ СУЧАСНИХ ФОРМАТІВ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОЇ ІНДУСТРІЇ НА РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРОДУКЦІЇ ВЛАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У статті проведено аналіз сучасних форматів закладів ресторанної індустрії, а також порівняння форматів в європейських країнах з українськими закладами згідно з ДСТУ 4281:2004. У ході аналізу визначено, що заклади ресторанної індустрії поділяються на формати: «Fine dining» або «Luxury»; «Casual dining» та «Quick Service Restaurant». Проведено аналіз щодо відповідності меню, страв до концепції закладу відповідного формату. У результаті експериментальних досліджень розроблено технологію супів-пюре для закладів формату «Fast food» із використанням легкотекучого модифікованого крохмалю «Nistatyl СН 31105». Визначено, що крохмаль «Nistatyl СН 31105» під час заварювання має знижену в'язкість, яка не згущується під час охолодження. Такі властивості крохмалю є оптимальними саме для рідких пюреподібних супів. У статті представлено обладнання, що є оптимальним для виробництва супів-пюре, а також посуд для закладів формату «Fast food».

Ключові слова: формати ресторанного господарства, ресторанный концепції, фастфуд, супи-пюре, крохмаль «Геламіл».

Постановка проблеми. Сучасні заклади ресторанної індустрії мають безліч функціональних ідей, які запозичені з європейських закладів. Сьогодні в Україні вже складно побачити заклади, які мають слаборозвинену концепцію, бо кожен заклад має свій певний формат, який відповідає попиту споживача. Відповідно до ДСТУ 4281:2004., заклади ресторанного господарства, зокрема ресторани та бари, мають класи люкс, перший і в другий, що ж стосується кафе, кав'ярень, їдалень і закусочних, то вони можуть просто мати або не мати певну специфіку (етнологічну, спортивно-розважальну, арт-стилістичну тощо) [1, с. 140].

Таке поняття, як «формат закладів ресторанної індустрії», нині переважає над поняттям «клас», який характеризується у ДСТУ 4281:2004. Ресторани класу люкс в Європі прийнято називати ресторани формату «Fine dining» або «Luxury», і тут чітко наводяться умови класу люкс, а що стосується ресторанів першого і другого класу, то в Європі ці ресторани просто мають формат демократичного кафе «Casual dining», і тут дуже важливо розуміти, що критерії, які пред'являються до цього формату, загалом узагальнені до стандартного сімейного ресторану або ресторану з певним концепт-профілем [2, с. 40].

Для закладів швидкого харчування також існує своє ранжування, європейські заклади мають одну загальну об'єднану назву «Quick Service Restaurant», і там вони вже мають поділи на «Fast food», «Street food», а також на заклади з форматом «Free flow» [3, с. 115].

З огляду на таку різноманітність форматів головним завданням рестораторів є правильна та грамотна подача своїх послуг, адже формат закладу головним чином диктує певну концепцію, в якій має бути все гармонічно організовано та поєднано, починаючи від назви закладу, стилю інтер'єру і до готових страв, які реалізуються. Однак нині, в умовах війни все дуже важко організувати, багато закладів практично мають занепад, який зумовлений безліччю таких факторів, як постійні тривоги, плинність кадрів, додаткові витрати на підтримку резервної енергії тощо. Тому важливо звернути увагу на низку другорядних ідей, які мають залучити цільову аудиторію, тим самим підвищити рентабельність закладу.

Однією з важливих умов попиту споживача є вибір тієї страви, яка відповідає концепції закладу. Основним завданням натеper є розроблення інноваційних технологій з огляду на концепцію закладу. Так, сьогодні можна зайти в кав'ярню італійської кухні й побачити там десерт «Тірамісу» і морозиво «Джелато», і чомусь японські солодощі «Моті». Або, заходячи до піцерії, ми можемо там виявити в меню борщ та суші. Це пояснюється тим, що ресторатори намагаються досягнути неосяжне і ввести в меню саме рейтингові страви, які мають попит. Однак навіть тут ми можемо виявити низку проблем, які варто висвітлити та деталізувати.

Аналіз останніх досліджень. Ураховуючи огляд багатьох відомих закладів ресторанної індустрії, хотілося би відзначити, що вони намагаються щопівроку оновлюватися щодо меню, розроблення авторських страв, а також запровадження незвичайних «фішок», які збільшують попит на цей заклад. Наприклад, це введення нової лінійки снєків у форматі «Fast food», вегетаріанського напрямку чи нових низькокалорійних десертів у кав'ярні [4].

Також не слід забувати і про ресторани формату «Luxury», в якому можна побачити подачу бургерів преміального авторського виконання. Зважаючи на те, що в таких ресторанах в основному працюють шеф-кухарі зі світовим ім'ям, технологія страв може проходити як традиційним (класичним) методом, так і з використанням молекулярних технологій. Так, в одному з французьких ресторанів формату «Luxury» було введено низку авторських страв від шефа, які мали суто атмосферу домашньої кухні, без певних вишукувань у подачі. В основному всі страви містили прості продукти і називалися як «*Страви від фермера*». Здавалося б, що чізкейк, приготований на крафтовому сирі «Рікотта», з гарбузово-цитрусовим конфі, просто ввійшов у топ-найкращих страв на вибір споживача [5, с. 203].

З огляду на такий попит на страви з використанням крафтових сирів, міксів овочів та фруктів, відомим українським кулінарним блогером Євгеном Клопотенко було розроблено меню страв української кухні виключно з використанням тільки української сировини. Концептом його закладу «100 років тому вперед» є поєднання кулінарних традицій усіх регіонів України. Так, наприклад, десерт – каша «Зозуля» складається з пшона, маку та шавлію, або український борщ, який готують виключно в духовій печі зі сливовим лекваром.

Для ресторанів форматів «Casual» інноваційним напрямом може бути розроблення страв різної спрямованості. Це пояснюється тим, що формат «Casual» має більшість різноманітних стилів і технологічних методів, які можуть відображатися як у стилі «Free from», так і в інновації авторського наповнення з використанням технологічних методів «Fusion» або «Cross cooking». Наприклад, нині в європейських сімейних ресторанах вводяться страви дитячого харчування, де це не просто страви з мініпорціями, а страви, в яких враховано всі алергени, де збільшено вміст білку та мінімальна кількість цукру та солі.

Нещодавно в Європі почали з'являтися ресторани в стилі «Pop art», концепція яких заснована на яскравому молодіжному русі. Стиль закладів також наповнений яскравим інтер'єром та

деталлями. Продукція для цього ресторану також має переважати в яскравості смаку й оформлення. Для багатьох ця яскравість може супроводжуватися солодкими стравами або кондитерськими виробами, проте тут у концепті передбачено саме десертну продукцію з відсутністю вираженого солодкого смаку та з повною заміною цукру. Наприклад, у таких закладах можна зустріти креми, муси з терпким, кислим або солодко-гострим смаком. Багато хто приходить до таких закладів, щоб випробувати незвичайні смаки, а також відчути себе на молодіжній тусовці, оскільки атмосфера таких закладів задає тон простоти спілкування між офіціантом та відвідувачем [6, с. 228].

Для закладів швидкого харчування основною умовою завжди був спритний сервіс в обслуговуванні, в якому зазвичай представлена монопродукція. Більшість споживачів нині прагнуть підтримати формат «Free from», а саме уникати вживання продукції із вмістом цукру, солі, глютену і трансжирів. Через це в європейських країнах почали з'являтися заклади, які націлені саме на здорове та корисне харчування. Наприклад, у Швейцарії, Франції та інших країнах почали з'являтися закусочні формату «Fast food/Street food» з вегетаріанським харчуванням. Також сьогодні збільшилася різноманітність закладів із монопродукцією здорового харчування, наприклад салат-бар, суп-бар. Вживання супів є корисною їжею з фізіологічної точки зору, але не такою рейтинговою за попитом. Тому подібні заклади намагаються розташовувати при фітнес-центрах, а також офісних центрах і в точках з великим потоком людей (вокзали, ринки, студентські містечка).

Формулювання мети статті (постановка завдання).

Метою дослідження є вплив формату «Fast food» на розроблення та впровадження супів-пюре. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- надати загальну характеристику та проаналізувати сучасні формати закладів ресторанної індустрії;
- дослідити сучасні тенденції форматів ресторанних закладів;
- обґрунтувати технологію розроблення та впровадження супів-пюре для закладів формату «Fast food».

Основна частина. Процес приготування супів-пюре є тривалим та потребує додаткового залучення спеціального обладнання для забезпечення однорідної консистенції та заданої дисперсності. Недопустимими дефектами є розшаровування, недостатня седиментаційна стійкість системи. З огляду на це використання кулінарних напівфабрикатів у технології пюреподібних перших страв натеper є актуальним завданням для закладів «Fast food».

Основними структурними компонентами супів-пюре є рідка основа (бульйон, молоко), гарнір (овочі, крупа тощо) та структуроутворювачі (пасероване борошно, яєчний льезон). Структура супів-пюре більшою мірою залежить від згущувачів, які мають досить обмежений термін використання та певні технологічні недоліки. Відомий широкий асортимент харчових добавок, проте не всі витримують подвійне теплове оброблення, що є необхідним у ході технологічного процесу виробництва супів-пюре. Такими якостями володіють модифіковані крохмалі, що пройшли окислення.

Одним зі складників перших страв є рослинні або тваринні жири, які під дією тих чи інших чинників здатні до окиснення, розшаровування на поверхні супу, що є небажаним процесом у разі приготування та подавання готової страви. Крім того, під час приготування та короткочасного зберігання супів-пюре спостерігається агрегативно нестійка система.

Для стабільної структури кулінарного напівфабрикату може бути використано рідкокиплячий модифікований крохмаль «Nistatyl CH 31105», а як поверхнево-активні речовини (ПАР) – ефір лимонної кислоти фірми «GrindSted® Citremsp70», який згідно з Постановою ЄС № 1829/2003 і 1830/2003 відповідає вимогам Європейського Союзу (E 472c) та є повністю

безпечним для використання в харчовій промисловості. Ефір лимонної кислоти моно- та дигліцеридів виготовлено з харчової рафінованої соняшникової та пальмової олії. Він зменшує напругу між жировою і водною фазами, які наявні в складі супів-пюре, стабілізує рідку емульсію, надає чистоти і стабільності водній дисперсії в середовищі з підвищеним вмістом жиру, також володіє високими водозв'язувальними якостями.

Крохмалі серії «Nistatyl СН 31105» представлені картопляним крохмалем зі зниженою в'язкістю і характеризуються як легко-текучий желюючий картопляний крохмаль, тобто крохмаль, розчин якого за високих температур дає низьку в'язкість, а в разі застигання – щільний гель. Зниження в'язкості, яке є результатом окислення або кислотного гідролізу крохмалю, зумовлено тим, що крохмальні ланцюжки поділяються, наприклад, робляться коротше. У результаті крохмаль «Nistatyl СН 31105» має такі властивості в порівнянні зі звичайним картопляним крохмалем: він може використовуватися в більш високій концентрації; має підвищену здатність зв'язувати воду і утворювати гель, а також підвищену стабільність і чистоту розчинів [7, с. 178].

На рівні багатокомпонентних модельних систем нами проведено обґрунтування вмісту крохмалів серії «Геламіл» для визначення їх оптимальної концентрації.

Згідно з експериментальними дослідженнями, нами прийнято такі види та концентрації крохмалів:

- для супів-пюре з комбінацією пюре на основі картоплі, капусти, кабачків – крохмаль Nistatyl СН 31105 за вмістом 2,0%;
- для супів-пюре з комбінацією пюре зі шпинату, грибів та спаржі – крохмаль Nistatyl СН 31105 за вмістом 2,0%;
- для супів-пюре з комбінацією бобових – крохмаль Nistatyl СН 31105 за вмістом 2,0%.

Для розширення асортименту супів-пюре нами розроблено:

- суп-пюре «Дієтичний», основною сировиною якого є картопля, капуста, кабачки, морква, цибуля ріпчаста, зелень. Емульгаторною основою є молоко питне й емульгатор ефір лимонної кислоти «GrindSted® Citremsp70»;
- суп-пюре «Крем-шпинат», основною сировиною якого є шпинат, гриби шампіньйони, спаржа, зелень. Замість молока ми використовуємо вершки молочні 15,0% жирності, сухий яєчний білок та емульгатор ефір лимонної кислоти «GrindSted® Citremsp70»;
- суп-пюре «Бобове асорті», основною сировиною якого є сочевиця зелена, цибуля ріпчаста, коріння петрушки. Як емульгаторну основу використовуємо молоко питне та емульгатор ефір лимонної кислоти «GrindSted® Citremsp70».

Використання крохмалів «Nistatyl СН 31105» корисне тим, що ці крохмалі повністю замінюють пшеничне борошно, яке використовують у ролі загусника та структуроутворювача. Використання емульгатора Citremsp70 дає нам повну заміну курячих яєць. Принципову технологічну схему виробництва супу-пюре наведено на рис. 1.

У межах підсистеми D₁ відбувається МКО овочевої та бобової сировини. Овочі – картоплю, моркву, капусту, спаржу, коріння петрушки – миють, очищують від лущиння і нарізають за технологічним призначенням. Цибулю ріпчасту та цибулю порей перебирають, очищують, миють та нарізають за технологічним призначенням. Бобові перебирають, промивають в проточній воді, а після замочують на 4 години в воді за температури 20±2°C.

У межах підсистеми D₂ відбувається підготовка води (фільтрування або де мінералізація) до суспендування крохмалю. Молоко питне та вершки проціджують за необхідністю та зважують для подальшого оброблення.

Для одержання н/ф «Крохмальна суспензія» (підсистема D₃) крохмаль зважують, просіюють та суспендують у воді. Емульгатор зважують і просіюють за технологічною необхідністю (підсистема D₄).

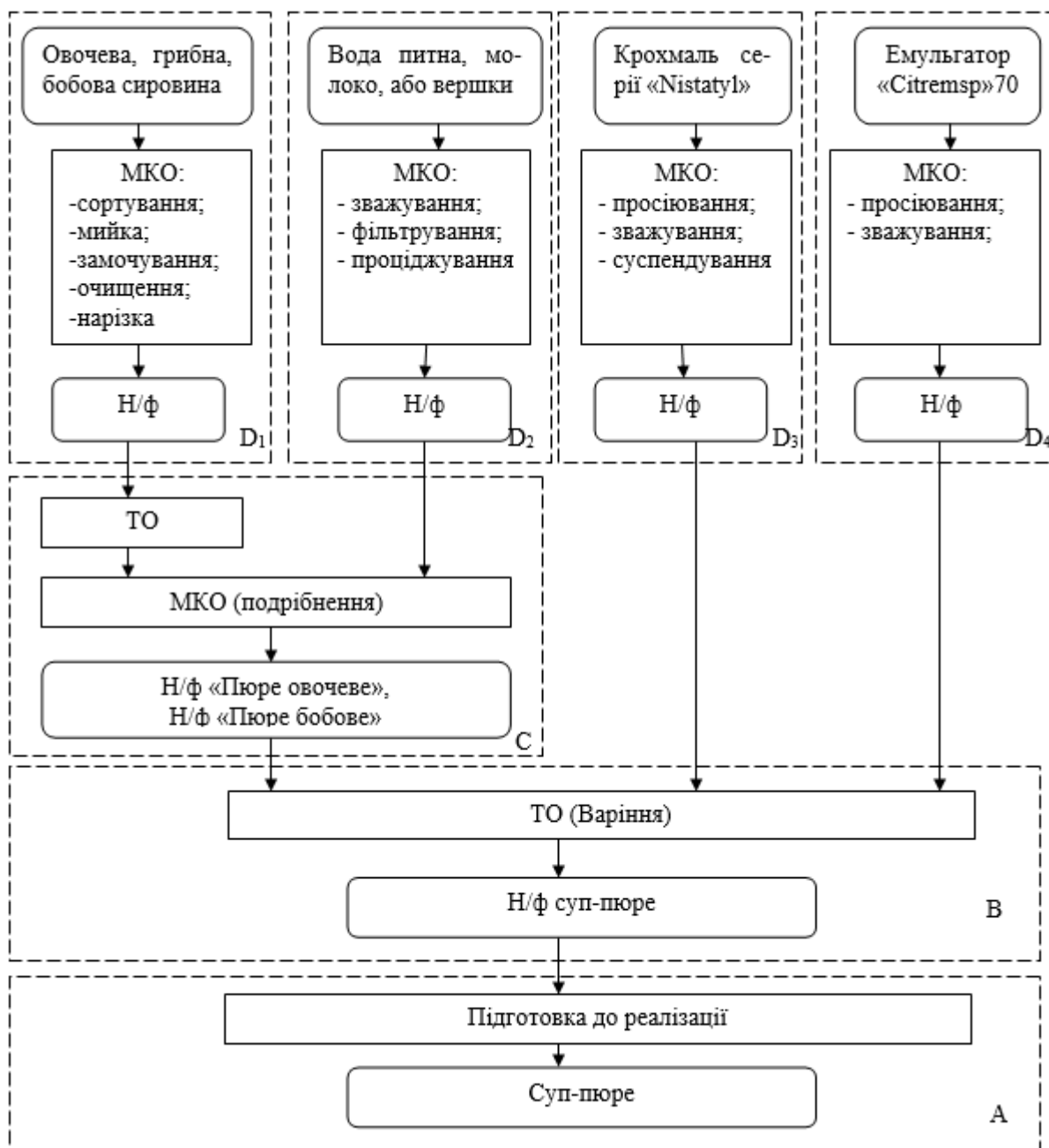


Рис. 1. Принципова технологічна схема виробництва супу-пюре «Дієтичний» із використанням крохмалю «Nistatyl SN 31105»

Функціонування підсистеми С відображає одержання н/ф «Пюре овочево», н/ф «Пюре бобове». Для реалізації цієї підсистеми овочі піддають термообробленню (варіння, пасерування, припускання) та після з невеликим відокремленням відвару овочі подрібнюють до стану пюре.

У межах підсистеми В відбувається теплове оброблення н/ф «Пюре овочево» або н/ф «Пюре бобове», яке поєднують під час варіння із н/ф «Крохмальна суспензія» та н/ф «Емульгатор». Під час ТО суміш необхідно варити з постійним перемішуванням, для рівномірної клейстеризації крохмальних зерен.

Функціонування підсистеми А відображає одержання готового продукту із заданими функціонально-технологічними властивостями.

Натепер дуже важливо впроваджувати в заклади формату «Fast food» супи, але технологічний процес виробництва досить трудомісткий, який вимагає додаткового обладнання та посуду, що тягне за собою додаткові площі. Таким чином, реалізація перших страв у ресторанному закладі формату «Fast food» практично відсутня, або тут представлено супи з використанням промислових напівфабрикатів сухих сумішей. Органолептичні показники супів на основі сухих сумішей інші, ніж у супів власного приготування, а також вони більшою мірою відрізняються смаком, запахом і консистенцією. Супи на основі сухих сумішей мають яскраво виражений смак і аромат підсилювачів смаку (глутамат натрію), ароматизаторів, а також інших добавок, що зазвичай відштовхують споживача через відсутність натурального і природного смаку.

Рішенням даної проблеми може стати підбір професійного обладнання для перших страв, яке буде забезпечувати максимум усі необхідні технологічні операції. На підставі маркетингових досліджень ринку технологічного обладнання пропонується багатофункціональний кухонний апарат «VarioCooking Center VCC 112» (рис. 2).



Рис. 2. Технологічне обладнання для виробництва перших страв у закладі формату «Fast food»:
а – багатофункціональний кухонний апарат «VarioCooking Center VCC 112»;
б – технологічний процес виготовлення перших страв на апараті «VarioCooking Center VCC 112»

З вищесказаного можна зазначити, що суповий «Fast food» ще не до кінця розвинений і зростає досить повільним темпом. Однією з основних причин відсутності його розвитку є складнощі з подаванням, а саме «зручним» подаванням. Сьогодні в Європі прийнято формат «take-away», коли порцію супу можна взяти із собою в їстівному, паперовому або пластиковому стаканчиках.

Тому нами було проведено дослідження з вибором одноразового посуду для супів-пюре, що реалізуються в закладі формату «Fast food».

Натепер є безліч запатентованих технологій розроблення хлібних стаканчиків для супів-пюре (рис. 3, а). Формочки спеціально випікаються для перших страв та є їстівними, більш того, для кожного виду супу підбираються відповідні наповнювачі та прянощі. Найбільше заклади формату «Fast food» використовують паперові стаканчики із щільного картону, що мають вологу непроникливу оболонку (рис. 3, б), а також пластикові стаканчики (рис. 3, в).



Рис. 3. Види подачі супів-пюре в закладах формату «Fast food»:
а – хлібний стаканчик; б – паперовий стаканчик; в – пластиковий стаканчик

Висновки. У ході виконання роботи було вирішено наступні завдання:

- представлено загальну характеристику та аналіз сучасних форматів закладів ресторанної індустрії. Згідно зі світовою класифікацією вони мають формати: «Fine dining» або «Luxury»; «Casual dining» та «Quick Service Restaurant»;
- досліджено сучасні формати закладів ресторанної індустрії країн Європи, які мають відповідний концепт-профіль, під який підпорядковується меню, інтер'єр, стиль оформлення страв та ін.;
- обґрунтовано технологію виробництва супів-пюре з використанням крохмалю серії «Nistatyl CH 31105», що є хімічно модифікованим, для закладів формату «Fast food»;
- обґрунтовано впровадження супів-пюре з підбором теплового обладнання та посуду, що є зручним і доцільним для закладів формату «Fast food».

Список використаних джерел

1. Максименко О.І. Тенденції розвитку ринку швидкого харчування в Україні. *Науковий вісник Миколаївського державного університету ім. В.О. Сухомлинського. Економічні науки*. 2019. Вип. 1, № 7. С. 139–143.
2. Corvo, Paolo, Riccardo Migliavada, and Dauro Mattia Zocchi. New food and restaurant trends. *Italian studies on food and quality of life*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 39–55.
3. Muntean, Camelia, and Gabriela Motoi. Food and nutrition policies in european countries within the context of development of fast food industry. *Revista Universitară de Sociologie* 19.1 (2023).
4. Smith, Claire et al. Characteristics of fast-food/takeaway-food and restaurant/café-food consumers among New Zealand adults. *Public Health Nutrition* 17.10 (2014): 2368–2377.
5. Fantasia, Rick. Fast food in France. *Theory and Society* (1995): 201–243.
6. Sandberg, John. Some traditional aspects of pop art. *Art Journal* 26.3 (1967): 228–245.
7. Chang, Fengdan et al. Preparation and characterization of modified starch granules with high hydrophobicity and flowability. *Food chemistry* 152 (2014): 177–183.

Стаття надійшла до редакції: 25.03.2025 р.



S. Andrieieva, Ye. Pyvovarov, M. Kolesnikova, A. Dykhtiar
State Biotechnological University

**INFLUENCE OF MODERN FORMATS OF RESTAURANT INDUSTRY
ESTABLISHMENTS ON THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION
OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR OWN PRODUCTION**

Summary

The article contains an analysis of the current formats of mortgages in the restaurant industry, as well as an alignment of the formats of European countries with Ukrainian mortgages, based on DSTU 4281:2004. The analysis revealed that the assets of the restaurant industry are divided into formats; “Fine dining” or “Luxury”; “Casual dining” and “Quick Service Restaurant”. An analysis was carried out regarding the type of menu, from the concept of a suitable format. In the course of experimental research, the technology of puree soups for filling in the “Fast food” format was developed using the easy-flowing modified starch “Nistatyl CH 31105”. It was found that starch “Nistatyl CH 31105” has a reduced viscosity during brewing and does not thicken during cooling. Such power of starch is optimal for rare puree-like soups. The article presents equipment that is optimal for the production of pureed soups and also dishes for storing the “Fast food” format.

Keywords: restaurant industry formats, concept, fast food, pureed soups, “Gelamil” starch.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-31>

UDC 631.163.24

A. V. Antonenko, PhD Technical Sciences, Associate Professor

ORCID: 0000-0001-9397-1209

L. V. Bal-Prylypko, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID: 0000-0002-9489-8610

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

e-mail: artem.v.antonenko@gmail.com

QUALITY AND SAFETY OF MAYONNAISE BASED ON BLENDED OIL, EGGPLAN POWDER AND GUM ARABIC

Summary. The paper theoretically and experimentally substantiates the feasibility of using gum arabic, eggplant powder, and blended oil to develop mayonnaise technology, and also creates recipes for different versions of this sauce. The results of organoleptic analysis showed that the use of gum arabic, eggplant powder and blended oil has a positive effect on the organoleptic properties of mayonnaise. The consistency, appearance, color and aroma of all samples received positive ratings, and the mayonnaise sample with 50% blended oil (M2) received the highest rating (5 points). The study of the fatty acid composition of lipids demonstrated that the mayonnaise sample (M3) has the highest results in terms of the content of fatty acids of the ω -3 and ω -6 groups. However, the ratio of fatty acids in the sample (M3) is 1:7/1:9, which is not optimal. The best ratio of fatty acids, which is 1:4, is characterized by the mayonnaise sample (M2). The analysis of the fatty acid composition also confirmed the functionality of all mayonnaise samples. It was determined that all developed samples based on blended oil meet the standards for structure (viscosity and emulsion stability) and quality (pH, acid and peroxide values), which indicate the resistance of the product to mechanical stress and stability during storage. It was found that the microbiological indicators of the control sample and experimental samples, in which the oil-fat fraction was partially or completely replaced with blended oil, during 28 days of storage show that the conditionally pathogenic and pathogenic microflora are within the permissible values. The number of bacteria of the *Staphylococcus aureus* group in the control and experimental samples remained constant at 2.7×10^2 throughout the entire storage period. The results obtained indicate the possibility of substantiating the technology of mayonnaise based on gum arabic, eggplant powder and blended oil with increased biological value.

Keywords: sauce, mayonnaise, oil, gum arabic, eggplant powder, polyunsaturated fatty acids (PUFA), technology, functional product, dietary supplements, technology.

Statement of the problem and its relevance. The biologically active components of vegetable oils, in particular blended ones, which normalize lipid metabolism, primarily include polyunsaturated fatty acids (PUFAs) – linoleic (ω -6) and linolenic (ω -3). PUFAs participate in the body's work as structural elements of cell biomembranes. They contribute to the regulation of metabolism in cells, normalization of blood pressure, affect cholesterol metabolism, stimulating its oxidation and excretion from the body, participate in the metabolism of B vitamins, increasing resistance to infectious diseases and other factors [1; 2].

One of the main products of the oil and fat industry, which is present in the mass daily consumption of the population, is mayonnaise sauce. The multicomponent composition of mayonnaise provides opportunities for the creation of products that prevent deficiency states in essential fatty acids, vitamins and other physiologically functional ingredients [3; 4].

One of the main components of mayonnaise emulsions is refined deodorized oil. In order to create mayonnaises with increased biological value in terms of essential fatty acid content, samples of mayonnaise sauce with partial or complete replacement of the oil-fat base with blended deodorized oil were studied, thereby ensuring the necessary balance of PUFA [5].

Gum arabic is a natural thickener and stabilizer used in the food industry, in particular in the production of mayonnaise. Gum arabic helps to achieve the desired consistency of mayonnaise, giving it a creamy texture, prevents the ingredients from separating, maintaining the homogeneity of the product. As a natural polymer, gum arabic is considered a healthier alternative to synthetic additives. The use of gum arabic can extend the shelf life of mayonnaise. Gum arabic has practically no taste, which allows you to preserve the original taste of mayonnaise and is able to improve the creaminess and visual appeal of the product. Gum arabic is usually added at the emulsification stage, when oil and water are mixed.

Analysis of recent research and publications. Many studies by domestic and foreign scientists and others have been devoted to the determination of organoleptic, microbiological, physicochemical and functional-technological properties, the study of the fatty acid composition of mayonnaise sauces, vegetable oils and the development of emulsion-type sauce technologies based on them [1–8].

A number of scientists continue to work in this direction, since the indicated problem has not lost its relevance even today. A market analysis of mayonnaise sauce consumption shows that in modern society they have become one of the most sought-after products. However, this product does not correspond to the peculiarities of physiology and biochemical processes of the human body due to the increased amount of saturated fatty acids, as well as the presence of flavoring and technological food additives that are not beneficial to health. Convenience of consumption, high organoleptic indicators contribute to the fact that emulsion-type sauces are quite popular among consumers, with the classic mayonnaise sauce “Provencal” being in the greatest demand. The analysis of the Ukrainian sauce market shows that mayonnaise production accounts for about 49% of the total number of sauces. About 80% of consumers prefer this type of sauce, and 40% of the population consumes mayonnaise sauce at least several times a week.

Increasing the production of biologically complete multicomponent sauces (in particular, mayonnaise) is relevant in light of the concept of balanced nutrition, according to which a person’s daily diet should contain a sufficient amount of polyunsaturated fatty acids [7].

The main advantage of sauces is the potential for enriching the recipe composition with ingredients by one or more factors in order to most fully comply with their balanced nutrition formula [8].

However, despite the high nutritional value of sauces, including mayonnaise, they have their drawbacks, one of which is the low content of essential nutrients, in particular polyunsaturated fatty acids. The main oil-fat fraction of mayonnaise sauce contains a large amount of saturated fatty acids and is unstable to oxidation processes, so classic mayonnaise is not able to satisfy the human need for the necessary micronutrients and cannot maintain its quality indicators for a long time.

Partial introduction (25%, 50%) of blended oil into the composition of mayonnaises or complete replacement of refined deodorized sunflower oil with it causes high biological value. Therefore, the issue of developing mayonnaise based on blended oil, enriched with polyunsaturated fatty acids, biologically active components (cachetin, flavones and flavonoids), which will be important both for the full nutrition of the population and for ensuring high indicators of quality and safety of the sauce, is currently relevant.

Eggplant powders are an additional source of vitamins, which is especially important for regulating metabolism and improving the body’s resistance to various negative environmental factors. Vitamins are part of enzymes that provide important metabolic processes in the body. Water-soluble vitamins in eggplant powders (PP, B1, B2) contribute to cellular metabolism. The mineral composition of eggplant powders increases by an average of 2.5–3.0 times, where the vast majority is, mg/100g: calcium (48.5 ± 2.0), potassium (740.4 ± 2.0), iron (1.7 ± 0.5), phosphorus (98.80 ± 1.5), magnesium (26.18 ± 2.0). All these elements are a component of bone tissue, have radioprotective and anti-anemic properties, and therefore are vital for humans. The amount of vitamins of group B (B1 and B2), PP increases

more than 10 times and is, mg/100g: thiamine B1 – 0.40 ± 0.01 ; riboflavin B2 – 0.5 ± 0.06 ; nicotinic acid PP – 5.22 ± 0.10 . The increased level of mineral elements, vitamins of group B, niacin in eggplant powders will contribute to the overall strengthening of the body and the strengthening of the protective effect of the immune system. And this, in turn, increases the body's resistance to adverse environmental factors.

The purpose of the article. The purpose of the work is to study the quality indicators of mayonnaise sauce with partial or complete replacement of the oil-fat fraction with blended oil and the use of gum arabic and eggplant powder. The main attention is paid to organoleptic and physicochemical indicators (effective viscosity, emulsion stability, acidity, acid and peroxide value), analysis of the fatty acid composition of the developed sauce samples based on blended oil, as well as changes in microbiological indicators during storage.

The methodological basis of the study is the process of developing the recipe composition of mayonnaise sauce using blended oil and tracking its quality and safety indicators.

Research methods – standard organoleptic, structural-mechanical, methods for determining the fatty acid composition, microbiological methods and processing the obtained data using modern computer programs.

The information base of the study is scientific articles, materials of international congresses and symposiums, scientific and practical conferences, regulatory and technical documentation, patents.

The object of the study is mayonnaise sauce with gum arabic, eggplant powder, and partial (25%, 50%) or complete replacement of the oil-fat fraction in the recipe with blended oil.

The subject of the study is the technology of mayonnaise sauce with partial (25%, 50%) or complete replacement of the oil-fat fraction in the recipe with blended oil and the use of gum arabic and eggplant powder.

The scientific novelty of the obtained results lies in the theoretical substantiation and experimental confirmation of the feasibility of using gum arabic, eggplant powder, and blended oil in mayonnaise sauce technology and its effect on organoleptic, physicochemical, microbiological indicators, and fatty acid composition.

Presentation of the main research material. In parallel, three samples of mayonnaise based on blended oil were prepared with a mass fraction of 25%, 50%, and 100% added to the recipe (Table 1).

Table 1

Production of mayonnaise based on blended oil with a mass fraction of 25%, 50% and 100% in the recipe

Name of ingredients	CONTROL	Mayonnaise samples		
		Test sample 1 (25%) M1	Test sample 2 (50%) M2	Test sample 3 (100%) M3
Refined deodorized sunflower oil	65,40	49,05	32,7	–
Blended oil	–	16,35	32,7	65,40
Egg powder	5,0	5,0	5,0	5,0
Skimmed milk powder	1,6	1,6	1,6	1,6
Gum Arabic	–	5	5	5
Eggplant powder	–	3	3	3
Mustard powder	0,75	0,75	0,75	0,75
Sodium bicarbonate	0,05	0,05	0,05	0,05
Sugar	1,5	1,5	1,5	1,5
Salt	1,0	1,0	1,0	1,0
Acetic acid	0,55	0,55	0,55	0,55
Water	24,15	24,15	24,15	24,15

The mayonnaise recipe in Table 1 was selected in accordance with the requirements of DSTU 4487-2015 “Mayonnaise and mayonnaise sauces” (Technical Committee “Oils, fats and products of their processing” (TC 86), 2015). The recipe for mayonnaise sauce “Provencal” with a mass fraction of fat of 67% was chosen as the control sample.

The next stage of the study was the determination of the organoleptic indicators of the developed mayonnaise samples.

The organoleptic characteristics of mayonnaise must meet the requirements of DSTU 4487-2015 “Mayonnaise and mayonnaise sauces” (Technical Committee “Oils, fats and products of their processing” (TC 86), 2015), which are presented in Table 2.

Table 2

Characterization of organoleptic parameters of mayonnaise based on blended oil and gum arabic

Indicator name	Characteristic
Consistency and appearance	Homogeneous creamy product
Taste and smell	The taste is slightly sharp, sour.
Color	White with a yellowish tint, uniform throughout the mass

The results of the obtained organoleptic indicators, given in Table 2, were carried out on a 5-point scale. The obtained data indicate that the use of blended oil in the technology of mayonnaise sauce has a positive effect on its organoleptic indicators. The consistency, appearance, color and smell of all samples (M1 and M2), which contained 25% and 50% of blended oil, respectively, were marked with the highest score (5 points), except for the mayonnaise sample with a complete replacement (100%) of the oil-fat fraction with blended oil. The sample (M3) was marked with the lowest taste score (4.6), since it had some deviations from the norm. To confirm the enrichment of the biological value of mayonnaise sauce based on blended oil, a study of the fatty acid composition of lipids of the developed samples with the control – mayonnaise “Provencal” (Table 3). The fatty acid composition of lipids was determined by the method of gas-liquid chromatography of fatty acid methyl esters. The studies were carried out on a gas-liquid chromatograph.

From the obtained data presented in Table 3, it can be seen that the ratio of fatty acids of the ω -3: ω -6 groups for lipids of the mayonnaise sauce sample (M2) was 1:4 (Table 3), which is the recommended ratio for functional food products. α -linolenic fatty acid belongs to the ω -3 fatty acids listed above. Linoleic and γ -linolenic acids belong to the ω -6. The optimal overall ratio of ω -3 to ω -6 in the diet for the age group 18–45 years is 1:3/1:6, respectively, and it must be maintained. It is undesirable to exceed the value of 1:10. This stimulates the development of inflammatory processes in the body. The lipids of the control sample of mayonnaise “Provansal” do not contain ω -6 and ω -3 fatty acids. Monounsaturated fatty acids are contained in the lipids of the control sauce sample twice as much as in the mayonnaise sauce sample (M2), and 2.2 times more than in the lipids of the mayonnaise sauce sample (M3). The presented data on the qualitative characteristics of the developed mayonnaise sauce samples based on blended oil indicate that the best indicators in terms of the ratio of fatty acids of the ω -3: ω -6 groups were obtained by the sauce sample (M2). It should be noted that the highest indicators in terms of the content of fatty acids of the ω -3 and ω -6 groups in lipids were obtained by the mayonnaise sample (M3). However, the ratio of fatty acids of the ω -3: ω -6 groups in the lipids of the mayonnaise sample (M3) is 1:7/1:9, which does not correspond to the optimal one. Important for emulsion-type sauces are the structure indicators (effective viscosity and emulsion stability) and quality indicators (pH, acid number and peroxide number), which characterize the resistance of the product to mechanical influences and storage stability.

Table 3

Fatty acid composition of lipids of mayonnaise based on blended oil

Indicator name	Content g per 100 g of product			
	CONTROL	Test sample 1 (25%) M1	Test sample 2 (50%) M2	Test sample 3 (100%) M3
<i>Saturated fatty acids</i>	7,96	8,337	13,895	16,674
14:0 Myristic acid	0,01	0,050	0,084	0,101
16:0 Palmitic acid	4,48	4,774	7,956	9,547
17:0 Heptadecanoic acid		0,036	0,060	0,072
18:0 Stearic acid	2,79	2,521	4,201	5,041
20:0 Arachidonic acid	0,2	0,696	1,160	1,392
22:0 Behenic acid	0,46	0,166	0,277	0,332
24:0 Lignoceric acid	–	0,094	0,157	0,188
<i>Monounsaturated fatty acids</i>	16,88	18,636	31,06	37,272
16:1 Palmitoleic acid	0,08	0,175	0,291	0,349
17:1 Octadecenoic acid	–	0,019	0,032	0,038
18:1 Oleic acid	16,8	16,876	28,127	33,752
20:1 Gadoleic acid	–	0,059	0,099	0,119
22:1 Erucic acid	–	1,507	2,511	3,013
<i>Polyunsaturated fatty acids</i>	39,27	33,027	55,045	66,054
18:2 Linoleic acid	39,24	14,473	24,122	28,946
18:3 Linolenic acid	0,03	18,554	30,923	37,108
18:3 γ -linolenic acid	–	6,517	10,862	13,034
18:3 α -linolenic acid	–	12,037	20,061	24,073

The stability of the mayonnaise emulsion depends on the composition of the oil-fat base, the recipe components used as emulsifiers of powdered milk, egg, mustard, and eggplant powder, which participate in creating the structure of mayonnaise, as well as on compliance with the optimal parameters of the technological process, primarily homogenization. The study of the change in emulsion stability was carried out by the method of centrifugal force. For this, the control and experimental samples of mayonnaise were centrifuged for 5 minutes at a rotation speed of 3000^{-1} s. The results of the study of these indicators are presented in Table 4.

Table 4

Physico-chemical parameters of mayonnaise based on blended oil and gumarabic

Indicator name	Mayonnaise samples			
	CONTROL	Test sample 1 (25%)	Test sample 2 (50%)	Test sample 3 (100%)
Effective viscosity, $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ (at a shear rate of 3 s^{-1})	9,5	9,5	9,5	9,3
Emulsion stability, %	99	100	100	99
pH	4,5	4,5	4,5	4,6
Acid value, ml KOH/kg	0,2	0,2	0,2	0,2
Peroxide number, $\frac{1}{2}\text{O}_2$, mol/kg	2,3	2,5	2,6	2,9

The results of the conducted studies (Table 4) confirm the possibility of producing all mayonnaise samples based on blended oil, since their physical and chemical indicators fully comply with the established requirements of regulatory documentation. The percentage of unbroken emulsion for the experimental samples of mayonnaise (M1) and (M2) with a mass fraction of blended oil of 25% and 50% was 100%, which is 1% less than for the control and experimental sample of mayonnaise (M3).

As a result of the conducted studies, the emulsion stability indicator corresponds to the norm for all mayonnaise samples. The effective viscosity for the control and experimental samples of mayonnaise (M1, M2 and M3) was within the norm. However, the effective viscosity index for the experimental mayonnaise sample (M3) with complete replacement of the oil-fat fraction with blended oil was $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ less than for other experimental mayonnaise samples (M1 and M2). The results obtained for the active acidity indices indicate, however, that the pH for all developed mayonnaise samples was within normal limits. The acid number indices did not differ for the control and experimental mayonnaise samples (M1, M2, M3). The peroxide number indices for the mayonnaise sample (M3) almost reach the limit value for this type of product – 3.1 mmol of active oxygen/kg.

In order to control the safety indices for the developed mayonnaise samples, the change in microbiological indices during storage (28 days) was determined (Table 5).

Studies of microbiological indicators (Table 5) of the control sample of mayonnaise and experimental samples with partial or complete replacement of the oil-fat fraction with blended oil during storage (28 days) indicate that the conditionally pathogenic and pathogenic microflora are within acceptable values.

