

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО



DMYTRO MOTORNYI TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY



ПРАЦІ

**Таврійського державного
агротехнологічного університету**
Технічні науки

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY**
Technical sciences

*Виходить 3 рази на рік
Видається з 1998 р.*

**Випуск 23, том 2
Issue 23, volume 2**

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

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2

Запоріжжя – 2023



УДК [631.3+621.3+664](058)
Т 13

Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. Вип. 23, т. 2. 218 с.

ISSN 2078-0877

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, AGRIS, «Україна наукова», НБУ ім. В. І. Вернадського

Головний редактор

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

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)

Відповідальний секретар

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

Технічний секретар

Погорельцева Д. О. (Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Белосев Христо, д-р техн. наук, проф. (Болгарія)
Даманаускас Відас, д-р техн. наук, проф. (Литва)
Івановс Семенс, д-р техн. наук, проф. (Латвія)
Ольт Юрі, PhD, д-р техн. наук, проф. (Естонія)
Паскуцці Сімоне, 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)

**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)
Гриб О. Г., д-р техн. наук, проф. (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)

Editor in chief

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

Deputy editors in chief

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

Executive secretary

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

Technical secretary

Pogoreltseva D. (Ukraine)

SECTORAL MACHINE BUILDING

Belojev 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)

**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)
Gryb O., Dr. Sci. Tech., 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)
Pliuhin 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)
Лясковська С.Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Малкіна В. М., д-р техн. наук, проф. (Україна)
Мацулевич О. Є., канд. техн. наук, доц. (Україна)
Холодняк 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)

ПРАЦІ**Таврійського державного
агротехнологічного університету****Випуск 23, том 2****Засновник**

Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного

Заснований у 1998 році

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ №24285-14125ПР від 27.12.2019 р.
Виходить 3 рази на рік

Рекомендовано до друку вченою радою
Таврійського державного агротехнологічного
університету
імені Дмитра Моторного
Протокол № 3 від 31.10.2023 р.

«Праці ТДАТУ» включено до **Категорії Б**
Переліку наукових фахових видань України
(науки: технічні), в яких можуть
публікуватися результати дисертаційних
робіт на здобуття наукових ступенів
доктора наук і доктора філософії /
кандидата наук (накази МОН України від
17.03.2020 р. № 409)

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: 10.31388/2078-0877-2023-23-2

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)

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY****Issue 23, volume 2****Founder**

Dmytro Motorny Tavria State
Agrotechnological University

Founded in 1998

Certificate of governmental registration
KB No. 24285-14125ПР dated December 27, 2019
Published 3 times a year

Recommended for publication by the Academic
Board of Dmytro Motorny Tavria State
Agrotechnological University
Record No. 3 dated October 31, 2023

Proceedings of TSATU is included in the List of
scientific professional editions of Ukraine
(technical sciences), category B, in which the
results of theses for obtaining scientific degrees
of Doctor of Sciences and Doctor of Philosophy /
Candidate of Sciences can be published (order of
the Ministry of Education and Science of Ukraine
dated March 17, 2020, No. 409)

Address of the Editorial office

Legal address: 72312, Zaporizhzhia region
Melitopol, 18, B. Khmel'nitskyi Ave.
Actual address: 69600, Zaporizhzhia region
Zaporizhzhia, 66, Zhukovskiy Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>
DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2