Table 5

Microbiological indicators of mayonnaise based on blended oil and gum arabic during storage

Indicator name	Permissible level	Sample	Shelf life, days			
			0	10	14	28
Escherichia coli (coliform) bacteria, in 0.01g of mayonnaise	Not allowed According to DSTU 6003:2008	CONTROL	–	–	–	–
		Experimental samples	–	–	–	–
Pathogenic microorganisms, including Salmonella bacteria, in 25g of mayonnaise	Not allowed	CONTROL	–	–	–	–
		Experimental samples	–	–	–	–
Staphylococcus aureus, in 1g of mayonnaise, no more than	$5,0 \times 10^2$	CONTROL	$2,7 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$
		Experimental samples	$2,7 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$	$2,7 \times 10^2$
Listeria monocytogenes, in 25g of mayonnaise	Not allowed	CONTROL	–	–	–	–
		Experimental samples	–	–	–	–

Determination of BGCP in 0.01 g of experimental and control samples of mayonnaise indicate their absence in the studied products. The number of bacteria of the Staphylococcus aureus group in the control sample of mayonnaise and experimental samples throughout the entire storage period is the same and is 2.7×10^2 .

Conclusions. The paper theoretically and experimentally substantiates the feasibility of using blended oil in the development of mayonnaise sauce technology and develops recipes for these mayonnaises. Based on organoleptic analysis, it was determined that the use of blended oil in mayonnaise sauce technology has a positive effect on its organoleptic indicators. The consistency, appearance, color and smell of all samples received a positive assessment. The highest score (5 points) was given to the mayonnaise sample containing 50% blended oil (M2). The study of the fatty acid composition of lipids showed that the highest indicators in terms of the content of fatty acids of the ω -3 and ω -6 groups were obtained by the lipids of the mayonnaise sample (M3). However, the ratio of fatty acids in lipids of the ω -3: ω -6 groups in the mayonnaise sample (M3) is 1:7/1:9, which does not correspond to the optimal one. The optimal ratio of fatty acids in lipids of the ω -3: ω -6 groups as 1:4 is possessed by the mayonnaise sauce sample (M2). The analysis of the fatty acid composition also confirmed the functionality of all developed mayonnaise samples.



The article establishes that all developed samples of mayonnaise based on blended oil, gum arabic, and eggplant powder fully comply with the regulatory indicators of structure (effective viscosity and emulsion stability) and quality (pH, acid number, and peroxide number), which characterize the product's resistance to mechanical stress and storage stability for emulsion-type sauces.

It was investigated that the microbiological indicators of the control mayonnaise sample and experimental samples with partial or complete replacement of the oil-fat fraction with blended oil during storage (28 days) indicate that the opportunistic and pathogenic microflora are within the permissible values. The number of *Staphylococcus aureus* bacteria in the control sample of mayonnaise and the experimental samples throughout the entire storage period is the same and is 2.7×10^2 . The studied quality indicators make it possible to substantiate the technology of mayonnaise sauce based on blended oil, gum arabic, and eggplant powder with increased biological value. The implementation of this technology will expand the range and contribute to obtaining a high-quality and safe food product.

Bibliography

1. Інноваційні технології харчової продукції функціонального призначення : монографія О.І. Черевко. Харків: ХДУХТ, 2017. С. 591.
2. Yatsenko V.M. Financial-economic and innovative support of entrepreneurship development in the spheres of economy, tourism and hotel-restaurant business. Agenda Publishing House, Coventry, United Kingdom. 2017.
3. Чепурда Г.М. Стратегії сталого розвитку в туризмі та готельно-ресторанному бізнесі: можливості і проблеми запровадження в Україні. ЧДТУ, 2021. С. 189.
4. Nutritional value of a dry soluble gerodietetic product for enteral nutrition D. Antiushko, T. Bozhko *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 5. С. 35–42.
5. Галицька Л.Ю., Хижняк О.О. Нетрадиційна олієвмісна сировина в Україні. *Тези доповідей Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей* : матеріали 3 Міжнародної науково-технічної конференції 2014. Київ : НУХТ, 2014 С. 144–146.
6. Корецька І.Л., Зінченко Т.В. Оцінювання нових харчових виробів за допомогою критерію «Багатокутник якості». *Наукові праці НУХТ*. 2003. № 14. С. 64–65.
7. Пересічний М.І., Кравченко М.Ф. Технологія продукції громадського харчування з використанням біологічно активних добавок : монографія. Київ : КНТЕУ, 2003. С. 322.
8. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О. Харчові порошки з рослинної сировини. Класифікація, методи отримання, аналіз ринку. *Biotechnologia Acta*. 2010. № 3(5). С. 31–42.

Стаття надійшла до редакції: 20.04.2025 р.

А. В. Антоненко, Л. В. Баль-Прилипко

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ЯКІСТЬ ТА БЕЗПЕЧНІСТЬ МАЙОНЕЗУ НА ОСНОВІ КУПАЖОВАНОЇ ОЛІЇ, ПОРОШКА З БАКЛАЖАНІВ ТА ГУМІАРАБІКА

Анотація

У роботі обґрунтовано теоретично і експериментально доцільність використання гуміарабіка, порошка з баклажанів та купажованої олії для розроблення технології майонезу, а також створено рецептури різних варіантів цього соусу. Результати органолептичного аналізу показали, що застосування гуміарабіку, порошка з баклажанів та купажованої олії позитивно впливає на органолептичні властивості майонезу. Консистенція, зовнішній вигляд, колір і аромат усіх зразків отримали позитивні оцінки, причому зразок майонезу з 50% купажованої олії (М2) отримав найвищу оцінку (5 балів). Дослідження жирно-кислотного складу ліпідів продемонструвало, що зразок майонезу (М3) має найвищі результати за вмістом жирних кислот груп ω -3 та



ω-6. Проте співвідношення жирних кислот у зразку (М3) становить 1:7/1:9, що не є оптимальним. Найкращим співвідношенням жирних кислот, яке дорівнює 1:4, характеризується зразок майонезу (М2). Аналіз жирно-кислотного складу також підтвердив функціональність усіх зразків майонезу. Визначено, що всі розроблені зразки на основі купажованої олії відповідають нормативам за показниками структури (в'язкість і стійкість емульсії) і якості (рН, кислотне і перекисне числа), які свідчать про стійкість продукту до механічного впливу та стабільність під час зберігання. Було з'ясовано, що мікробіологічні показники контрольного зразка та дослідних зразків, в яких частково або повністю замінено олієжирову фракцію на купажовану олію, протягом 28 днів зберігання показують, що умовно патогенна та патогенна мікрофлора знаходиться в межах допустимих значень. Кількість бактерій групи *Staphylococcus aureus* у контрольному та дослідних зразках залишалася сталою на рівні $2,7 \times 10^2$ протягом усього терміну зберігання. Отримані результати свідчать про можливість обґрунтування технології майонезу на основі гуміарабіка, порошка з баклажанів та купажованої олії з підвищеною біологічною цінністю.

Ключові слова: соуси, майонез, олія, гуміарабік, порошок із баклажанів, поліненасичені жирні кислоти (ПНЖК), функціональний продукт, дієтичні добавки, технологія майонезу.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-32>

УДК 664

С. П. Боковець, д.ф.

ORCID: 0000-0003-0466-2426

О. Кошель, д.ф., доцент

ORCID: 0000-0002-2184-2106

Сумський національний аграрний університет

e-mail: sergiy_bokovec@ukr.net

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КУЛІНАРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ У МОЛЕКУЛЯРНІЙ ГАСТРОНОМІЇ

Анотація. У статті розглянуто сучасне спеціалізоване обладнання, що використовується в молекулярній гастрономії, зокрема роторні випарники, су-від пристрої, сифони для спінювання, ультразвукові гомогенізатори та кріогенне охолодження. Проаналізовано принципи їх роботи, функціональні можливості та вплив на фізико-хімічні властивості харчових продуктів.

Огляд наукових досліджень показав, що впровадження цих технологій дозволяє розширити кулінарні можливості, забезпечити стабільну якість страв та сприяти інтеграції молекулярної гастрономії в традиційні ресторанні формати. Отримані результати підтверджують перспективність подальшого розвитку цієї галузі та її значення для інноваційної ресторанної індустрії.

Ключові слова: молекулярна гастрономія, обладнання, роторний випарник, су-від, ультразвуковий гомогенізатор, кріогенне охолодження, організація виробництва, ресторанна індустрія.

Постановка проблеми. Сучасна кулінарія стрімко розвивається, впроваджуючи новітні технології та наукові підходи до приготування їжі. Одним із найбільш інноваційних напрямів є молекулярна гастрономія – галузь, що поєднує кулінарію, фізику та хімію для створення унікальних текстур, форм і смакових комбінацій. Її становлення стало можливим завдяки появі спеціалізованого технологічного обладнання, яке дозволяє змінювати фізико-хімічні властивості продуктів на молекулярному рівні. Вакуумні випарники, ротаційні дистилятори, термостати, сифони та кріогенні установки стали невід'ємною частиною цього напрямку, відкриваючи перед кухарями нові можливості для кулінарних експериментів.

Молекулярна гастрономія, що виникла в результаті численних експериментів, перетворилася на окремий напрям у кулінарному мистецтві [1; 2; 3; 4]. Завдяки інноваційним методам оброблення продуктів удалося створити унікальні страви, які виходять за межі традиційних уявлень про їжу. Вперше з'явилися кулінарні витвори, приготовані за допомогою рідкого азоту, текстуризаторів, а також ферментів, що здатні змінювати структуру м'язових тканин [5; 6; 7]. Подібні експерименти дають змогу отримати несподівані гастрономічні поєднання: пасту з апельсина, цукерки з печінки чи каву з часником, що викликає захоплення та подив.

Для успішного приготування страв у цьому напрямі кухар має не лише досконало володіти технологічними процесами, а й глибоко розуміти принципи хімії та фізики, адже створення молекулярних страв ґрунтується на законах цих наук [8; 9]. Харчові продукти розглядаються не просто як інгредієнти, а як складні речовини, молекулярний склад яких можна змінювати та піддавати різним реакціям, прогнозуючи кінцевий результат [10; 11; 12]. Важливою перевагою молекулярної гастрономії є її освітня роль – вона сприяє популяризації харчових наук, формує новий підхід до перероблення продуктів та відкриває нові перспективи у сфері кулінарних інновацій.



Однак, незважаючи на стрімкий розвиток молекулярної гастрономії, цей напрям досі залишається предметом наукових дискусій та викликає неоднозначне ставлення. Деякі дослідники вбачають у ньому радикальну зміну кулінарної традиції, що може трансформувати майбутнє харчової індустрії, тоді як інші наголошують на складності технологічних процесів і необхідності дорогого обладнання, що ускладнює його масове впровадження.

Аналіз останніх джерел. У статті [13] описано використання спеціального обладнання для створення гелевих кульок із рідким центром, що надає стравам унікальної текстури та презентації. Представлено результати практичних досліджень техніки сферифікації – методу молекулярних технологій, що дозволяє схарактеризувати основні переваги цього напрямку розвитку продукції ресторанного господарства.

Автори [14] досліджували застосування сувід-апаратів, а також технік молекулярної кухні, як-от сферифікація, гелеутворення, зневоднення, піноутворення, газування, швидке заморожування, згущення, sous-vide (приготування у вакуумі) та склеювання. Автори підкреслюють, що застосування спеціального обладнання та інгредієнтів дозволяє змінювати вигляд страв, їх смаки та робити презентацію феєричною, що сприяє підвищенню рівня ресторанного сервісу.

У роботі [15] розглядається Croquanter-техніка – метод молекулярної гастрономії, що передбачає отримання хрустких листків (чіпсів) із фруктів, овочів та йогурту. Ця техніка вимагає використання спеціального обладнання для зневоднення продуктів, що дозволяє створювати нові текстури та смаки у стравах.

У дослідженні [16] авторами розглядаються еспумізація, емульгування, гелеутворення та аромадистиляція харчових продуктів. Зокрема, автори аналізують використання такого обладнання, як-от: гомогенізатор – для створення стійких емульсій, сифон для піни – для аерування рідин, роторний випарник – для відокремлення ароматичних речовин, лазерний термометр – для точного контролю температури під час процесів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є аналіз сучасного спеціалізованого устаткування, що використовується в молекулярній гастрономії. Дослідження спрямовано на виявлення основних принципів роботи таких технологій, як сферифікація, гелеутворення, аромадистиляція, дегідратація та кріогенне охолодження, а також оцінювання їх практичного застосування в закладах ресторанного господарства.

Матеріали дослідження. Більшість технологічних процесів у молекулярній гастрономії неможливо реалізувати без спеціалізованого обладнання, яке за своєю складністю можна порівняти з приладами, що використовуються в наукових лабораторіях або високотехнологічному виробництві. Зокрема, звичайна центрифуга, яка в традиційній кулінарії застосовується для відокремлення вершків від молока, в молекулярній кухні слугує засобом для отримання паст і пін із різноманітних продуктів, наприклад, томатів чи перцю.

Ще одним важливим пристроєм є роторний випарник, що дозволяє контролювати тиск під час термічного оброблення інгредієнтів. Завдяки цьому рідини можуть закипати за нижчих температур, що дає змогу зберігати ефірні олії та леткі ароматичні сполуки. Наприклад, використовуючи цю технологію, можна надати рибі виразний цитрусовий аромат або, навпаки, надати фруктам смак морепродуктів.

Одним із революційних підходів до приготування м'яса та риби став метод COOK-IN, розроблений відомим шеф-кухарем Стефаном Марквардом у 2001 році [17]. Ідея створення цього пристрою має досить незвичну історію. Побачивши ручний повітродув компанії STEINEL, призначений для покрівельних, електромонтажних і малярних робіт, Марквард замислився над тим, щоб використати потужний гарячий повітряний потік для швидкого й ефективного приготування продуктів. Такий підхід дозволив би досягти ефекту аерогрилю без застосування відкритого вогню.

Головна особливість Стефан-гриля, що відрізняє його від традиційних гриль-пристроїв, полягає в методі теплового оброблення. Температура всередині продукту може сягати 650 °C без безпосереднього контакту з відкритим полум'ям. Окрім того, шматки м'яса або риби нанижуються на спеціальний шомпол і прожарюються зсередини, що й дало назву технології – cook-in (від англ. «готувати зсередини»). Такий метод забезпечує утворення апетитної золотистої скоринки всередині продукту, тоді як його зовнішня частина зберігає ніжну текстуру та природну соковитість. Додатково в процесі приготування використовується спеціальна насадка, яка інтенсивно обдуває поверхню страви гарячим повітряним потоком, що входить у комплект пристрою.

Вакуумна установка Cookvac – це інноваційна розробка іспанських шеф-кухарів, що поєднує функції компактного пристрою для приготування страв та технологію вакуумного просочення [18]. Основний принцип її роботи базується на створенні штучного вакууму, який значно знижує рівень кисню всередині камери, що своєю чергою дозволяє готувати продукти за знижених температур. Завдяки такому методу приготування зберігається природна текстура, колір та корисні речовини інгредієнтів. Однією з ключових особливостей Cookvac є ефект «губки»: після відновлення звичайного тиску всередині пристрою продукти активно поглинають рідину, яка їх оточує. Це відкриває широкі можливості для експериментів із поєднанням різних маринадів, соусів та ароматичних добавок.

Приготування у вакуумі також сприяє збереженню насиченого кольору продуктів, особливо тих, що містять міоглобін, як-от м'ясо та яскраві овочі. Оскільки процес відбувається за температури нижче 100 °C, виключається активне кипіння, що забезпечує делікатне приготування за принципом аль-денте. Глибоке проникнення рідини всередину продукту на клітинному рівні робить цей метод одним із найефективніших для збереження природного смаку та структури їжі.

Метод Sous-vide, що в перекладі з французької означає «під вакуумом», було розроблено шеф-кухарем Жоржем Пралусом, який вперше застосував його для приготування фуагри. Він помітив, що після оброблення за цією технологією печінка набуває ніжнішої текстури та більш насиченого смаку. Sous-vide передбачає тривале приготування продуктів у водяному середовищі за низьких температур – зазвичай близько 60 °C або навіть нижче [19]. Для реалізації цієї методики необхідне спеціальне обладнання – термостатичні водяні лазні, які підтримують стабільну температуру з високою точністю. Процес розпочинається з того, що інгредієнти поміщають у герметичні вакуумні пакети, звідки видаляється повітря. Після цього запаюють пакети занурюють у воду, що нагріта до заданої температури, і залишають на тривалий час – іноді понад 72 години.

Пакоджетинг – це технологія, що отримала назву на честь гомогенізаторів марки RascoJet. Її основна особливість полягає в тому, що продукти, зокрема різні пюреподібні маси, зберігаються за температури до –22 °C [20]. Унікальність процесу полягає в досягненні ідеальної однорідності без необхідності додавання хімічних або природних сполучних агентів, які зазвичай використовуються в харчовій промисловості для зв'язування продуктів. Наприклад, у виробництві паштетів, варених ковбас і сосисок часто застосовують яйця або спеціальні хімічні стабілізатори. RascoJet досягає подібного ефекту завдяки надтонкому подрібненню замороженої маси до стану ніжної кремоподібної текстури. Наприклад, телячий фарш із додаванням спецій і сухарів можна залишити в морозильній камері на 24 години, а потім подрібнити в RascoJet. Отриману гомогенну масу фасують у полімерний рукав, герметично запечатують і піддають термічній обробці за 130–140 °C упродовж години. Після охолодження виходить надзвичайно ніжний і однорідний продукт, що має стабільну структуру.

Термоміксинг – це технологія, що поєднує процеси змішування та подрібнення інгредієнтів із постійним нагріванням. Фактично термоміксер можна порівняти з мініатюрним варильним



котлом, обладнаним функцією перемішування [21]. Інноваційність сучасних термоміксерів полягає в особливій конструкції ножів, які дозволяють ефективно обробляти як заморожені, так і делікатні продукти, наприклад, філе червоної риби або відварені спагеті.

Чаша термоміксера може нагріватися до $+120^{\circ}\text{C}$, що робить можливим розплавлення масла, жиру, шоколаду, карамелі, а також приготування соусів, мусів, паст та глазурей. Окрім базових функцій, апарат здатний виконувати такі операції, як варіння, емульгування, гомогенізація, пасерування, бланшування, подрібнення, тушкування, карамелізація та розтоплення інгредієнтів. Завдяки цьому термоміксинг широко застосовується в сучасній гастрономії для створення складних багатокомпонентних страв з ідеальною текстурою та смаком.

Термоміксер є незамінним інструментом для приготування пюре, суфле, сирів, а також м'ясних і рибних фаршів та начинок. Завдяки своїй універсальності, високій швидкості оброблення продуктів та здатності працювати з твердими інгредієнтами, як-от горіхи, сухарі чи лід, цей прилад набув великої популярності в молекулярній кухні. Провідні ресторани світу активно використовують термоміксери для створення складних текстур і вишуканих страв.

Фрізери (морозильники) є важливими пристроями у професійній кухні, особливо для інноваційних і креативних шеф-кухарів [22]. До такого обладнання висуваються підвищені вимоги: воно повинно бути компактним, але водночас мати достатній об'єм для зберігання продуктів. Спеціально для ресторанів розроблено шок-фрізери з вертикальним дизайном, що дозволяє економити простір. Головна перевага цих пристроїв – висока швидкість заморожування: 5 кг продуктів охолоджуються до $-25\ldots-35^{\circ}\text{C}$ приблизно за годину. Для збереження якості ягід, грибів та морепродуктів їх рекомендується заморожувати до -65°C . Вартість такого обладнання може сягати 5000 євро.

Ароматистиляція – сучасний напрям у кулінарії, що базується на принципах дистиляції. Сам процес, назва якого походить від латинського *destillatio* (що означає «стікання краплями»), передбачає розділення суміші летких рідин шляхом випаровування під дією тепла з подальшою конденсацією пари [23]. Оскільки кожна речовина має свою температуру кипіння, дистиляція дозволяє виокремлювати аромати та есенції з рідких, твердих і пастоподібних продуктів. Ця технологія відкриває нові можливості у створенні насичених смакових композицій, що активно використовуються в сучасній гастрономії.

Анхель Леон, один із найвидатніших сучасних шеф-кухарів Іспанії, у співпраці з Департаментом харчових технологій університету Кадіса створив інноваційний пристрій для роботи з бульйонами. Відомий кулінар Ферран Адрія назвав цей винахід «новою ерою» в приготуванні супів [24]. Унікальність приладу полягає в тому, що в його ручний фільтр вставляється спеціальна капсула, виготовлена з діатомових водоростей, що існували ще в палеолітичний період. Завдяки цій капсулі бульйон, проходячи через фільтр за будь-якої температури, очищується від жиру на 94%. Сировину для виготовлення капсул видобувають в іспанських кар'єрах біля узбережжя, а основним її компонентом є кремнезем, що становить близько 90% його складу. Одна капсула дозволяє очистити до 25 літрів бульйону, не змінюючи його смаку, адже матеріал абсолютно інертний. Це дає змогу створювати прозорі, легкі та дієтичні супи, що зберігають усі відтінки смаку своїх інгредієнтів, дивуючи гостей елегантною чистотою та глибиною аромату.

Система FoodPairing відкриває нові горизонти у створенні унікальних смакових поєднань. Вона не базується на інтуїції чи традиційних рецептах, а ґрунтується на науковому підході та дослідженнях у сфері харчової хімії [25]. Основний принцип цієї системи полягає в тому, що продукти можуть поєднуватися лише в тому разі, якщо мають спільні ключові ароматичні компоненти. Це дозволяє шеф-кухарям розширювати межі гастрономії, незважаючи на класичні кулінарні канони. Для досягнення успіху в молекулярній кухні необхідні не лише високі кулінарні навички, а й глибокі знання у сфері фізики та хімії, адже кожен продукт

є складною системою, що підкоряється законам науки, а процеси, які відбуваються з ним під час приготування, можна аналізувати, передбачати й використовувати для створення нових унікальних страв.

Висновки. Цілком закономірно, що наука про властивості речовин звернула увагу на кулінарію, адже ця сфера дозволяє отримувати результати за короткий проміжок часу. Сучасне спеціалізоване устаткування для молекулярної гастрономії дозволяє досягати принципово нових органолептичних характеристик продуктів, розширюючи можливості сучасної ресторанної індустрії. Використання роторних випарників, сифони для спінювання, термостати су-від, ультразвукові гомогенізатори та криогенне обладнання дозволяє кухарям впливати на фізико-хімічні властивості інгредієнтів, зберігаючи їх природну структуру та покращуючи смакові якості.

Список використаних джерел

1. Nigel T. Andersen, Jeff Z. Y. Chen. Helical Wrapping of Cylindrical Tubes by Wormlike-Chain Polymers. *Macromolecules*. 2023, 56 (8), 3246–3254. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.3c00111>
2. Наконечна Ю.Г., Люлько М.В., Шевченко Д.Г. Сферифікація як метод молекулярної кухні. The world of science and innovation. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference. London, United Kingdom: Cognum Publishing House. 2020.
3. Sivakumaran K., Prabodhani W. An overview of the applications molecular gastronomy in food industry. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2018, 3(3), 35–40.
4. Liu, Yingzhe; Chipot, Christophe; Shao, Xueguang; Cai, Wensheng Solubilizing Carbon Nanotubes through Noncovalent Functionalization. Insight from the Reversible Wrapping of Alginic Acid around a Single-Walled Carbon Nanotube. ACS Publications. Collection. 2016, <https://doi.org/10.1021/jp9110772>
5. Zixi Li, Wenduo Chen, Jiayin Liu, Dazhi Jiang. Can Linear Conjugated Polymers Form Stable Helical Structures on the Carbon Nanotubes. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022, 14 (43), 49189–49198. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c14771>
6. Daniel James Lundberg, Michael S. Strano. Approximate Corona Phase Hamiltonian for Individual Cylindrical Nanoparticle-Polymer Interactions. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2022, 126 (1), 347–354. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.1c09998>
7. Sivakumaran K., Prabodhani W. An overview of the applications molecular gastronomy in food industry. *Int. J. Food Sci. Nutr*, 2018, vol. 3, pp. 35–40.
8. Halford B. The Science of Spherification. *Chemical & Engineering News*, 2014, vol. 92 (42), pp. 35–36.
9. Горшкова Л., Павлюк В., Ярмолук Д. Застосування технологій молекулярної кухні як чинник зростання ресторанного сервісу. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2022. № 1 (5). С. 15–20. [https://doi.org/10.32782/2708-4949.1\(5\).2022.3](https://doi.org/10.32782/2708-4949.1(5).2022.3) ; [https://doi.org/10.32782/2708-4949.1\(5\).2022.3](https://doi.org/10.32782/2708-4949.1(5).2022.3)
10. D'Angelo G., Hansen H.N. and Hart A.J. Molecular gastronomy meets 3D printing: Layered construction via reverse spherification. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, vol. 3(3), pp. 152–159.
11. Jeong K., Hyeonbin O., Shin S.Y. Effects of sous-vide method at different temperatures, times and vacuum degrees on the quality, structural, and microbiological properties of pork ham. *Meat science*, 2018, no. 143, pp. 1–7.
12. Застосування методів молекулярної кухні для виробництва оздоровчих десертів. Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності. / І.Р. Біленька та ін. *Матеріали третьої Міжнар. наук.-практ. конф., 04–06 вересня 2019 р.; Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі, Таврійський держ. агротехнологічний ун-т*. Харків : ХДУХТ, 2019. С. 104–105.
13. Del Moral, R. G. Gastronomic Paradigms in Contemporary Western Cuisine: From French Haute Cuisine to Mass Media Gastronomy. *Frontiers in nutrition*, 2020, 6, 192. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00192>
14. Шемет В.Я., Гулай О.І., Мороз І.А. Фізикохімічні аспекти молекулярної гастрономії. *Наукові праці НУХТ*. 2021. Т. 27. № 3. С. 163–171. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-3-19>
15. M. Saquib Hasnain, Syed Anees Ahmad, Mohammad Niyaz Hoda, Sanjay Rishishwar, Poonam Rishishwar, Amit Kumar Nayak. Stimuli-responsive carbon nanotubes for targeted drug delivery. 2019, 321–344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101995-5.00015-5>



16. Бабич Д.В., Проскуріна Т.В., Маковій Д.Д. Удосконалення організаційної структури управління як важливий механізм управління сучасним рестораном. *Економіка та управління ресторанами*. 2018. Вип. 24. 114 с.
17. Зайченко К.С. Методи та моделі формування організаційної структури інноваційно-активного малого ресторану: сутність та практичне значення. *Економіка та держава*. 2019. № 2. 176 с.
18. Вплив застосування технології Sous Vide на різні види м'яса птиці / В.М. Пасічний та ін. *Харчова промисловість*. 2018. № 24. С. 71–76.
19. Гармаш Д.В., Пасічний В.М. Вплив застосування технології sous vide на функціонально-технологічні характеристики продуктів на основі різних видів м'ясної сировини. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Нові рішення в сучасних технологіях: зб. наук. пр. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. № 1. С. 67–74.
20. Коваль О.А. Обладнання для реалізації технології «sous vide» в закладах ресторанного господарства. *Інноваційні технології в готельно-ресторанному бізнесі* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, 22-23 березня 2017 р. Київ : НУХТ, 2017. С. 176–178.
21. Винникова Л.Г. Технология мясных продуктов. *Теоретические основы и практические рекомендации*. Київ : Освіта України, 2017. 364 с.
22. Ayesha Kausar. Self-healing aeronautical nanocomposites. 2023, 263–296. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99657-0.00001-6>
23. Karina Panczyk, Karolina Gaweda, Mateusz Drach, Wojciech Plazinski. Extension of the GROMOS 56a6CARBO/CARBO_R Force Field for Charged, Protonated, and Esterified Uronates. *The Journal of Physical Chemistry B* 2018, 122 (14), 3696–3710. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.7b11548>

Стаття надійшла до редакції 20.03.2025 р.

S. Bokovets, O. Koshel
Sumy National Agrarian University

MODERN TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR CULINARY EXPERIMENTS IN MOLECULAR GASTRONOMY

Summary

The article reviews modern specialized equipment used in molecular gastronomy, including rotary evaporators, sous vide devices, foaming siphons, ultrasonic homogenizers, and cryogenic cooling. The principles of their operation, functionality, and impact on the physical and chemical properties of food are analyzed.

A review of scientific research has shown that the introduction of these technologies allows to expand culinary possibilities, ensure consistent quality of dishes and promote the integration of molecular gastronomy into traditional restaurant formats. The obtained results confirm the prospects for further development of this industry and its importance for the innovative restaurant industry.

Keywords: molecular gastronomy, equipment, rotary evaporator, sous vide, ultrasonic homogenizer, cryogenic cooling, production organization, restaurant industry.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-33>

УДК 663.44

С. П. Боковець, д.ф.

ORCID: 0000-0003-0466-2426

Т. І. Маренкова.

ORCID: 0000-0001-7481-0848

Сумський національний аграрний університет

e-mail: sergiy_bokovec@ukr.net

e-mail: tanya_201@ukr.net

ІННОВАЦІЙНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МАЛИХ ПИВОВАРЕНЬ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У статті розглядається вплив інноваційного технологічного обладнання на підвищення ефективності виробництва на малих пивоварнях. Особливу увагу приділено таким модульним системам, як Місго Cube та Combi Cube, що дозволяють оптимізувати процеси приготування та зброджування пивного сусла, а також забезпечують високу гнучкість і компактність під час експлуатації.

Визначено переваги використання передових технологій у порівнянні з традиційними методами пивоваріння, зокрема в контексті зниження енергоспоживання, покращення якості продукту та скорочення витрат. Враховано також упровадження автоматизованих систем управління, які дозволяють забезпечити стабільність виробничих процесів.

Оцінювання сучасного обладнання, представленого на ринку, дає можливість малим пивоварням досягти високих результатів за допомогою інноваційних рішень без значних капіталовкладень у масштабне виробництво.

Ключові слова: обладнання, крафт, міні-пивоварні, пивне сусло, крафтове пивоваріння, організація виробництва, виробництво пива.

Постановка проблеми. Останні десятиліття ознаменувалися стрімким технологічним прогресом, який суттєво вплинув на розвиток пивоварної галузі. Сучасне промислове пивоваріння використовує високотехнологічне обладнання, розроблене вже у ХХІ столітті, що забезпечує високу продуктивність та якість напоїв. Особливості конструкції, принципи роботи та інноваційні можливості такого устаткування висвітлено в спеціалізованих виданнях та науково-виробничих журналах [1–4].

Паралельно з масштабним виробництвом розвивається крафтове пивоваріння, яке набирає популярності серед споживачів. Попит на свіже, натуральне пиво стимулював появу невеликих пивоварень, що пропонують альтернативу продукції великих компаній [5]. Це явище є відповіддю на зміну ринку, адже великі пивоварні орієнтуються переважно на масове виробництво з тривалими термінами зберігання, що не завжди відповідає очікуванням справжніх поціновувачів пива.

Проте, попри динамічний розвиток, обладнання малих пивоварень значно поступається за технологічним рівнем устаткуванню промислових гігантів. Це обмежує впровадження сучасних методів отримання пивного сусла, які демонструють високу ефективність на великих підприємствах [6]. Таким чином, подальший розвиток крафтового пивоваріння залежатиме від модернізації обладнання та адаптації передових технологій, що дозволить малим виробництвам не лише зберегти автентичність напою, а й досягти високих стандартів якості та енергоефективності.



В останні роки для малих пивоварень важливими стали питання оптимізації виробничих процесів, упровадження енергозберігаючих технологій, а також автоматизації та цифровізації виробництва. З огляду на це з'являються нові інноваційні рішення, які дозволяють зменшити витрати на сировину, електроенергію та воду, підвищити ефективність процесу бродіння і ферментації, а також скоротити час виготовлення пива без шкоди для його якості [7; 8].

Сучасне пивоварне обладнання, що використовує технології, як-то безперервне пивоваріння, автоматизовані системи контролю та управління, а також новітні системи охолодження і нагрівання, дозволяє малим пивоварням досягти значних знижок у собівартості продукції за збереження унікальності рецептури і смакових характеристик [9]. Окрім того, застосування таких рішень відкриває нові можливості для виробників, дозволяючи їм адаптуватися до вимог ринку, підвищувати конкурентоспроможність і, в кінцевому підсумку, залучати більше споживачів [10].

Однак, незважаючи на розвиток інноваційних технологій та наявність новітніх рішень для малих пивоварень, більшість підприємств стикається з низкою бар'єрів. Це можуть бути високі витрати на придбання та обслуговування сучасного обладнання, а також відсутність кваліфікованих кадрів для належного керування таким устаткуванням [11]. Крім того, не кожне мале підприємство готове до значних інвестицій у модернізацію виробництва, що ставить під питання впровадження новітніх технологій.

Таким чином, для підвищення ефективності пивоварного виробництва важливим є пошук оптимальних рішень, що поєднують доступність інноваційних технологій і економічну вигоду. У контексті цього завдання, зокрема, важливим є аналіз наявних моделей обладнання для малих пивоварень, їхніх конструктивних особливостей, а також переваг і недоліків в їх використанні. Вивчення сучасних тенденцій у розвитку технологій пивоваріння для малих підприємств дає змогу спрогнозувати можливі напрями вдосконалення процесів, що своєю чергою дозволить покращити якість продукції та конкурентоспроможність малих пивоварень на ринку.

Дослідження в цій сфері активно проводяться в наукових і професійних виданнях, а також технічних звітах виробників пивоварного устаткування. Це дозволяє відстежити останні інновації та технології, які можуть змінити сучасний підхід до виробництва пива.

Аналіз останніх джерел. Останні дослідження в галузі пивоваріння та технологічного обладнання для малих пивоварень вказують на значний прогрес у розробленні інноваційних рішень, спрямованих на підвищення ефективності виробництва та поліпшення якості пивного суслу. Відомо, що одним з основних напрямів є адаптація технологій, що застосовуються на великих підприємствах, до потреб малих виробництв. Наприклад, у роботі Р. Бліщ [12] розглядається впровадження компактних варочних систем і систем бродіння для малих пивоварень, що дозволяє суттєво знизити капітальні витрати та забезпечити високу якість продукції. Зазначено, що використання компактних варочних установок зі змінними модулями є важливим етапом для розвитку крафтового пивоваріння.

Дослідження, представлені в статті [13], присвячено аналізу сучасних систем фільтрації та очищення пива, зокрема таких, як мембранні фільтри і ультрафільтраційні установки. Автор зазначає, що фільтраційні системи з використанням мембран дозволяють значно покращити прозорість пива та знижують витрати на фільтрувальні матеріали, що є критично важливим для малих пивоварень, де кожен етап виробничого процесу має високу економічну значущість. Він також звертає увагу на важливість автоматизації таких процесів, що дозволяє підвищити стабільність виробництва та забезпечити високу якість продукції.

Дослідження [14; 15] зосереджені на розробленні ефективних систем контролю температури під час ферментації та зброджування пивного суслу. Вчені акцентують увагу на інтеграції інтелектуальних датчиків та систем автоматичного управління, які дозволяють оптимізувати

температурні режими, що своєю чергою покращує ароматичні та смакові властивості пива. За результатами їх досліджень встановлено, що використання сучасних систем контролю знижує енергетичні витрати та підвищує повторюваність рецептур пива, що важливо для крафтових виробництв, які прагнуть досягти стабільного результату за мінімальних витрат.

З іншого боку, в статті [16] обговорюються питання модернізації устаткування для зброджування пивного сусла та постійного поліпшення методів контролю якості в малих пивоварнях. Автори пропонують використання модульних бродильних установок, які дозволяють пивоварням варіювати продуктивність залежно від попиту і забезпечують вищу енергоефективність процесу. Такий підхід, як зазначено в [17], дає можливість малим виробництвам зберігати автентичність процесу пивоваріння за використання сучасних технологій.

Інші автори [18–20] приділяють увагу розвитку інноваційних систем для покращення процесу очищення пивного сусла та бродіння. Вони розглядають систему фільтрації пива з використанням новітніх технічних рішень для підвищення ефективності очищення та зниження витрат на матеріали, зокрема використання відновлювальних фільтрувальних елементів. Учені [21] також зазначають, що застосування автоматизованих систем для контролю якості пива на кожному етапі виробництва дає можливість досягати стабільності та підвищення якості готової продукції.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета дослідження – аналіз інноваційного устаткування для малих пивоварень як ключового фактора підвищення ефективності виробництва. Дослідження спрямовано на вивчення сучасних технологічних рішень, що дозволяють оптимізувати процеси варіння, бродіння, фільтрації та зберігання пива, а також на оцінювання їх впливу на якість кінцевого продукту, енергоефективність і економічну доцільність використання в малих виробництвах.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у розробленні обладнання для малих пивоварень, недостатньо дослідженими залишаються питання довготривалої експлуатації модульних систем в умовах різних масштабів виробництва, їх адаптації до нестандартних рецептур та специфічних технологічних процесів. Також потребують подальшого вивчення аспекти енергоефективності та екологічної стійкості таких установок, зокрема можливості їх інтеграції в концепцію «зеленої» пивоварні.

Основна частина. Для вирішення технічних викликів, що постійно загострюються у сфері малих пивоварень, компанія KRONES розробила комплекс інноваційного обладнання, що дозволяє підвищити ефективність і економічність виробництва. В основі цих рішень лежать дві унікальні концепції модульних пивоварень: Micro Cube та Combi Cube, які поєднують передові технологічні рішення з компактністю та простотою експлуатації.

Micro Cube – це високотехнологічний комплекс для приготування та зброджування пивного сусла, який має продуктивність 5, 10 або 25 гектолітрів за один цикл. До його складу входять солододробарка, заторно-фільтраційний апарат, сусловарочний гідроциклонний блок, шість бродильних ємностей, а також системи водо-, тепло- та холодозабезпечення. Гнучкість управління забезпечується поєднанням ручного керування з електронною підтримкою, що значно спрощує експлуатацію.

Завдяки модульній конструкції обладнання постачається у вигляді попередньо зібраних блоків, що дозволяє швидко встановлювати та вводити його в експлуатацію. Компактні габарити (14000×6000 мм) дають змогу оптимально розмістити систему навіть у невеликих приміщеннях, при цьому максимальний діаметр ємнісного обладнання не перевищує 1200 мм. Такий підхід відкриває нові можливості для крафтових виробників, дозволяючи їм працювати на рівні сучасних технологій без значних капіталовкладень у масштабне виробництво.



Рис. 1. Технологічний комплекс обладнання для варіння та ферментації пивного сусла Micro Cube

Combi Cube B – це комплектна модульна система для варіння пива, що забезпечує продуктивність від 40 до 100 гектолітрів гарячого сусла за варку з початковою щільністю 10–15%. Конфігурація обладнання та кількість робочих циклів залежать від вибраної технології.



Рис. 2. Модульний варильний комплекс Combi Cube B

У разі застосування настійного методу затирання можливе проведення до 10 варок на добу, тоді як відварювальний метод дозволяє виконувати до 9 варок.

Інноваційна система теплообміну, що використовується у варочних апаратах, включає нагрівальні сорочки з анкерними зв'язками ShakesBeer, які забезпечують рівномірне прогрівання сировини під час ферментативної модифікації зерна та кип'ятіння сусла. Крім того, сусловарочний апарат оснащений сучасною системою інтенсивного кип'ятіння Stromboli, що сприяє покращенню якості пивного сусла.

Combi Cube C – це централізована система, змонтована на єдиній рамі, яка виконує функції обслуговування всього бродильно-табірного відділення невеликих пивоварень. Вона не лише контролює ферментаційні процеси, а й здійснює санітарне оброблення обладнання, що підвищує рівень гігієни виробництва. При цьому самі бродильні апарати не входять до складу цієї системи, що дає можливість адаптувати її до різних виробничих умов.

Combi Cube F – модульна фільтраційна установка, призначена для освітлення пива з продуктивністю від 26 до 104 гектолітрів на годину.



Рис. 3. Модульний фільтраційний комплекс Combi Cube F

Конструкція дозволяє встановлювати від одного до п'яти модулів, серед яких: фільтрувальний, буферний, карбонізаційний, кізельгуровий та СП-модуль для автоматизованого очищення. Гнучкість у комплектації та можливість налаштування параметрів дозволяють адаптувати установку до індивідуальних технологічних вимог кожного виробництва, забезпечуючи оптимальну якість готового продукту.

Фільтраційний модуль оснащений передовою двопотоковою системою TFS, яка забезпечує високу ефективність очищення пива та суттєво скорочує витрати кізельгуру. Це не лише покращує прозорість і стабільність напою, а й робить процес фільтрації економічно вигіднішим та екологічнішим. На відміну від традиційних міні-пивоварень, нові модульні комплекси для малих і крафтових виробництв інтегрують технології, що вже зарекомендували себе у промисловому пивоварінні. Завдяки цьому підвищується якість готового продукту, оптимізується споживання енергоресурсів, а самі процеси стають більш гнучкими та ефективними. Крім того, використання автоматизованих систем управління дозволяє зменшити вплив людського фактора, забезпечуючи стабільність параметрів виробництва та максимальну повторюваність рецептур.

Висновки. Отже, впровадження інноваційного обладнання, як-от модульні комплекси Micro Cube та Combi Cube, значно підвищує ефективність та економічність виробництва в малих пивоварнях. Ці технологічні рішення дозволяють виробникам не лише зберігати високу якість пива, але й адаптувати свої виробничі процеси до сучасних вимог ринку. Завдяки компактним розмірам і можливості інтеграції передових технологій малим пивоварням відкриваються нові горизонти для оптимізації виробництва без необхідності значних капіталовкладень у велике виробництво. У майбутньому подібні інновації можуть стати стандартом для малих пивоварень, сприяючи подальшому розвитку крафтової пивоварної індустрії.

*Список використаних джерел*

1. Albanese L, Ciriminna R, Meneguzzo F, Pagliaro M, Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments, *Journal of Cleaner Production*. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.162>.
2. Пищик Б.І. Модернізація лінії виробництва пива з розробкою теплообмінника «труба в трубі» і дробарки: магістерська : дис. ... : 133 «Галузеве машинобудування». Київ, 2018. 182 с.
3. Романова З.М. Удосконалення пива світлих сортів на міні-пивоварнях м. Одеса за рахунок використання українського солоду. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 84-ї міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 23–24 квітня 2018 р. Київ : НУХТ, 2018. Ч. 1. С. 280.
4. Martsynkevich L. Use of combined devices in hardware and technological scheme of mini-beer L. Marcinkiewicz *Proceedings of the scientific student session – SSS'11*. 2011. P. 68–71.
5. Amienyo D., Azapagic A., Life cycle environmental impacts and costs of beer production and consumption in the UK. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2016, 21, 492–509. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1028-6>
6. Choi J.-H., Kang J.-W., Mijanur Rahman A.T.M., Lee S.J., Increasing fermentable sugar yields by high-pressure treatment during beer mashing. *J. Inst. Brew.* 2016, 122, 143–146. <https://doi.org/10.1002/jib.285>
7. Dindar E., An Overview of the Application of Hydrodynamic Cavitation for the Intensification of Wastewater Treatment Applications: A Review. *Innov. Energy Res.* 2016, 5, 1–7. <https://doi.org/10.4172/ier.1000137>
8. Яковенко Ю. Удосконалення технології пивного суслу для пива «Молочний стаут» : кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю «8.181.00.01 Технології продуктів бродіння і виноробства». Львів, 2024. 71 с.
9. Жеплінська М., Сухненко І., Лазарів Ю. Порівняльний аналіз способі затирання для приготування пивного суслу. *Технічні науки – Інноваційні технології*. 2016.
10. Protsenko L., Ryzhuk S., Koshitska N., Lyashenko M., Bober A., Gunko S., Kazmirchuk V. Comparative estimation of the quality of ukrainian and european pellets. *Chemistry of food products and materials. New raw materials*. Volume 2023, 17(2)/2023, 41–52.
11. Remes D.B. Membrane filtration systems for beer production: Advances in microbrewery filtration techniques. *International Journal of Brewing and Fermentation*, 2021, 30(2), 112–120. <https://doi.org/10.1080/21532123.2021.1745612>
12. Бліш Р. Технологічні аспекти одержання функціонального пива. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*. 2023, 33–39. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2023-33-05>
13. Urminská D., Haring N., Drábová B. Antioxidant Activity of Special Functional Beers. *Preprints*. 2024, <https://doi.org/10.20944/preprints202405.0193.v1>
14. Jameson M.G., Schmidt P. Innovative filtration solutions for craft breweries: Improving beer quality and reducing material costs. *International Journal of Brewing Engineering*, 2023, 25(1), 89–98. <https://doi.org/10.1002/jbe.2023.01.004>
15. O'Neill S., Lee, M. Compact brewing systems for small breweries: A comparison of modular brewing technologies. *Journal of Brewing Science*, 2022, 47(3), 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.jbsc.2022.03.015>
16. Благополучна А., Ляховська Н., Нецадим Л. Безвідходні технології міні-виробництв. *Економічні горизонти*. 2022. № 1 (19). № 32–38. [https://doi.org/10.31499/2616-5236.1\(19\).2022.259399](https://doi.org/10.31499/2616-5236.1(19).2022.259399)
17. Bellino L.M. Modular fermentation units in small breweries: Enhancing energy efficiency and scalability. *Journal of Microbrewery Technology*, 2019, 8(4), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jmbt.2019.08.009>
18. Frank A., Scheel R., Ag B., Optimized Dry Processing Using the Newest Generation of Grinding Equipment. *MBAA Tech. Q.* 2016, 53, 97–102. <https://doi.org/10.1094/TQ-53-2-0502-01>.
19. Iben U., Wolf F., Freudigmann H.-A., Fröhlich J., Heller W., Optical measurements of gas bubbles in oil behind a cavitating micro-orifice flow. *Exp. Fluids* 2015, 56, 114. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1979-6>
20. Martins K. Automation in fermentation control for craft breweries: Benefits of intelligent temperature management. *Brewing Technology Review*, 2020, 15(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s12345-020-0048-1>
21. Фалик Т.С. Екологічні проблеми крафтових пивоварень та способи їх вирішення : дис ... на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) : 21.06.01 «Екологічна безпека» ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2019. 157 с. С. 124–138.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2025 р.



S. Bokovets, T. Marenkova
Sumy National Agrarian University

INNOVATIVE EQUIPMENT FOR SMALL BREWERIES AS A FACTOR FOR INCREASING PRODUCTION EFFICIENCY

Summary

The article discusses the impact of innovative technological equipment on increasing production efficiency in small breweries. Particular attention is paid to modular systems, such as Micro Cube and Combi Cube, which allow to optimize the processes of preparation and fermentation of beer wort, as well as provide high flexibility and compactness in operation.

The advantages of using advanced technologies compared to traditional brewing methods are identified, in particular in the context of reducing energy consumption, improving product quality and reducing costs. The article also takes into account the introduction of automated control systems that ensure the stability of production processes.

The assessment of modern equipment available on the market enables small breweries to achieve high results with innovative solutions without significant investments in large-scale production.

Keywords: equipment, craft, micro and mini breweries, beer wort, craft brewing, production organization, production.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-34>

УДК 637

Н. В. Болгова, к.с.-г.н

Б. Ю. Луханін, аспірант

Сумський національний аграрний університет

e-mail: natalia.bolhova@snau.edu.ua

ORCID: 0000-0002-0201-0769

ORCID: 0009-0009-6092-4444

ВПЛИВ ВІЙНИ НА МОЛОЧНУ ГАЛУЗЬ В УКРАЇНІ

Анотація. За роки повномасштабної війни молочна галузь України реагує на всі виклики сьогодення, постійно адаптуючись і трансформуючись. Зростає дефіцит молока-сировини через скорочення поголів'я корів. Разом із тим галузь продовжує розвиватися та впливати на глобальний світовий ринок. Метою цього дослідження є аналіз впливу російсько-української війни на виробництво молока. За даними Державної служби статистики у 2024 році, порівняно з попереднім роком на перероблення надійшло на 200 748 т більше молока-сировини. Кількість молока, прийнятого від населення, скоротилася на 23,3%, як наслідок – зросла частка молока «екстра» та вищого гатунку, покращилися його якісні показники. Жирність сировини зросла на 0,04%. Молокопереробна галузь України зберегла потужності, водночас тваринництво потребує подальшого розвитку. У короткостроковій перспективі галузь може стати найпривабливішою для інвестицій за умови виробництва безпечної сировини.

Ключові слова: молоко-сировина, молочна продукція, жир, білок, якість, безпечність, війна.

Постановка проблеми. Молочна промисловість відіграє життєво важливу роль у глобальній продовольчій системі, пропонуючи широкий асортимент молочних продуктів, які споживаються мільйонами людей у всьому світі [1, с. 384].

Визначаються чотири глобальні тенденції, які впливають на молочну промисловість: зміна географії та масштабів виробництва і споживання; інтенсифікація капіталу, землі та тварин; зростання обізнаності про екологічний вплив молочних продуктів; альтернативні перебої з молоком [2, с. 374].

Екологічність та етичні міркування займають центральне місце як вирішальні аспекти якості молока. Споживачі віддають перевагу екологічно чистим методам виробництва [3, с. 3215].

Для виробництва якісної та безпечної молочної продукції необхідно дотримуватися комплексу профілактичних санітарно-гігієнічних заходів, починаючи з процесу виробництва молока, збору, транспортування та закінчуючи переробленням і реалізацією. Разом із тим достеменно не відомо, яким чином воєнні дії в Україні впливають на виробництво молочних продуктів, якість і безпечність молока-сировини.

Аналіз останніх досліджень. Забезпечення конкурентоспроможності молочної продукції залежить від якості молока. За останні два десятиліття в усьому світі було проведено багато досліджень, спрямованих на підвищення якості та безпечності молока. З роками параметри якості, які використовуються фермерами для визначення придатності молока для продажу, збільшилися від простих сенсорних оцінок за допомогою зору та смаку до складних аналізів на наявність хімічних залишків. Зокрема, встановлено, що в європейських країнах стандарт якості вищий, а тому високі вимоги до молочної сировини стають перешкодою для виходу на європейські ринки більшості вітчизняних молокопереробних підприємств. Відповідно, державна стратегія має бути спрямована на збільшення виробництва високоякісної молочної сировини.

вини та нарощування експортного потенціалу шляхом формування спеціалізованих молочних кооперативів для молокопереробних підприємств [4, с. 141].

Якість сирого молока є основним фактором, що визначає якість молочних продуктів. Хорошу молочну продукцію можна виробляти тільки з доброякісної молочної сировини. Гігієнічна якість молока має вирішальне значення для виробництва безпечних молочних продуктів. Щоб досягти такої якості, належні гігієнічні практики повинні застосовуватися по всьому молочному ланцюгу.

Із законодавчої позиції правил, запроваджених для захисту якості молока, багато й вони відрізняються від країни до країни. Норми Європейського Союзу містять серію законодавчих заходів, які всебічно охоплюють різні аспекти молочного сектора. Виробництво молочних продуктів відповідає загальним гігієнічним вимогам, викладеним у кількох європейських регламентах: Регламент (ЄС) № 178/2002 [5, ст. 1–24], Регламент (ЄС) № 852/2004 [6, ст. 1–54] та Регламент (ЄС) № 853/2004 [7, ст. 55].

Загальне законодавство ЄС про харчові продукти встановлює основну юридичну відповідальність операторів ринку харчових продуктів і кормів щодо забезпечення безпечності харчових продуктів на всіх етапах виробництва, перероблення та розповсюдження на підконтрольних їм підприємствах. Водночас держави-члени несуть відповідальність за дотримання харчового законодавства ЄС, а також моніторинг і перевірку відповідності операторів ринку харчових продуктів і кормів установленим вимогам. Із цією метою держави-члени підтримують систему офіційного контролю та інших заходів відповідно до обставин, включаючи публічне інформування про безпеку та ризик харчових продуктів і кормів, нагляд за безпекою харчових продуктів і кормів та іншу діяльність із моніторингу, що охоплює всі етапи виробництва, оброблення та розповсюдження.

Перероблене молоко має відповідати суворим гігієнічним критеріям, включаючи обмеження кількості мікроорганізмів, кількості соматичних клітин, відсутність залишків ветеринарних препаратів і не перевищувати прийнятні рівні специфічних забруднень. Дослідження та контроль якості молока необхідно проводити на всіх етапах молочного ланцюга.

Обов'язковою умовою отримання безпечної молочної продукції на виробництві є наявність лабораторій із сучасним обладнанням, яке дозволяє контролювати технологічні параметри в процесі виробництва та своєчасно коригувати виробничий процес. Лабораторне дослідження молока дозволяє встановити ефективність годівлі худоби, своєчасно діагностувати захворювання тварин, оцінювати роботу механізмів та обладнання [8, с. 146].

Крім мікробної небезпеки, молоко та молочні продукти також можуть містити хімічні небезпеки та забруднювачі, які в основному потрапляють із навколишнього середовища, кормів для тварин, тваринництва та промислової практики [9, с. 2]. Ракетне паливо, яке згоряє під час польоту ракети, містить небезпечні речовини, які накопичуються в повітрі та осідають на ґрунтового покритті, й може бути потенційною загрозою для безпечності молока.

На початку повномасштабного вторгнення молочна промисловість України зазнала серйозних збитків. До війни 42% усього молока вироблялося в регіонах, які зазнали найбільших обстрілів та окупації росіян. У 2022 році за час воєнного стану поголів'я корів зменшилось на понад 191 тис. голів, або на 12,4%. Ця тенденція зберіглася і в 2023 році.

Крім того, офіційна статистика зафіксувала зниження продуктивності корів через шок тварин від вибухів та інші проблеми з їх здоров'ям. Крім дефіциту сировини галузь відчуває дефіцит кадрів. Частина працівників пішла воювати, частина виїхала за кордон, відповідно, дефіцит кадрів продовжує зростати.

Для стабілізації ситуації галузь необхідно підтримувати з боку держави. Особливої уваги потребують екологічні проблеми, які ще більше стають актуальними під час війни.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є аналіз впливу російсько-української війни на виробництво молока. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати особливості виробництва молока в умовах війни в Україні;
- з'ясувати, які показники впливають на якість молочних продуктів.

Основна частина. Незважаючи на певні труднощі, українські молочні фермери та переробники продемонстрували надзвичайну стійкість, довівши, що розвиток можливий навіть під величезним тиском.

Виробники молочних продуктів навчилися керувати деякими воєнними ризиками. Зусилля щодо зміцнення виробництва енергії та електромереж зробили галузь більш стійкою до відключень електроенергії. Крім того, низькі ціни на корми внаслідок того, що велика кількість українського зерна та кукурудзи залишилися в країні через російську військово-морську блокаду, допомогли компенсувати деякі втрати під час війни та зберегти низькі витрати виробництва.

З 2019 року поголів'я корів в Україні суттєво скоротилося – з 1,92 млн голів до 1,25 млн голів у 2024 році. Уразливість молочної промисловості до наслідків війни призвела до масового короточасного забою тварин. Хоча загальне поголів'я худоби скоротилося, частка молока, виробленого великими фермами, зросла до 27%. Середній розмір молочних ферм зріс із 232 корів у 2019 році до 289 корів у 2023 році. За даними Державної служби статистики (ДСС), у 2024 році порівняно з попереднім роком на перероблення надійшло на 200 748 т більше молока-сировини (рис. 1).

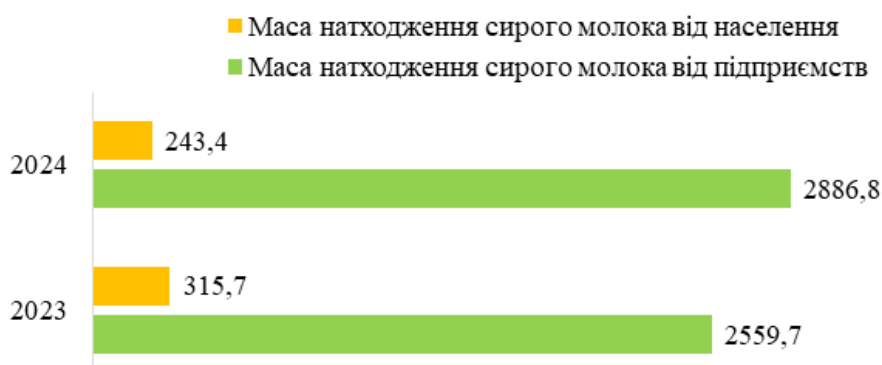


Рис. 1. Кількість молока, переданого на перероблення, т

Незважаючи на війну, що триває, молочним фермерам вдалося збільшити обсяги молока, що постачається на перероблення, з 2,8 мільйона тонн у 2022 році до 3,2 мільйона тонн у 2024 році. На думку аналітиків, основним чинником зростання виробництва в промисловому секторі стало підвищення продуктивності дійного стада. Зростання виробництва в промисловому секторі стимулює і зростання молочного перероблення.

Кількість молока, прийнятого від населення, скоротилася на 23,3%, як наслідок – зросла частка молока «екстра» та вищого ґатунку, покращилися його якісні показники.

Позитивним фактом є те, що якість молока, виробленого на підприємствах, досить висока. Переважає частка молока ґатунку «екстра» (55,2%). Частка молока вищого ґатунку становить 23,3%, I ґатунку – 19,5%. Частка неґатункового молока була меншою 0,1%.

Якість молока є важливим показником, який впливає на якість усіх молочних продуктів. Для відстеження якості молочної сировини в межах країни ДСС формуються універсальні показники (табл. 1).

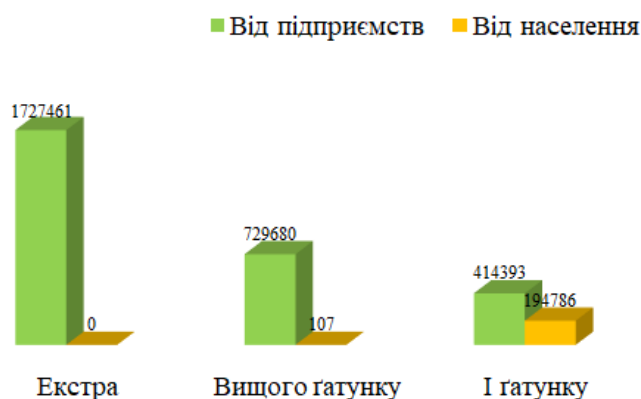


Рис. 2. Кількість молока коров'ячого незбираного, купленого переробними підприємствами за гатунками, т

Таблиця 1

Показники якості молока, які використовуються для статистичного спостереження

Кількість молочної сировини, що надійшла переробним підприємствам	тонни	Відображає первинну масу молока коров'ячого сирого та/або вершків у натуральному вираженні, куплених переробними підприємствами, власно виробленої та від замовників для перероблення на власних або орендованих потужностях
Масова частка жиру в молочній сировині, куплених переробними підприємствами	%	Характеризує якість молока коров'ячого сирого та/або сирих вершків із молока коров'ячого, що надійшли на перероблення
Масова частка білка в молочній сировині, куплених переробними підприємствами	%	Характеризує якість молока коров'ячого сирого та/або сирих вершків із молока коров'ячого, що надійшли на перероблення
Кількість молока коров'ячого сирого, що надійшло переробним підприємствам (у перерахунку на молоко коров'яче встановленої базисної жирності – 3,4%)	тонни	Відображає масу молока сирого коров'ячого, що надійшло переробним підприємствам для перероблення, у перерахунку на молоко коров'яче встановленої базисної жирності
Кількість вершків з молока коров'ячого сирого, що надійшли переробним підприємствам (у перерахунку на вершки коров'ячі сири встановленої базисної жирності – 10,0%)	тонни	Відображає масу вершків сирих, що надійшли переробним підприємствам для перероблення, в перерахунку на вершки коров'ячі сири встановленої базисної жирності
Середня ціна молока коров'ячого сирого, купленого переробними підприємствами (у перерахунку на молоко коров'яче встановленої базисної жирності – 3,4%)	грн	Відображає вартість однієї тонни молока коров'ячого сирого, купленого переробними підприємствами
Середня ціна вершків з молока коров'ячого, куплених переробними підприємствами (у перерахунку на вершки сири встановленої базисної жирності – 10,0%)	грн	Відображає вартість однієї тонни вершків коров'ячих сирих, куплених переробними підприємствами
Кількість продукції, отриманої з молока та вершків коров'ячих сирих	тонни	Відображає кількість молочної продукції певного виду, отриманої з молочної сировини, що надійшла на перероблення, без урахування кількості продукції, використаної на підприємстві для виробництва іншої продукції

ДСС охоплює підприємства, які здійснюють перероблення сирого молока. Під час контролю результатів ДСС здійснюється аналіз даних у часі (динаміка показника за останні 3–5 років); аналіз даних у просторі (по регіонах; по містах обласного значення та районах); методи

аналізу агрегатів та розподілу даних (виявлення й аналіз сумнівних агрегатів та виявлення одиниць, показники яких значно відрізняються від розподілу основної частини даних, наприклад, відношення середньої ціни молока сирого, купленого переробними підприємствами в регіоні, до середнього рівня цього показника по країні). Таке оброблення дозволяє аналізувати ефективність виробництва.

Традиційно масова частка білка та жирів у молоці, прийнятому на перероблення від підприємств, є вищими, порівняно з молоком, прийнятим від населення. Така тенденція спостерігається і в період війни (рис. 3).

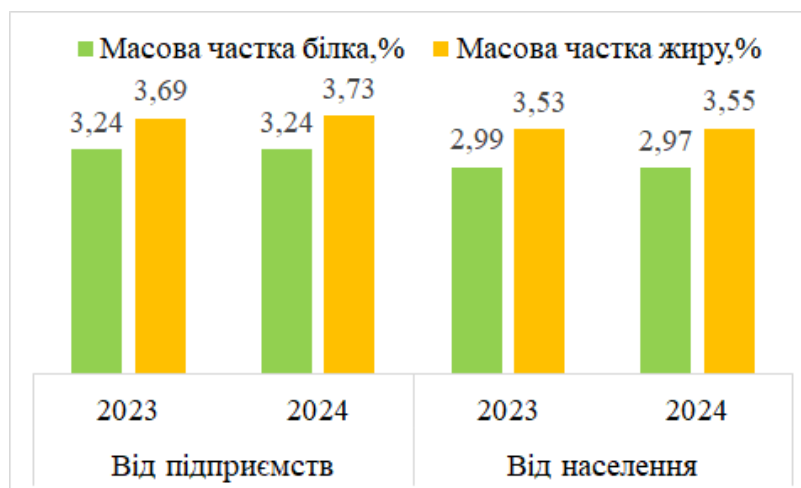


Рис. 3. Вміст білка та жирів у молоці-сировині

Варто зазначити, що якість молока у 2024 році покращилася порівняно з попереднім роком. Жирність сировини зросла на 0,04%. Це демонструє здатність до адаптації та стабільну продуктивність у всьому секторі.

Попри всі виклики, у 2024 році Україна збільшила експорт молочних продуктів у натуральних обсягах на 8% (рис. 4).



Рис. 4. Експортні категорії в грошовому еквіваленті в грудні 2024 року

За даними Асоціації виробників молока, за результатами 2024 року молочний експорт з України збільшився на фоні дефіциту молочних жирів та підвищення цін на вершкове масло та інші біржові товари у світі.

У 2024 році Україна збільшила експортну виручку по всіх товарних позиціях, включаючи молоко та вершки не згущені (+6%), молоко та вершки згущені (+8%), маслянку (+29%), молочну сироватку (+19%), масло вершкове (+15%), сири (+26%), морозиво (+21%) та казеїн (+3%). Ріст світових цін на молочні продукти та девальвація гривні сприяли активності українських експортерів. Попри підвищення ціни на сире молоко в Україні, воно все одно поступалося європейським цінам, а вітчизняні молочні продукти, а саме вершкове масло, були привабливими на зовнішніх ринках.

Новим викликом у галузі є безпечність молока-сировини, пов'язана з наслідками воєнної агресії. Попри те, що бойові дії в країні тривають уже більше 10 років, не виявлено досліджень, пов'язаних із встановленням впливу воєнної агресії на безпечність сільськогосподарських продуктів, вироблених на територіях областей, де ведуться бойові дії. Питання комплексного підходу щодо дослідження впливу війни на безпечність сировини для виготовлення харчової продукції залишається нерозв'язаним.

Висновки. Українська молочна промисловість довела свою стійкість і адаптивність перед обличчям надзвичайних викликів. Нині зростання відбувається тільки завдяки підвищенню продуктивності худоби, а кількість корів у промисловому секторі продовжує скорочуватись. У 2024 році на перероблення надійшло на 200 748 т більше молока-сировини. Кількість молока, прийнятого від населення, скоротилася на 23,3%, відповідно, зросла частка молока «екстра» та вищого ґатунку, покращилися його якісні показники. У короткостроковій перспективі галузь може стати найпривабливішою для інвестицій за умови виробництва безпечної сировини.

Список використаних джерел

1. Fiorillo V., Amico B.M. Milk Quality and Economic Sustainability in Dairy Farming: A Systematic Review of Performance Indicators. *Dairy*. 2024. 5(3). 384–402. <https://doi.org/10.3390/dairy5030031>
2. Bojovic M., McGregor A. A review of megatrends in the global dairy sector: What are the socioecological implications? *Agric. Hum. Values*. 2022. 40. 373–94. <https://doi.org/10.1007/s10460-022-10338-x>
3. Castellini G., Barelo S., Bosio A.C. Milk Quality Conceptualization: A Systematic Review of Consumers, Farmers, and Processing Experts Views. *Foods*. 2023. 12(17). 3215. <https://doi.org/10.3390/foods12173215>
4. Bal-Prylypko L., Berezina L., Stepasyuk L., Cherednichenko O., Lialyk A. Developing dairy farming and improving product quality. *Scientific Horizons*. 2024. 27(1). 140–151. <https://doi.org/10.48077/scihor1.2024.140>
5. European Parliament Regulation (EC), No. 178/2002 of the European Parliament and of the Council. *Off. J. Eur. Communities*. 2002. 31. 1–24.
6. EC Regulation (EC) No 852/2004, Hygiene of foodstuffs. *Off. J. Eur. Union*. 2004. 139. 1–54.
7. EC Commission Regulation (EC) No 853/2004 of 29 April 2004 laying down specific hygiene rules for food of animal origin. *Off. J. Eur. Union*. 2004. № 139. P. 55–205.
8. Чабаненко Д. Забезпечення якості та безпеки молока в промисловому виробництві. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Ветеринарні науки*. 2024. № 26 (114). С. 144–153. <https://doi.org/10.32718/nvlvet11421>
9. Owusu-Kwarteng J., Akabanda F., Agyei D., Jespersen L. Microbial Safety of Milk Production and Fermented Dairy Products in Africa. *Microorganisms*. 2020. 8(5). 752. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050752>

Стаття надійшла до редакції 18.02.2025 р.



N. Bolhova, B. Lukhanin
Sumy National Agrarian University

IMPACT OF THE WAR ON THE DAIRY INDUSTRY IN UKRAINE

Summary

The dairy industry plays a vital role in the global food system, offering a wide range of dairy products consumed by millions of people worldwide. To produce high-quality and safe dairy products, it is necessary to adhere to a set of preventive sanitary and hygienic measures, starting from the process of milk production, collection, transportation and ending with processing and sale. However, it is unknown how military operations in Ukraine affect the production of dairy products and the quality and safety of raw milk. At the beginning of the full-scale invasion, Ukraine's dairy industry suffered severe losses. Before the war, 42% of all milk was produced in the regions that suffered the most shelling and occupation by the Russians. In 2022, during martial law, the number of cows decreased by more than 191 thousand heads or 12.4%. This trend continued in 2023. In addition, official statistics recorded a decrease in cow productivity due to animal shock from explosions and other health problems. In addition to the shortage of raw materials, the industry is experiencing a shortage of personnel. Some workers went to war, some went abroad, and accordingly, the shortage of personnel continues to grow. To stabilize the situation, the industry must be supported by the state. Special attention is required for environmental problems, which become even more relevant during the war. This study aims to analyze the impact of the Russian-Ukrainian War on milk production. To solve the set goal, the following tasks must be performed: explore the features of milk production in war conditions in Ukraine and analyze what indicators affect the quality of dairy products. The Ukrainian dairy industry has proven its resilience and adaptability in the face of extraordinary challenges. Today, growth occurs only due to increased livestock productivity, and the number of cows in the industrial sector continues to decrease. In 2024, 200,748 tons more raw milk was received for processing. The amount of milk obtained from the population declined by 23.3%. As a result, the extra and premium milk share increased, and its quality indicators improved. The industry may become the most attractive for investment in the short term, provided that safe raw materials are produced. Even though military operations in the country have been ongoing for more than 10 years, no studies have been found related to establishing the impact of military aggression on the safety of agricultural products produced in the territories of regions where hostilities are taking place. The issue of a comprehensive approach to studying the impact of war on the safety of raw materials for manufacturing food products remains unresolved.

Keywords: raw milk, dairy products, fat, protein, quality, safety, war.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-35>

УДК 006.065

А. П. Драган, к. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7195-1127

В. І. Карась, старший викладач

ORCID: 0009-0001-3326-1456

ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

e-mail: dragan1402@ukr.net

ВПЛИВ СТАНДАРТИЗАЦІЇ НА ВИРОБНИЦТВО Й ЕКСПОРТ РІПАКУ ТА ПРОДУКТІВ ЙОГО ПЕРЕРОБЛЕННЯ

Анотація. У статті проаналізовано основні проблеми, що виникають у стандартизації та сертифікації процесів виробництва і перероблення насіння ріпаку. Звертається увага на дотримання вимог стандартів до базових показників якості насіння ріпаку та досліджується їх вплив на його експортні можливості. У публікації акцентовано на широкому спектрі використання як насіння ріпаку, так і похідних продуктів його перероблення, а саме ріпакового меду, ріпакової олії, макухи, шроту, гліцерину, ріпакового борошна та інших продуктів виробництва. Досліджується взаємозв'язок між процесом стандартизації в галузі виробництва і перероблення насіння ріпаку та її впливом на розвиток ринку ріпакової продукції в Україні і світі. Аналізується вплив гармонізації національних стандартів з міжнародними нормативними документами на зростання експорту ріпаку, ріпакового шроту і ріпакової олії.

Ключові слова: стандарти, ріпак, гармонізований стандарт.

Постановка проблеми. За даними Мінагрополітики, у 2024 році було засіяно насінням ріпаку приблизно 1,3 млн га [1].

Від рівня ефективності розвитку виробництва ріпаку і похідних продуктів його перероблення залежить зростання експортних можливостей всієї країни. Значною мірою на підвищення ефективності виробництва ріпаку впливає переоснащення та модернізація всього циклу сільськогосподарських технологічних процесів з поступовим упровадженням інноваційних світових ресурсозберезувальних агротехнологій, які передбачають мінімальний обробіток ґрунту. Усе це значно покращує врожайність культури та підвищує якість насіння ріпаку, що впливає на рентабельність його виробництва.

Проводячи аналіз АПК України, робимо висновок, що з кожним роком зростає частка вирощування олійних культур. З огляду на статистичні дослідження олійні культури та продукти їх перероблення нині займають значний сектор експорту товарів з України. Ріпак за своїми експортними можливостями є другою олійною культурою після соняшнику, але при цьому він володіє значно ширшим спектром застосування в різних галузях виробництва.

У зв'язку з інтеграцією України до світової організації торгівлі постає проблема вивчення взаємозв'язку між обсягом експортно-імпортних операцій та прогресом національної стандартизації. У 2014 році було підписано Угоду про асоціацію з Європейським Союзом (УАЄС), яка сприяє розвитку торгівельних відносин та передбачає погодження нормативних документів між Україною і країнами ЄС.

Розвиток міжнародного співробітництва в галузі ріпаківництва постійно вимагає вивчення міжнародних і європейських стандартів і розроблення на їх базі національних гармонізованих стандартів, що дає можливість погоджувати та встановлювати єдині підходи до показників якості насіння ріпаку і методів його контролю.

Аналіз актуальних досліджень. Питанням гармонізації нормативного законодавства і перспективам розвитку національної системи стандартизації та сертифікації основну увагу приділяють державні організації, що безпосередньо займаються проблемами сертифікації і стандартизації, а також численні проєкти (як національні, так і міжнародні) та фонди, що моніторять ситуацію з цього питання (проєкт ІФС «Ділове середовище та розвиток підприємництва в Україні» за фінансової підтримки Уряду Канади, економічний компонент Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, Директива Європейського Парламенту щодо виробництва ріпаку та ін.) [2].

На проблемних питаннях під час створення стандартів (міжнародні технічні неузгодженості, термінологічне спотворення тексту, порушення сучасних лексичних та граматичних норм тощо) у сучасних умовах економічного розвитку акцентують увагу провідні українські вчені: Борис Гриньов, Зоя Глупак, Світлана Литвинська, Михайло Гінзбург, Наталя Глухова, Людмила Симоненко, Оксана Тур та інші [3; 4; 5; 6; 7; 8].

Про актуальність і рентабельність виробництва, перероблення, експортні можливості й широкий спектр використання ріпаку та перспективи розвитку ріпаківництва в Україні й світі публікують свої спостереження вітчизняні та зарубіжні вчені: Олена Демянюк, Олексій Забарний, Сергій Харченко, Олександра Волощук, Оксана Панкова, Юрій Кернасюк, Наталія Баранкова, Тетяна Василич, Людвіг Штріввер, Хайнц Штрубенхофф та багато інших [9; 10; 11].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є дослідження погодження державних стандартів України з міжнародними нормативними документами в галузі виробництва ріпаку та продуктів його перероблення, а також вивчення впливу гармонізації національних стандартів на зростання обсягів експортно-імпортних операцій в ріпаковому секторі виробництва, особливо на експорт ріпаку, ріпакового шроту та ріпакової олії як основних продуктів у галузі ріпаківництва.

Основна частина. Зважаючи на високі вимоги до якості насіння ріпаку та продуктів його перероблення, зростання темпів вирощування ріпаку та інтенсивності проведення експортно-імпортних операцій, в Україні пріоритет відводиться процесу гармонізації державних стандартів України з міжнародними та європейськими нормативними документами в цих галузях.

За даними Мінекономрозвитку України, протягом останніх десяти років приблизно 90% національних стандартів є гармонізованими з міжнародними та європейськими нормативними документами.

У 2014 році 27 листопада наказом Мінекономрозвитку України було створено технічний комітет зі стандартизації в галузі сільського господарства ТК 170 «Зернові культури та продукти їх перероблення». У сферу діяльності технічного комітету ввійшли зернові, зернобобові й олійні культури та продукти їх перероблення.

Розроблення і впровадження стандартів, які відповідають міжнародним нормам і вимогам, є непростим завданням, оскільки необхідно враховувати вплив різних показників, від яких залежить якість ріпакової продукції, а саме біохімічних, фізичних, ґрунтових та інших факторів. Якість ріпакової продукції значною мірою залежить від технології вирощування, застосування машин і обладнання, добрив, зернохосвищ. А тому технічному комітету зі стандартизації необхідно переглянути всі застарілі стандарти на ріпак та продукти його перероблення, встановити нові вимоги, які відповідають міжнародним нормам і правилам, що дають можливість стимулювати виробництво продукції найвищої якості та розвивати її експортний потенціал.

Розглядаючи концепцію технічної гармонізації стандартів у ріпаківній галузі виробництва, необхідно звернути увагу на такі проблеми:

- державний контроль і нагляд за виробництвом ріпаку і продуктів його перероблення залишається складним і обтяжливим для товаровиробника;

– значну частину національних стандартів не гармонізовано з міжнародними нормативними документами, що не забезпечує вільний доступ ріпаку і продуктів його перероблення на світові ринки;

– методики визначення конкретних показників якості ріпаку і безпеки продукції його перероблення не завжди погоджені з міжнародними нормами.

На сучасному етапі розвитку ріпаківництва основним завданням є усунення технічних бар'єрів у торгівлі ріпаком і його похідною продукцією.

Між країнами як торговельними партнерами необхідно формувати взаємну довіру по відношенню до якості насіння ріпаку та продуктів його перероблення, а також якості роботи контролюючих органів, які здійснюють нагляд за дотриманням норм сертифікації та стандартизації сільськогосподарської продукції.

Важливим питанням виробництва ріпаку та похідних його продуктів є погодження основних положень законодавства України у сфері якості та безпеки ріпакової продукції з вимогами нормативних документів ЄС (вимоги *Acquis communautaire*) та іншими країнами, що запроваджуються в Законі України «Про зерно та ринок зерна в Україні».

Технічний комітет ТК170 займається розробленням державних і гармонізованих національних стандартів, а також здійснює контроль та нагляд за своєчасним внесенням необхідних змін і доповнень у нормативні документи. Коли кількість змін значно впливає на структуру стандарту та вимоги до параметрів якості стандартизованої продукції, тоді доцільно розробляти новий нормативний документ. За останні роки державними органами зі стандартизації та сертифікації розроблено велику кількість нових державних стандартів України, для насіння ріпаку та продуктів його перероблення, гармонізованих з європейськими (ДСТУ EN) і міжнародними (ДСТУ ISO) нормативними документами.

У таблиці 1 наведено приклади позначень державних та міжнародних стандартів, погоджених між собою за методами контролю показників якості ріпаку, параметрів показників якості, норм і правил зберігання та транспортування ріпаку та продуктів його перероблення.

Аналізуючи таблицю 1, на прикладі гармонізованого державного стандарту ДСТУ ISO 658:2006, який розроблено на базі міжнародного нормативного документу ISO 658:2002 та було введено в дію з 1 січня 2008 року, можна звернути увагу на термін між затвердженням стандарту (2006 рік) та введенням його в дію, що становить два роки, а з урахуванням часу на його розроблення близько трьох років [12]. Тому робимо висновок, що основним завданням на всіх етапах гармонізації нормативних документів є скорочення проміжку часу між початком його розроблення і введенням його в дію. Це прискорить процес погодження нормативних документів з Європейським Союзом й іншими країнами-імпортерами ріпаку, надасть можливість виробникам скоріше отримати сертифікат відповідності EUR1 та експортувати ріпак і продукти його перероблення.

Першим етапом виробництва високоякісного ріпаку є вибір якісного насіння (табл. 2), на яке мають бути представлені сертифікати та супровідні документи згідно з вимогами передбачених у державному стандарті ДСТУ 4138-2002 [13]. Зараз відбувається інтенсивне впровадження нових сортів і гібридів насіння ріпаку. До Державного реєстру сортів рослин, придатних для поширення в Україні, включено 350 сортів і гібридів ріпаку озимого. Протягом останніх 10 років до Державного реєстру було включено 306 сортів і гібридів ріпаку озимого, що сягає 87,4% від загальної кількості. При цьому було зареєстровано 20 сортів і 6 гібридів ріпаку озимого української селекції та 16 сортів і 264 гібриди іноземної селекції, а це вимагає погодження національних і міжнародних стандартів щодо якісних і безпекових показників насіння ріпаку [9].



Таблиця 1

Гармонізовані національні стандарти у сфері виробництва та перероблення ріпаку

№ п/п	Позначення гармонізованого стандарту (термін дії)	Назва стандарту	Позначення міжнародного та європейського стандарту
1	ДСТУ ISO 658:2006 (01.01.2008)	Насіння олійних культур. Метод визначення вмісту домішок	ISO 658:2002
2	ДСТУ ISO 729:2005 (01.10.2006)	Насіння олійних культур. Визначення кислотності олії	ISO 729:1988
3	ДСТУ ISO 542:2006 (01.01.2008)	Насіння олійних культур. Методи вибирання проб	ISO 542:1999
4	ДСТУ ISO 664:2007 (12.01.2009)	Насіння олійне. Виділення дослідного зразка з лабораторії проби	ISO 664:1990
5	ДСТУ ISO 10519:2008 (01.09.2008)	Насіння ріпаку. Визначення вмісту хлорофілу спектрометричним методом	ISO 10519:1997
6	ДСТУ ISO 9167:2007 (1.07.2010)	Насіння ріпаку. Визначення люкозимолатів. Частина 1. Метод з використанням рідинної хроматографії високороздільної здатності	ISO 9167-1:1992
7	ДСТУ ISO 9289:2008 (1.09.2008)	Макухи та шроти олійного насіння. Визначення вільного залишку гексану	ISO 9289-1:1991
8	ДСТУ ISO 734-1:2008 (1.09.2008)	Макухи та шроти олійного насіння. Визначення вмісту олії	ISO 734-1:2006
9	ДСТУ ISO 665:2008 (1.09.2008)	Насіння олійних культур. Визначення вмісту вологи та легких речовин	ISO 665:2000
10	ДСТУ ISO 22000:2019 (01.09.2021)	Системи керування безпечністю харчових продуктів. Вимоги до будь-якої організації в харчовому ланцюзі	ISO 22000:2018
11	ДСТУ EN ISO 659:2022 (1.01.2024)	Насіння олійне. Визначення вмісту олії (контрольний метод)	EN ISO 659:2009 ISO 659:2009
12	ДСТУ EN ISO 22630:2022 (01.09.2023)	Шрот із насіння олійних культур. Визначення вмісту олії. Метод швидкого екстрагування	EN ISO 22630:2015 ISO 22630:2015
13	ДСТУ EN ISO 10565:2022 (01.01.2024)	Насіння олійних культур. Одночасне визначення вмісту олії та води	EN ISO 10565:1998 ISO 10565:1998

Таблиця 2

Класифікація насіння ріпаку [14]

Клас насіння	Масова частка ерукової кислоти в олії, %, не більше ніж	Глюкозинолатів, мкмоль/г, не більше ніж*	
		у насінні	у шроті
Вищий	1,5	20,0	34,0
I	5,0	45,0	75,0
II	Не нормують		
* У сухій речовині			

До експорту ріпак проходить декілька етапів стандартизації та сертифікації, а саме:

- перший етап: сортування насіння ріпаку на класи згідно з вимогами ДСТУ 4966-2008 [14];
- другий етап: вибір і призначення методів контролю показників якості ріпаку залежно від його призначення за ДСТУ ISO 665:2008, ДСТУ ISO 10565:2022, ДСТУ ISO 658:2006, ДСТУ ISO 729:2005, ДСТУ ISO 734-1:2008 та іншими стандартами [15–18];
- третій етап: визначення і контроль якісних показників та перевірка їх на відповідність державним (ДСТУ) і міжнародним (ISO) нормативним документам;

– четвертий етап: дотримання основних вимог норм стандартів щодо зберігання і транспортування ріпакової продукції.