ЗМІСТ / CONTENTS

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- Панченко А. І., Волошина А. А., Холод І. М., Волошин А. А.** Вплив геометричних параметрів розподільних систем на стабілізацію вихідних характеристик планетарних гідромашин 6
Panchenko A., Voloshina A., Kholod I., Voloshin A. Influence of geometric parameters of distribution systems on stabilization of the output characteristics of planetary hydromashines
- Кюрчев С.В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф., Ковальов О. О.** Підвищення якості продуктів при використанні удосконаленого способу гомогенізації і нормалізації молока 25
Kiurchev S., Samoichuk K., Yalpachik V., Kovalyov A. Improving product quality using an improved method of milk homogenization and normalization
- Самойчук К. О., Самохвал В. А., Червоткіна О. О.** Дослідження ефективності роботи системи охолодження при інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів 33
Samoichuk K., Samokhval V., Chervotkina O. Studying the efficiency of the cooling system during the intensification of extrusion of industrial oils in screw press extruders for the manufacture of fuel briquettes
- Кюрчев С. В., Верхованцева В. О., Паляничка Н. О.** Дослідження холоду при зберіганні ягід 46
Kiurchev S., Verkholtantseva V., Palianychka N. Research on cold storage of berries
- Тримбач С. П., Степаненко С. П.** Теоретичні дослідження швидкості переміщення частинок сипкого матеріалу в процесі гранулювання 54
Trimbach S., Stepanenko S. Theoretical studies of the movement velocity of particles of bulk material in the granulation process
- Соломка О. В., Ачкевич О. М., Ачкевич В. І.** Застосування систем автоматизованого проектування в сільськогосподарському машинобудуванні 67
Solomka O., Achkevych O., Achkevych V. Application of automated design systems in agricultural engineering
- Коробка С. В., Стукалець І. Г., Сиротюк С. В., Скляр О. Г., Скляр Р. В., Болтянський Б. В., Баранович С. М.** Математичне моделювання процесу сушіння фруктів у геліосушарці 78
Korobka S., Stukalets I., Syrotyuk S., Skliar O., Skliar R., Boltianskyi B., Baranovych S. Mathematical modeling of the process of fruit drying in a solar dryer
- Бойко В. Б., Улексін В. О., Золотовська О. В., Лепеть Є. І., Бойко Б. В.** Проект мехатронної системи експериментальної гідропневматичної сівалки 99
Boiko V., Ulexin V., Zolotovska O., Lepet E., Boiko B. Project of mechatronic system of experimental hydropneumatic seeder



- Червоткіна О. О., Фучадчи Н. О., Паляничка Н. О., Самохвал В. А.** Вплив різних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул 113
Chervotkina O., Fuchadzy N., Palianychka N., Samohval V. Influence of different parameters on the process of granou-luvanne of rosliny syrovine and yacterity granules
- Кошулько В. С., Пацула О. М.** Розробка брикетувального гвинтового пресу лущинної фракції макухи олійних культур 124
Koshulko V., Patsula O. Development of a briquetting screw press for the husk fraction of the cake of oil crops

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

- Галько С. В., Мірошник О. О., Сивенко М. М., Qawaqzeh M. Z., Al_Issa Huthaifa.** Визначення оптимальних параметрів накопичуючих та генеруючих джерел електричної енергії в автономних локальних електричних системах 134
Halko S., Miroschnik O., Syvenko M., Qawaqzeh M.Z., Al_Issa Huthaifa. Determination of optimal parameters of accumulating and generating sources of electric energy in autonomous local electrical systems
- Дяденчук А. Ф., Філіпович Є. В.** Моделювання фотоелектричних характеристик гетероперехідного сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si 152
Dyadenchuk A., Filipovich Ye. Simulation of the photoelectric characteristics of the ZnO/porous-Si/Si heterojunction solar cell
- Юрченко О. Ю., Барсукова Г. В., Чепіжний А. В., Зубко В. М., Тимошенко Г. А.** Пошук місця пошкодження обмотки електроенергетичного обладнання за зміною робочої температури 167
Yurchenko O., Barsukova H., Chepizhnyu A., Tymoshenko H., Zubko V. Search for the location of damage to the electrical equipment winding due to a change in the working temperature
- Попова І. О., Чаусов С. В.** Дослідження схемного рішення пристрою для застосування в якості фільтра лінійних несиметричних напруг 177
Porova I., Chausov S. Investigation of the circuit solution of a device for using linear unbalanced voltages as a filter

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Колісниченко Т. О., Прісс О. П., Кюрчева Л. М., Сефіханова К. А.** Дослідження органолептичних показників якості емульсійних соусів з йодміщуючими добавками 186
Kolisnychenko T., Priss O., Kiurcheva L., Sefikhanova K. Investigation of organoleptic quality indicators of emulsion sauces with iodine replacement additives
- Ткаченко Л. В., Вітряк О. П.** Технологія коктейлів підвищеної біологічної цінності з використанням молочної сироватки 195
Tkachenko L., Vitriak O. Technology of cocktails of increased biological value using milk whey
- Семко Т. В., Пахомська О. В.** Аюрведа - сучасна система оздоровлення організму людини 206
Semko T., Pahomska O. Ayurveda modern health system human organism



ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-6-24**УДК 621.225.001.4**А. І. Панченко¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

І. М. Холод¹, інженерА. А. Волошин², інженер¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*² *ВСП «Мелітопольський фаховий коледж ТДАТУ»*e-mail: voloshinaa2012@gmail.com, тел: +380975262603**ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМ НА СТАБІЛІЗАЦІЮ ВИХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНЕТАРНИХ ГІДРОМАШИН**

Анотація. Досліджено вплив геометричних параметрів розподільних систем на вихідні характеристики планетарних гідромашин з метою забезпечення стабілізації їх вихідних параметрів. Встановлено, що нераціональна конструкція розподільної системи перетворює її на джерело пульсацій робочої рідини. Основний вплив на величину пульсацій надає кінематична схема, кутовий зазор між розподільними вікнами та кількість додаткових вікон рухомого розподільника. Встановлено, що раціональне варіювання цими параметрами дозволяє усунути пульсацію робочої рідини. Обґрунтовано вихідні умови проектування розподільних систем, що виключають пульсацію робочої рідини в планетарних гідромашинах. При проектуванні розподільних систем найбільш раціональними є кінематичні схеми 5/4, 9/8 та 13/12 без застосування додаткових вікон та з використанням чотирьох додаткових вікон рухомого розподільника, 7/6 та 13/12 – з використанням двох додаткових вікон при нульовому зазорі між розподільними вікнами. При використанні запропонованих кінематичних схем відсутня пульсація робочої рідини, що дозволяє стабілізувати вихідні характеристики планетарних гідромашин.

Ключові слова: амплітуда коливань, коефіцієнт пульсації, площа прохідного перетину, стабілізація вихідних параметрів.

Постановка проблеми. Гідравлічний привід набув широкого застосування на будівельних, дорожніх, комунальних, сільськогосподарських, лісозаготівельних та інших самохідних машинах. У гідроприводах робочих органів та ходових системах цих машин все частіше використовуються планетарні (орбітальні) гідромотори, які дозволяють забезпечити безредукторне з'єднання цих гідромоторів безпосередньо з виконавчими механізмами [1–3].



Планетарні гідромотори, незважаючи на їх численні переваги, мають деякі недоліки, одним з яких є недосконалість їх розподільної системи [4, 5], внаслідок чого гідромотор стає джерелом пульсації робочої рідини, що викликає незадовільну роботу всього гідроприводу [6-10]. Виникнення зазначених недоліків пов'язане з відсутністю комплексних досліджень, що описують вплив зміни пропускної здатності розподільних систем на вихідні характеристики планетарних гідромашин. Проведення таких досліджень дозволить розробити необхідні рекомендації для розрахунку геометричних параметрів систем розподілу планетарних гідромашин з метою забезпечення їхньої стабілізації на етапах проектування.

У зв'язку з цим питання підвищення надійності будівельних, сільськогосподарських та комунальних машин шляхом стабілізації вихідних характеристик планетарних гідромоторів, що використовуються в гідроприводах активних робочих органів та ходових системах самохідної техніки, є актуальною проблемою. Тому дана робота присвячена вирішенню питань, пов'язаних із дослідженням впливу зміни пропускної здатності розподільних систем на вихідні характеристики планетарних гідромашин з метою забезпечення їхньої стабілізації ще на етапах проектування.