Зростання виробництва ріпаку в Україні відбувається не тільки завдяки збільшенню посівних площ, але також через покращення якості насіння ріпаку, запровадження передових інноваційних агротехнологій з використанням нової техніки. Усе це є передумовою зростання врожайності ріпаку, зменшення собівартості його виробництва та підвищення рентабельності. Якщо подивитись на сектор експорту і перероблення ріпаку, то бачимо, що починаючи з 2023–2024 маркетингового року зі спадом експорту зростає перероблення ріпаку в Україні, що спрямовано на виробництво харчової та технічної ріпакової олії з подальшим отриманням ріпакового шроту. Ріпакова олія і шрот є експортними похідними продуктами перероблення ріпаку, які надалі використовуються для виготовлення біопалива та комбікормів. Базовим національним стандартом для ріпакової олії є ДСТУ 8175:2015, яким передбачено класифікацію на рафіновану і нерафіновану олію та її розподіл на харчову й технічну. Нормативним документом встановлено вимоги безпеки, охорони довкілля, правила приймання, зберігання і транспортування, які далі стануть основою для погодження з міжнародними показниками з метою експорту ріпакової олії [19].

Проблема пошуку альтернативних видів енергоресурсів для України і передових країн світу є однією з найактуальніших. Тому особлива увага приділяється застосуванню ріпаку для виробництва нових джерел енергії. Використання ріпаку як біоенергетичної культури в основному є найбільшою експортною складовою частиною України в галузі ріпаківництва. Ріпак використовується в країнах Європейського Союзу та Північної Америки для виробництва біодизельного палива, мастильних речовин та біогазу. Якщо проаналізувати виробництво ріпаку у світі за останні п'ять років, то беззаперечним лідером є Канада, Китай, Індія, а також Австралія та Україна. Але Китай та Індія працюють на внутрішній ринок перероблення і не є провідними експортерами.

Для експорту ріпаку встановлюються спеціальні норми і вимоги до виробництва, постачання та зберігання сільськогосподарської культури та подальшого його перероблення в біодизельне паливо, біогаз та мастильні речовини. Зокрема, згідно з вимогами нормативних документів, вологість ріпаку повинна бути в межах 6–8%, олійність – 36%, а кислотне число олії в насінні – не більше ніж 5 мгКОН/г [14].

Сучасний експорт ріпаку з України значною мірою спрямовано на Європу, де з кожним роком поновлюються нормативні вимоги, а з 2023–2024 маркетингового року через блокування на кордоні виникли логістичні проблеми транспортування ріпаку не тільки в Європу, але і в країни Азії та Америки. Усе ж основну увагу необхідно звернути на невідповідність до норм і вимог міжнародних нормативних документів, через що український ріпак можуть не пропустити на європейські та інші зовнішні ринки. Вимоги до виробництва ріпаку регулюються Директивою Європейського Парламенту, яка передбачає обов'язкове декларування показників викидів парникових газів, що виділяються в процесі виробництва та обігу сировини, з якої виробляється біопаливо. Парникові гази, як-от оксид азоту (N_2O), діоксид вуглецю (CO_2) і метан (CH_4), значно впливають на навколишнє середовище. Для всіх учасників технологічного процесу виробництва біопалива передбачено проведення підрахунків викидів парникових газів із подальшим оформленням відповідних звітів. Також країни Європейського Союзу забороняють імпортувати ріпак, за вирощування якого використовувалися інсектициди і якщо в його зерні міститься понад 0,01 мг/кг хлорпірифосу та хлорпірифос-метилу. Ці вимоги стосуються всіх фермерських господарств України, які вирощують ріпак та відправляють його на експорт.

Висновки. Проводячи аналіз стану ринку ріпаку та продуктів його перероблення на міжнародних торговельних біржах, можна зробити висновок, що з кожним роком розширюються їх експортні можливості у зв'язку з широким спектром застосування продуктів ріпаківництва та їх усе більшою рентабельністю.

Виробництво біоекологічних продуктів перероблення ріпаку покращує екологічну безпеку навколишнього середовища та сприяє подальшому розвитку ріпаківництва в Україні.

Реформування і вдосконалення системи стандартизації та сертифікації в галузі ріпаківництва дозволяє підприємствам вирощувати і виробляти ріпакову продукцію, дотримуючись вимог національних стандартів і гармонізованих нормативних документів. Необхідно постійно погоджувати і здійснювати порівняльний аналіз вимог показників якості й безпеки ріпаку та продуктів його перероблення з нормативами ЄС і вимогами країн-експортерів, з якими Україна здійснює постійні торгівельні операції.

Гармонізація стандартів із міжнародними та європейськими нормами має стати поштовхом для підвищення рівня конкурентоспроможності вітчизняних фермерів та їх ріпакової продукції на світових ринках.

Список використаних джерел

1. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. URL: <http://www.me.gov.ua>
2. Карась В.І., Драган А.П. Стандартизація зернових культур та її вплив на розвиток ринкових відносин. *Перспективні технології та прилади*, Луцьк : ЛНТУ. 2023. Випуск 22. С. 54–60.
3. Глушак З.І. Стандартизація та сертифікація зерна в Україні та країнах Європейського Союзу. *Наукові горизонти*. 2019. № 7. С. 63–69.
4. Глухова Н.А. Сфери використання ріпаку: розширюємо погляд *Журнал «АгроЕліта»*. 2019. № 2. С. 9–11.
5. Гінзбург М.Д. Щодо засадничих понять, пов'язаних із поданням процесів. *Серія «Проблеми української термінології»*. 2010. № 676. С. 8–14.
6. Гриньов Б.В. Щодо питання застосування «Методу обкладинки» у національній стандартизації. *Стандартизація. Сертифікація. Якість*. 2013. № 4. С. 12–14.
7. Тур О.М. Сучасна проблематика гармонізування національних стандартів із міжнародними та європейськими. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2020. № 1. С. 41–49.
8. Хойнацький М.С., Симоненко Л.О., Мовні проблеми державних стандартів на терміни та визначення. *Вісник Книжкової палати*. 2015. № 1. С. 16–18.
9. Забарний С.О. Дем'янчук С.О. Оцінка стану та перспективи розвитку ріпаківництва в Україні і світі. *Агроекологічний журнал*. 2023. № 2. С. 83–90.
10. Кернасюк Ю. Глобальний і внутрішній ринок ріпаку. *Агробізнес сьогодні*. 2022. № 13–14. С. 12–13.
11. Панкова О.В., Сировицький К.Г., Харченко С.О. Посівні якості насіння ріпаку в залежності від обробки електромагнітним випромінюванням різних режимів, як екологічний спосіб підвищення врожайності. *Вісник Сумського національного університету*. 2023. Випуск 1. С. 59–65.
12. ДСТУ ISO 658:2006 Насіння олійних культур. Метод визначення вмісту домішок (ISO 658:2002 IDT). [діє від 01.01.2008]. Київ, 2007. 12 с.
13. ДСТУ 4138:2002 Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості Національний стандарт України [діє від 01.01.2004]. Київ, 2003. 170с.
14. ДСТУ 4966:2008 Насіння ріпаку для промислового перероблення. Технічні умови. Національний стандарт України [діє від 01.07.2010]. Київ, 2009. 12 с.
15. ДСТУ ISO 729:2005 Насіння олійних культур. Визначення кислотності олії (ISO 729:1988 IDT). [діє від 01.10.2006]. Київ, 2006. 10 с.
16. ДСТУ ISO 665:2008 Насіння олійних культур. Визначення вмісту вологи та легких речовин (ISO 665:2000 IDT). [діє від 01.09.2008]. Київ, 2008. 10 с.
17. ДСТУ ISO 734-1:2008 Макухи та шроту олійного насіння. Визначення вмісту олії. Частина 1. Метод екстрагування гексаном (ISO 10565:1998 IDT) [діє від 01.09.2008]. Київ, 2008. 10 с.
18. Україна на шляху до рекордного експорту ріпаку, проте якою ЦІНОЮ? URL: <https://www.apk-inform.com/uk/exclusive/opinion/1535791>
19. ДСТУ 8175:2015 Олія ріпакова. Технічні умови. [діє від 01.01.2017]. Київ, 2017. 24 с.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2025 р.



A. Drahan, V. Karas
Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Berezhany Agrotechnical Institute”

IMPACT OF STANDARDIZATION ON PRODUCTION AND EXPORT RAPESEED AND PRODUCTS OF ITS PROCESSING

Summary

The article analyzes the main problems that arise during the standardization of rapeseed production and processing processes. Attention is paid to compliance with the requirements of the standards for the basic quality indicators of rapeseed and their influence on its export possibilities is investigated. In the publication special attention is paid to the wide range of uses of both rapeseed and its derivatives, namely rapeseed honey, rapeseed oil, cake, meal, glycerin, rapeseed flour and other production products. The article examines the relationship between the process of standardization in the field of rapeseed production and processing, and its impact on the development of the market of rapeseed products in Ukraine and the world. The influence of the harmonization of national standards with international regulatory documents on the growth of exports of rapeseed, rapeseed meal and rapeseed oil is analyzed.

Keywords: standards, rapeseed, harmonized standard.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-36>

УДК [634.23:631.559]:551.582

І. Є. Іванова, к. с.-г. наук

ORCID: 0000-0003-2711-2021

І. А. Кривонос, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-7079-5150

С. В. Басанець, аспірант 2 курсу, спеціальність «Агрономія»

ORCID: 0009-0004-6158-7367

Я. І. Пендрак, аспірант 2 курсу, спеціальність «Агрономія»

ORCID: 0009-0006-9281-7545

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: irynaivanova2017@gmail.com

ФОРМУВАННЯ ОБСЯГІВ ВИРОБНИЦТВА ВИШНІ ЗА ДІЇ АБІОТИЧНИХ ЧИННИКІВ

Анотація. Одна з найбільш затребуваних культур у населення України – вишня. Культура має такі якості, як скоростиглість і невибагливість до погодних параметрів. В умовах аридизації та опустелювання південних територій країни є потреба в дослідженні фізіолого-технологічних показників та урожайності культури. Метою експериментальних досліджень було в умовах Півдня Степової зони України дослідити вплив кліматичних чинників на врожайність вишні та створити математичну модель залежностей двох параметрів.

Дослідження дії абіотичних факторів Запорізької області на врожайність вишні проводили з 2007 по 2019 роки. Помітний вплив на урожайність вишні мають десять погодних факторів, про що свідчать результати кореляційного аналізу $r = 0.68 \dots -0.86$. Отримана модель демонструє вплив гідротермічних факторів на врожайність досліджуваної культури.

Результати кореляційного аналізу дозволили отримати парні коефіцієнти кореляції і за допомогою показника VIF було виявлено ефект мультиколінеарності. За допомогою методу LASSO були отримані достовірні оцінки параметрів регресії та зроблено аналіз погодних факторів, що мають вплив на врожайність вишні. Виділено найбільш значущі температурні погодні параметри в період цвітіння, різниця між середньою максимальною та мінімальною температурами повітря, середнє з максимальних значень температур повітря, сума активних температур, гідротермічний коефіцієнт, сума активних температур за вегетаційний період (до фази досягання плодів). Виділено максимально значущі параметри вологості: середньомісячна сума опадів за серпень, абсолютна мінімальна відносна вологість повітря в травні, в період цвітіння – сума опадів та загальна кількість днів з опадами.

Ключові слова: вишня, погодні умови, метод LASSO, врожайність.

Постановка проблеми. Запорізька область представлена такими кісточковими культурами як черешня, абрикос та вишня. Обсяг їх виробництва становить 14,6%, 14,0% та 11,9% відповідно. Пресингу широкого спектру стресорів рослини піддаються через дестабілізацію погодних умов, забруднення атмосфери та загальне погіршення екологічної обстановки. Поріг впливу негативних факторів часто перевищує поріг природної адаптації рослин, тому їх захисна система потребує допомоги. До групи рослин, що найбільш накопичують негативну інформацію, відносять плодові насадження. Наслідком цього є збільшення чутливості до стресорів та зниження врожайності [1; 2].

Негативні стреси за комплексом негативних явищ поділяють на 2 групи: природні та антропогенні. Саме вони здатні викликати напругу в біологічних системах (рис. 1).

Мікробіологічні, фізіологічні стреси, пошкодження комахами або дія бур'янів в агроценозах відносяться до біотичних негативних природних стресів. Температурний, водний стреси та стрес, викликаний нестачею освітленості – це антропогенні негативні абіотичні стреси,

що спричинені наслідками дії факторів неживої природи. Антропогенні стреси призводять до збільшення кількості захворювань рослин, зменшують стійкість до всіх видів стресів тощо [3; 4; 5].



Рис. 1. Класифікація стресів рослин плодових культур

Обсяги виробництва є параметром, який визначає рівень успішності господарювання підприємств садівництва. Показник урожайності плодових культур є одним з основних показників вдалого розвитку підприємства в сучасних умовах господарювання [6; 7; 8].

Дослідження формування врожайності культури за дії клімату в умовах певного регіону має як теоретичне, так і практичне значення. Згідно з аналізом стресових факторів погодного спрямування ми зможемо об'єктивно спрогнозувати показник урожайності. Останнє може стати базою для комп'ютерного моделювання прогнозу врожайності провідних культур актуального регіону. У садівництві згідно з класифікацією та ієрархією різноманітні плодові культури мають індивідуальні сортові та видові особливості. Кожна культура має сорти з індивідуальною генетичною відгукованістю до умов навколишнього середовища. Зокрема, вишня майже на рівні з черешнею може стати однією з плодових візитівок південної території України. Уже з III декади травня вишня, дюки й черешня розпочинають сезон фруктів. Інтенсивне збільшення цінової політики на плодову сировину було пов'язане з впливом економічних, політичних та епідеміологічних чинників які призвели до низької врожайності. У цьому розумінні гуманітарний контекст значення плодів є одним із вирішальних на територіях, що характеризуються раптовими та затяжними стихійними лихами і конфліктами, тому щодо постійної вразливості та нестабільності представляють особливо критичну сферу, де збереження їжі має вирішальне значення. На врожайність, за відгуками дослідників, мали вплив погодні умови останнього періоду досягання плодів [9; 10].

Аналіз останніх досліджень. За останнє десятиріччя до 2022 року зміна зареєстрованого асортименту України проходила завдяки багаторічній роботі вчених півдня країни. Селекціонерами М.І. Туровцевим та В.О. Туровцевою, А.М. Шкіндер-Барміною було створено сорти вишні й дюків. Селекційна робота науковців визначалась такими вимогами щодо майбутніх сортів, як: низькорослість, максимальна врожайність, функціональні характеристики плодів у десертному й технологічному призначенні, стійкість до мікробіологічних захворювань, зимостійкість. Однак до 2022 року нові конкурентоспроможні сорти селекціонерів України дуже поступово вводились до асортименту промислового садівництва з причини зміни погодних умов існування культур [11; 12; 13].

Формулювання мети статті. Метою дослідження є математичне обґрунтування впливу кліматичних параметрів на врожайність вишні, яку вирощено на півдні Степової зони країни.

Матеріали і методи досліджень. Експеримент було проведено з 2007 по 2019 роки в садівничих господарствах Мелітопольського району Запорізької області. У ході досліджень використано дані Головного управління статистики в Запорізькій області та Мелітопольської метеостанції.

З огляду на вищенаведене визначення екологічної сприятливості або дискомфорតності погодних чинників до врожайності вишні в умовах Запорізької області залишається актуальним питанням для досліджень.

Основна частина. Землі південних регіонів натеper є територією зони ризикованого землеробства. Причиною є те що переважна частина території характеризується раптовими та затяжними стихійними лихами і конфліктами, а також це пов'язано з погодними змінами і збільшенням територій, де спостерігаються прояви опустелювання. Сільськогосподарські землі зони Приазов'я перетворились на зону ризикованого землеробства. Науковці констатують, що через сильні змінами клімату нині зона Степу підпорядкована екологічному ризику. Дослідженнями відзначено перегруповування кордонів кліматичних зон за період останніх десяти років. У Херсонській та Запорізькій областях уже проявились ознаки опустелювання [14–21].

Під час проведення експерименту та його математичного опрацювання використано методи варіаційної статистики, за допомогою яких нами було проаналізовано та оброблено експериментальні данні та зроблено прогноз остаточних результатів. У ході досліджень було використано комп'ютерні програми «MS office Excel 2007» та пакет «Statistica 6».

Схема розрахунку моделей врожайності вишні за дії погодних факторів (рис. 2) [22; 23].

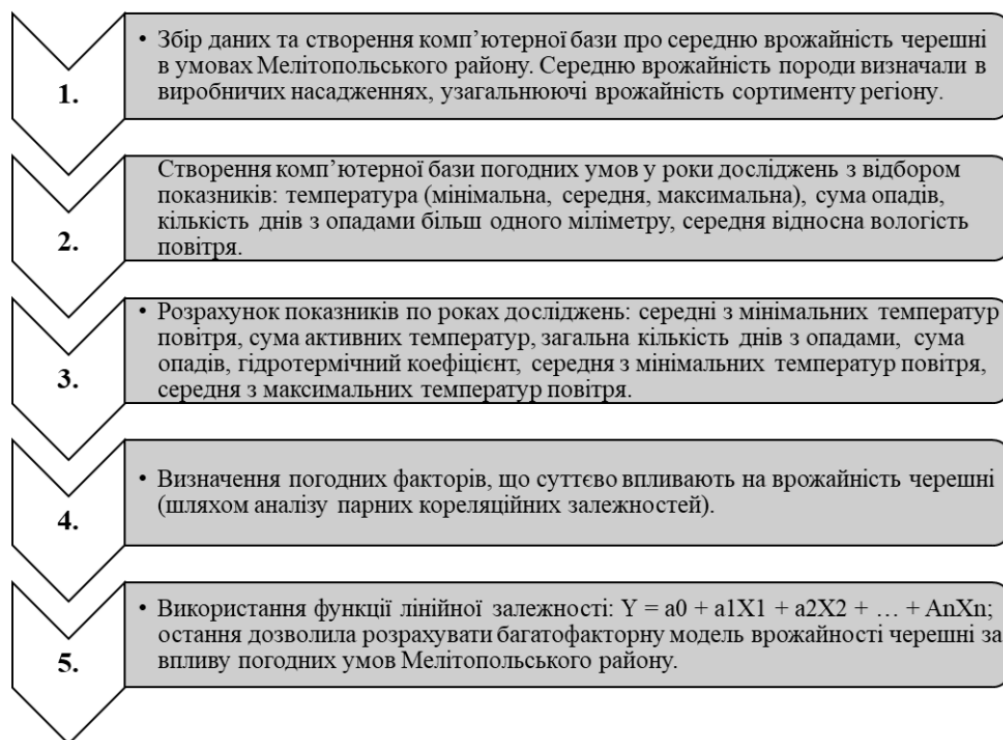


Рис. 2. Схема розрахунку моделей врожайності вишні

Експериментальна частина. Сільськогосподарську оцінку впливу абіотичних факторів на врожайність вишні з 2007 по 2019 рр. було визначено за допомогою низки методів математичної статистики. Результатами двофакторного дисперсійного аналізу підтверджено (рис. 3) домінуючий вплив погодних умов на врожайність вишні.

Встановлено, що частка впливу фактору А (кліматичні параметри) на показник урожайності вишні – 79,69% (рис 3). Вплив фактору В (генетичні особливості сорту) становив 7,74%.

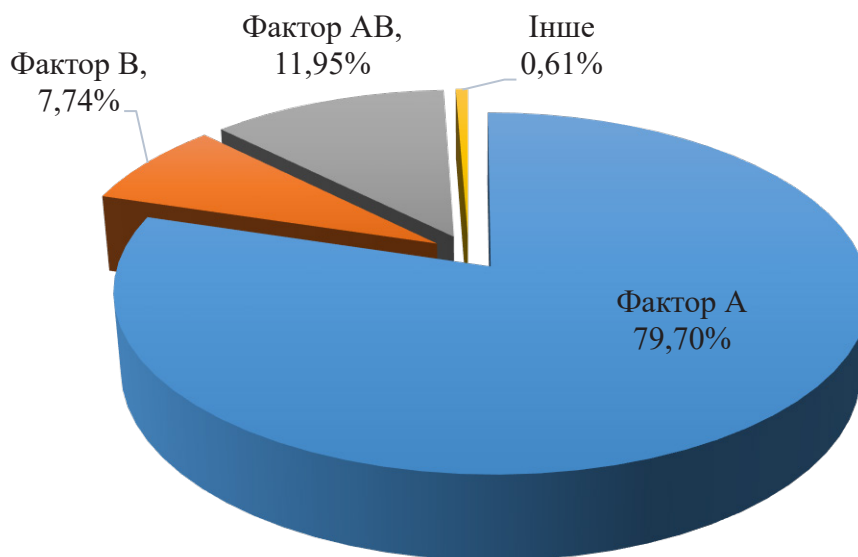


Рис. 3. Частка впливу факторів на врожайність вишні, %: фактор А – кліматичні параметри, фактор В – генетичні особливості сорту, АВ – взаємодія факторів А і В, випадкові та інші фактори

Проведено пошук кореляційних залежностей між показником врожайності культури (Y) та погодними параметрами (факторами) – X_i , де $i = 1 \dots 10$. Проаналізовано фактори – 20 штук, які можуть мати вплив на показник врожайності досліджуваної культури. Для дослідження впливу погодних факторів на врожайність вишні за роки експерименту визначено ступінь 20 парних взаємозалежностей на наступних фазах вегетаційного розвитку рослини: вегетаційний період, цвітіння, досягання плодів, період знімання врожаю.

Дані на рис. 4 показують, що проведено аналіз тісноти кореляційного зв'язку для десяти погодних факторів (X_i) до врожайності вишні (Y) за шкалою Чеддока. За даними рис. 4, для 10 погодних факторів (X_i , де $i = 1 \dots 10$) визначили середню і сильну лінійну кореляційну залежність з урожайністю культури ($r_{YX_i} = 0,68 \dots -0,86$). Виділено найбільш значущі температурні погодні параметри в період цвітіння: різниця між середньою максимальною та мінімальною температурами повітря, середнє з максимальних значень температур повітря, сума активних температур, гідротермічний коефіцієнт, сума активних температур за вегетаційний період (до фази досягання плодів). Виділено найбільш значущі фактори вологості: середньомісячна сума опадів за серпень, абсолютна мінімальна відносна вологість повітря в травні, сума опадів в період цвітіння, загальна кількість днів з опадами в період цвітіння.

Регресійна модель залежності врожайності Y вишні від факторів погодних умов (X_i , $i = 1 \dots 10$) має вигляд, при $R^2 = 0,9958$:

$$Y = 10,022 - 0,003X_1 - 1,151X_2 - 0,017X_3 + 0,105X_4 + 0,049X_5 + 0,431X_6 + 0,945X_7 - 0,187X_8 - 0,758X_9 - 0,479X_{10}.$$

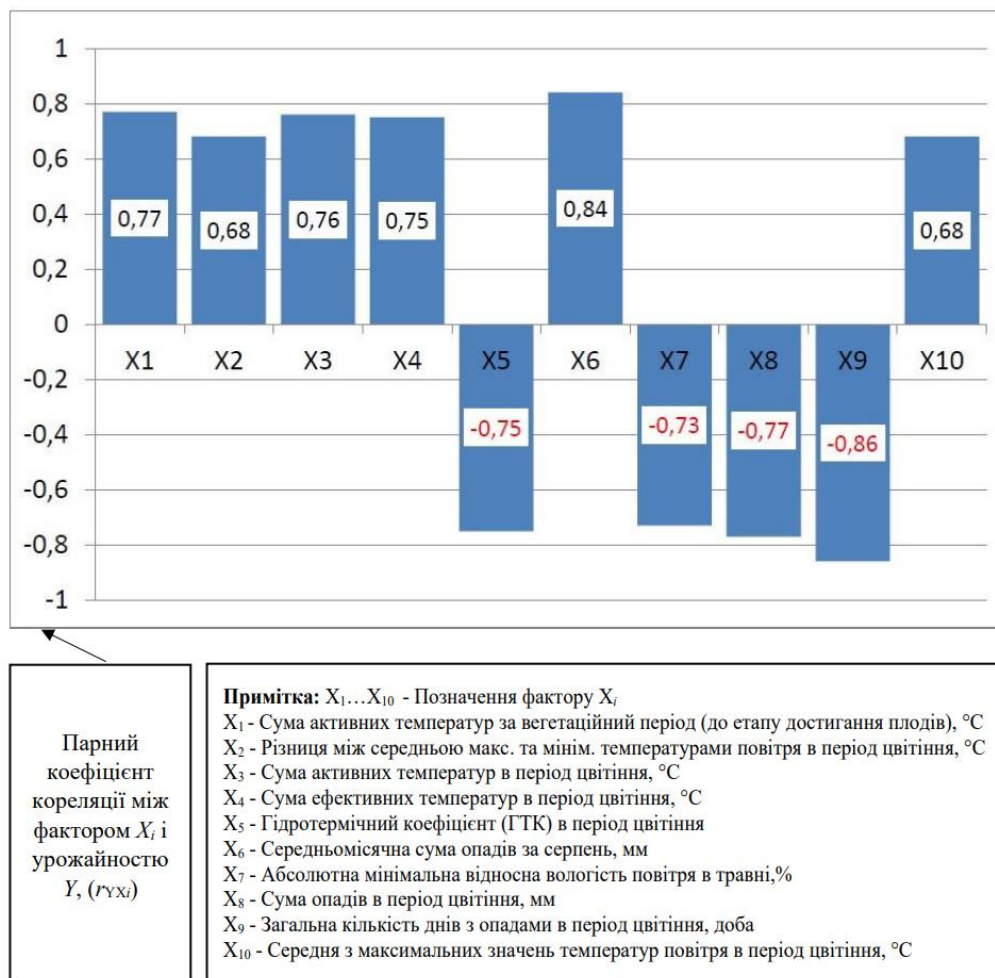


Рис. 4. Дані парних коефіцієнтів кореляції між погодними факторами та врожайністю (2007...2019 рр.)

Аналіз перевірки результатів за критерієм Ст'юдента показав, що досліджені фактори є незначимими, при $\alpha=0,05$ (виняток мають фактори X_6 і X_7). Для ліквідації ефекту мультиколінійності та отримання ефективної моделі регресії треба позбавитись кореляційних факторів та залишити ті з них, які мають максимальний вплив на продуктивність урожайності (Y). Для максимального врахування факторів, які є доречними, було проведено статистичний аналіз регресійних моделей. Останні було побудовано за різних доборів факторів. Перевірку кожної з моделей, що були розроблені, проведено за різними критеріями їх якості. На підставі отриманих розрахунків і практичної доцільності запропоновано найбільш ефективну модель:

$$Y = 4,040 - 0,634X_2 + 0,054X_4 + 0,3281X_6 + 0,670X_7 + 1,122X_8 - 0,755X_9 - 0,392X_{10}.$$

Рівняння можна вважати статистично значущим.

Значення узагальненого коефіцієнту детермінації ($R^2 = 0,996$) показує суттєвий зв'язок виділених факторів з результирующим показником (Y). Критерій Фішера $F = 84,44$ при значенні $p\text{-value} = 6.898 \cdot 10^5$. Останнє свідчить про адекватність моделі за $\alpha = 0,05$.

Висновки. Проведений множинний кореляційно-регресійний аналіз дозволив отримати регресійну модель. Регресійна модель прогнозує врожайність вишні залежно від впливу погодних параметрів:

$$Y = 4,040 - 0,634X_2 + 0,054X_4 + 0,3281X_6 + 0,670X_7 + 1,122X_8 - 0,755X_9 - 0,392X_{10}.$$

Рівняння можна вважати статистично значущим. Надану математичну модель можна використовувати в регіонах зі схожими кліматичними умовами.

Список використаних джерел

1. Наумов А.О., Лимар А.О. Способи підвищення адаптивних здатностей рослин кавуна до негативних абіотичних чинників Південного Степу. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 9 (798). С. 21–28. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201909-03>
2. Šebek G. Pomological and chemical characteristics of fruit of some sour cherry cultivars grown in the conditions of bijelo polje. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2019. 26. P. 100–104.
3. Адаменко Т. Без паніки: кліматичні зміни можуть виявитися корисними для сільського господарства. *Український тиждень*. 2012. № 29 (246). С. 28–31.
4. Богданюк О.В. Оцінка впливу чинників на урожайність плодово-ягідних культур в контексті ефективного управління садівництвом. *Молодий вчений*. 2016. № 11. С. 555–558.
5. Експерти пояснили причину «космічних» цін на черешню. URL: <https://ua.news.ua/eksperty-poyasnyly-prychynu-kosmichnyh-tsin-na-chereshnyu/> (дата звернення: 17.02.2025).
6. Wojdyło A., Nowicka P., Laskowski P., Oszmiański J. Evaluation of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) fruits for their polyphenol content, antioxidant properties, and nutritional components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014. 62. P. 12332–12345. <https://doi.org/10.1021/jf504023z>
7. Wang R., Zhang F., Zan S., Gao C., Tian C., Meng X. Quality characteristics and inhibitory xanthine oxidase potential of 21 sour cherry (*Prunus cerasus* L.) varieties cultivated in China. *Frontiers in Nutrition*. 2021. 8. P. 796294. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.796294>
8. Karagiannis E., Sarrou E., Michailidis M., Tanou G., Ganopoulos I., Bazakos C., Kazantzis K., Martens S., Xanthopoulou A., Molassiotis A. Fruit quality trait discovery and metabolic profiling in sweet cherry genebank collection in Greece. *Food Chemistry*. 2021. 342. P. 128315. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128315>
9. Регресійний аналіз залежності урожайності вишні від гідротермічних факторів в умовах мультиколінеарності / В.М. Малкіна та ін. *Наукові горизонти*. 2019. № 11 (84). С. 51–60.
10. Урожайність черешні залежно від кліматичних умов років вирощування / І.Є. Іванова та ін. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. № 3. С. 61–70.
11. Cittadini E.D., Lubbers M.T.V.H., Ridder de N., Keulen van H., Claassen G.D.N. Exploring options for farm-level strategic and tactical decision-making in fruit production systems of South Patagonia Argentina. *Agricultural Systems*. 2008. Vol. 98, is. 3. P. 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.07.001>
12. Gonzalez-Gomez D., Ayuso M.C., Bernalte M.J., Fernández-León M.F. Evaluation of different postharvest conditions to preserve the amount of bioactive compounds, physicochemical quality parameters and sensory attributes of «Sweetheart» cherries. *Acta horticulturae*. 2017. № 1161_92. P. 581–586. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1161.92>
13. Lakatos L., Dussi M.C., Szabo Z. The influence of meteorological variables on sour cherry quality parameters. *Acta horticulturae*. 2014. № 1020. P. 287 – 292. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1020.41>
14. Schuster M. New cultivars of first quality cherries at Dresden-Pillnitz. *Acta Horticulturae*. 2016. Vol. 136. P. 1–6. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1139.1>
15. Туровцева Н.М. Сорти черешні селекції Інституту зрошуваного садівництва імені М.Ф. Сидоренка НААН України. *Агробіологія*. 2014. № 1. С. 96–101.
16. Туровцев М.І. Селекція черешні (*Cerasus avium* Moench.) в Інституті зрошуваного садівництва ім. М.Ф. Сидоренка УААН України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*; редкол.: Д.О. Мельничук та ін. Київ, 2009. Вип. 133. С. 51–58.
17. Бублик М.О. Методологічні та технологічні основи підвищення продуктивності сучасного садівництва. Київ: Нора-прінт, 2005. 286 с.
18. Богданюк О.В. Оцінка впливу чинників на урожайність плодово-ягідних культур у контексті ефективного управління садівництвом. *Молодий вчений*. 2016. № 11. С. 555–558. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/molv_2016_11_130 (дата звернення: 22.07.2019).



19. Ivanova I., Kryvonos I., Shleina L., Taranenko G., Gerasko T. Multicriteria Optimization of Quality Indicators of Sweet Cherry Fruits of Ukrainian Selection During Freezing and Storage. *Modern Development Paths of Agricultural Production* / ed. V. Nadykto. Springer Nature Switzerland AG. 2019. P. 707–717. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_69
20. Gerasko T.V. and Velcheva L.G. and Todorova L., Pokoptseva L.A. and Ivanova I. Ye. Effect of Living Mulch on Chlorophyll Index, Leaf Moisture Content and Leaf Area of Sweet Cherry (*Prunus avium* L.). In: *Modern Development Paths of Agricultural Production Trends and Innovations*. Springer Link. 2019. P. 681–688. ISBN 978-3-030-14918-5
21. Кіщак О.А. Наукові основи промислової культури черешні в Лісостепу України : автореферат. дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.01.07 ; Нац. акад. аграр. наук України, Ін-т садівництва. Київ, 2014. 36 с.
22. Serdyuk M. The study of mass loss intensity of plum fruit during storage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 1/10 (79). P. 42–48.
23. Bublyk M.O., Fryziuk L.A., Levchuk L.M. Fruit crop production distribution in Ukraine: A research note. *Chemistry and Chemical Biology: Methodologies and Applications* / ed. R. Joswik, A. A. Dalinkevich. Toronto, 2014. P. 207–214.

Стаття надійшла до редакції 23.02.2025 р.

I. Ivanova, I. Kryvonos, S. Basanets, Ya. Pendrak
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

FORMATION OF CHERRY PRODUCTION VOLUMES UNDER THE ACTION OF ABIOTIC FACTORS

Summary

Sour cherry is one of the most popular crops among the population of Ukraine. The crop has such qualities as early maturity and unpretentiousness to weather parameters. In the context of aridisation and desertification of the southern territories of the country, there is a need to study the viticultural and technological indicators and yield of the crop. Taking into account the above, the purpose of the experimental studies was to investigate the influence of climatic factors on sour cherry yield in the southern steppe zone of Ukraine and to create a mathematical model of the dependencies of the two parameters.

The study of the effect of abiotic factors in Zaporizhzhia region on sour cherry yield was conducted from 2007 to 2019. Ten weather factors have a significant impact on sour cherry yields, as evidenced by the results of the correlation analysis $r = 0.68 \dots -0.86$. The obtained model demonstrates the influence of hydrothermal factors on the yield of the studied crop. The results of the correlation analysis allowed us to obtain paired correlation coefficients and, using the VIF indicator, we identified the effect of multicollinearity. Using the LASSO method, we obtained reliable estimates of the regression parameters and analysed the weather factors that affect sour cherry yields.

The most significant temperature weather parameters during the flowering period, the difference between air temperatures, the average of the maximum air temperatures, the sum of active temperatures, the hydrothermal coefficient; during the growing season, the sum of active temperatures (up to the fruit ripening phase). The most significant humidity parameters were identified: average monthly precipitation in August, absolute minimum relative humidity in May, and during the flowering period – the amount of precipitation and the total number of days with precipitation.

Keywords: sour cherry, weather conditions, LASSO method, fruitfulness.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-37>

УДК 663.81:637.433

С. Л. Колесніченко, канд. техн. наук

М. А. Кашкано, канд. техн. наук

Одеський національний технологічний університет

e-mail: svetlanalk@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8752-053X

ORCID: 0000-0002-8782-9182

ВИКОРИСТАННЯ СОКІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ ОМЛЕТУ

Анотація. Метою дослідження є розроблення рецептури та технології приготування омлетів із використанням соку синьої капусти та соку пітахай як рецептурних компонентів.

У статті приведено результати дослідження органолептичних показників. Аналіз смакових якостей розроблених омлетів показав, що додавання соків надає готовим виробам більшої пишності, соковитості, дещо знижує яєчний присмак та додає нотку смаку сировини, з якої одержано сік.

Органолептичні властивості розроблених омлетів були на високому рівні. Розраховано енергетичну цінність омлетів з урахуванням маси однієї порції – 250 грамів.

Наведено розрахункові дані біологічної цінності яєць курячих, що йдуть на порцію омлету. Біологічна цінність зумовлена наявністю в їх складі незамінних амінокислот, моно- та поліненасичених жирних кислот, вітамінів, а також мінеральних речовин. Розроблені страви рекомендовано до впровадження в заклади ресторанного господарства для споживання широкими верствами населення.

Ключові слова: омлет, технологія продукції ресторанного господарства, показники якості, пітахай, синя капуста.

Постановка проблеми. З 1996 року в другу п'ятницю жовтня проводиться Всесвітній день яйця (World Egg Day). Його присвячено вшануванню одного з найдавніших продуктів харчування, що відомий людству, який нині часто називають «суперфудом», а саме яйцем.

Яйця курячі свіжі мають значну біологічну та харчову цінність завдяки високому вмісту білка (майже 13%), ліпідів (11,5%) та мінеральних речовин (0,8%). Білки яєць є повноцінними, бо містять практично всі незамінні амінокислоти. Ліпіди своєю чергою мають у складі біологічно активні арахідонову, ліноленову жирні кислоти та фосфоліпіди.

Нині в закладах ресторанного господарства значної популярності набувають традиційно відомі страви, що збагачені комплексом натуральних рослинних компонентів для підвищення біологічної цінності страви та оновлення і покращення її органолептичних характеристик.

Найбільш популярною стравою з яєць вважається омлет – смажений чи запечений із суміші збитих яєць та інших рецептурних компонентів із додаванням солі та прянощів. Французький омлет за класичною технікою приготування має ніжну консистенцію всередині та злегка хрумку рум'яну скоринку зовні. Французький омлет готується з яєць, вершкового масла, солі і перцю.

Але як рецептурні компоненти в омлет можуть додаватися молоко, вода, вершки, бульйон, невелика кількість борошна тощо. Додаткова різноманітність досягається додаванням під час теплового оброблення дрібно нарізаної ковбаси, смаженого м'яса, сиру, відварених грибів, цибулі, часнику або зелені [1, с. 148]. Теплове оброблення може полягати в підсмажуванні на сковороді, запіканні в духовці або приготуванні на водяній бані.

Розроблено [2, с. 78] омлети з додаванням бджолиного пилку, меду, яєчного порошку. Також відомий спосіб одержання омлету тривалого зберігання з використанням високого тиску 700 МПа для забезпечення мікробіологічної чистоти виробу та збереження всього вітамінного комплексу [3, с. 207].



Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є розроблення рецептури й технології приготування омлетів із соками синьої капусти та пітахайї для розширення асортименту омлетів та надання популярній страві додаткових оздоровчих та інноваційних органолептичних властивостей.

Дослідження проводилися в науково-дослідній лабораторії кафедри технології ресторанного й оздоровчого харчування Одеського національного технологічного університету.

Основна частина. Прототипом було вибрано рецептуру омлету з додаванням води (контрольний зразок).

Для приготування соків використовували капусту синю свіжу (ДСТУ 4154:2003) та пітахайю з червоною м'якоттю свіжоморожену (Сертифікат якості виробника).

Синя капуста, порівняно з білокачанною, містить більшу кількість вітаміну С та вітаміну К, відповідно, 67% та 32% від добової норми, вітаміну В6 – 12% добової норми, а також калію – 12%, кремнію – 93% добової норми у 100 грамах капусти. Через високий вміст антоціанів, які є пігментами червоного, синього та фіолетового кольору, за регулярного вживання синьої капусти усувається крихкість судин. Також вона містить багато антиоксидантів, що стимулюють процес регенерації клітин організму людини [4, с. 176].

Пітахайя (фрукт дракона) стабілізує рівень глюкози в крові. Антиоксиданти цього фрукту звільняють організм від вільних радикалів, які часто стають причиною онкології. Завдяки високому вмісту вітаміну С фрукт дракона зміцнює імунітет та допомагає боротися із вірусними та мікробними захворюваннями. Але, оскільки пітахайя є екзотичним фруктом, вона має певні протипоказання, її не слід вживати алергікам. У ресторанах часто використовують свіжу пітахайю для оформлення страв, бо вона має насичений червоно-фіолетовий колір.

На першому етапі досліджень піддавали аналізу сік із синьої капусти і пітахайї. Сік одержували за допомогою соковижималки: капусту попередньо нарізали на шматки, пітахайю розморожували. Характеристику одержаних соків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика соків синьої капусти та пітахайї

Показник	Сік із синьої капусти	Сік із пітахайї
Зовнішній вид і колір	Рідина синьо-фіолетового кольору	Рідина ярко-фіолетового кольору
Запах	Запах капусти	Ніжний ягідний аромат
pH	7,2	5,9

Омлети готували за рецептурами, що наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Рецептури зразків омлетів

Найменування	Контроль	Омлет із соком пітахайї	Омлет із соком синьої капусти
Яйця курячі, г	180	180	180
Вода питна	40	-	-
Йогурт грецький, 3%, г	-	40	40
Сік синьої капусти, г	-	-	40
Сік пітахайї червоної, г	-	40	-
Сіль, г	0,3	0,3	0,3
Часник сушений мелотий, г	-	0,5	0,5
Перець білий, г	-	0,1	0,1
Перець чорний мелений, г	0,1	-	-
Олія оливкова, г	20	20	20
ВИХІД, г:	220	250	250

Технологія приготування. Підготовлені яйця звільнити від шкаралупи та перелити в глибоку миску. Додати грецький йогурт, перемішати до однорідності, потім влити сік, додати сіль, часник сушений та перець білий. Ретельно перемішати та одразу вилити на розігріту сковороду діаметром 22-24 см, змащену оливковою олією. Коли омлет знизу підсмажиться, а в центрі ще буде рідким, згорнути омлет рулетом та підсмажувати ще 1–2 хвилини. Перекласти омлет на тарілку швом донизу. Прикрасити зеленню за бажанням.

Технологічну схему приготування омлетів із соком пітахайї або із соком синьої капусти наведено на рис. 1.

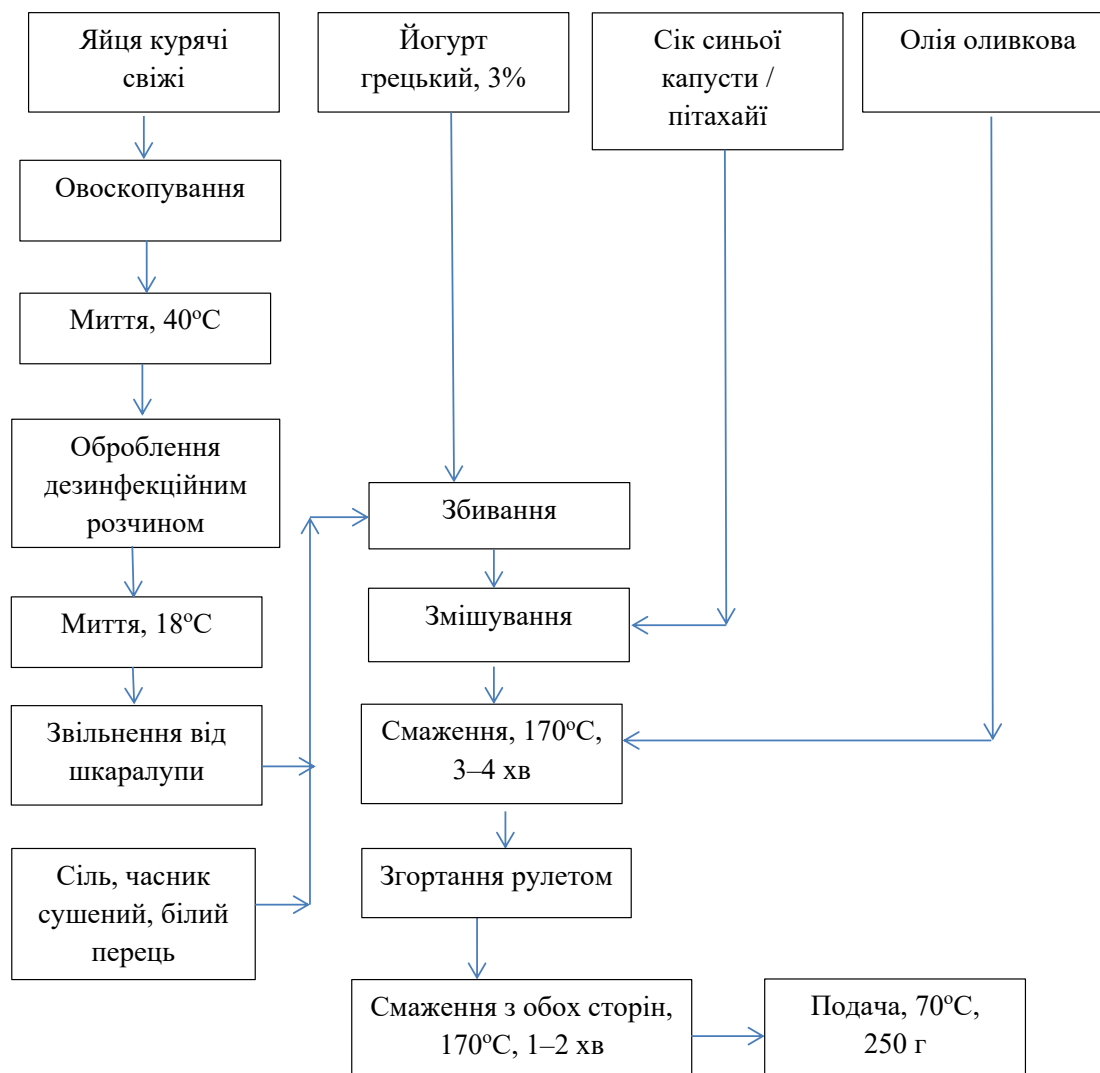


Рис. 1. Технологічна схема приготування омлетів із соком синьої капусти або із соком пітахайї

Органолептичні показники розроблених омлетів представлено в табл. 3.

Аналіз смакових якостей розроблених омлетів показав, що додавання соків надає готовим виробам більшої пишності, соковитості, дещо знижує яєчний присмак та додає нотку смаку сировини, яку використовували для приготування соку.

Таблиця 3

Органолептичні показники розроблених омлетів

Показник	Характеристика
Омлет із соком синьої капусти	
Зовнішній вид	Рулет салатного кольору із золотистою шкірочкою
Колір	Шкірочки – рум'яний, золотистий, у розрізі омлет – ярко-салатовий
Смак	Ніжний смак запечених яєць із присмаком прянощів, злегка солонуватий
Запах	Ніжний запах запечених яєць, оливкової олії, часнику та перцю
Консистенція	Ніжна, пишна, дуже соковита
Омлет рожевий із соком пітахайї	
Зовнішній вид	Рулет рожево-помаранчевого кольору із золотистою шкірочкою
Колір	Шкірочка рум'яна, золотиста, в розрізі омлет – рожево-помаранчевий
Смак	Ніжний смак запечених яєць, злегка солодкувато-солонуватий з присмаком прянощів
Запах	Ніжний запах запечених яєць, оливкової олії, часнику та перцю
Консистенція	Ніжна, пишна, дуже соковита

Органолептичні показники якості розроблених омлетів відповідали нормі та були на високому рівні, особливо вразив колір омлетів: омлет із додаванням соку пітахайї був рожево-помаранчевого кольору, омлет із додаванням соку синьої капусти в розрізі мав колір м'якоті свіжого салатного огірка, ярко-салатовий.

Якість розроблених омлетів визначимо за органолептичною оцінкою за 5-ти бальною шкалою, результати оцінювання наведено на діаграмах (рис. 2 і рис. 3).

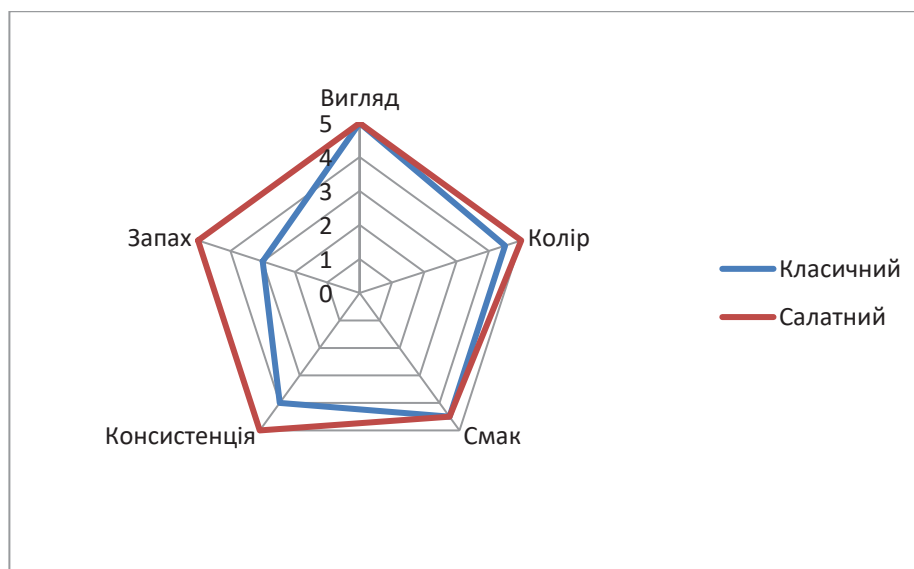


Рис. 2. Результати балового органолептичного оцінювання омлету із соком синьої капусти

Енергетичну цінність розроблених омлетів розраховували за стандартною методикою, результати підрахунків наведено в табл. 4 і табл. 5.

Біологічна цінність страви визначається головним чином наявністю в ній незамінних факторів харчування, які не синтезуються в нашому організмі або синтезуються в обмеженій кількості і з малою швидкістю [4, с. 68]. До основних незамінних компонентів їжі відносяться 8...10 амінокислот, 3...5 поліненасичених жирних кислот, усі вітаміни і більшість мінеральних речовин, а також природні фізіологічні речовини високої біологічної активності.

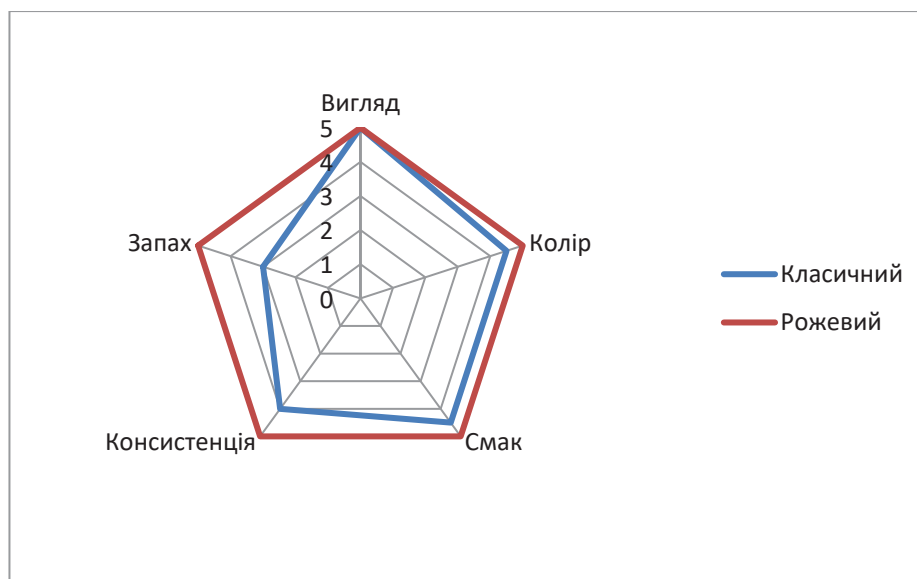


Рис. 3. Результати балового органолептичного оцінювання омлету із соком пітахайї

Таблиця 4

Вміст макронутрієнтів та енергетичної цінності порції омлету із соком синьої капусти

Компоненти	Маса нетто, г	Білки, г	Жири, г	Вуглеводи, г
Яйця курячі, гр.	180	22,9	20,7	1,3
Йогурт грецький, 3%, г	40	1,1	1,2	1,6
Сік синьої капусти, г	-	0,6	0,01	2,5
Сіль, г	0,3	-	-	-
Часник сушений молотий, г	0,5	0,16	0,01	3,6
Перець білий, г	0,1	0,5	0,4	3,6
Олія оливкова, г	10	-	9,98	-
Всього:		25,26	31,93	12,6
Б/Ж/У		1	1,4	0,5
Енергетична цінність	439 ккал			

Таблиця 5

Вміст макронутрієнтів та енергетичної цінності порції омлету із соком пітахайї

Компоненти	Маса нетто, г	Білки, г	Жири, г	Вуглеводи, г
Яйця курячі, г	180	22,9	20,7	1,3
Сметана, 10%, г	40	1,1	1,2	1,6
Сік пітахайї червоної, г	40	0,2	0	5,2
Сіль, г	0,3	-	-	-
Часник сушений молотий, г	0,5	0,16	0,01	3,6
Перець білий, г	0,1	0,5	0,4	3,6
Олія оливкова, г	10	-	9,98	-
Всього:		24,86	31,92	15,3
Б/Ж/У		1	1,4	0,6
Енергетична цінність	448 ккал			

Біологічна цінність яєць курячих зумовлена наявністю в їх складі незамінних амінокислот, моно- та поліненасичених жирних кислот, вітамінів, а також мінеральних речовин (табл. 6).



Таблиця 6

Біологічна цінність яєць курячих

Назва	Вміст	
	На 100 г яєць [4]	На 180 г яєць
1	2	3
Незамінні амінокислоти		
Аргінін	0,79	1,42
Валін	0,77	0,39
Ізолейцин	0,6	1,08
Лейцин	1,08	1,94
Лізин	0,9	1,62
Метіонін + Цистеїн	0,72	1,30
Треонін	0,61	0,34
Триптофан	0,2	0,36
Фенілаланін	0,65	1,17
Фенілаланін + тірозин	1,13	2,03
Мононенасичені жирні кислоти, г:		
16:1 Пальмітолеїнова (ud)	0,39	0,70
18:1 Олеїнова (ud)	4,09	7,36
20:1 Гадолеїнова (омега-9)	0,004	0,007
Поліненасичені жирні кислоти, г:		
18:2 Лінолева (ud)	1,1	1,98
18:3 Ліноленова (ud)	0,06	0,11
20:4 Арахідонова (ud)	0,1	0,18
Омега-3 жирні кислоти	0,101 (норма 0,9...3,7 гр.)	0,18
Омега-6 жирні кислоти	0,784 (норма 4,7...16,8 гр.)	1,41
Вітаміни (% добової норми):		
A	29	52,2
B ₂	24	43,2
Холін	50	90
B ₅	26	46,8
B ₆	7	12,6
B ₁₂	17	30,6
Д	22	39,6
Н	40	72,0
РР	18	32,4
Мінеральні речовини (% добової норми):		
Калій	6	10,8
Натрій	10	18
Фосфор	24	43,2
Залізо	14	25,2
Йод	13	23,4
Кобальт	100	180
Мідь	8,3	14,94
Молібден	8,6	15,48
Селен	56	100,8
Хром	8	14,4
Цинк	9,3	16,74

Біологічна цінність соку синьої капусти зумовлена головним чином наявністю вітамінів групи В, вітамінів С, К. Біологічна цінність соку пітахайї визначена вітамінами В₁, В₂, С і РР,

присутність яких оздоровче впливає на серцево-судинну систему, запобігає тромбозам, нормалізує рівень холестерину, сприяє детоксикації організму.

Висновки. Завдяки дослідженням з розроблення технології приготування страв із додаванням соку синьої капусти та пітахайї як рецептурного компонента розширено асортимент омлетів. Розроблені омлети мають не тільки високі харчові, але й також оздоровчі превентивні властивості.

Досліджувані зразки одержали високу органолептичну оцінку під час дегустації й рекомендовані до впровадження в меню в закладах ресторанного господарства для вживання всіма верствами населення. Завдяки гарному кольору кожного виду розроблених омлетів передбачається їх особлива популярність у молодіжних кафе, арт-кафе та ресторанах молекулярної кухні.

Перспективи подальших досліджень. Надалі планується розширення асортименту різнокольорових омлетів завдяки застосуванню свіжих соків із рослинної сировини яскравого кольору та значної біологічної цінності. Також плануються структурні дослідження розроблених зразків.

Список використаних джерел

1. Технологія продукції ресторанного господарства / А.Д. Салавеліс та ін. Одеса : «Освіта України», 2017. 312 с.
2. Філь М.І. Інноваційний підхід до технології яєчного омлету. НВ ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. *Серія: Харчові технології*. 021, 23(95), 78–82. <https://doi.org/10.32718/nvvet-f9513>
3. Сукманов В.О., Маліч О.А., Дебелий В.Л. Дослідження реологічних показників яєчних омлетів тривалого терміну зберігання, вироблених з використанням високого тиску. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. № 21(4). С. 206–217. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2015_21_4_28
4. Енциклопедія харчування : у 10 т. Т. 1–2: Організм людини та харчування. Нутрієнти харчових продуктів / під ред. А.І. Черевко. Харків : «Світ книги», 2013. 223 с.
5. Kahma N., Niva M., Helakorpi S., Jallinoja P. Everyday distinction and omnivorous orientation: An analysis of food choice, attitudinal dispositions and social background Appetite. 2016. No. 96. 443–453.
6. Kalyani P., Gayathri R., Vishnupriya V. Top foods among adolescents International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research. 2016. № 39. P. 20–24.
7. Gruner J., OhriVachaspati P. Food and Beverage Selection Patterns among Menu Label Users and Nonusers: Results from a CrossSectional Study. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. 2016. № 117. P. 929–936.
8. Gustafsson I.B., Ostrom A., Johansson J., Mossberg L. The five aspects meal model: A tool for developing meal services in restaurants. *Journal of Foodservice*. 2011. Vol. № 17(2). P. 84–93.
9. Nemeth C.N., Lang D.L., Toth A.T. Microbiological condition of “eggshell flour” in the food industry. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2015. № 7. 1–5.
10. Savastano D. Complexity of emulsification Publish. 2018. № 1. 213–219.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.

S. Kolesnichenko, M. Kashkano
Odesa National University of Technology

USE OF JUICES IN OMELET PREPARATION TECHNOLOGY

Summary

The purpose of the research was to develop a recipe and technology for preparing omelets using blue cabbage juice and pitahaya juice as recipe components. The article presents the results of a study of organoleptic indicators. Analysis of the taste qualities of the developed omelets showed that adding juices gives the finished products more



splendor, juiciness, somewhat reduces the egg flavor and adds a touch of the taste of the raw material from which the juice was obtained. The organoleptic properties of the developed omelets were at a high level.

The energy value of omelets was calculated taking into account the mass of one Serving – 250 grams. The calculated data on the biological value of chicken eggs per serving of omelet are given. The biological value is due to the presence of essential amino acids, mono- and polyunsaturated fatty acids, vitamins, and minerals in their composition. The developed dishes are recommended for introduction into restaurant establishments for consumption by wide segments of the population.

Keywords: omelet, restaurant production technology, quality indicators, pitahaya, blue cabbage.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-38>

УДК 664.6

О. Ю. Кошель, д.ф., доцент

ORCID: 0000-0002-2184-2106

В. І. Пономаренко, аспірант

ORCID: 0009-0003-0132-1316

Сумський національний аграрний університет

e-mail: valeriia.ponomarenko26@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ БІСКВІТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БОРОШНА ЗЕЛЕНОЇ ГРЕЧКИ

Анотація. У статті розглянуто перспективи застосування борошна зеленої гречки у виробництві бісквітних напівфабрикатів як альтернативи традиційному пшеничному борошну. Метою дослідження є визначення впливу борошна зеленої гречки на якісні показники бісквіту. Було розроблено нову рецептуру бісквітного напівфабрикату з повною заміною пшеничного борошна на борошно зеленої гречки. Створено технологічну схему виробництва бісквітних напівфабрикатів із борошна зеленої гречки. Визначено органолептичні показники випеченого напівфабрикату. Отримані результати свідчать про доцільність використання борошна зеленої гречки для виготовлення бісквітних напівфабрикатів, оскільки випечені напівфабрикати мають гарні органолептичні показники, зберігають пишність і мають природний колір, що робить їх привабливими для споживачів.

Ключові слова: бісквітний напівфабрикат, борошно зеленої гречки, нетрадиційні види борошна.

Постановка проблеми. У сучасних умовах спостерігається зростання попиту на продукти з високою харчовою цінністю та функціональними властивостями, що відповідають концепції здорового харчування. Актуальність використання нетрадиційних видів борошна в кондитерському виробництві зумовлена необхідністю покращення харчової цінності бісквітних виробів, збагачення їх вітамінами, мінералами та іншими корисними речовинами.

Традиційні рецептури бісквітів зазвичай базуються на використанні пшеничного борошна, яке хоча й забезпечує необхідні структурні властивості тіста, проте має обмежену біологічну цінність і високий глікемічний індекс. У зв'язку із цим зростає інтерес до альтернативної сировини, яка може покращити функціональні властивості продукту та розширити його асортимент.

Аналіз наукових публікацій свідчить про активні дослідження щодо впровадження нетрадиційних інгредієнтів у виробництво бісквітних напівфабрикатів. Зокрема, досліджено можливість використання кукурудзяного борошна [1], рисового борошна [2], борошна із цвіркунів [3], вівсяного борошна [4], спельтового борошна [5], нутового та арахісового борошна [6], гарбузового пюре та борошна з насіння соняшника [7], а також комбінації різних безглютенових компонентів [8] і борошна з насіння чіа [9].

Попередні дослідження підтвердили ефективність застосування нетрадиційного борошна у виробництві бісквітів, що відкриває перспективи для подальшого розширення їх асортименту.

Одним із нових і недостатньо вивчених напрямів удосконалення технологій борошняних кондитерських виробів можна вважати використання борошна зеленої гречки.

Гречана крупа та продукти її перероблення, особливо зелене гречане борошно, вважаються перспективною нетрадиційною сировиною, оскільки гречане борошно виробляється без термічного оброблення, завдяки чому зберігаються вітаміни, макро- та мікроелементи, ферментні комплекси та потужні антиоксидантні властивості. Це борошно характеризується високим вмістом білка (13–15%) і є особливо цінним харчовим продуктом для виробництва безглютено-

вої продукції, оскільки білок не містить глютену і складається в основному з альбумінів і глобулінів, які легко засвоюються організмом [10]. Воно має тонкий горіховий смак, світло-сірий колір, легко перетравлюється і засвоюється організмом та приносить величезну користь [11]. Його використання дозволяє не лише збагачувати бісквіти корисними нутрієнтами, а й знижувати глікемічний індекс готових виробів, що особливо важливо для споживачів, які дотримуються здорового харчування або мають певні дієтичні обмеження.

Варто зазначити, що раніше вже проводилися теоретичні дослідження з обґрунтування використання борошна зеленої гречки у збивних бісквітних напівфабрикатах. Наприклад, теоретично обґрунтовано доцільність використання борошна зеленої гречки та псиліуму в технології збивних борошняних напівфабрикатів, зокрема бісквітів типу «Буше» [12]. Автори підтвердили, що борошно зеленої гречки є цінним джерелом рослинного білка, має низький глікемічний індекс та є гіпоалергенним продуктом.

Водночас практичного обґрунтування перспективи використання цього борошна в бісквітних напівфабрикатах нами не знайдено.

Таким чином, розроблення бісквітних виробів із частковою або повною заміною традиційного борошна на борошно зеленої гречки є актуальним і перспективним напрямом, що вимагає наукового обґрунтування та дослідного впровадження.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях активно вивчається використання борошна зеленої гречки як нетрадиційного інгредієнта у виробництві різних харчових продуктів.

У дослідженні [13] І. Гетьман, І. Кухаренко та Л. Михонік було використано борошно зеленої гречки як поживне середовище для заквасок спонтанного бродіння. Встановлено, що гречана закваска може бути якісною альтернативою традиційним житнім та пшеничним закваскам. Визначено органолептичні, біотехнологічні та фізико-хімічні параметри, які забезпечують високу якість закваски.

У роботі О. Болховітіної, А. Жигиря та Л. Каменюки [14] розглянуто перспективи використання борошна зеленої гречки в технології пшеничного хліба. Виявлено, що додавання 10–15% цього компонента підвищує вміст харчових волокон на 55,4–98,4%, вітамінів та мікроелементів, зокрема калію, магнію, фосфору та заліза.

А. Сімонова та Н. Соколова [15] розглянули можливість використання борошна зеленої гречки в технології хлібобулочних виробів пониженої вологості й дослідили вплив борошна зеленої гречки на глікемічний індекс цих виробів. Установлено, що вибрана комбінація інгредієнтів дозволяє значно зменшити енергетичну цінність і глікемічний індекс виробів з борошна.

У дослідженні С. Боковця та О. Кошель [16] розглянуто вплив борошна зеленої гречки та псиліуму на якість безглютенових маффінів. Визначено, що співвідношення 85:15% забезпечує оптимальні показники в'язкості тіста та стабільність форми готових виробів.

І. Городецька, Ю. Камбулова, О. Кохан та Н. Олексієнко [17] встановили, що борошно зеленої гречки можна використовувати в здобному печиві, замінюючи пшеничне борошно до 60%.

У дослідженні Н. Соколової [18] було виявлено, що використання борошна зеленої гречки в багатокомпонентному тісті впливає на процес бродіння. Збільшення частки цього компонента підвищує виділення CO₂, що впливає на якість кінцевого продукту.

Своєю чергою С. Боковець [19] дослідив можливості використання борошна зеленої гречки та льняного борошна у виробництві безглютенового тіста для вареників. Виявлено покращення органолептичних характеристик та поживної цінності таких виробів.

Технологію дієтичної пасхальної випічки з використанням борошна зеленої гречки розробили Є. Тесленко, К. Жванко та А. Геречук [20]. Було встановлено, що дріжджова безглютенова паска має кращі органолептичні показники, вищий вміст білків (9,7–10,4%) та харчових волокон (2,8–3,5%).



Формулювання мети (постановка завдання). Метою дослідження є визначення впливу борошна зеленої гречки на якісні показники бісквіту.

Відповідно до цього поставлено завдання: розробити рецептуру, технологічну схему виробництва збивного бісквітного напівфабрикату з борошна зеленої гречки та дослідити його органолептичні показники.

Основна частина. Головними компонентами бісквітного тіста є борошно, яйця, цукор, також і додаткові інгредієнти, що можуть змінювати його властивості.

Співвідношення цих компонентів визначає структуру та органолептичні показники готового виробу.

На основі рецептури шифонового бісквіту, в якій було здійснено заміну компонентів – пшеничного борошна на борошно зеленої гречки, цукру на цукрозамінник, а рідини на яблучне пюре, було розроблено нову рецептуру бісквітного напівфабрикату з борошном зеленої гречки (табл. 1).

Таблиця 1

Рецептура бісквітного напівфабрикату з борошном зеленої гречки

Найменування сировини	Масова частка сухих речовин, %	Витрата сировини на 10 кг напівфабрикату, г	
		У натурі	У сухих речовинах
Борошно зеленої гречки	88,00	1744,00	1534,72
Розпушувач	95,00	145,00	137,75
Пюре яблучне	12,00	4070,00	488,40
Рослинна олія	100,00	349,00	349,00
Еритритол	100,00	2326,00	2326,00
Жовтки курячі	46,00	1279,00	588,34
Білки курячі	12,00	1454,00	174,48
Разом	-	11 383,00	5598,69
Вихід		10 000,00	

Виробництво бісквітного напівфабрикату з борошна зеленої гречки здійснюється відповідно до технологічної схеми (рис. 1).

Технологічний процес виробництва бісквіту починається з підготовки сировини. На цьому етапі здійснюємо санітарне оброблення і контроль якості яєць, розподіляємо їх на білки та жовтки. Борошно зеленої гречки та розпушувач просіюємо крізь сито з діаметром отворів $1 - 2 \cdot 10^{-3}$ м, еритритол просіюємо крізь сито з діаметром отворів $2 - 5 \cdot 10^{-4}$ м.

Після підготовки сировини готуємо яблучну основу, збиту яєчну та борошняну суміші відповідно. Змішуємо еритритол (35% від загальної кількості), рослинну олію та яблучне пюре. З'єднуємо борошно зеленої гречки з розпушувачем. Збиваємо охолоджені за температури $2-4^{\circ}\text{C}$ яєчні білки із залишком еритритолу та яєчними жовтками.

Далі протягом 1–2 хв замішуємо тісто: в яблучну основу додаємо борошняну суміш та поступово вводимо збиту яєчну суміш.

Готовий тістовий напівфабрикат переміщаємо у форму та направляємо на випікання протягом 35–40 хв за температури $170-180^{\circ}\text{C}$.

Випечений бісквітний напівфабрикат охолоджуємо та залишаємо на вистоюванні 25–30 хв за температури $20-25^{\circ}\text{C}$. Зберігаємо бісквітний напівфабрикат 3 доби, за температури $16-20^{\circ}\text{C}$ та відносної вологості 75%.

Випікання бісквіту відбувалося в металевому кільці без дна, застеленому фольгою, оскільки так бісквіт піднімається рівномірніше і краще пропікається.

Після повного остигання готовий бісквітний напівфабрикат (рис. 2) оцінювався за низкою органолептичних показників, які визначають його якість. До таких показників належать зовнішній вигляд, колір, смак, запах і консистенція.

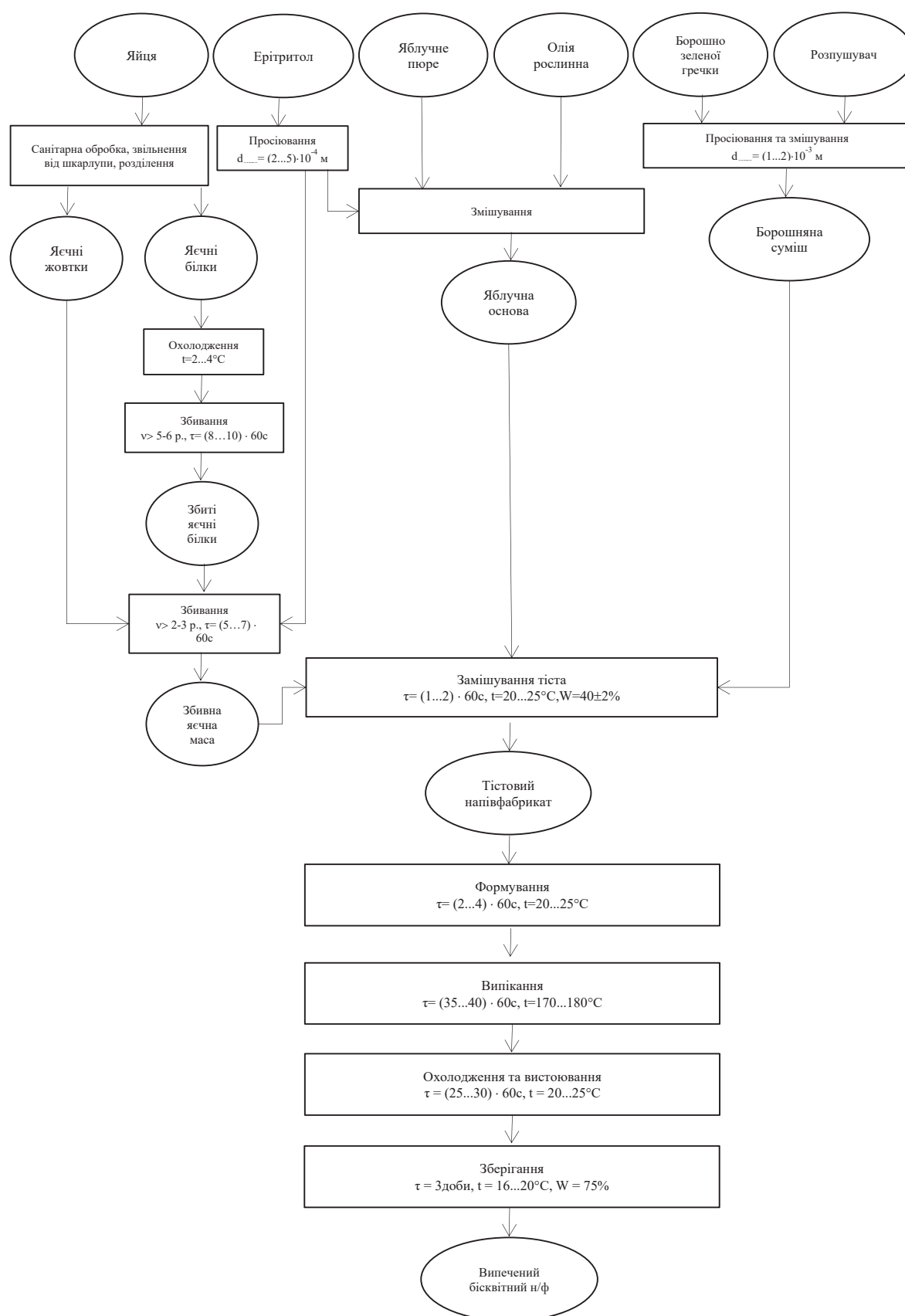


Рис. 1. Технологічна схема збивного бісквітного н/ф з борошна зеленої гречки



Рис. 2. Випечений бісквітний напівфабрикат (а – вид зверху, б – у розрізі).

Нижче представлено результати органолептичних показників (табл. 2).

Таблиця 2

Органолептичні показники бісквіту

Назва показника	Характеристика
Форма і поверхня	Кругла форма, шорсткувата поверхня без пошкоджень, зламів та вм'ятин, не підгоріла
Вид у розрізі	Не крихкий, добре пропечений, пористий, без закалу та слідів непромісу
Колір	Поверхня – золотисто-коричнева, м'якушка – світло-жовта із сіруватим відтінком
Смак та запах	Характерний для випеченого напівфабрикату, з горіховими нотками, без стороннього присмаку та запаху

Висновки. Проведені дослідження підтверджують, що бісквітні напівфабрикати на основі борошна зеленої гречки мають гарні органолептичні показники, зберігають пишність і мають природний колір, що робить їх привабливими для споживачів. Таким чином, застосування цього виду борошна у виробництві кондитерських виробів може стати ефективним рішенням для розширення асортименту корисної та якісної продукції.

Список використаних джерел

1. Розширення асортименту безглютенових бісквітних напівфабрикатів / В.Т. Лебединець та ін. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. 2021. № 25 : Техн. науки. С. 52–59.
2. Лебединець В., Багрий Л., Ярошик У. Перспективи використання ягідних порошоків у виробництві печива та бісквітів. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. 2016. № 17. С. 105–110.
3. Середа О.Г., Мельник, О.Ю. Дослідження фізико-хімічних характеристик збивного борошняного напівфабрикату з борошном із цвіркунів. *Технічні науки та технології*. 2023. № 4 (34). С. 182–187. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-182-187](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-182-187)
4. Денисова Н., Буяльська Н., Моторко О. Дослідження впливу добавок вівсяного борошна та яблучного пюре на технологію виробництва бісквітів. *Technical sciences and technologies*. 2021. № 3(25). С. 229–236. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3\(25\)-229-236](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-3(25)-229-236)

5. Mykhailo K., Olha R., Tetiana M. Rheological properties of biscuits dough with spelt flour. *The international scientific-practical journal «commodities and markets»*. 2021. Т. 38. № 2. С. 94–102. URL: [https://doi.org/10.31617/tr.knute.2021\(38\)09](https://doi.org/10.31617/tr.knute.2021(38)09)
6. Чорна Н., Боковець С. Використання нутового та арахісового борошна у технології бісквіта основного. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2024. № 3 (57). С. 74–78.
7. Дайниченко Л., Філіпова А. Технологія бісквіту з використанням пюре гарбуза та борошна з насіння соняшника. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2020. Т. 41. № 2. С. 5–11.
8. Федорова Д., Добровольська М. Технологія бісквітних десертів для харчування осіб із глютенною ентеропатією. *Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв, готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємництва: наукові пошуки молоді* : Матеріали всеукр. науково-практ. конф. молодих уч. і студентів, 2 квіт. 2015 р. С. 32.
9. Кононенко І., Котузаки О. Використання нетрадиційних сировинних ресурсів у технології борошняних виробів. *Інноваційні технології розвитку харчових виробництв та ресторанної індустрії: наукові пошуки молоді* : Тези доп. Міжнар. науково-практ. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих вчен., м. Харків, 26 жовт. 2023 р. Харків, 2023. С. 83.
10. Кайнаш А., Камбарова Ю. Способи поліпшення якісних характеристик хлібобулочних виробів. *Якість та безпечність продукції у внутрішній і зовнішній торгівлі й торговельне підприємство: сучасні вектори розвитку і перспективи* : Матеріали III Міжнар. науково-практ. Інтернет-конф., 15 лют. 2024 р. Полтава, 2024. С. 59.
11. Сильчук Т.А., Кирпіченко О.М., Дочинець І.В. Використання різних видів борошна для хлібобулочних та борошняних кондитерських виробів в закладах ресторанного господарства. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2024. № 3 (57). С. 32–36.
12. Мазуренко І.К., Боковець С.П. Харчова цінність збивного бісквітного напівфабрикату на основі борошна зеленої гречки. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Т. 341. № 5. С. 151–156. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-23>
13. Гетьман І., Кухаренко І., Михонік Л. Борошно зеленої гречки як поживне середовище для заквасок спонтанного бродіння. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : Матеріали 87 Міжнар. наук. конф. молодих уч., аспірантів і студентів, 15 квіт. 2024 р. – 16 квіт. 2021 р. Київ, 2021.
14. Болховітна О., Жигир А.М., Каменюка Л. Перспективи використання борошна зеленої гречки у технології хліба пшеничного. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв* : Матеріали Міжнар. науково-практ. конф. «Сучасна інженерія агропром. і харч. вир-в». Харків, 2021. С. 437–438.
15. Сімонова А., Соколова Н. Використання борошна зеленої гречки в технології хлібобулочних виробів пониженої вологості для зниження їх глікемічного індексу. *Проблеми формування здорового способу життя у молоді* : зб. матеріалів XI Всеукр. наук.-практ. конф. молодих уч. та студентів з міжнар. участю, м. Одеса, 4–6 жовт. 2018 р. Одеса, 2018. С. 76.
16. Боковець С.П., Кошель О.Ю. Дослідження впливу борошна зеленої гречки та псиліуму на структурно-механічні властивості безглютенових маффінів. *Scientific bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*. 2024. Т. 14. № 2. URL: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-19>
17. Quality of butter cookies with the use of green buckwheat flour, chicory and ceroba / I. Horodetska et al. *Food Industry*. 2020. Т. 28. С. 54. URL: <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2020-28-9>



18. Соколова Н. Вплив борошна зеленої гречки на процес бродіння в мультикомпонентному тісті. *79-та наукова конференція викладачів академії* : Зб. тез доп., 16–19 квіт. 2019 р. Одеса, 2019. С. 43–44.

19. Боковець С.П. Використання нетрадиційної сировини рослинного походження у технології безглютенового тіста для вареників. *Scientific bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*. 2024. Т. 14. № 2. URL: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-20>

20. Тесленко Є., Жванко К., Гереччук А. Розроблення технології дієтичної пасхальної випічки. *Актуальні питання розвитку науки та забезпечення якості освіти у XXI столітті* : Тези доп. XLVII міжнар. наук. студент. конф. за підсумками н.-д. робіт студентів за 2023 р., м. Полтава, 25 квіт. 2024 р. 2024. С. 700–701.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2025 р.

O. Yu. Koshel, V. I. Ponomarenko
Sumy National Agrarian University

FEATURES OF BISCUIT TECHNOLOGY USING GREEN BUCKWHEAT FLOUR

Summary

The article examines the prospects of using green buckwheat flour in the production of biscuit semi-finished products as an alternative to traditional wheat flour. The aim of this study is to determine the impact of green buckwheat flour on the quality indicators of biscuits. A new recipe for biscuit semi-finished products was developed with the complete replacement of wheat flour with green buckwheat flour. A technological scheme for the production of biscuit semi-finished products using green buckwheat flour was created. The organoleptic characteristics of the baked semi-finished product were determined. The obtained results indicate the feasibility of using green buckwheat flour for the production of biscuit semi-finished products, as the baked products have good organoleptic properties, retain their fluffiness, and have a natural color, making them attractive to consumers.

Keywords: biscuit semi-finished product, green buckwheat flour, non-traditional types of flour.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-39>

УДК 664.8.037

М. О. Семенов, аспірант

ORCID: 0009-0001-7465-7668

Л. М. Кюрчева, канд. с.-г. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-8225-3399

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: semenovnikita2000@gmail.com

ПОТРЕБА В ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДАХ ДО СТВОРЕННЯ ДЕГІДРАТОВАНИХ ПРОДУКТІВ ІЗ ПРОЛОНГОВАНИМ ТЕРМІНОМ ЗБЕРІГАННЯ ДЛЯ ГУМАНІТАРНИХ ПОТРЕБ

У статті розглядається потреба в розробці інноваційних підходів до створення дегідратованих продуктів із пролонгованим терміном зберігання для забезпечення гуманітарних потреб у кризових умовах. Обґрунтовано актуальність теми в контексті сучасних викликів продовольчої безпеки, зокрема в Україні з 2022 року через воєнний стан. Проаналізовано недоліки традиційних методів дегідратації (конвективне та сонячне сушіння) та переваги сучасних технологій, як-от сублімаційне сушіння та вакуумна дегідратація. Наукова новизна полягає у визначенні ключових напрямів удосконалення технологій для мінімізації втрат поживних речовин і забезпечення терміну зберігання до 5–10 років. Практична цінність дослідження полягає в розробці рекомендацій для створення продуктів, придатних для гуманітарної допомоги, національних резервів і польових умов. Висновки підкреслюють необхідність інтеграції енергоефективних рішень і місцевої сировини для масштабування виробництва.

Ключові слова: продовольча безпека, сублімаційне сушіння, вакуумна дегідратація, поживна цінність, гуманітарна криза, енергоефективність, місцева сировина, тривале зберігання.

Постановка проблеми. Продовольча безпека в умовах гуманітарних криз є глобальною проблемою, що загострюється через війни, природні катастрофи та порушення логістичних ланцюгів. В Україні, де з лютого 2022 року триває воєнний стан, потреба в продуктах із тривалим терміном зберігання стала критично важливою для населення, військових і біженців. Традиційні методи дегідратації, зокрема конвективне сушіння, призводять до втрат до 50 % вітамінів і погіршення органолептичних властивостей, що знижує їхню ефективність для довгострокового використання [1, с. 45]. Актуальність дослідження зумовлена потребою в розробці інноваційних технологій, які б забезпечили високу поживну цінність, термін придатності до 10 років і простоту використання в екстрених ситуаціях. Наукова новизна полягає у комплексному аналізі сучасних методів дегідратації та їхньої адаптації до гуманітарних потреб.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження у сфері харчових технологій активно зосереджені на вдосконаленні методів дегідратації. Коваленко О. П. (2021) наголошує на важливості енергоефективних технологій для забезпечення продовольчої безпеки в умовах криз [2, с. 123]. Петровська Н. В. (2020) досліджує сублімаційне сушіння як спосіб збереження до 95% поживних речовин, але зазначає високу вартість обладнання [3, с. 210]. Грищенко Т. А. (2022) аналізує вакуумну дегідратацію, підкреслюючи її переваги в зниженні енергоспоживання на 20–30 % порівняно з традиційними методами [4, с. 89]. Зарубіжні джерела, зокрема Smith J. (2020), пропонують інтеграцію біотехнологій для підвищення стабільності продуктів [5]. Невирішеною залишається проблема масштабування таких технологій для гуманітарних цілей із урахуванням економічних і логістичних обмежень.



Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є обґрунтування потреби в інноваційних підходах до створення дегідратованих продуктів із пролонгованим терміном зберігання для гуманітарних потреб. Завдання дослідження: 1) проаналізувати недоліки традиційних методів дегідратації; 2) оцінити ефективність сучасних технологій (сублімаційного сушіння та вакуумної дегідратації); 3) визначити ключові напрями вдосконалення для забезпечення поживної цінності та тривалого зберігання; 4) розробити рекомендації для практичного впровадження.

Основна частина. Традиційні методи дегідратації, зокрема конвективне сушіння, мають низьку ефективність через значні втрати вітамінів (до 50 %) і залежність від зовнішніх умов. Сучасні технології, як-от сублімаційне сушіння, дозволяють зберегти до 95 % поживних речовин і забезпечити термін зберігання до 10 років. Формула теплового балансу для сублімації:

$$Q = m \cdot (L_s + c \cdot \Delta T) \quad (1)$$

де Q – кількість теплоти;

m – маса продукту;

L_s – питома теплота сублімації;

C – теплоємність;

T – зміна температури.

Вакуумна дегідратація знижує енергоспоживання на 20–30 %, але потребує точного контролю тиску:

$$P_v = P_0 \cdot e^{-\frac{L_v}{R \cdot T}} \quad (2)$$

де P_v – тиск пари;

P_0 – початковий тиск;

L_v – теплота випаровування;

R – газова стала;

T – температура.

Аналіз сировини показав, що використання місцевих культур (картопля, морква) підвищує доступність, але не знижує собівартість через складність технологій.

Таблиця 1

Порівняння поживної цінності дегідратованих продуктів залежно від методу

Метод	Втрати вітаміну С, %	Термін зберігання, роки	Енергоспоживання, кВт год/кг
Конвективне сушіння	45–50	1–2	1,5–2,0
Сублімаційне сушіння	5–10	5–10	3,0–4,0
Вакуумна дегідратація	15–20	3–5	1,2–1,8

Висновки. Дослідження підтвердило потребу в інноваційних підходах до створення дегідратованих продуктів для гуманітарних потреб. Сублімаційне сушіння забезпечує максимальне збереження поживних речовин і тривалий термін зберігання, але потребує значних інвестицій. Вакуумна дегідратація є компромісом між якістю й енергоефективністю. Рекомендується інтеграція місцевої сировини й оптимізація технологій для масштабування. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці гібридних методів і зниженні собівартості виробництва.



Список використаних джерел

1. Коваленко О. П. Продовольча безпека в умовах глобальних викликів. Київ : Аграрна наука, 2021. 298 с.
2. Петровська Н. В. Сучасні технології переробки сільськогосподарської сировини. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2020. 350 с.
3. Грищенко Т. А. Енергоефективність у харчовій промисловості. Одеса : ОНТУ, 2022. 245 с.
4. Smith J. Advances in Food Dehydration Technologies. *Journal of Food Science*. 2020. Vol. 85 (3). P. 123–130. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15012>.
5. Brown L., Taylor M. Energy-efficient drying methods for humanitarian aid. *Food Technology*. 2021. Vol. 76 (4). P. 45–52.
6. Кравець І. М. Технології переробки овочів в умовах кризи. Харків : ХНАУ, 2021. 180 с.
7. Олійник О. В. Екологічні аспекти харчового виробництва. Київ : НУБіП, 2020. 210 с.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.

M. O. Semenov, L. M. Kiurcheva
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

**NEED FOR INNOVATIVE APPROACHES TO CREATING DEHYDRATED
PRODUCTS WITH EXTENDED SHELF LIFE FOR HUMANITARIAN PURPOSES**

Summary

The article addresses the need for innovative approaches to developing dehydrated products with extended shelf life to meet humanitarian demands in crisis conditions. The relevance of the topic is substantiated in the context of food security challenges, particularly in Ukraine since 2022 due to the ongoing war. The shortcomings of traditional dehydration methods (convective and solar drying) and the advantages of modern technologies, such as freeze-drying and vacuum dehydration, are analyzed. The scientific novelty lies in identifying key directions for improving technologies to minimize nutrient losses and ensure a shelf life of 5–10 years. The practical value of the study is in providing recommendations for creating products suitable for humanitarian aid, national reserves, and field conditions. The conclusions emphasize the necessity of integrating energy-efficient solutions and local raw materials for scaling production. Future research prospects include the development of hybrid methods and cost reduction strategies.

Keywords: food security, freeze-drying, vacuum dehydration, nutrient value, humanitarian crisis, energy efficiency, local raw materials, long-term storage.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-40>

УДК 663.3

О. І. Мамай¹, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0002-2591-8059

Т. О. Кузьміна¹, д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-6113-1923

Т. О. Яковенко¹, ст. викл.

ORCID: 0000-0002-1616-8997

М. І. Валько¹, д.т.н., проф.

ORCID: 0009-0001-2089-2005

Ю. В. Березовський², д.т.н., проф.

ORCID: 0000-0002-9645-2743

¹Херсонський національний технічний університет²Київський національний університет будівництва і архітектури

e-mail: kntuxt@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МІЦНИХ НАПОЇВ З ПЛОДОВИХ ДИСТИЛЯТІВ

Анотація. Удосконалено технологію міцних напоїв, що дозволяє отримувати продукт високої якості з яблук, вирощених в Україні. Встановлено найбільш придатні сорти яблук для виробництва сидрових матеріалів. Підібрано штами дріжджів, які мають високу здатність зброджувати цукор за низької температури бродіння та в збідненому азотом середовищі. Запропоновано мінерально-вітамінну добавку, що сприяє повнішому використанню вуглеводів яблучної сировини.

Під час перегонки сидрового матеріалу отримано високий вихід спирту в отриманих фракціях відносно наявного в сидровому матеріалі. Одержаний плодовий спирт має високі органолептичні показники, за фізико-хімічними показниками відповідає вимогам стандарту.

На підставі проведених досліджень розроблено технологічну і апаратурно-технологічну схеми виробництва плодових дистилятів. Витриманий кальвадосний дистилят відповідає за фізико-хімічними показниками вимогам і має виражений натуральний яблучний смак та аромат.

Ключові слова: сорти яблук, штами дріжджів, мінерально-вітамінна добавка, сидровий матеріал, перегонка, плодовий спирт, витриманий кальвадосний дистилят, технологічна схема, апаратурно-технологічна схема.

Постановка проблеми. Кальвадос України – це міцний алкогольний напій з характерним ароматом, букетом та смаком, що виготовлений зі спиртів яблучних, отриманих методом дистилювання зброджених яблучних соків із подальшим витриманням спиртів у дубових бочках, бутах та/або у великих нержавіючих або емальованих резервуарах із дубовими клепами впродовж не менше ніж 2 роки [1].

Крім кальвадосів України розрізняють такі міцні алкогольні напої з плодових спиртів: горілка плодова, напій міцний плодовий, бальзами, лікери, бренді плодови.

Первинною сировиною для виробництва кальвадосів України є яблука свіжі, інші міцні плодови напої можна виробляти з плодів та ягід, що придатні для отримання зброджених соків.

Назва «кальвадос» походить від департаменту Кальвадос – місцевості в Нижній Нормандії у Франції. Кальвадосом може зватися тільки напій, що походить з одинадцяти чітко позначених місцевостей Нормандії [2]. Сьогодні кальвадос виробляють шляхом перегонки сидру з яблук спеціального сорту, які зберігають специфічний аромат плодів.

Світове виробництво міцних напоїв преміум-класу постійно зростає. Згідно з новими вичерпними даними та прогнозами IWSR [3] глобальний ринок алкогольних напоїв буде збільшуватися.



В Україні попит на напої та їх споживання продовжує поступово зростати, це відбувається, незважаючи на тривалі воєнні дії та складну економічну ситуацію в країні. Згідно з нещодавнім дослідженням, спільно проведеним Асоціацією ритейлерів України (РАУ) та українською аналітичною компанією Num8erz, у 2023 році українці перейшли від більш легкого алкоголю до міцніших напоїв [4].

У нашій країні є всі умови для розвитку унікальної за якісними та смаковими властивостями продукції. Прийняття Закону України щодо спрощення умов виробництва дистилатів суб'єктами малого підприємництва сприятиме розвитку ринку спиртових дистилатів та спиртних напоїв, гастрономічного туризму, розвитку крафтового виробництва спиртних напоїв з особливою репутацією, які надалі можуть бути зареєстровані як географічні зазначення, створить додаткові можливості для перероблення сільськогосподарської продукції, просування української крафтової продукції на зовнішні ринки [5; 6]. Завдяки цьому очікується подальший розвиток виробництва міцних алкогольних напоїв.

В останні роки в Україні практично не проводились дослідження, присвячені вдосконаленню технології міцних алкогольних напоїв із плодових спиртів. Залишаються маловивченими багато аспектів технології виробництва, в тому числі підбір сортів плодово-ягідної сировини, з урахуванням хіміко-технологічних показників, а також застосування різних технологічних рішень, що сприяють підвищенню якості напоїв.

Аналіз останніх досліджень. Нині в Україні відроджується інтерес до напоїв на основі збродженого соку (сидру) і кальвадосу, розроблено національні стандарти на кальвадоси України та міцні напої з плодових спиртів [1; 7].

Хімічний склад яблучної сировини, що використовується для виробництва сидру та кальвадосу, залежить від багатьох факторів: сорту, складу та структури ґрунту, кліматичних умов року, агротехнічних прийомів, ступеня зрілості плодів.

Для виробництва кальвадосу використовують сидрові сорти яблук. Як правило, це осінні та зимові сорти. Встановлено, що для отримання якісного сидру свіжовіджатий сік повинен містити, %: цукру – близько 12; кислот – 0,6; дубильних речовин – 0,05; азотистих речовин – 0,2 [8].

Процес бродіння яблучного сусла характеризується різноманітними біохімічними перетвореннями, а певне поєднання основних, побічних та вторинних продуктів бродіння визначає органолептичні властивості вина та його відмінність від яблучного соку [9]. Поряд зі збільшенням концентрації спирту, виділяються вищі спирти, які під час взаємодії з кислотами утворюють складні ефіри, що відіграють важливу роль у складенні аромату сидру та отриманих з нього плодових спиртів.

Сидрові матеріали, призначені для приготування плодових спиртів, використовують неосвітленими. Об'ємна частка дріжджових осадів у таких матеріалах не повинна перевищувати 1%. Під час виготовлення соків, призначених для подальшої перегонки на плодові спирти, заборонено використовувати методи сульфитування продукції та проводити оброблення плодово-ягідної м'язги ферментними препаратами. Сидрові матеріали повинні мати колір, смак та аромат, властивий плодам та ягодам, з яких вони виготовлені, без сторонніх тонів [10].

В Україні сидрові матеріали, призначені для перегонки на плодові дистилати, готують згідно з технологічною інструкцією [11].

Проводились порівняння за методом аналізу основних компонентів 26 основних летких ароматичних сполук експериментальних сортів сидру, отриманих на основі одного штаму дріжджів і суміші різних штамів, з сортами сидру, що промислово випускаються [12]. Експериментальні сорти сидру, отримані під час бродіння особливої змішаної культури, що складається з *Saccharomyces uvarum* і *Hanseniospora valbyensis*, виявилися ближче до традиційного сидру, що промислово випускається, ніж сидр, приготовлений на одному штамі дріжджів.

Виявлено залежність якості кальвадосних матеріалів від сортових особливостей яблук і специфіки застосовуваних рас дріжджів [13]. Встановлено взаємозв'язок між складом летких домішок кальвадосних спиртів та сортовими особливостями яблук.

Під час перегонки яблучних виноматеріалів відбуваються складні фізико-хімічні процеси, в яких беруть участь усі компоненти, що входять до їх складу. Одним із головних завдань у перегонці виноматеріалів є збереження яблучного аромату. Тому багатьма вченими приділяється особлива увага саме цьому процесу.

На основі виробничого досвіду експлуатації перегінних установок для отримання спирту-сирцю, коньячного і плодового спирту з виноматеріалів та відходів виноробної промисловості, проведення експериментальних і дослідних робіт, ураховуючи нормативні матеріали [11; 14], було розроблено новий перегінний апарат для малих і середніх підприємств та фермерських господарств [15]. У пристрої періодичної дії для одержання спирту-сирцю зміцнювальна колона, дефлегматор і холодильник виконані у вигляді єдиного блоку. Дефлегматор установлений таким чином, що 60–70 % тарілок зміцнювальної колони розміщені в охолоджувальній зоні дефлегматора. Джерело пари виконано у вигляді парогенератора, який входить в єдиний блок із перегінним кубом.

Після проведення випробування моделі апарата було виготовлено апарат з об'ємом куба 50 дм³ і проведено випробування під час перегонки дріжджових осадів, коньячних виноматеріалів, зброджених плодових соків. Результати випробування показали, що апарат може бути використаний з успіхом для отримання спирту-сирцю, коньячних і кальвадосних спиртів.

Проведені випробування на малій моделі апарата показали її працездатність і належну якість спирту-сирцю з дріжджових осадів і виноматеріалів. На основі проведених експериментальних робіт, виконаних на кафедрі харчових технологій ХНТУ, було сконструйовано і виготовлено дві промислових установки [16].

Таким чином, якість міцних плодових напоїв зумовлюється застосовуваною сировиною, технологічними параметрами процесу ферментації, дріжджами, режимами перегонки, фракціонування та витримки плодових дистилятів, а також адаптованістю до місцевої сировини.

Дослідження, спрямовані на вивчення впливу особливостей різних стадій виробництва сидрових матеріалів та кальвадосного дистиляту з використанням місцевих сортів яблук, є актуальними і представляють науковий та практичний інтерес у галузі яблучного виноробства.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета роботи – удосконалення способу виробництва плодових дистилятів з яблук.

Основна частина. Об'єктом дослідження є технологія міцних напоїв. Предмет дослідження – яблука осінніх та зимових сортів, штами дріжджів, сидрові матеріали і дистиляти, вироблені із застосуванням цих сортів яблук і штамів дріжджів.

Основні компоненти хімічного складу соків та сидрових матеріалів, дистилятів визначали відповідно до чинних загальноприйнятих в енології сучасних методик [17] та нормативних документів.

Для одержання суслу з плодів яблук їх подрібнювали, віджимали сік. Бродіння яблучного суслу проводили за температури 15–16°C з додаванням сухих активних дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* (bayanus) різних виробників. Бродіння здійснювали в анаеробних та герметичних умовах.

Плодові дистиляти отримували за допомогою перегонки на лабораторній модельній установці [15].

Використання яблук у плодovому виноробстві передбачає не тільки їх якість із позиції фізіологічного стану, а й сортові особливості їх хімічного складу, які значною мірою визначають аромат і смак сухих сидрових матеріалів та продуктів на їх основі [18–21].

Одним із важливих показників є накопичення в плодах сухих речовин і органічних кислот, від яких залежать біохімічні процеси, в тому числі зброджування яблучного соку.

У загальній кількості сухих речовин яблук цукри займають перше місце. Цукор яблучного соку практично не бере участь у створенні смаку сидрових матеріалів, оскільки майже повністю зброджується дріжджами [9].

Смакові якості яблук, сидрових матеріалів визначаються кількісним вмістом органічних кислот. Загальний вміст кислот у культурних сортах яблук дуже різний і коливається від 0,19 до 1,64% (за яблучною кислотою). Ступінь кислого смаку залежить насамперед від кислотності соку яблук, але відмінності у відчутті смаку пов'язані з відмінностями складу органічних кислот, з буферними властивостями соків і співвідношення цукру та кислоти [22].

Для визначення придатності яблучної сировини було визначено технологічні показники осінніх сортів яблук Прима, Скіфське золото, Гала; зимових – Голден Делішес, Катерина, Аскольда: титрована кислотність, вміст цукрів і сухих речовин (табл. 1).

Відомо, що для виробництва кальвадосу слід використовувати яблука тих сортів, які здатні накопичувати достатню кількість цукрів за високої титрованої кислотності плодів.

Таблиця 1

Технологічні показники яблук осінніх та зимових сортів

Сорт яблук	Титрована кислотність, г/дм ³	Вміст цукру, г/дм ³	Вміст сухих речовин, %
Осінні сорти			
Прима	6,2 ± 0,1	118,2 ± 0,1	13,4 ± 0,1
Скіфське золото	7,1 ± 0,1	112,4 ± 0,1	13,0 ± 0,1
Гала	5,2 ± 0,1	116,8 ± 0,1	14,2 ± 0,1
Зимові сорти			
Голден Делішес	5,9 ± 0,1	104,3 ± 0,1	13,6 ± 0,1
Катерина	5,1 ± 0,1	125,1 ± 0,1	14,8 ± 0,1
Аскольда	6,2 ± 0,1	119,7 ± 0,1	13,5 ± 0,1

Сидровий матеріал для кальвадосів виготовляють, як правило, з кількох сортів яблук. Це пов'язано з тим, що в одному сорті важко домогтися необхідного балансу цукрів, кислот і танінів, який буде необхідний для отримання якісного продукту. Згідно з науковими даними [18; 23], ідеальним співвідношенням вважається 20% кислих яблук, 40% – солодких і 40% гірких яблук. Для визначення відсоткового вмісту кожного із сортів яблук у сортосуміші для виробництва кальвадосу було проведено їх класифікацію залежно від смаку: солодкі, кисло-солодкі, гірко-солодкі, кислі. Використовуючи такі показники, як титрована кислотність, вміст цукрів, можна віднести вибрані сорти яблук до таких типів: Прима, Гала, Катерина і Аскольда – кисло-солодкі; Скіфське золото – кислий; Голден Делішес – гірко-солодкий.

Оскільки в технологіях отримання плодових дистилятів заборонено використовувати сульфітацію виноматеріалу, необхідно було дослідити вплив різних культур дріжджів на процес бродіння і якість зброженого суслу (сидрового матеріалу).

Проводилось зброджування яблучного соку, отриманого із сортосуміші, на різних культурах дріжджів. Дослідження проводили з використанням штамів дріжджів: IOC 11-1002 K, EnartisFerm VQ10, SafSpirit FD-3. Як контроль використовували розводку дріжджів, отриману під час спонтанного заброджування яблучного суслу.

Бродіння яблучного суслу проводилось за температури 14–16°C, з додаванням розводки сухих активних дріжджів, а також на спонтанній мікрофлорі. Тривалість зброджування яблучного соку становила 10–14 діб.



Основні фізико-хімічні показники збродженого суслу представлено в табл. 2. Усі досліджувані штами дріжджів активно зброджували яблучне сусло за температури бродильного середовища 15–16°C. Термін повного збродження для всіх культур дріжджів, окрім контрольного – 12 діб. Найменший вміст залишкового цукру – у зразках, зброджених спеціалізованим штамом SafSpirit FD-3. Контрольні зразки, зброджувані спонтанною мікрофлорою, закінчували бродіння на 14-ту добу, отримуючи недоброд із вмістом цукру 3,4–3,6 г/дм³.

Титрована кислотність протягом бурхливого бродіння зростала у всіх досліджуваних зразках. Під час добродження титрована кислотність дещо знижувалась майже у всіх досліджуваних зразках. Найбільший вміст титрованих кислот за яблучною кислотою після завершення бродіння спостерігався у зразку, збродженому спонтанною мікрофлорою. Найбільш плавне зростання титрованої кислотності спостерігалось в зразку, збродженому дріжджами IOC 11-1002 K. Найменший вміст титрованих кислот – у зразках, зброджених спеціалізованою культурою дріжджів для виробництва плодових дистилятів SafSpirit FD-3.

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники сидрових матеріалів

Показник	Раса дріжджів			
	IOC 11-1002 K	EnartisFerm VQ10	SafSpirit FD-3	спонтанна мікрофлора
Вміст спирту, % об.	6,5–6,9	6,7–7,0	6,8–7,2	6,2–6,7
Вміст цукру, г/дм ³	1,1–1,3	0,9–1,1	0,5–0,6	3,4–3,6
Титрована кислотність, г/дм ³	6,8–7,0	6,5–6,8	5,9–6,2	7,0–7,4
pH	3,2–3,3	3,1–3,2	3,1–3,2	3,2–3,3

Таким чином, усі досліджувані штами дріжджів, крім контрольного, забезпечують повне вибродження цукрів за несприятливих умов бродіння (низька температура) і можуть застосовуватися для отримання матеріалів для плодових спиртів.

Яблучний сік порівняно з виноградним містить недостатню кількість засвоюваних форм азотистих сполук [9]. Це є причиною уповільнення швидкості спиртового бродіння, збільшення термінів бродіння, утворення недостатньої кількості ароматоутворювальних речовин.

Для нормального розвитку та здійснення процесу бродіння яблучного соку дріжджі потребують вітамінів, які є кофакторами низки ферментів, задіяних у процесі ферментації соку. Для проведення бродіння потрібно, щоб у середовищі, в якому розвиваються дріжджі, крім цукрів, що зброджуються, знаходилися в достатній кількості мінеральні й азотисті речовини. Деякі фактори росту, додатково введені в сусло, можуть грати роль стимуляторів дріжджів, навіть якщо останні можуть їх синтезувати [22].

З метою інтенсифікації процесу бродіння було розглянуто мінеральні та органічні азотисті сполуки. У ролі мінеральної азот- і фосфоровмісної добавки було вибрано діамоній фосфат, як фактори росту були вибрані нікотинава кислота і фолієва кислота.

Бродіння яблучного суслу, отриманого із сортосуміші, проводилося за температури 16 °C. Тривалість контролю бродіння яблучного соку становила 14 діб. Бродіння проводилася на 4 зразках: № 1 – додавання діамоній фосфату; № 2 – додавання фолієвої кислоти, № 3 – додавання нікотинамиду, № 4 – контрольний зразок, без додавання факторів росту.

Збродження цукрів за введення добавок відбувається не тільки з вищою швидкістю, але й повніше. Найбільша швидкість збродження спостерігається в разі введення діамоній фосфату, що зумовлено легкістю засвоєння дріжджами амонійного азоту. Інші добавки дещо менше збільшують швидкість збродження, проте дозволяють дріжджам повніше використувати вуглеводну сировину (після 14 днів бродіння масова частка цукрів була менше 2 г/дм³).

Найменша швидкість зброджування спостерігалася в контрольному зразку. На чотирнадцятий день бродіння в зразку залишалося найбільше цукру.

У табл. 3 представлено показники вихідного яблучного соку і суслу, отриманого із введенням різних добавок у кількості 50 мг/дм³.

Таблиця 3

Показники яблучного соку та сидрового матеріалу, отриманого за введення різних добавок

Зразки	Показники		
	вміст цукру, г/дм ³	титрована кислотність, г/дм ³	вміст спирту, % об.
Вихідний яблучний сік	117,5	5,8	—
№ 1	1,3	6,7	6,95
№ 2	1,5	6,9	6,85
№ 3	1,5	7,0	6,90
№ 4	3,7	7,3	6,65

Додаткове введення азотного харчування мінімально вплинуло на концентрацію титрованих кислот отриманого сидрового матеріалу.

У результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що найбільше збільшення швидкості зброджування цукрів у яблучному соку спостерігається в разі додавання діамоній фосфату. Крім того, всі добавки позитивно впливають на повноту зброджування цукрів. При цьому введення добавок меншою мірою вплинуло на титровану кислотність отриманого матеріалу в порівнянні з контрольним зразком.

Таким чином, на підставі аналізу отриманих результатів пропонується комплексна добавка, що складається з мінерального складника – діамоній фосфату та вітамінних складників – нікотинаміді і фолієвої кислоти.

Із сидрового матеріалу, який одержували з використанням дріжджів SafSpirit FD-3 і добавки діамоній фосфату, отримали плодові дистиляти за допомогою перегонки на лабораторній модельній установці. Результати щодо виходу спирту та його дегустаційної оцінки наведено в табл. 4.

Отримано високий вихід спирту в отриманих фракціях відносно наявного в сидровому матеріалі. Спирт плодовий (середня фракція) за зовнішнім виглядом – прозора, безбарвна рідина, без осаду та сторонніх домішок, смак і аромат – характерні для спирту плодового молодого для виробництва міцних напоїв, без сторонніх присмаків і запахів.

Таблиця 4

Вихід і якість спирту із сидрових матеріалів

Вихідна сировина	Об'єм, дм ³	Головна фракція, дм ³ / % об.	Середня фракція, дм ³ / % об.	Хвостова фракція, дм ³ / % об.	Дегустаційна оцінка, бал	Вихід спирту з наявності в сировині, %
Сидровий матеріал, вміст спирту 7,0 % об.	45,0	0,1/88,7	4,4/64,9	4,0/2,8	9,5	97,0

У табл. 5 наведено компонентний склад спирту плодового, отриманого під час фракціонуваної перегонки сидрових матеріалів.

Таким чином, отриманий дистилят відповідає за фізико-хімічними показниками ДСТУ 7088:2009 Спирт плодовий молодий для виробництва міцних напоїв. Технічні умови.

На підставі проведених досліджень розроблено технологічну схему виробництва плодкових дистилятів. В її основу покладено класичну технологію, але зі змінами деяких стадій технологічного процесу (рис. 1 і 2).

Таблиця 5

Фізико-хімічні показники спирту плодового для виробництва міцних напоїв

Назва показника	Значення за ДСТУ 7088:2009	Вміст компонентів у дистиляті
Об'ємна частка етилового спирту, % об.	62–70	64,9
Масова концентрація вищих спиртів, у перерахунку на ізоаміловий спирт безводного спирту, мг/100 см ³	100–600	420
Масова концентрація альдегідів, у перерахунку на оцтовий альдегід безводного спирту, мг/100 см ³	не більше 50	42
Масова концентрація середніх ефірів, у перерахунку на оцтово-етиловий ефір безводного спирту, мг/100 см ³	50–250	120
Масова концентрація летких кислот, у перерахунку на оцтову кислоту безводного спирту, мг/100 см ³	не більше 80	58
Масова концентрація метилового спирту безводного спирту, г/100 дм ³	не більше 1,5	0,9
Масова концентрація загальної сірчистої кислоти, мг/дм ³	не більше 35	14

Для виробництва плодкових дистилятів використовувалися яблука осінніх та зимових сортів технічної зрілості в запропонованому співвідношенні.

Установлено, що для одержання якісного кальвадосу свіжий сік повинен містити 10–12% цукру, 6–8 г/дм³ титрованих кислот, не менше ніж 2 г/дм³ азотистих речовин, не менше ніж 0,5 г/дм³ фенольних речовин. Зазвичай це осінні й зимові сорти, дуже соковиті, з високою кислотністю й цукристістю, багаті ароматичними й фенольними речовинами.

Оброблення м'язги пектолітичними ферментними препаратами не допускається, оскільки під дією ферментів пектин розщеплюється з утворенням метилового спирту, що під час перегонки концентрується.

Під час готування сидрових матеріалів, призначених для одержання спиртів, бродіння рекомендується проводити за низької температури. Така технологія дозволяє одержувати матеріали дуже високої якості, оскільки за низької температури відбуваються більше накопичення й збереження ароматичних речовин.

Для виробництва плодкових спиртів рекомендується використовувати добре освітлені, витримані до року сидрові матеріали. Проте під час зберігання матеріалу навіть протягом 2 місяців у герметичних ємностях на холоді відбуваються втрати близько 70% складних ефірів, включаючи компоненти, тому необхідно організувати процес таким чином, щоб отриманий виноматеріал без освітлення направлявся на перегонку.

Згідно зі схемою (рис. 2) плоди автоконтейнером 11 завантажують у прийомний бункер 1. Гідравлічним транспортером 2 плоди водою транспортуються через пастку 3, де важкі домішки відділяються від плодів, а вода з плодами проходить шнекову мийку 4.

Транспортерно-мийна вода відокремлюється від плодів разом із легкими домішками і піском і зливається у віддільник відходів 5, де легкі домішки відокремлюються від води і видаляються транспортером 6 у контейнер 11. Вода з водовіддільника зливається в збірник транспортерно-мийної води 7, звідки насосом 8 повертається через гідроциклон 10 у гідротранспортер 2. У гідроциклоні 10 відбувається відділення дрібних домішок і піску від води, що викидаються в контейнер 11. Осади в міру їх накопичення з нижньої частини збірника транспортерно-мийної води відкачуються насосом 9 через гідроциклон 10 і викидаються у візок 11. Відділена вода зливається в каналізацію. У шнековій мийці 4 плоди зверху зрошуються чистою питною водою, яка, рухаючись назустріч плодам, що піднімаються вгору, змиває з них домішки і бруд. Остаточне відмивання плодів відбувається в уніфікованій мийній машині 12.

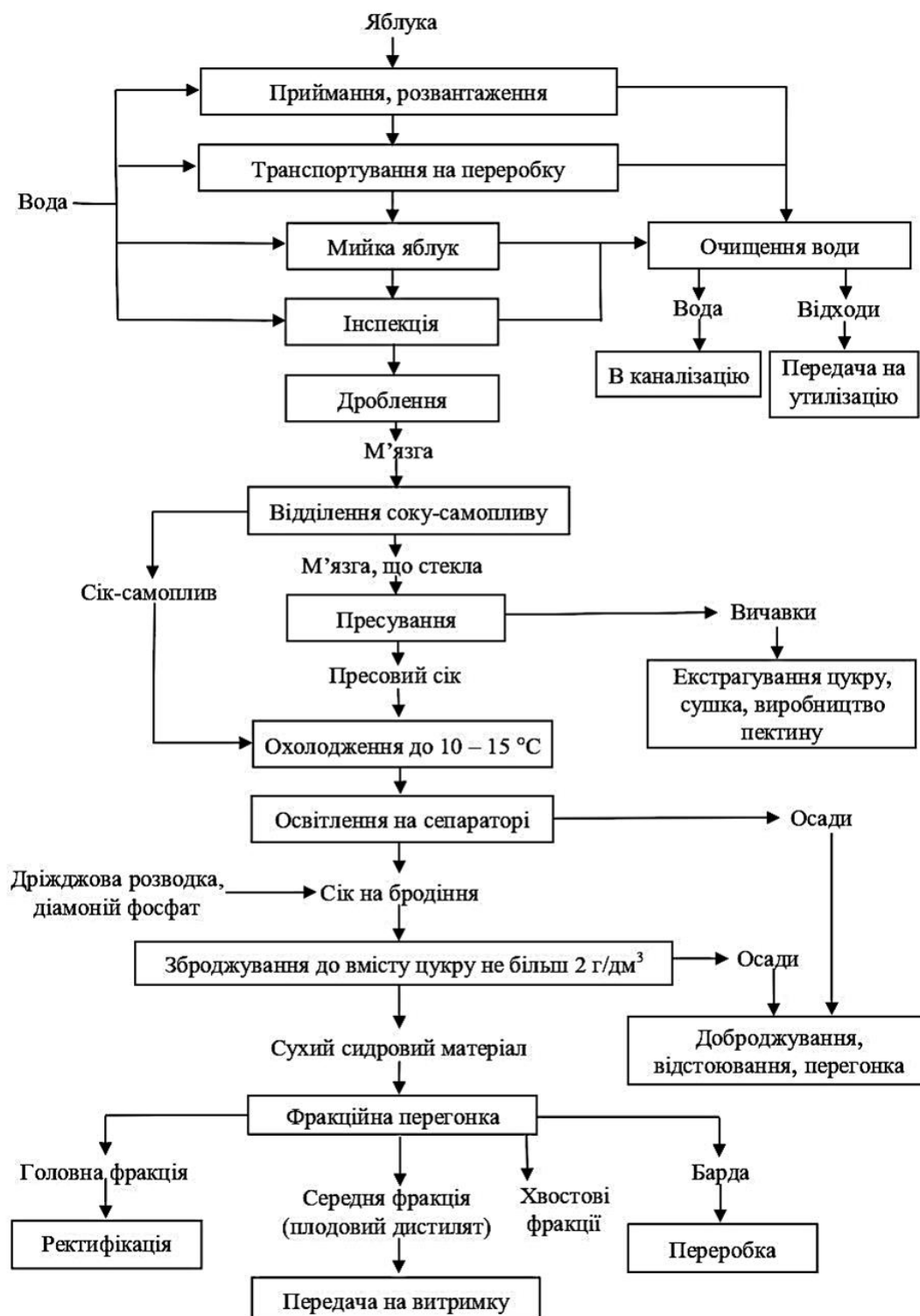


Рис. 1. Принципова схема перероблення яблук з виробництвом плодового дистилату

Після мийки плоди проходять сортування, видалення від них домішок і браку на інспекційному транспортері 13, де також проводиться додаткова мийка за допомогою зрошувача, встановленого на виході плодів із транспортера. Вода з відходами з інспекційного транспортера 13 надходить на віддільник відходів 5, і відходи направляються в транспортний візок 11.

Плоди, відділені від браку і домішок, надходять у шнековий транспортер 4, що є живильником дробарки 14. За необхідності (у разі сильного забруднення плодів) на транспортері 4 установлюють зрошувач для додаткової мийки.

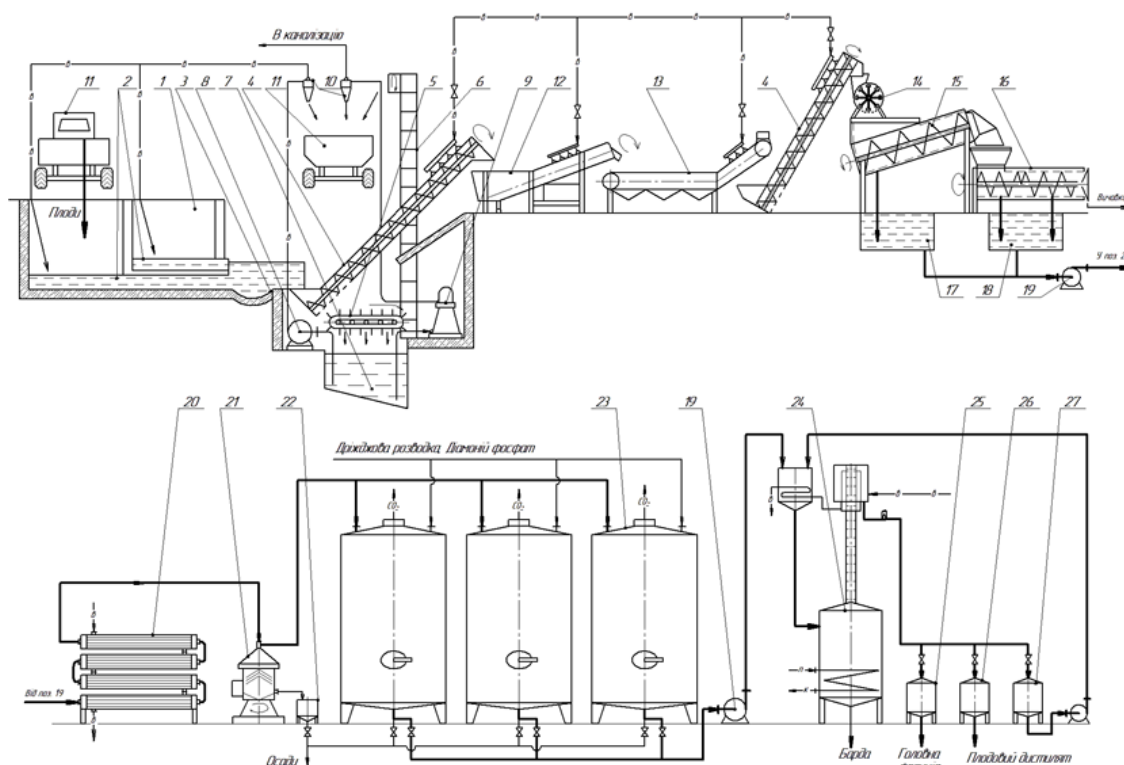


Рис. 2. Апаратурно-технологічна схема перероблення яблук з виробництвом плодкових дистилатів

Із дробарки 14 м'язга попадає в стікач 15, де відділяють сік-самоплив, потім – у прес 16, де остаточно відбирається пресова фракція соку. Сік пресових фракцій і самоплив збирається в збірниках 17 і 18, звідки насосом 19 перекачується в теплообмінник 20 для охолодження до 10–15 °С. Охолоджений сік освітлюють у сепараторі 21. Освітлений сік надходить у резервуари для бродіння 23. Гушавина осадів із сепаратора 21 надходить у збірник 22.

Розводку дріжджів і добавки для підживлення дріжджів задають у резервуари 23 під час їх наповнення освітленим суслим. Бродіння проводиться в анаеробних умовах до залишкового вмісту цукрів не більше 2 г/дм³ за температури 16°С. Отриманий сидровий матеріал знімають із дріжджових осадів, залишаючи до 1–1,5% осадів і подають в установку для перегонки 24.

Сидрові матеріали піддають фракціонованій перегонці в установці 24. Головну фракцію спирту зі збірника 25 направляють на ректифікацію. Середню фракцію зі збірника 26 направляють на витримку для отримання Кальвадосів України. Хвостові фракції зі збірника 27 об'єднують з матеріалом, що надходить на перегонку.

Гушавину, що утворюється в результаті бродіння й освітлення, переганяють окремо.

Отриманий дистилат витримували в ємності з нержавіючої сталі на дубових чіпсах. Витримані кальвадосні дистилати доводили спеціально підготовленою водою з твердістю трохи більше 0,36 ммоль/дм³ до об'ємної частки спирту етилового 40–43% об. Для досягнення бажаної цукристості додавали цукровий сироп, за необхідності – карамельний відтінок. Далі кальвадос залишали на післякупажний відпочинок.



У таблиці 6 наведено результати аналізу кальвадосу, витриманого в дубовій бочці протягом 2 років.

Таблиця 6

Фізико-хімічні показники кальвадосу

Фізико-хімічні показники	Показники ДСТУ 8070:2015, концентрація компонентів	Концентрація компонентів у продукті
Об'ємна частка етилового спирту, % об.	40	40
Масова концентрація цукрів, г/дм ³	7–15	11
Масова концентрація метанолу, не більше, г/дм ³	1,0	0,7

Одержаний кальвадос відповідає за фізико-хімічними показниками ДСТУ 8070:2015 Кальвадоси України. Технічні умови [1].

Отриманий продукт відповідає й органолептичним показникам (табл. 7).

Таблиця 7

Органолептичні показники кальвадосу України

Показник	Характеристика
Прозорість	Прозорий, з блиском, без сторонніх включень
Колір	Світло-бурштиновий із золотистим відтінком
Аромат, букет і смак	Аромат і букет – яблучний, з тонами витримки в дубовій бочці, без сторонніх тонів

Запропоновані вдосконалення технології дозволяють отримувати кальвадос України високої якості з яблук, вирощених в Україні. Продукт, отриманий без додавання синтетичних барвників та ароматизаторів, має виражений натуральний яблучний смак та аромат.

Висновки. Удосконалено технологію виробництва кальвадосу, що дозволяє отримувати продукт високої якості з яблук, вирощених в Україні. На основі аналізу технологічних показників встановлено найбільш придатні сорти яблук для виробництва сидрових матеріалів, внесених до Державного реєстру сортів рослин України. Доцільно використовувати не окремі сорти, а сортосуміші для корегування вмісту цукру і титрованих кислот.

Підібрані штами дріжджів, які мають високу здатність зброджувати цукор та продукувати речовини, що зумовлюють аромат, за низької температури бродіння проявляють активність у збідненому азотом середовищі.

Запропоновано комплексну добавку, що складається з мінерального складника – діамоній фосфату та вітамінних складників – нікотинаміду і фолієвої кислоти. Вона сприяє розвитку дріжджів і дозволяє повніше використовувати вуглеводи яблучної сировини.

За результатами проведених досліджень удосконалено технологію перероблення плодів із виробництвом плодових дистилятів. Отриманий дистилят відповідає за фізико-хімічними показниками ДСТУ 7088:2009 Спирт плодовий молодий для виробництва міцних напоїв. Технічні умови.

Витриманий дистилят має високі органолептичні показники і відповідає за фізико-хімічними показниками ДСТУ 8070:2015 Кальвадоси України. Технічні умови.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 8070:2015 Кальвадоси України. Технічні умови. Чинний від 2017-01-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 13 с. Національний стандарт України.