Аналіз останніх досліджень. Визначено основні параметри [11], проведено чисельні та експериментальні дослідження роботи насоса-турбіни [12], досліджено динамічний відгук насосних турбін [13], проведено аналіз витрати відцентрових [14] та шестеренних [15] гідромашин. Оптимізовано геометричні параметри проточної частини вихрекамерних насосів [16], визначено діапазони працездатності вихрекамерного нагнітачів при перекачуванні Бінгамівських рідин [17], визначено характеристики раціонального регулювання складу бензоповітряної суміші [18]. Досліджено перебіг закрученого струменя через конфузор [19], а також внутрішній перебіг у двонаправлених каналах кубічного типу системи осьового потоку методом чисельного моделювання та експерименту [20]. Поліпшено вихідні характеристики лабіринтно-гвинтового насоса, шляхом удосконалення його проточної частини [21], представлено чисельний розрахунок та експеримент з коливання тиску в осьовому потоковому насосі [22]. Питання, пов'язані зі стабілізацією вихідних характеристик планетарних гідромашин, не розглядалися.

Проведено гідродинамічний аналіз героторних насосів [23], запропоновано нову конструкцію героторного насоса зі змінним зазором, яка знижує коливання напруги [24], проведено оцінку витрати героторних насосів [25]. Представлена 3D модель [26] та двомасштабна модель зносу [27] орбітального героторного гідромотора. Побудовано обчислювальну модель втрат, що



створюються стисливістю рідини [28], проведено експериментальні дослідження, спрямовані на перевірку цієї обчислювальної моделі [29]. Виконано порівняльний аналіз схем механізмів планетарних роторних гідравлічних машин [30], удосконалено планетарно-роторну гідравлічну машину, що застосовується для насосів та гідромоторів [31], запропоновано розрахункові та конструктивні методи розширення каналів подачі в планетарних гідравлічних машинах [32]. Проектування елементів системи роторів та розподільних систем планетарних гідромашин не розглядалися.

Запропоновано підхід для прогнозування аерації та кавітації у героторних насосах [33], проведено оцінку кавітації на ефективну витрату аксіально-поршневих гідромашин [34], обґрунтовано причини виникнення кавітаційних явищ у зоні розподілу [35]. Розроблено кінематичну схему переміщення роторів орбітального гідромотора [36], запропоновано оптимальний профіль зуба для циклоїдальних передач [37] та методи підвищення їх навантажувальної здатності [38]. Розглянуто сили та моменти, що діють у героторних насосах [39], розроблено модель зносу [40] та проведено дослідження зносу робочих поверхонь роторів орбітальних гідромоторів [41]. Реалізовано метод визначення надійності гідромотора шляхом моделювання змін технічного стану роторів [42], який здійснювався шляхом моделювання коливань діаметрального зазору [43]. Проведено експериментальну оцінку впливу діаметрального зазору на вихідні характеристики планетарного гідравлічного двигуна [44]. Обґрунтовано методологічну можливість автоматизації контролю зубчастої поверхні роторів героторних гідромашин [45]. Питання, пов'язані з розподілом робочої рідини, не досліджувалися.

Розроблено математичну та фізичну моделі [9], що дозволяють моделювати процеси, що відбуваються в розподільних системах, обґрунтовано кінематичні схеми [4, 5]. Досліджено вплив форми розподільних вікон, у формі сегмента [4, 9], паза [6] та кола [7] на вихідні характеристики планетарного гідромотора, виконано порівняння вікон [8], обґрунтовано кутове розташування розподільних вікон [46]. Вплив зазору між розподільними вікнами на пропускну здатність розподільної системи планетарного гідромотора не досліджувався.

Огляд героторних технологій у гідравлічних машинах показав [1], що в даний час літератури з проектування, розрахунку, виготовлення та експлуатації гідромашин героторного типу дуже мало. При цьому необхідно зазначити, що якщо про героторні насоси ще можна знайти якусь інформацію, то дослідження, що стосуються орбітальних та планетарних гідромоторів, практично немає. Також необхідно зазначити, що питання зниження пульсації робочої рідини в



планетарних гідромашинах з метою підвищення надійності гідроприводів самохідної техніки в цілому залишається невирішеним. Тому теоретичні дослідження впливу зміни кінематичних, геометричних та функціональних параметрів на зниження пульсації робочої рідини та стабілізацію вихідних характеристик планетарних гідромашин ще на етапах проектування є актуальним завданням.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Забезпечення стабілізації вихідних характеристик планетарних гідромашин на етапах проектування шляхом зниження пульсації потоку робочої рідини.