2. Benoît Noël, Maud Guichard: Cidre et Calvados en Pays d'Auge, Sainte-Marguerite-des-Loges, Éditions BVR, 2013. 260 p.

3. International Wine & Spirit Research. Global beverage alcohol market set for moderate recovery in 2025, while challenges persist in 2024. URL: <https://www.theiwsr.com/global-beverage-alcohol-market-set-for-moderate-recovery-in-2025-while-challenges-persist-in-2024/> (дата звернення: 14.05.2024).
4. Ресторанний консалтинг. Статті і аналітика. URL: <https://restaurant-consulting.com.ua/uk/ukrainska-industrija-napoiv-povertaietsja> (дата звернення: 14.05.2024).
5. Торгово-промислова палата України. Закон України щодо спрощення умов виробництва дистилятів суб'єктами малого підприємництва. URL: <https://uccr.org.ua/uploads/files/64ec79c34c65d937907022.pdf> (дата звернення: 23.01.2025).
6. Журнал «Напої & Пиво. Технології та Інновації». Закон для малих виробників крафтових міцних напоїв: сутність і підводні камені. URL: <https://techdrinks.info/zakon-dlya-malyh-vyrobnykiv-kraftovyh-mitsnyh-napoiv-sutnist-i-pidvodni-kameni/> (дата звернення 14.05.2024).
7. ДСТУ 7072:2009 Напої міцні з плодових спиртів. Технічні умови. Чинний від 2011-01-01. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 16 с. Національний стандарт України.
8. Lea Andrew. Cider Apple Compositional Data. URL: <http://www.cider.org.uk/appledat.htm> (дата звернення: 22.05.2024).
9. Технологія плодово-ягідних напоїв : навч. посіб. для ВНЗ / М.І. Валько та ін. Херсон : ХНТУ, 2016. 512 с.
10. Інститут енології Шампані. Методи виробництва сидру. Технології поліпшення якості. URL: https://ioc.eu.com/wp-content/uploads/2021/02/CIDER_n03-20_f3.pdf (дата звернення: 17.06.2024).
11. Технологічні правила виноробства : у 2 тт. / під ред. Г.Г. Валуйко, В.А. Загоруйко. Сімферополь : Таврида, 2006. Т. 2 : Ігристі вина. Коньяки. Плодово-ягідні вина. 288 с.
12. Calvert Martha, Neill Clinton, Stewart Amanda, Lahne Jacob. Sensory descriptive analysis of hard ciders from the Northeast and Mid-Atlantic United States. *Journal of Food Science*, 2023. 88. p. 1750-3841.
13. Balcerek M., Pielech-Przybylska K., Dziekońska-Kubczak U., Bartosik A. Effect of Apple Cultivar and Selected Technological Treatments on the Quality of Apple Distillate. *Foods*. 2023; 12(24):4494.
14. Виноградов В.О. Устаткування виноробних заводів. Сімферополь : Таврида, 2002. Т. 2. 416 с.
15. Обладнання для виробництва плодових, коньячних спиртів та спирту-ректифікату / К.А. Ковалевський та ін. *Вісник ХНТУ*. Херсон, 2016. № 2(57). С. 142–148.
16. Апарати для отримання коньячних і плодових спиртів / В.О. Виноградов та ін. *Зб. наук. пр. НІВіВ «Магарач»*. Ялта 2012. Т. XLII. С. 81–86.
17. Гержикова В.Г. Методи технохімічного контролю у виноробстві. Сімферополь : Таврида, 2009. 304 с.
18. Balcerek M., Pielech-Przybylska K., Dziekońska-Kubczak U., Bartosik A. Effect of Apple Cultivar and Selected Technological Treatments on the Quality of Apple Distillate. *Foods*. 2023; 12(24): 4494.
19. Jolicoeur, Claude. The new cider maker's handbook. White River Junction, Vermont: Chelsea Green Publishing, 2013. p. 337.
20. Januszek M, Satora P, Tarko T. Oenological Characteristics of Fermented Apple Musts and Volatile Profile of Brandies Obtained from Different Apple Cultivars. *Biomolecules*. 2020 Jun 3;10(6):853. doi: 10.3390/biom10060853
21. Güven S., Karagöz S. Production of Brandy from Apple by Different Methods. *International Journal of Fruit Science*. 2009. № 9. С. 247–256. DOI: 10.1080/15538360903241310
22. David R. Dalton. The Chemistry of Wine. Oxford University Press, 2017. p. 463.
23. Science and Technology of Fruit Wine Production. Editors: Maria R. Kosseva, V.K. Joshi, P.S. Panesar. Academic Press, 2017. p. 727.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2025 р.



O. Mamai¹, T. Kuzmina¹, T. Yakovenko¹, M. Valko¹, Yu. Berezovsky²

¹Kherson National Technical University

²Kyiv National University of Construction and Architecture

IMPROVEMENT OF STRONG BEVERAGES TECHNOLOGY FROM FRUIT DISTILLATES

Summary

The technology of strong drinks has been improved, which allows obtaining a high-quality product from apples grown in Ukraine. The most suitable apple varieties for the production of cider materials have been established. These are the fruits of autumn and winter apple varieties Prima, Scythian Gold, Gala, Golden Delicious, Katerina, Askolda, entered in the State Register of Plant Varieties of Ukraine. It is advisable to use not individual varieties, but variety mixtures to adjust the sugar content and titrated acids.

Yeast strains that have a high ability to ferment sugar at low fermentation temperatures and in a nitrogen-depleted environment have been selected. When preparing cider materials intended for the production of alcohols, fermentation is recommended to be carried out at a low temperature, which allows obtaining very high-quality materials, since at low temperatures there is a greater accumulation and preservation of aromatic substances. A mineral and vitamin supplement has been proposed that contributes to a more complete use of carbohydrates in apple raw materials.

When storing cider materials even for 2 months in sealed containers in the cold, losses of esters occur, including components of enanthate ester. Since sulfitation of wine materials sent for distillation is not allowed, their storage is associated with certain difficulties. Therefore, production must be organized in such a way that the resulting wine material is sent for distillation without clarification.

During the distillation of cider material, a high yield of alcohol was obtained in the obtained fractions, relative to that present in the cider material. The obtained fruit alcohol has high organoleptic characteristics, and in terms of physicochemical characteristics it meets the requirements of the standard.

Based on the conducted research, a technological and instrumental-technological scheme for the production of fruit distillates was developed. The aged Calvados distillate meets the requirements in terms of physicochemical characteristics and has a pronounced natural apple taste and aroma.

Keywords: apple varieties, yeast strains, mineral and vitamin supplement, cider material, distillation, fruit alcohol, aged Calvados distillate, technological scheme, equipment and technological scheme.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-41>

УДК 664.68:613.2:519.6

О. Г. Серета, старший викладач

А. О. Геліх, к. т. н., доцент

О. А. Воронін, аспірант

Сумський національний аграрний університет

e-mail: seaol@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2614-725X

ORCID: 0000-0003-3769-1231

ORCID: 0009-0002-8254-4775

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ ЗБИВНОГО БІСКВІТНОГО НАПІВФАБРИКАТУ З ДОДАВАННЯМ БОРОШНА ІЗ ЦВІРКУНІВ ТА ЦУКРОЗАМІННИКІВ

Анотація. У роботі досліджено оптимізацію рецептурного складу збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений» для покращення його харчової цінності. Використано ортогональний централь-но-композиційний план експерименту з чотирма факторами: вмістом білків, жирів, вуглеводів і органолептичними характеристиками. Досліджено вплив заміни традиційних компонентів на борошно із цвіркунів, еритрол та фруктозу. Проведено математичне моделювання, побудовано 3D-модель оптимізації, визначено оптимальну рецептурну композицію з нутрієнтним співвідношенням 1:1:4,1 та високими органолептичними показниками.

Ключові слова: оптимізація харчових технологій, збивний бісквітний напівфабрикат, борошно із цвіркунів, еритрол, фруктоза, харчова цінність.

Постановка проблеми Ринок борошняних кондитерських виробів (БКВ) – це складний, висококонкурентний товарний ринок, на якому співвідношення ціни та якості відіграє ключову роль. З огляду на хімічний склад БКВ, у них міститься значна кількість важливих для організму харчових речовин. Проте, незважаючи на їх високу харчову цінність, борошняні кондитерські вироби, які виготовляються за традиційною технологією, не можуть вважатися збалансованими для таких категорій населення, як діти, люди похилого віку та споживачі, які: мають преддіабетичний стан або хворіють на цукровий діабет; мають генетичні та набуті захворювання; проживають у складних екологічних умовах; мають дефіцит білку в організмі [1].

Серед великої кількості БКВ значний відсоток займають збивні бісквітні напівфабрикати (ЗБН), які характеризуються як висококалорійні через високий вміст жирів і вуглеводів та низький вміст білкових складників, тому вони є одним з об'єктів для корегування нутрієнтного складу.

Аналіз останніх досліджень. ЗБН мають високу енергетичну та калорійну ємність із високим вмістом жиру та цукру, що може призвести до проблем зі здоров'ям, але це можна вирішити, збагачуючи рецептуру ЗБН корисними для здоров'я сполуками та створюючи функціональний виріб. Одним із підходів, що використовуються для покращення поживного профілю м'якушки ЗБН, є часткова заміна пшеничного борошна іншими джерелами борошна, як-от непшеничне зерно, бобові, бульби та псевдозернові культури [2].

Дослідження властивостей парового бісквітного напівфабрикату з борошна з листя морінги показало, що додавання більшої кількості інноваційного борошна збільшило вміст золи, білка та сиров'язковини в готовому виробі, а заміна пшеничного борошна на бананове борошно сприяло підвищенню вмісту вологи та золи в напівфабрикаті [3].

Досліджено, що додавання мікропротеїнів у технології бісквітного напівфабрикату змінили їх фізико-хімічні, колірні та сенсорні характеристики. У порівнянні з контрольним зразком кількість білків і клітковини в отриманому напівфабрикаті суттєво зросла. Крім цього, заміна пшеничного борошна на мікропротеїни в кількості 50,0% значно підвищили твердість і клейкість бісквіту зі зменшенням пружності та питомого об'єму порівняно з контрольним зразком [4].

Досліджено хімічний склад (вміст вологи, білків, жирів, вуглеводів, харчових волокон, золи) та енергетичну цінність бісквітних коржів, збагачених буряковим порошком і пюре з мангольда. Додавання 15,0% бурякового порошку та 20,0% пюре з мангольду до бісквіта забезпечувало зменшення жиру на 36,51%, збільшення харчових волокон на 538,46% та збільшення золи на 712,5%, енергетична цінність на 15,76% менша порівняно з контрольним зразком [5].

Отже, дослідження, що проведені із зазначеної теми, свідчать про те, що інновації в технології збивних бісквітних напівфабрикатів різносторонні та характеризуються як використання нових компонентів, що сприяють покращенню споживчих характеристик, так і оптимізацією рецептурного складу.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження є оптимізація рецептурного складу збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений» за вмістом білків, жирів та вуглеводів за одного з максимальних значень органолептики та створення універсальної моделі для інших рецептур, в яких використовується борошно цвіркунів, еритрол та фруктоза. Для досягнення поставленої мети виконувались такі завдання:

1) розробити ортогональний центрально-композиційний план за чотирьох (n) факторів оптимізації рецептури збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений» з фіксацією кожного з факторів на п'яти рівнях, з урахуванням мінімальної і максимальної кількості рецептурних інгредієнтів за незмінних основних характеристик виробів;

2) оцінити органолептичні властивості кожної рецептурної композиції, визначеної в ході експерименту;

3) представити отримані результати у вигляді 3D-моделі для визначення найкращої рецептурної композиції;

4) визначити близьке до оптимального співвідношення білків, жирів та вуглеводів у страві до норми в раціоні дорослої середньостатистичної людини шляхом інтерпретації отриманих математичних даних на мову експерименту з урахуванням органолептичних показників;

5) визначити вміст мінеральних речовин у страві за кількісних показників оптимальної композиції рецептурних інгредієнтів.

Основна частина. У роботі досліджується, як за допомогою методів математичного моделювання, а саме використання ортогонального центрально-композиційного плану, знаходити оптимальне співвідношення рецептурних компонентів у збивних бісквітних напівфабрикатах, в яких відбувається часткова або повна заміна традиційних компонентів. Під час оптимізації враховується взаємозалежність і величина чотирьох факторів: вмісту білку, жиру, вуглеводів та показників органолептичних досліджень. Дані по білку, жиру та вуглеводах зіставляються з добовими потребами середньостатистичної людини. За основу беруться основні традиційні компоненти бісквітних напівфабрикатів, а саме борошно, цукор, ячні продукти та кислотомісні продукти (лимонна кислота). Функція відгуку інтерпретується та досліджується, після чого робляться висновки щодо оптимальної оптимізації розробленої нової рецептури.

Важливістю досліджень у цій сфері є створення моделі, методичних рекомендацій для розроблення асортименту продукції із застосуванням нової сировини – борошна із цвіркунів (БЦ) і цукрозамінників фруктози та еритролу для більш широкого впровадження їх у сфері ресторанних господарств. Попередні дослідження підтверджують, що БЦ є високопоживною

сировиною, багатою на незамінні амінокислоти, ненасичені жирні кислоти та макро- і мікро-елементи, що оптимально підходять для приготування бісквітних напівфабрикатів, оскільки саме ці нутрієнти дозволяють значно підвищити біологічну цінність розробленого збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений».

Проблемним місцем є визначення оптимального складу рецептури, який би задовольняв органолептичні вподобання та при цьому був оптимально збалансованим за харчовою цінністю, що досить складно, оскільки обсяги дослідження занадто великі.

Органолептичне оцінювання якості готового продукту здійснювали аналітичними методами – якісним та методом профільного аналізу. Сутність профільного методу полягає в тому, що складне поняття одного з органолептичних показників (консистенція, смак, запах, колір) було представлено у вигляді сукупності складників (дескрипторів), які оцінювалися експертами за показниками якості, інтенсивності та порядку проявлення [6].

Для проведення оптимізації функція відгуку формується у вигляді повного квадратного поліному другого порядку для $n=4$, що наведений у формулі 1. Для визначення коефіцієнтів поліному використовується ортогональний центрально-композиційний план другого порядку (ОЦКП).

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 + \dots \quad (1)$$

Ортогональний центрально-композиційний план – це такий план, в якого матриця планування X будується так, щоб матриця $C = XtX$ виявилася діагональною. Використовуємо цей підхід і в побудові планів другого порядку. План називається центральним, якщо всі крапки розташовані симетрично щодо центру плану. ОЦКП – центральний симетричний прямокутний композиційний план.

Для визначення ОЦКП таким, що може бути використаний у дослідженнях, застосовуються 3 критерії, дані про які є загальновідомими:

1. t-критерій Ст'юдента/Ст'юдента – загальна назва для класу методів статистичної перевірки гіпотез (статистичних критеріїв), заснованих на порівнянні з розподілом Ст'юдента. Найчастіші випадки застосування t-критерію пов'язані з перевіркою рівності середніх значень у двох вибірках ^[1].

2. Критерій Кохрена – використовують для порівняння трьох і більше виборок однакового обсягу.

3. F-тест або критерій Фішера (F-критерій, ϕ^* -критерій) – будь-який статистичний критерій, тестова статистика якого в разі виконання нульової гіпотези має розподіл Фішера (F-розподіл).

Параметром оптимізації є оптимальне співвідношення в рецептурі білків, жирів та вуглеводів за одного з максимальних значень органолептики. Згідно зі встановленими раціональними нормами добового споживання основних поживних речовин оптимальне добове співвідношення білків, жирів та вуглеводів для середньостатистичної дорослої людини становить 1:1:4 відповідно. В ОЦКП кожний фактор фіксується на п'яти рівнях з огляду на максимальну та мінімальну кількість інгредієнтів із залишенням незмінними основних властивостей збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений», що наведено в табл. 1. План експерименту, результати безпосередніх вимірювань та їх початковий аналіз представлені в табл. 2 та табл. 3 відповідно.

У результаті досліджень були отримані коефіцієнти рівняння регресії. Проведено статистичний аналіз моделі загалом та її коефіцієнтів окремо. Результати зведено в табл. 4.



Таблиця 1

Рецептурні компоненти та рівні фіксації факторів, що впливають на оптимізацію рецептури збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений»

Фактори, що впливають на оптимізацію (компоненти рецептури)		Рівні фіксації факторів та їх натуральні величини, г					Вміст на 100 г продукту, г		
		-1,414	-1	0	1	1,414	Білки	Жири	Вуглеводи
x1	Борошно пшеничне	14,7	20,6	25,6	31,1	43,5	10,3	1,0	73,0
x2	Борошно із цвіркунів	1,6	2,3	2,8	3,3	4,6	65,0	20,0	10,0
x3	Еритрол	8	11,2	16,2	21,2	29,7	0	0	100,0
x4	Фруктоза	2,6	3,7	8,7	13,7	19	0	0	100,0
x5	Ячні продукти	41	57,5	62,5	67,5	95	12,6	10,6	1,1
Компоненти рецептури, що не є факторами в математичній моделі		Вміст в 1 порції нетто, г					Білки	Жири	Вуглеводи
Кислота лимонна		0,11					0	0	0

Таблиця 2

Ортогональний центрально-композиційний план за чотирьох (n) факторів оптимізації рецептури збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений»

№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄				
1	1	1	1	1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
2	1	-1	1	1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
3	1	1	-1	1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
4	1	-1	-1	1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
5	1	1	1	-1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
6	1	-1	1	-1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
7	1	1	-1	-1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
8	1	-1	-1	-1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
9	1	1	-1	1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
10	1	-1	-1	1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
11	1	1	1	1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
12	1	-1	1	1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
13	1	1	-1	-1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
14	1	-1	-1	-1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
15	1	1	1	-1	1	0,40	0,40	0,40	0,40
16	1	-1	1	-1	-1	0,40	0,40	0,40	0,40
17	1	-1,414	0	0	0	-0,60	-0,60	-0,60	1,40
18	1	1,414	0	0	0	-0,60	-0,60	-0,60	1,40
19	1	0	-1,414	0	0	-0,60	-0,60	1,40	-0,60
20	1	0	1,414	0	0	-0,60	-0,60	1,40	-0,60
21	1	0	0	-1,414	0	1,40	-0,60	-0,60	-0,60
22	1	0	0	1,414	0	1,40	-0,60	-0,60	-0,60
23	1	0	0	0	-1,414	-0,60	1,40	-0,60	-0,60
24	1	0	0	0	1,414	-0,60	1,40	-0,60	-0,60
25	1	0	0	0	0	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60



Таблиця 3

Результати безпосередніх вимірювань

№	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄					
1	6,9	10,1	31,5	13,71	15,6	120,36	15,6	15,4	0,037
2	6,2	9,8	25,9	10,20	13,0	76,64	13,0	13,0	0,000
3	7,8	10,1	25,9	10,56	13,6	68,73	13,6	13,7	0,005
4	6,5	8,4	31,3	12,75	14,7	128,23	14,7	14,7	0,007
5	5,6	6,6	25,5	13,26	12,7	83,61	12,7	12,6	0,019
6	7,4	8,4	25,7	11,02	13,1	72,41	13,1	13,3	0,033
7	6,7	9,0	24,6	10,25	12,6	65,96	12,6	12,7	0,010
8	7,7	9,4	32,5	13,49	15,8	130,66	15,8	15,7	0,005
9	7,1	11,6	31,7	11,64	15,5	120,55	15,5	15,6	0,006
10	8,0	7,1	31,1	14,16	15,1	123,82	15,1	15,3	0,034
11	7,3	10,3	28,7	12,18	14,6	92,21	14,6	14,6	0,004
12	7,2	9,2	28,6	12,84	14,5	94,11	14,5	14,4	0,002
13	6,4	11,4	26,1	11,67	13,9	71,99	13,9	13,7	0,038
14	8,0	11,6	26,1	11,61	14,3	64,33	14,3	14,2	0,020
15	6,3	6,9	31,1	12,53	14,2	134,33	14,2	14,3	0,017
16	5,8	8,1	25,7	12,26	13,0	78,82	13,0	13,1	0,017
17	8,2	8,6	31,3	14,01	15,5	117,50	15,5	15,5	0,001
18	7,2	6,8	25,5	11,26	12,7	76,60	12,7	12,6	0,007
19	8,8	11,9	31,7	12,41	16,2	109,56	16,2	16,3	0,017
18	8,6	10,3	31,5	14,22	16,2	110,24	16,2	16,0	0,020
19	6,0	9,1	28,6	12,34	14,0	100,95	14,0	14,2	0,027
20	8,3	9,4	28,6	14,05	15,1	87,17	15,1	15,0	0,018
21	6,8	6,9	31,1	15,6	14,1	119,16	15,1	13,9	0,058
22	7,6	11,5	28,9	10,96	14,7	91,77	14,7	15,0	0,064
23	7,0	8,1	28,4	11,83	13,9	98,60	13,9	14,0	0,009
24	6,7	9,0	24,6	10,25	12,6	65,96	12,6	12,7	0,010
25	7,7	9,4	32,5	13,49	15,8	130,66	15,8	15,7	0,005

Таблиця 4

Результати статистичного аналізу експерименту

	x0	x1	x2	x3	x4					
Σxi*ycp	345,6	34,5	11,8	8,1	4,3	0,0	-0,6	0,7	-0,5	
Σxi^2	17	20,0	20,0	20,0	20,0	6,0	6,0	6,0	6,0	
bi	20,29	1,7	0,59	0,44	0,21	0,00	-0,01	0,01	-0,01	
S2{bi}	16,13	1,61	1,61	1,61	1,61	4,04	4,04	4,04	4,04	
S{bi}	3,39	1,27	1,27	1,27	1,27	2,01	2,01	2,01	2,01	
ti	3,68	0,83	0,22	0,32	0,17	0,00	0,04	0,04	0,04	
ti–tkp	1,55	-1,13	-1,34	-1,22	-1,21	-1,34	-1,79	-1,79	-1,79	
	x1x2	x1x3	x1x4	x2x3	x2x4	x3x4	x1x2x3	x1x2x4	x2x3x4	x1x2x3x4
Σxi*ycp	2,3	0,9	-1,8	0,5	0,1	0,0	-1,3	-0,1	-0,1	00,5
Σxi^2	16	16	16	16	16	16	16	16	16	116
bi	0,14	0,05	-0,11	0,03	0,00	0,00	-0,08	-0,01	-0,01	00,03
S2{bi}	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	22,02
S{bi}	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	11,42
ti	0,08	0,03	0,06	0,02	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	00,02
ti–tkp	-1,78	-2,12	-1,98	-2,0	-2,14	-2,14	-1,78	-1,65	-2,04	-2,05
ΣSj2		2521,28		ΣSad		0,513		Sy2	97,35	
Si2max		154.33		Sad^2		0.0189				

Закінчення табл. 4

G	0,06	F	0,000404	α	0,06
m-1	4,00	k ₁	5		
N	25,00	k ₂	21	f ₁	23,87
G _{кр}	0,19	F _{кр(табл.)}	2,87		
G – G _{кр} =	-0,13	F – F _{кр} =	-2,86975952	t _T	2,06
(G < G _{кр}) дисперсія однорідна		F < F _{кр} статистична модель значима, рівняння регресії надійне			

Після побудови ОЦКП, проведення всіх необхідних розрахунків та визначення рівняння регресії надійним проводиться заміна коефіцієнтів у формулі 1 на визначені в дослідженнях, що дає можливість визначення взаємозалежності рецептурних компонентів та їх вплив на показники оптимізації. Як наслідок, отримана регресійна модель у кодованих одиницях має вигляд:

$$Y = 20,29 + 1,7x_1 + 0,59x_2 + 0,44x_3 + 0,21x_4 + 0,14x_1x_2 + 0,05x_1x_3 - 0,011x_1x_4 + 0,03x_2x_3 - 0,08x_1x_2x_3 - 0,01x_1x_2x_4 - 0,01x_2x_3x_4 + 0,03x_1x_2x_3x_4 - 0,07 + -0,09$$

Для визначення оптимальної рецептурної композиції відповідно до заданих параметрів було побудовано 3D-модель методом згладжування найменших квадратів за допомогою програмного пакету для статистичного аналізу Statistica, що наведено на рис. 1. Після дослідження графічних даних, результатів безпосередніх вимірювань та рівняння регресії оптимальною рецептурною композицією було визначено 21 зразок (табл. 1, 2, 3).

Згідно з проведеними дослідженнями та даними 3D-моделі оптимальною рецептурною композицією є показники досліду № 21.

Переведення моделі на мову експериментатора називається інтерпретацією моделі. Вплив фактора на параметр оптимізації дорівнює величині коефіцієнта регресії. Оскільки Y прагне до максимуму, то збільшення коефіцієнтів зі знаком + сприятливо для параметру оптимізації. Фактори, коефіцієнти яких незначні (з точки зору експериментатора, що володіє досвідом у досліджуваній сфері), не інтерпретуються і не здійснюють суттєвого впливу на параметр оптимізації.

Найважливішою в дослідженнях функції відгуку є взаємодія двох і більше факторів. Спираючись на рівняння регресії, найбільший вплив на параметр оптимізації здійснює взаємодія факторів x_1 та x_2 , що відповідає найбільшому коефіцієнту 0,14. Цей висновок виходить із рівняння регресії, а також пояснюється тим, що одиничний параметр оптимізації y_1 (білок) в основному збільшується завдяки збільшенню факторів x_1 та x_2 , а одиничний параметр оптимізації y_3 (вуглевод) – за рахунок збільшення фактору x_1 . Збільшення одиничного параметра оптимізації y_2 (жир) забезпечується факторами x_3 та x_4 , які містять значну кількість жиру у своєму складі, але майже не впливають на оптимізацію вмісту білка та вуглеводів, тому їх вплив на загальний параметр оптимізації незначний, що підтверджується незначною величиною коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Парне, три- та чотирифакторне взаємовідношення зводиться до більш низького рівня, якщо в ньому є фактори, котрі не мають значимого впливу на параметр оптимізації, тому в рецептурі виробу найважливішим є вміст борошна із цвіркунів та цукрозамінників, які здійснюють найбільший вплив на оптимізацію рецептурної композиції. Інтерпретація рівняння регресії, яке є надійним (дисперсія однорідна та статистична модель значима), є основним способом для прийняття вірних рішень в оптимізації. Тому після дослідження графічних даних, результатів безпосередніх вимірювань та інтерпретації рівняння регресії оптимальною рецептурною композицією було визначено 21-й зразок, який має найбільш близьке до оптимального спів-

відношення білків, жирів та вуглеводів, що становить 1:1:4,1 за органолептичної оцінки 15,6. Важливою умовою в дослідженні рецептурної композиції є той фактор, що в разі отримання високих показників органолептики або співвідношення нутрієнтів інші показники можуть мати незадовільні значення, тому треба вибрати композицію з максимальним балансом факторів, хоча показники можуть мати нижчі значення, і на це треба звертати особливу увагу під час досліджень та інтерпретації результатів.

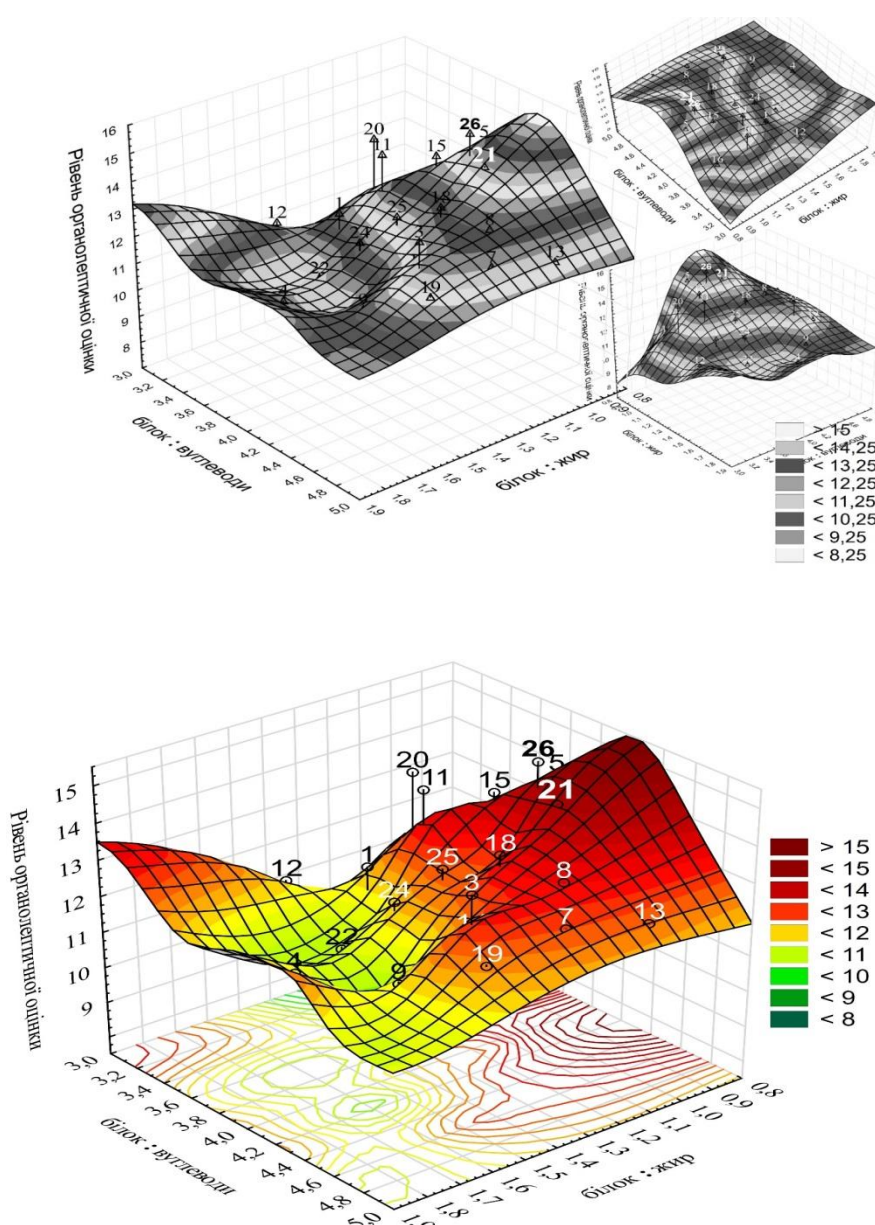


Рис. 1. 3D-модель оптимізації рецептурної композиції збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений»

Висновки. У ході роботи було досягнуто мету, а саме оптимізовано рецептурний склад збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий», та розв'язано поставлені завдання:



1) Розроблено ортогональний центрально-композиційний план за чотирьох (n) факторів оптимізації рецептури збивного бісквітного напівфабрикату «Протеїновий покращений» та підтверджено однорідність дисперсії за допомогою G-критерію (Кохрена) за рівня значущості α (0,05), значимість статистичної моделі та надійність рівняння регресії за допомогою F-критерію Фішера (табл. 4);

2) Проведено органолептичне оцінювання кожної рецептурної композиції, визначеної в ході експерименту, яке здійснювали аналітичними методами – якісним та методом профільного аналізу;

3) Для визначення оптимальної рецептурної композиції отримані результати було представлено у вигляді 3D-моделі (рис. 1), що побудовано методом згладжування найменших квадратів;

4) Після дослідження графічних даних, результатів безпосередніх вимірювань та інтерпретації рівняння регресії оптимальною рецептурною композицією було визначено 21-й зразок (табл. 1, 2, 3), який має найбільш близьке до оптимального (1:1:4) співвідношення білків, жирів та вуглеводів, що становить 1:1:4,1 за органолептичної оцінки 15,6.

Список використаних джерел

1. Jeffrey L. C. Gluten-free Baked Products L. C. Jeffrey, W. A. Atwell AACC international, Inc. 2014. 88 p.
2. Shobeiri M., Elhami Rad A. H., Sheikholeslami Z., Zenozi M. S., and Saeedi Asl M. R. The effects of quinoa and okra incorporation on the quality of diet cake. *Food Science and Technology International*, 2023, 29, no. 4, 417–427. <https://doi.org/10.1177/10820132221140615>
3. Fenny Indah Sari, Hotnida Sinaga, Linda Masniary Lubis. (2019) The Effect of Moringa Leaf Flour Addition in Steamed Sponge Cake Made from, a Mixture of Wheat and Banana Flours. *Indonesian Journal of Agricultural Research*. Vol. 2, №. 2. <https://doi.org/10.32734/injar.v2i2.1144>
4. Mohammad Rouzbahani, Hedayat Hosseini, Hossein Rastegar, Somaye Vali Zade, Adel Mirza Alizadeh, Anoosheh Sharifan, Fataneh Hashempour-baltork. (2024). Physicochemical, rheological and organoleptic characterizations of sponge cakes fortified with mycoproteins. *Journal of Agriculture and Food Research*. Volume 17, 101223. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101223>
5. Бісквіт збагачений буряковим порошком та пастою мангольда: поживні та органолептичні властивості / Т. Holovko et. al. *Food Science and Technology*, 2023, 17(1). <https://doi.org/10.15673/fst.v17i1.2558>
6. Серeda О. Мельник О. Органолептичний аналіз бісквіта круглого з додаванням білкововмісної сировини. *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. 2023. № 6 (1). С. 125–139. <https://doi.org/10.31866/2616-7468.6.1.2023.278476>

Стаття надійшла до редакції 19.03.2025 р.

O. Sereda, A. Gelih, O. Voronin
Sumy National Agrarian University

OPTIMIZATION OF THE FORMULATION COMPOSITION OF A WHIPPED BISCUIT SEMI-FINISHED PRODUCT WITH THE ADDITION OF CRICKET FLOUR AND SUGAR SUBSTITUTES

Summary

The paper investigates optimizing the recipe composition of the whipped biscuit semi-finished product “Protein Improved” to improve its nutritional value. An orthogonal central compositional experimental design with four factors was used: the content of proteins, fats, carbohydrates, and organoleptic characteristics. The effect of replacing traditional components with cricket flour, erythritol, and fructose was studied. Mathematical modelling was conducted, a 3D optimization model was built, and the optimal recipe composition with a nutrient ratio of 1:1:4.1 and high organoleptic indicators was determined.

Keywords: optimization, whipped biscuit semi-finished product, cricket flour, erythritol, fructose, nutritional value.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-42>

УДК 664.87

Є. В. Чебаненко, аспірант

О. Ю. Мельник, канд. техн. наук, доцент

Сумський національний аграрний університет

e-mail: evgeniachebanenko@gmail.com

ORCID: 0009-0005-3867-4187

ORCID: 0000-0002-9201-7955

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО НАГРІВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СМАКОВИХ ЯКОСТЕЙ БОБОВИХ

Анотація. У статті проведено огляд застосування інфрачервоного нагрівання на бобові культури, які є важливим джерелом рослинного білка, вітамінів і мікроелементів, однак їх споживання обмежується тривалим часом приготування, твердою текстурою та вмістом антипоживних речовин. Інфрачервоне нагрівання (ІЧН) розглядається як перспективна технологія, що забезпечує рівномірну термічну обробку, скорочує час приготування, покращує смак, текстуру та функціональні властивості бобових. Використання ІЧН сприяє збереженню білків, зниженню рівня антипоживних речовин і підвищенню засвоюваності поживних елементів. Крім того, ця технологія має значний промисловий потенціал завдяки енергоефективності та можливості масштабування. Подальші дослідження доцільно зосередити на оптимізації технологічних параметрів, оцінюванні впливу на різні сорти бобових і вивченні споживчих переваг.

Ключові слова: бобові, поживна цінність, біодоступність, інфрачервоне нагрівання, функціональні властивості, органолептичні властивості.

Постановка проблеми. Бобові культури, зокрема горох, квасоля, сочевиця та нут, займають важливе місце у світовому сільському господарстві та харчовій промисловості завдяки своєму багатому поживному складу. Вони є цінним джерелом рослинного білка, харчових волокон, вітамінів групи В, заліза, магнію та інших мікроелементів. Завдяки своїм поживним властивостям бобові відіграють ключову роль у раціонах людей, особливо в країнах, де споживання м'яса обмежене, або якщо люди з певних причин його не споживають.

Проте, незважаючи на їх високу харчову цінність, існує низка причин, які впливають на споживчі властивості бобових та знижують їх популярність серед споживачів. Серед них – тривалий час приготування, тверда текстура, специфічний смак і наявність антипоживних речовин, як-от фітати і таніни, які можуть перешкоджати засвоєнню деяких нутрієнтів. Традиційні методи термічної обробки бобових, хоча й знижують рівень цих небажаних властивостей, однак часто призводять до втрат поживних речовин та погіршення органолептичних характеристик.

В умовах сучасної харчової промисловості зростає інтерес до новітніх технологій оброблення, які дозволяють зберегти або покращити поживні та смакові властивості продуктів. Інфрачервоне нагрівання (ІЧН) є однією з таких інновацій, що демонструє значний потенціал у покращенні властивостей продуктів харчування. Цей метод оброблення, що базується на випромінюванні теплових хвиль, дозволяє досягати рівномірного нагріву продукту з мінімальними втратами тепла, що сприяє збереженню природних смакових і ароматичних властивостей.

Інфрачервоне нагрівання має численні переваги, як-от скорочення часу приготування, зменшення втрат поживних речовин та покращення текстури і смаку оброблених продуктів. Однак, попри ці переваги, технологія ще недостатньо вивчена щодо її впливу на якість бобових культур, зокрема на зміну їх смакових властивостей.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є всебічне вивчення сучасних досліджень про застосування інфрачервоного нагрівання для оброблення бобових, аналіз його впливу на смакові властивості цих продуктів, а також оцінювання можливостей і обмежень впровадження цієї технології в промисловому масштабі.

Аналіз досліджень. Застосування інфрачервоного нагрівання в харчовій промисловості, зокрема для оброблення бобових, набуває все більшої популярності завдяки своїй ефективності в покращенні якості продукції. В останні роки проведено значну кількість досліджень, серед яких розвідки науковців X. Wu et al. та S. Sansak et al. [1; 2], які встановили вплив інфрачервоного нагрівання на енергоспоживання та якість продукції та зазначили покращення органолептичних показників бобових і зниження енергетичних затрат.

М. Heydari et al. [3] дослідили зміни структури крохмалю і білка в сочевиці під впливом інфрачервоного нагрівання, виявивши поліпшення функціональних властивостей оброблених продуктів. В. Guldiken et al. [4] вивчили вплив інфрачервоного нагрівання на хімічний склад і морфологічні властивості борошна з квасолі та нуту. Дослідження S.B. Pawar et al. та M.H. Riadh et al. [5; 6] зазначають вплив інфрачервоного нагрівання для підвищення функціональних властивостей бобових продуктів, підкреслюючи їх покращення.

У монографії «*Lentils: Production, processing technologies, products, and nutritional profile*» [7] наведено широкий огляд сучасних технологій оброблення сочевиці, включаючи інфрачервоний нагрів. T.S. Manyatsi et al. [8] зазначили, що інфрачервоний нагрів сприяє поліпшенню фізико-хімічних властивостей продуктів, що підвищує їх привабливість для споживачів. S. Deerika et al. [9] акцентували увагу на важливості підбору оптичних характеристик для ефективного інфрачервоного нагрівання продуктів.

S. Liu et al. [10] зазначили, що оброблення сочевиці інфрачервоним нагріванням підвищує її харчову цінність, а F.A. Mendoza et al. [11] використали видиму інфрачервону спектроскопію для надання оцінки якості консервованої чорної квасолі. О. Fasina et al. [12] досліджували вплив інфрачервоного нагрівання на властивості насіння бобових, демонструючи покращення знежирення сировини та зменшення антипоживних факторів.

P. Sakare et al. [13] розглянули останні досягнення у використанні інфрачервоного висушування харчових матеріалів та вказують на зменшення часу оброблення та поліпшення смакових характеристик. С.А. Patterson et al. [14] дослідили вплив оброблення на антипоживні сполуки в бобових, виявивши зниження їх вмісту після інфрачервоної обробки.

С. Acquah et al. [15] розглянули вплив оброблення на стан біоактивних сполук та харчові властивості бобових, акцентуючи увагу на стратегіях досягнення сталого розвитку. R. López-Calabozo et al. [16] використали ближню інфрачервону спектроскопію для визначення вуглеводного складу сочевиці, що відкриває нові можливості для оцінювання якості продуктів.

S. Liu et al. [17] показали, як інфрачервоне нагрівання впливає на функціональні властивості обробленої сочевиці, підкреслюючи важливість темперування. А. Maria Medeiros Theóphilo Galvão et al. [18] дослідили білкові ізоляти сочевиці після ультразвукової обробки, підтверджуючи її здатність стабілізувати емульсії.

S.D. Daba et al. [19] використали ближню інфрачервону спектроскопію для передбачення концентрації білка в горохові, тоді як Y. Mizutani et al. [20] вивчили ефекти низьковологового теплового оброблення на білки та олії в соєвих зернах. D. Pathiraje et al. [21] оцінювали мультифункціональні інгредієнти з бобових для оброблених м'ясних продуктів після інфрачервоного нагрівання.

T. Bai et al. [22] дослідили вплив темперування та інфрачервоного нагрівання на харчові властивості нуту та ячмінного борошна, показуючи позитивні зміни. R. Campos-Vega et al. [23]

та B.D. Oomah et al. [24] розглянули вплив різних обробок на харчову цінність і біоактивні речовини в бобах.

J. Rivera et al. [25] надають огляд процесів фракціонування білків із бобових, підкреслюючи роль інфрачервоного нагрівання в покращенні функціональних характеристик. I. Amoah et al. [26] розглянули стратегії збільшення споживання бобових через кулінарні та освітні підходи, тоді як A. Badjona et al. [27] досліджували термічні й нетермічні методи оброблення.

M. Plans et al. [28] використали ближню інфрачервону спектроскопію для оцінювання сенсорних властивостей бобових, підкреслюючи її ефективність у прогнозуванні смакових якостей. M.M. Rahman et al. [29] застосовували інфрачервону мікроспектроскопію для дослідження білкових метаболічних характеристик у нових сортах *Vicia faba*. Своєю чергою L.M. а Lara et al. [30] дослідили вплив інфрачервоного оброблення на фізико-хімічні характеристики сої.

Зрештою, N.K. Rastogi [31] зазначив, що інфрачервоний нагрів є перспективним напрямом в обробленні харчових продуктів, забезпечуючи швидке і рівномірне оброблення з мінімальними втратами поживних речовин.

Ці дослідження показують, що інфрачервоний нагрів є ефективним методом для підвищення смакових якостей та харчової цінності бобових, що робить його важливим інструментом для харчової промисловості.

Основна частина. У ході дослідження було виявлено, що інфрачервоний нагрів суттєво впливає на покращення смакових і функціональних характеристик бобових. Одним із ключових аспектів є покращення функціональних властивостей бобових після оброблення. Дослідження M. Heydari et al. та B. Guldiken et al. [3; 4] показали, що обробка інфрачервоним нагріванням змінює структуру білків і крохмалю, що своєю чергою покращує гідратаційні властивості, розчинність і емульгуючу здатність борошна з бобових. Це відкриває нові можливості для використання бобових у різних харчових продуктах, підвищуючи їх функціональність. Значним досягненням стало зниження рівня антипоживних речовин після інфрачервоного нагрівання, як було зазначено в дослідженнях. C.A. Patterson et al. та A. Badjona et al. [14; 27] зазначили, що антипоживні речовини, як-от фітати і таніни, обмежують засвоєння корисних елементів з бобових, а їх зменшення суттєво покращує харчову цінність продукту, роблячи його більш корисним для споживачів.

Смакові якості оброблених бобових також зазнають значного покращення. Дослідження P. Sakare et al. [13] виявило, що після інфрачервоного нагрівання продукти набувають привабливіших смакових характеристик, що сприяє їх більшому сприйняттю серед споживачів. Це особливо важливо для продуктів із бобових, які часто мають специфічний смак і запах.

Підвищення харчової цінності бобових після інфрачервоного нагрівання було підтверджено у дослідженнях S. Liu et al. та T. Bai et al. [10; 22]. Оброблення дозволяє зберегти та навіть підвищити рівень білків й інших важливих поживних речовин, що робить бобові ще ціннішими для споживання, особливо в дієтах з високим вмістом рослинних білків.

Також відзначено покращення структурних властивостей білкових ізолятів із бобових, що є важливим для їх використання в різних харчових продуктах. Дослідження A. Maria Medeiros Theóphilo Galvão et al. [18] продемонструвало, що поєднання інфрачервоного нагрівання з ультразвуковим обробленням сприяє стабільності емульсій, що відкриває нові перспективи для застосування бобових у функціональних продуктах харчування.

Ефективність інфрачервоного нагрівання як технології оброблення підтверджено N.K. Rastogi [31], який підкреслив швидкість і рівномірність оброблення, що дозволяє знизити втрати поживних речовин і зменшити енергоспоживання. Це робить інфрачервоний нагрів привабливим методом оброблення з точки зору економічної ефективності та збереження ресурсів.

Також оцінювання якості оброблених бобових за допомогою ближньої інфрачервоної спектроскопії було підтверджено дослідженнями F.A. Mendoza et al. та R. López-Calabozo et al. [11; 16], що дозволяє точно визначити хімічний склад і якість продукції після оброблення.

Значним досягненням стало створення мультифункціональних інгредієнтів з бобових за допомогою інфрачервоного нагрівання. D. Pathiraje et al. [21] продемонстрували, що оброблення дозволяє отримати інгредієнти, які можуть використовуватися у виробництві оброблених харчових продуктів з поліпшеними властивостями, що розширює спектр їх використання в харчовій промисловості.

Таким чином, результати дослідження свідчать про значний потенціал інфрачервоного нагрівання як інноваційного методу оброблення бобових, що дозволяє суттєво покращити їх смакові, функціональні та харчові характеристики, а також забезпечити економічну ефективність і зменшення екологічного впливу виробництва.

Обговорення. Отримані результати свідчать про значний потенціал інфрачервоного нагрівання як ефективного методу покращення якості бобових. Важливо відзначити, що покращення функціональних властивостей, як-от водопоглинання та емульгуюча здатність, що було продемонстровано в дослідженнях M. Heydari et al. та B. Guldiken et al. [3; 4], може сприяти підвищенню використання бобових у різних харчових продуктах. Це важливо в контексті зростання попиту на альтернативні джерела білка та функціональні інгредієнти.

Суттєвим аспектом є зниження рівня антипоживних речовин, які обмежують засвоєння поживних елементів. Зменшення фітатів і танінів після оброблення, як це продемонстровано у C.A. Patterson et al. та A. Badjona et al. [14; 27], відкриває можливості для підвищення біодоступності мінералів і білків. Це робить бобові більш привабливими для споживачів, які прагнуть здорового харчування.

Однак важливим викликом залишається забезпечення однорідності оброблення в разі масштабування виробництва. Дослідження N.K. Rastogi [31] підкреслює, що інфрачервоний нагрів має переваги у швидкості та рівномірності нагрівання, але необхідно дослідити ефективність цієї технології в промислових умовах для забезпечення стабільної якості продукції.

Водночас підвищення смакових якостей оброблених бобових, як це було показано в дослідженні P. Sakare et al. [13], є значним досягненням, особливо в контексті популяризації рослинної їжі. Однак слід урахувати, що смакові переваги можуть варіюватися серед різних груп споживачів, тому необхідно продовжувати дослідження щодо оптимізації параметрів оброблення для досягнення оптимальних смакових характеристик.

Щодо економічних аспектів застосування інфрачервоного нагрівання може зменшити енергоспоживання та знизити витрати на виробництво, що робить цей метод привабливим для промислового впровадження. Проте необхідно провести подальші дослідження для оцінювання довгострокових економічних переваг і впливу на стійкість виробництва.

Таким чином, результати досліджень свідчать про те, що інфрачервоний нагрів є перспективною технологією для оброблення бобових, яка може підвищити їх харчову цінність та привабливість для споживачів. Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації технологічних параметрів і вивченні впливу цього виду оброблення на різні сорти бобових, а також встановленні споживчих переваг у разі впровадження цієї технології в промислові процеси.

Висновки. Використання інфрачервоного нагрівання для оброблення бобових демонструє значний потенціал у покращенні їх смакових, функціональних та споживчих властивостей. Дослідження показали, що цей метод сприяє зниженню вмісту антипоживних речовин, як-от фітати і таніни, підвищує біодоступність білків і мінералів, а також покращує текстуру і смакові характеристики продуктів. Крім того, технологія інфрачервоного нагрівання дозволяє підвищити ефективність оброблення, зменшуючи енерговитрати і час приготування, що є важливими перевагами для промислового впровадження.

Результати аналізу підтверджують, що інфрачервоний нагрів може стати ключовим інструментом для покращення якості бобових, що сприятиме зростанню їх споживання і включення в раціон більш широкого кола споживачів. Однак для повного впровадження цієї технології необхідні подальші дослідження щодо оптимізації технологічних параметрів і встановлення довгострокового впливу на харчову цінність і якість продуктів.

Таким чином, інфрачервоний нагрів відкриває нові можливості для харчової промисловості, сприяючи виробництву більш корисних і смачних продуктів з бобових, що може мати позитивний вплив на здоров'я споживачів і стійкість харчових систем.

Список використаних джерел

1. Wu X., Zhang M., Bhandari B. A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of *Cordyceps militaris* // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2019. Vol. 54. P. 34–42. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.03.003
2. Sansak S., Jongyingcharoen J. S. Effect of hot air assisted infrared drying on drying characteristics and quality of rice bran pellets // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 192. P. 03040. DOI: 10.1051/mateconf/201819203040
3. Heydari M. M., Najib T., Meda V. Investigating starch and protein structure alterations of the processed lentil by microwave-assisted infrared thermal treatment and their correlation with the modified properties // *Food Chemistry Advances*. 2022. Vol. 1. P. 100091. DOI: 10.1016/j.focha.2022.100091
4. Guldiken B., Konieczny D., Franczyk A., Satiro V., Pickard M., Wang N., House J., Nickerson M. T. Impacts of infrared heating and tempering on the chemical composition, morphological, functional properties of navy bean and chickpea flours // *European Food Research and Technology*. 2022. Vol. 248, No. 3. P. 767–781. DOI: 10.1007/s00217-021-03918-4
5. Pawar S. B., Pratap V. Fundamentals of infrared heating and its application in drying of food materials: a review // *Journal of Food Process Engineering*. 2015. Vol. 40, No. 1. DOI: 10.1111/jfpe.12308
6. Riadh M. H., Ahmad S. a. B., Marhaban M. H., Soh A. C. Infrared heating in food drying: an overview // *Drying Technology*. 2014. Vol. 33, No. 3. P. 322–335. DOI: 10.1080/07373937.2014.951124
7. Lentils: Production, processing technologies, products, and nutritional profile. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2023.
8. Manyatsi T. S., Al-Hilphy A. R., Majzoobi M., Farahnaky A., Gavahian M. Effects of infrared heating as an emerging thermal technology on physicochemical properties of foods // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. Vol. 63, No. 24. P. 6840–6859. DOI: 10.1080/10408398.2022.2043820
9. Deepika S., Sutar P. P. Spectral selective infrared heating of food components based on optical characteristics and penetration depth: a critical review *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. P. 1–23. DOI: 10.1080/10408398.2023.2227899
10. Liu S., Ren Y., Yin H., Nickerson M., Pickard M., Ai Y. Improvement of the nutritional quality of lentil flours by infrared heating of seeds varying in size *Food Chemistry*. 2022. Vol. 396. P. 133649. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133649
11. Mendoza F. A., Cichy K., Lu R., Kelly J. D. Evaluation of canning quality traits in black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by visible/near-infrared spectroscopy // *Food and Bioprocess Technology*. 2014. Vol. 7, No. 9. P. 2666–2678. DOI: 10.1007/s11947-014-1285-y
12. Fasina O., Tyler B., Pickard M., Zheng G., Wang N. Effect of infrared heating on the properties of legume seeds // *International Journal of Food Science & Technology*. 2001. Vol. 36, No. 1. P. 79–90. DOI: 10.1046/j.1365-2621.2001.00420.x
13. Sakare P., Prasad N., Thombare N., Singh R., Sharma S. C. Infrared drying of food materials: recent advances // *Food Engineering Reviews*. 2020. Vol. 12, No. 3. P. 381–398. DOI: 10.1007/s12393-020-09237-w
14. Patterson C. A., Curran J., Der T. Effect of processing on antinutrient compounds in pulses // *Cereal Chemistry*. 2016. Vol. 94, No. 1. P. 2–10. DOI: 10.1094/cchem-05-16-0144-fi
15. Acquah C., Ohemeng-Boahen G., Power K. A., Tosh S. M. The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses in meeting the Sustainable Development Goal 2 // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. DOI: 10.3389/fsufs.2021.681662

16. López-Calabozo R., Liberal Â., Fernandes Â., Revilla I., Ferreira I. C. F. R., Barros L., Vivar-Quintana A. M. Determination of carbohydrate composition in lentils using near-infrared spectroscopy // *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2024. Vol. 24, No. 13. P. 4232. DOI: 10.3390/s24134232
17. Liu S., Yin H., Pickard M., Ai Y. Influence of infrared heating on the functional properties of processed lentil flours: A study focusing on tempering period and seed size // *Food Research International (Ottawa, Ont.)*. 2020. Vol. 136. P. 109568. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109568
18. Maria Medeiros Theóphilo Galvão A., Lamy Rasera M., de Figueiredo Furtado G., Grossi Bovi Karatay G., M. Tavares G., Dupas Hubinger M. Lentil protein isolate (*Lens culinaris*) subjected to ultrasound treatment combined or not with heat-treatment: structural characterization and ability to stabilize high internal phase emulsions // *Food Research International (Ottawa, Ont.)*. 2024. Vol. 183. P. 114212. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114212
19. Daba S. D., Honigs D., McGee R. J., Kiszonas A. M. Prediction of protein concentration in pea (*Pisum sativum* L.) using near-infrared spectroscopy (NIRS) systems // *Foods (Basel, Switzerland)*. 2022. Vol. 11, No. 22. P. 3701. DOI: 10.3390/foods11223701
20. Mizutani Y., Shibata M., Yamada S., Nambu Y., Hirotsuka M., Matsumura Y. Effects of heat treatment under low moisture conditions on the protein and oil in soybean seeds // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 275. P. 577–584. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.139
21. Pathiraje D., Carlin J., Der T., Wanasundara J. P. D., Shand P. J. Generating multi-functional pulse ingredients for processed meat products—scientific evaluation of infrared-treated lentils // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 8. P. 1722. DOI: 10.3390/foods12081722
22. Bai T., Nosworthy M. G., House J. D., Nickerson M. T. Effect of tempering moisture and infrared heating temperature on the nutritional properties of desi chickpea and hull-less barley flours, and their blends // *Food Research International*. 2018. Vol. 108. P. 430–439. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.02.061
23. Campos-Vega R., Bassinello P. Z., De Andrade Cardoso Santiago R., Oomah B. D. Dry beans: processing and nutritional effects // *Elsevier eBooks*. 2018. P. 367–386. DOI: 10.1016/b978-0-12-814625-5.00019-4
24. Oomah B. D., Kotzeva L., Allen M., Bassinello P. Z. Microwave and micronization treatments affect dehulling characteristics and bioactive contents of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013. Vol. 94, No. 7. P. 1349–1358. DOI: 10.1002/jsfa.6418
25. Rivera J., Siliveru K., Li Y. A comprehensive review on pulse protein fractionation and extraction: processes, functionality, and food applications // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. Vol. 64, No. 13. P. 4179–4201. DOI: 10.1080/10408398.2022.2139223
26. Amoah I., Ascione A., Muthanna F., Feraco A., Camajani E., Gorini S., Armani A., Caprio M., Lombardo M. Sustainable strategies for increasing legume consumption: culinary and educational approaches // *Foods*. 2023. Vol. 12, No. 11. P. 2265. DOI: 10.3390/foods12112265
27. Badjona A., Bradshaw R., Millman C., Howarth M., Dubey B. FABA bean processing: thermal and non-thermal processing on chemical, antinutritional factors, and pharmacological properties // *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 14. P. 5431. DOI: 10.3390/molecules28145431
28. Plans M., Simó J., Casañas F., Del Castillo R. R., Rodriguez-Saona L. E., Sabaté J. Estimating sensory properties of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by near-infrared spectroscopy // *Food Research International*. 2013. Vol. 56. P. 55–62. DOI: 10.1016/j.foodres.2013.12.003
29. Rahman M. M., Refat B., Zhang H., Zhang W., Yu P. Detect molecular spectral features of newly developed *Vicia faba* varieties and protein metabolic characteristics in ruminant system using advanced synchrotron radiation based infrared microspectroscopy: a preliminary study // *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2019. Vol. 206. P. 413–420. DOI: 10.1016/j.saa.2018.08.022
30. Lara L. M., Wilson S. A., Chen P., Atungulu G. The effects of infrared treatment on physicochemical characteristics of vegetable soybean // *Heliyon*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. e01148. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01148
31. Rastogi N. K. Recent trends and developments in infrared heating in food processing // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2012. Vol. 52, No. 9. P. 737–760. DOI: 10.1080/10408398.2010.508138

Стаття надійшла до редакції 20.02.2025 р.



Yev. V. Chebanenko, O. Yu. Melnyk
Sumy National Agrarian University

APPLICATION OF INFRARED HEATING TO IMPROVE THE TASTE OF LEGUMES

Summary

Pulses, such as peas, beans, lentils and chickpeas, are important in modern agriculture and food industry due to their rich nutritional composition, including high levels of vegetable protein, dietary fiber, B vitamins, iron, magnesium and other trace elements. They are a valuable component of the diet, especially in regions where meat is consumed in limited quantities. However, despite their high nutritional value, pulses often face a number of challenges, such as long cooking times, hard texture, specific flavor and the presence of anti-nutrients, which can affect their popularity among consumers.

In light of the current challenges in the food industry, there is a growing interest in innovative processing technologies that can preserve or even improve the nutritional and flavor qualities of products. One of these technologies is infrared heating (IRH), which is based on the use of heat waves to ensure uniform heating of food with minimal heat loss. This technology shows significant potential in reducing cooking time, reducing nutrient loss, and improving the texture and flavor of processed pulses.

The purpose of this review is to comprehensively examine the available research on the use of infrared heating for pulses, assess its impact on their flavor and functional properties, and analyze the opportunities and limitations of using this technology at the industrial level. A literature review has shown that the use of infrared heating can significantly improve the taste of pulses, reduce the level of anti-nutrients such as phytates and tannins, and improve the hydration properties and emulsifying ability of pulses.

In particular, studies show that the treatment of pulses with IPN increases their nutritional value, preserves proteins and improves functional properties, such as solubility and emulsion stability. In addition, the reduction of anti-nutrients contributes to a better absorption of nutrients, making pulses more attractive to consumers seeking a healthier diet.

Infrared heating also has significant potential to reduce energy consumption and ensure cost efficiency in the production process, making it an attractive technology for industrial implementation. At the same time, given the growing popularity of plant-based foods, improving the flavor of processed pulses can help increase their consumption among different consumer groups.

Thus, infrared heating is a promising direction in the processing of legumes, which can significantly increase their nutritional value, improve their taste and functional characteristics, and ensure economic efficiency of production. Further research should focus on optimizing technological parameters, studying the impact on different varieties of pulses, as well as on studying consumer preferences and implementing this technology in industrial processes.

Keywords: legumes, processing, nutritional value, bioavailability, infrared heating, functional properties, organoleptic properties.

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-43>

УДК 663.252

Т. О. Яковенко, ст. викл.

О. І. Мамай, к.т.н., доц.

М. І. Валько, д.т.н., проф.

О. В. Стоянова, к.т.н., доц.

К. В. Зубкова, к.т.н., доц.

Херсонський національний технічний університет

e-mail: yakovenko.tetiana@kntu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1616-8997

ORCID: 0000-0002-2591-8059

ORCID: 0009-0001-2089-2005

ORCID: 0000-0002-6479-5936

ORCID: 0000-0002-8672-0855

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЧЕРВОНИХ КРІПЛЕНИХ ДЕСЕРТНИХ ВИН

Анотація. Проведено дослідження впливу технологічних особливостей перероблення червоних сортів винограду на якість кріплених десертних вин спеціального типу. Проаналізовано технологічні параметри червоних сортів винограду. Досліджено фізико-хімічні й органолептичні показники червоних сортів винограду та готових кріплених десертних вин. Розроблено технологічну схему виробництва червоних кріплених вин за вдосконаленою технологією.

Ключові слова: червоні сорти винограду Бастардо Магарачський, Каберне Совіньйон, Одеський чорний, Сапераві, кріплені десертні виноматеріали спеціального типу, фізико-хімічні показники, органолептичні показники, термовиніфікація.

Постановка проблеми. Сучасний світовий ринок вина демонструє стійку тенденцію до трансформації асортименту в бік випуску продукції, що відповідає фізіологічним потребам людини. Попит на цю продукцію формується не лише під впливом економічних та соціокультурних факторів, але й завдяки її харчовій цінності та оздоровчим властивостям [1; 2]. У зв'язку з цим на особливу увагу заслуговують червоні вина, багаті речовинами, що мають функціональне значення, зокрема, фенольними речовинами, вітамінами, мінеральними та іншими компонентами [3; 4].

Органолептичні властивості та харчова цінність червоних вин визначаються присутністю біологічно цінних сполук, у тому числі катехінів, флавонів, флавонолів, їх олігомерних та полімерних форм (проціанідинів) [3; 5]. Інтерес до цієї групи речовин визначається широким спектром реакційної здатності, а також наявністю їх у значних кількостях у різних рослинах, особливо в червоних сортах винограду тощо. Водночас недостатньо вивчено фенольні речовини різних сортів винограду, в тому числі селекції останніх 10–15 років, особливо у взаємозв'язку з районом та умовами вирощування.

Відомо, що фенольні сполуки винограду зосереджені переважно в шкірці та інших твердих структурних елементах грона, тому застосовують різні технологічні прийоми, що забезпечують інтенсифікацію процесу екстракції барвних речовин [6]. Такі прийоми розробляються як у технології перероблення винограду (бродіння на м'яззі, термовиніфікація, мацерація, фізико-хімічні впливи тощо), так і в агротехніці вирощування винограду (використання стимуляторів росту, підбір добрив, що забезпечують накопичення фенольного комплексу та знижують пружність шкірки винограду тощо) [7]. Проте багато питань залишаються невирішеними.

Виробництво червоних вин високої якості передбачає створення умов для екстрагування із твердих частин виноградної ягоди барвних і ароматичних речовин, а також їх збереження на всіх стадіях формування і дозрівання виноматеріалу [8; 9]. Екстрагування барвних і ароматичних речовин із м'язги залежить від багатьох факторів: способів механічного впливу на ягоди винограду, ступеня ферментативного руйнування клітин, що містять ці сполуки, температури, сорту винограду [10].

Актуальність досліджень фенольних сполук винограду зумовлена їх значним впливом на якість та оздоровчі властивості вин. Дослідження фенольних сполук винограду, розроблення методів їх ефективного вилучення зі шкірочки та забезпечення стабільності цих сполук під час зберігання вин є пріоритетними напрямками наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень. У процесі виробництва червоного вина істотно впливають на його якість такі фактори: сортовий склад винограду, що використовується для виробництва певного типу вина; еколого-географічні та природно-кліматичні умови вирощування винограду, агротехнологія його вирощування; застосована технологія перероблення винограду, оброблення і зброджування м'язги, витримки та оброблення вин; технологічні режими оброблення виноматеріалів і застосовуване обладнання.

Під час виробництва червоних вин високої якості технологічні процеси направлені на одержання максимальної екстрактивності виноматеріалів і найбільш повне вилучення барвних речовин із винограду [11; 12]. Тому у виробництві червоних вин необхідно враховувати наявність і концентрацію фенольних речовин, з їх перетвореннями у винограді й вині зв'язані основні біохімічні процеси, а отже, і якість готового продукту: колір, прозорість, стабільність.

Своєчасне визначення вмісту фенольних і барвних речовин надає виноробу можливість використовувати більш раціональні прийоми для перероблення винограду, регулювати процес вилучення екстрактивних речовин із твердих частин виноградної ягоди [13; 14].

Існують декілька способів виробництва червоних виноматеріалів: бродіння виноградного сусла на м'яззі, вуглекислотна мацерація, термовініфікація тощо.

У практиці сучасного виноробства виділяють три схеми термовініфікації червоних сортів винограду перед бродінням: нагрівання всієї м'язги, нагрівання тільки м'язги, що стекла, нагрівання м'язги спільно з виноградним суслом. У першому випадку передбачаються три температурні режими: до 55°C, 60–70°C та 70–80°C. Вибір того чи іншого режиму зумовлюється ступенем зрілості винограду, концентрацією в ньому (технологічним запасом) фенольних сполук, специфікою продукції, вимогами досягнення необхідної повноти смаку та забарвлення, а також можливостями підприємства.

Використання термовініфікації забезпечує високу економічну ефективність, потоковість процесу, повну інактивацію мікроорганізмів, завдяки чому бродіння проводиться чистими культурами дріжджів, можливість зниження дозувань діоксиду сірки та високу якість продукції.

Проте багато питань технології червоних вин вимагають подальших досліджень, у тому числі: вплив різних способів оброблення на накопичення фенольних сполук у вині, удосконалення технології виробництва кріплених десертних червоних вин, спрямоване на збереження цінних компонентів фенольного комплексу.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є наукове обґрунтування й удосконалення технології перероблення червоних сортів винограду з виробництвом кріплених десертних вин. Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання: проаналізувати технологічні параметри червоних сортів винограду; обґрунтувати технологічні прийоми, що впливають на якість вин; розробити сучасну технологічну схему виробництва кріплених десертних вин спеціального типу, що дозволяє одержувати якісні та стабільні вина; дослідити

фізико-хімічні й органолептичні показники готових вин; проаналізувати отримані результати, визначити оптимальні параметри та режими виробництва.

Основна частина. Об'єктом дослідження є технологія кріплених десертних вин спеціального типу. Предмет дослідження – червоні технічні сорти винограду, м'язга з них, готові кріплені десертні виноматеріали.

Визначення органолептичних та фізико-хімічних показників винограду і кріплених десертних виноматеріалів проводили за стандартними методами, прийнятими у виноробній галузі й методами, розробленими науковими установами [15].

Експеримент проводили з використанням винограду, що культивується в умовах Херсонської області, а саме сортів Бастардо Магарачський, Каберне Совіньон, Одеський чорний та Сапераві впродовж 3 сезонів [16].

Було проведено дослідження органолептичних показників якості сортів свіжозібраного червоного винограду в день збору врожаю за 20-бальною шкалою. Для виноробства, крім органолептичної оцінки не менш важливими є фізико-хімічні показники винограду, а саме вміст цукрів, кислот та фенольних речовин. Середні значення технологічних показників червоних сортів винограду за 3 сезони представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Органолептичні та фізико-хімічні показники червоних сортів винограду

Сорти винограду	Органолептична оцінка	Масова концентрація сухих речовин, %	Масова концентрація цукрів, г/дм ³	Масова концентрація титрованих кислот, г/дм ³	Масова концентрація фенольних речовин, мг/дм ³
Бастардо Магарачський	18,0–19,0	25,2–27,1	226–248	5,2–5,3	4450
Каберне Совіньон	18,0–19,5	24,0–24,8	220–225	5,8–5,9	3970
Одеський чорний	17,0–17,5	24,8–26,9	225–244	5,3–5,7	3970
Сапераві	18,5–19,0	24,0–26,7	216–237	5,8–6,1	4760

Таким чином, було встановлено доцільність використання даних сортів винограду для виготовлення кріплених десертних вин спеціального типу за технологічними параметрами. Досліджувані сорти винограду здатні досягти технічної зрілості в умовах Херсонської області згідно з вимогами ДСТУ 2366:2009 Виноград свіжий технічний. Технічні умови.

Наступним етапом було одержання кріплених десертних виноматеріалів спеціального типу підброджуванням м'язги, обробленої шляхом термовинифікації [16]. Використання технологічного прийому полягало в короткочасному бродінні суслу на м'яззі, попередньо термообробленої за 60–65 °С впродовж 8 годин, що дозволило підвищити в суслі вміст барвних, ароматичних та інших речовин, тим самим підвищуючи якість готового напою. При цьому процент вилучення від технологічного запасу фенольних речовин з м'язги становив для винограду Бастардо Магарачський – на 18,24–20,19%, для винограду Каберне Совіньон – на 13,22–15,28%, для винограду Сапераві – на 15,16–20,05%, для винограду Одеський чорний – на 18,17–22,32%.

Результати дослідження фізико-хімічних показників отриманих кріплених десертних виноматеріалів представлено в таблиці 2.

Аналіз отриманих даних показав, що виноматеріали із сортів винограду Бастардо Магарачський, Каберне Совіньон, Одеський чорний, Сапераві відповідають вимогам до виробництва десертних виноматеріалів спеціального типу, згідно з ДСТУ 4806:2007 Вина. Загальні технічні умови.

Для підвищення якості готових вин отримані виноматеріали купажували та витримували. Найкращі дослідні зразки наведено в таблиці 3.

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники кріплених десертних виноматеріалів

Сорти винограду	Масова концентрація цукрів, г/дм ³	Масова концентрація титрованих кислот, у перерахуванні на винну, г/дм ³	Масова концентрація приведенного екстракту, г/дм ³	Об'ємна частка етилового спирту, % об.
Бастардо Магарачський	160,7	4,3	25,4	16,1
Каберне Совіньон	160,8	6,2	22,5	16,0
Одеський чорний	160,5	5,8	21,9	16,1
Сапераві	160,2	5,8	19,5	16,2

Таблиця 3

Співвідношення кріплених десертних виноматеріалів у купажі

Виноматеріали	Купаж*					
	1	2	3	4	5	6
Бастардо Магарачський	33	25	–	–	50	34
Каберне Совіньон	33	50	25	34	25	33
Одеський чорний	–	25	50	33	25	–
Сапераві	34	–	25	33	–	33

* співвідношення кріплених десертних виноматеріалів, %

Отримані результати органолептичного оцінювання показали, що всі купажі напоїв відрізняються розвиненим ароматом, наявні тони сухофруктів і шоколаду, що є характерним для кріплених десертних виноматеріалів спеціального типу. Результати дегустаційного випробування за 10-ти бальною шкалою представлено в таблиці 4.

Таблиця 4

Результати дегустаційної оцінки кріплених десертних вин спеціального типу

Оцінюваний показник	Купаж					
	1	2	3	4	5	6
Прозорість (max = 0,5 бал)	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Колір (max = 0,5 бал)	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
Букет (max = 3,0 бал)	2,7	2,5	2,4	2,8	2,5	2,9
Смак (max = 5,0 бал)	4,0	4,2	4,0	4,9	3,8	4,9
Типовість (max = 1,0 бал)	0,7	0,8	0,6	1,0	0,5	1,0
Разом:	8,2	8,4	7,9	9,7	7,8	9,8

Найкращими зразками кріплених десертних вин визнані: зразок 4 (Купаж Одеський чорний, Сапераві та Каберне Совіньон) і зразок 6 (Купаж Каберне Совіньон, Сапераві та Бастардо Магарачський).

На підставі отриманих результатів досліджень була розроблена процесуальна технологічна схема (рис. 1) з виробництва червоних кріплених десертних вин спеціального типу.

Розроблена технологічна схема виробництва високоякісних червоних кріплених десертних вин спеціального типу спрямована на одержання максимальної екстрактивності виноматеріалів і найбільш повне вилучення антоціанів і комплексу фенольних речовин винограду із сортів Бастардо Магарачський, Каберне Совіньон, Одеський чорний та Сапераві, що культивуються в умовах Херсонської області.

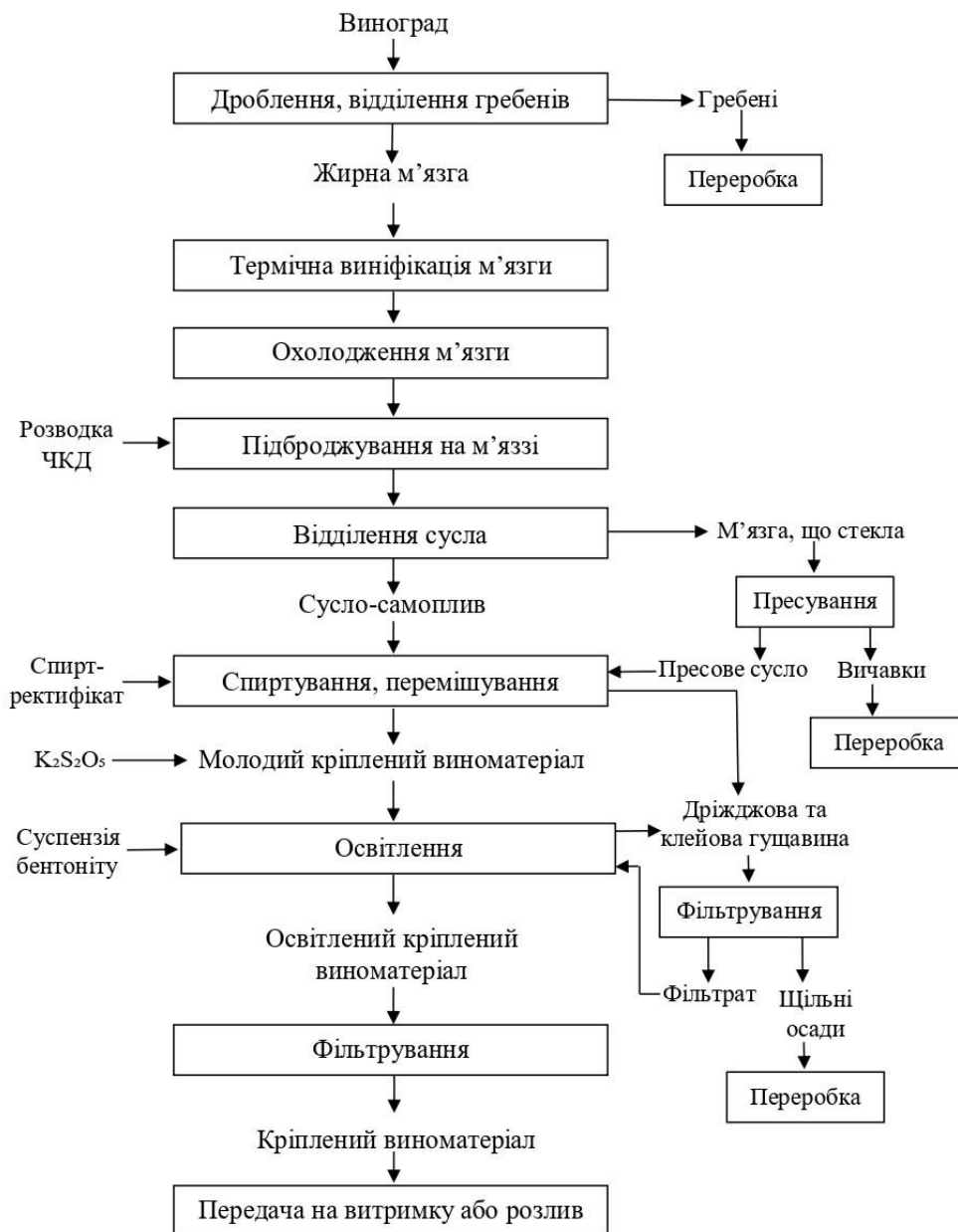


Рис. 1. Процесуальна схема перероблення винограду з виробництвом червоних кріплених десертних вин спеціального типу

Висновки. Розроблено систему оцінювання якості винограду, що включає органолептичне дослідження сировини, показників технологічної зрілості, визначення суми фенольних речовин, що вилучаються, і дозволяє оцінити придатність червоних сортів винограду для виробництва кріплених вин.

На підставі отриманих результатів досліджень встановлено доцільність використання таких сортів винограду, як Бастардо Магарачський, Каберне Совіньон, Одеський чорний, Сапераві для приготування кріплених десертних вин спеціального типу за технологічними параметрами та привабливими для споживача органолептичними властивостями.

Запропоновано спосіб одержання кріплених десертних виноматеріалів спеціального типу з максимальним вилученням фенольних сполук і кращими органолептичними показниками вин шляхом підброджування м'язги, обробленої методом термовиніфікації за 60–65 °С протя-

гом 8 годин. Використання такого способу теплової обробки дає можливість сформувати органолептичні властивості десертних виноматеріалів, у ході наступної витримки підсилюються специфічні тони чорносливу й шоколаду, що відповідають десертним винам спеціального типу.

Визначені регламентовані параметри виробництва десертних вин, що покладені в основу розробленої технологічної схеми, дозволяють забезпечити високу якість одержуваної продукції.

Список використаних джерел

1. Pro Capital Group. Аналітика ринків. Фінансовий консалтинг. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-vina-v-ukraine> (дата звернення: 11.02.2025).
2. Міжнародна організація з виноградарства та виноробства (OIV). Стан виноградарсько-виноробної галузі у світі. URL: https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/2023_SWVWS_report_EN.pdf (дата звернення: 09.02.2025).
3. Waterhouse A.L., Sacks G.L., Jeffery D.W. Understanding Wine Chemistry. John Wiley & Sons. West Sussex. UK, 2016. 472 p.
4. Білько М. В., Циганкова О. В. Удосконалення технології червоних столових вин підвищеної біологічної цінності. *Харчова промисловість*. 2017. № 21. С. 74–81.
5. Aleixandre-Tudo J.L., Buica A., Nieuwoudt H., Aleixandre J.L., du Toit W. Spectrophotometric Analysis of Phenolic Compounds in Grapes and Wines. *J Agric Food Chem*. 2017. V. 65(20) P. 4009–4026. doi: 10.1021/acs.jafc.7b01724.
6. Інноваційні технології продуктів бродіння і виноробства: підручник / С. В. Іванов та ін. ; за заг. ред. С.В. Іванова. Київ : НУХТ, 2012. 488 с.
7. Duley G., Ceci A.T., Longo E., Boselli E. Oenological potential of wines produced from disease-resistant grape cultivars. *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2023. V. 22(4). P.:2591–2610. DOI: 10.1111/1541-4337.13155
8. He Fei, Liang Na-Na, Mu Lin, Pan Qiu-Hong, Wang Jun, Reeves Malcolm, Duan Chang-Qing. Anthocyanins and their variation in red wines. II. Anthocyanin derived pigments and their color evolution. *Molecules*. 2012. V. 17(2) P. 1483–519. doi: 10.3390/molecules17021483
9. Casassa L.F., Harbertson J.F. Extraction, evolution, and sensory impact of phenolic compounds during red wine maceration. *Annu Rev Food Sci Technol*. 2014. V. 5. P. 83–109. doi: 10.1146/annurev-food-030713-092438.
10. Dimitrovska M., Bocevska D., Dimitrovski D., Doneva-Sapceska D. Evolution of anthocyanins during vinification of Merlot and Pinot Noir grapes to wines. *J. Sci. Food Agric*. 2015. V. 44. P. 259–267. DOI:10.1556/066.2015.44.0003
11. Застосування процесу термовініфікації у виробництві червоних сухих вин типу «Резерв» / В.О. Маринченко та ін. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2021. Т. 27. № 3. С. 144–152.
12. Taran N.G., Soldatenko E.V., Morari B.G., Soldatenko O.V., Borta I.P. Capacity of extraction of proanthocyanidins during different temperatures of fermentation-maceration process. *НААН, ННЦ «Інститут виноградарства і виноробства ім. В.Є. Таїрова»*. Одеса : ННЦ «ІВіВ ім. В.Є. Таїрова», 2020. Вип. 57. С. 90–94.
13. Revilla E., Losada M. M., Gutiérrez E. Phenolic Composition and Color of Single Cultivar Young Red Wines Made with Mencia and Alicante-Bouschet Grapes in AOC Valdeorras (Galicia, NW Spain). *J. Sci. Food Agric. Beverages*. 2016. V. 2(3) P. 18. DOI:10.3390/BEVERAGES2030018
14. Gutierrez-Escobar R., Aliano-Gonzalez M.J., Cantos-Villar E. Wine Polyphenol Content and Its Influence on Wine Quality and Properties: A Review. *Molecules*. 2021. V. 26(3). P. 718. DOI: 10.3390/molecules26030718
15. Гержикова В.Г. Методи технохімічного контролю у виноробстві. Сімферополь : Таврида, 2009. 304 с.
16. Дослідження процесів екстракції фенольних речовин при виробництві десертних виноматеріалів / О.І. Мамай та ін. *Науковий вісник ТДАТУ*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 14(2). doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-8

Стаття надійшла до редакції 26.03.2025 р.



T. Yakovenko, O. Mamai, M. Valko, O. Stoianova, K. Zubkova
Kherson National Technical University

IMPROVEMENT OF RED FORTIFIED DESSERT WINES TECHNOLOGY

Summary

A study was conducted on the impact of technological features of processing red grape varieties Bastardo Magarachsky, Cabernet Sauvignon, Odessa Black and Saperavi, cultivated in the conditions of the Kherson region, on the quality of dessert wines of a special type.

A system for assessing the quality of grapes has been developed, which includes organoleptic examination of raw materials, indicators of technological maturity, determination of the amount of phenolic substances extracted and allows assessing the suitability of red grape varieties for the production of dessert wines of a special type.

Based on the results of the research, the feasibility of using such grape varieties as Bastardo Magarachsky, Cabernet Sauvignon, Odessa Black, Saperavi for the preparation of dessert wines of a special type in terms of technological parameters and organoleptic properties attractive to the consumer has been established.

A method for obtaining dessert wine materials of a special type with maximum extraction of phenolic compounds and better organoleptic indicators of wines by fermenting the pulp treated by the method of thermovinification at 60-65 °C for 8 hours is proposed. The use of this method of heat treatment makes it possible to form the organoleptic properties of dessert wine materials, during the subsequent aging, specific tones of prunes and chocolate are enhanced, corresponding to dessert wines of a special type.

The regulated parameters of the production of dessert wines have been determined, which are the basis of the developed technological process and allow ensuring high quality of the resulting products.

Keywords: red grape varieties Bastardo Magaratsky, Cabernet Sauvignon, Odessa Black, Saperavi, dessert wine materials of a special type, physicochemical indicators, organoleptic indicators, thermovinification.

НОТАТКИ

НАУКОВИЙ ВІСНИК
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 15, том 1

Коректура • *Н. Ігнатова*

Комп'ютерна верстка • *В. Гайдабрус*

Відповідальний за випуск • к.т.н., професор Скляр О. Г.

Підписано до опублікування 30.04.2025.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022