Для вирішення питань, пов'язаних із дослідженням впливу геометричних параметрів розподільних систем на стабілізацію вихідних характеристик планетарних гідромашин необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити розрахункову схему, математичний апарат та обґрунтувати вихідні дані, що дозволяють дослідити вплив зміни геометричних параметрів розподільної системи на пульсацію її площі прохідного перетину залежно від кінематичної схеми, кутового зазору між розподільними вікнами та кількості додаткових вікон;
- дослідити вплив кінематичної схеми розподільної системи, кутового зазору між розподільними вікнами та кількості додаткових вікон на зміни коефіцієнтів пульсації потоку робочої рідини шляхом імітаційного моделювання робочих процесів, що відбуваються в системах розподілу робочої рідини планетарних гідромашин;
- обґрунтувати стартові умови для проектування розподільних систем, що дозволяють виключити пульсації потоку робочої рідини у планетарних гідромашинах.

Основна частина. Коливальні процеси, до яких відносяться коливання потоку робочої рідини, у каналах розподільної системи, що виникають при експлуатації гідромашин об'ємної дії, є одним із негативних факторів [4, 5]. Тому, розподільну систему планетарного гідромотора можна розглядати, як можливе джерело (генератор) коливань потоку робочої рідини, що впливає на стабільність вихідних характеристик гідроприводу в цілому.

Розроблена схема об'ємного розташування розподільних вікон (рис. 1, а) дозволила візуально простежити можливе перекриття вікон рухомого та нерухомого розподільників при роботі планетарного гідромотора та розробити розрахункову схему (рис. 1, б) для визначення поточного значення площі $S_i(t)$ прохідного перетину [46]. Пульсацію потоку робочої рідини гідромоторі викликають коливання площі $S_i(t)$ прохідного перерізу, виражені різницею $S_{\max}(t)$ і $S_{\min}(t)$ [4].

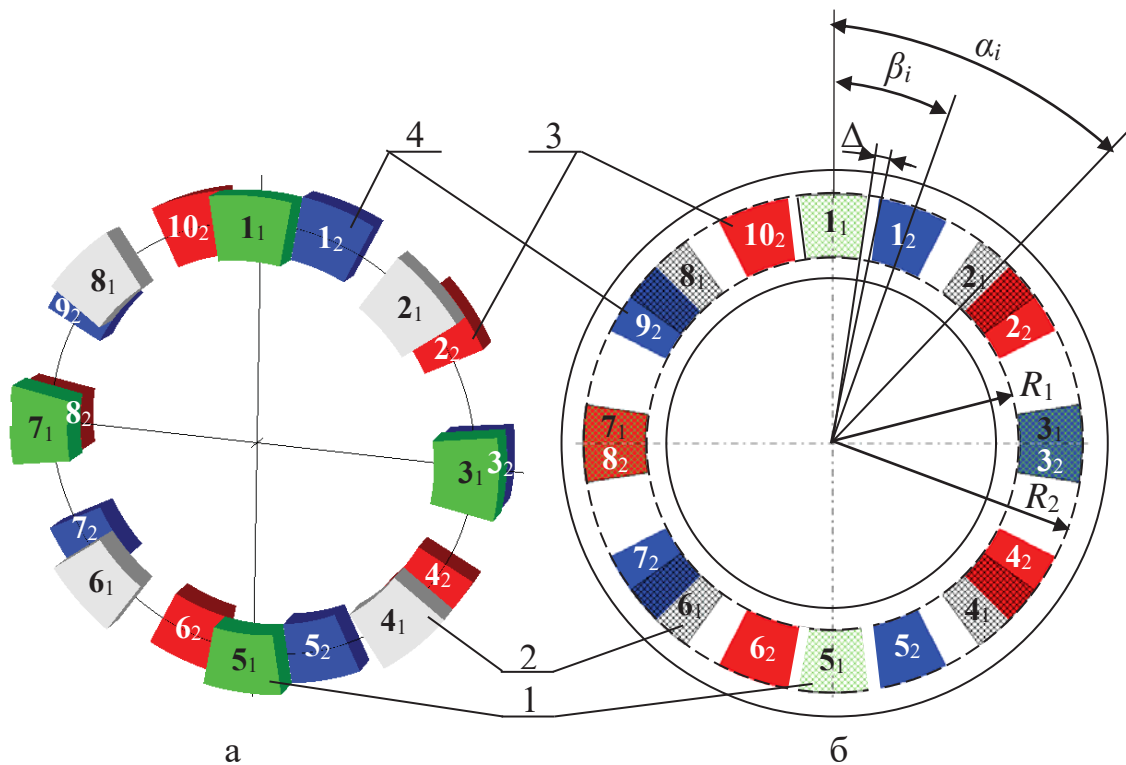


Рис. 1. Перекриття (суміщення) вікон рухомого та нерухомого розподільників під час роботи планетарного гідромотора:
 а – схема об'ємного розташування розподільних вікон;
 б – розрахункова схема; 1 – робочі вікна рухомого розподільника;
 2 – розвантажувальні вікна рухомого розподільника; 3 – вікна нагнітання нерухомого розподільника; вікна зливу нерухомого розподільника

Залежно від кінематичної схеми [5], габаритних розмірів і кутового зазору між розподільними вікнами площа прохідного перерізу $S_i(t)$ розподільної системи в будь-який момент часу визначається виразом:

$$S_i(t) = \sum_{i=1}^Z \left(\frac{\pi}{Z_2} - \Delta - |\beta_i - \alpha_i(t)| \right) \cdot \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2}, \quad (1)$$

а витрата робочої рідини:

$$Q = \mu \cdot \sum_{i=1}^Z \left[\frac{\pi}{Z_2} - \Delta - |\beta_i - \alpha_i(t)| \right] \cdot \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (2)$$

де α_i – кути розташування вікон рухомого розподільника (вважаємо непарні вікна розподільника робочими вікнами, а парні – розвантажувальними вікнами), $\alpha_1(t) = f\omega_{zm}dt$, $\alpha_2(t) = f\omega_{zm}dt + \alpha_1(t)$, $\alpha_i(t) = \alpha_{i-1}(t) + \alpha$; β_i – кути розташування вікон нерухомого розподільника (вважаємо непарні вікна нерухомого розподільника вікнами нагнітання, а парні – вікнами зливу), $\beta_1 = \pi / Z_2$, $\beta_2 = \beta_1 + \beta$,



$\beta_i = \beta_{i-1} + \beta$; Z_1 і Z_2 – кількість вікон рухомого та нерухомого розподільників, відповідно; R_1 і R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси розташування розподільних вікон, відповідно; Δp – перепад тиску робочої рідини; ρ – щільність робочої рідини.

Аналіз рівняння (1) показує, що в залежності від перерахованих параметрів площа прохідного перерізу $S_i(t)$ розподільної системи планетарного гідромотора може змінюватись у великому діапазоні. При дослідженні впливу зміни пропускної здатності розподільних систем на зміну вихідних характеристик планетарного гідромотора з метою забезпечення їх стабілізації, обґрунтовано параметр, що описує відносні зміни коливання площі $A_i(t)$ – коефіцієнт пульсації.

На підставі проведених досліджень описані амплітуди коливань пропускної здатності розподільної системи, частоти обертання валу гідромотора, тиску робочої рідини та крутного моменту на валу гідромотора [5, 47]:

– пропускної здатності розподільної системи A_Q

$$A_Q(t) = \mu \cdot \sqrt{\frac{2(p_n - p_{зл})}{\rho}} \cdot (S_{\max}(t) - S_{\min}(t)); \quad (3)$$

– частоти обертання валу гідромотора A_n

$$A_n(t) = \frac{\mu \cdot \sqrt{\frac{2(p_n - p_{сл})}{\rho}} \cdot \eta_{об}}{V} \cdot (S_{\max}(t) - S_{\min}(t)); \quad (4)$$

– тиску робочої рідини A_p

$$A_p(t) = \frac{Q^2 \cdot \rho}{2\mu^2} \cdot \left(\frac{1}{S_{\min}^2(t)} - \frac{1}{S_{\max}^2(t)} \right); \quad (5)$$

– крутного моменту на валу гідромотора A_M

$$A_M(t) = \frac{V \cdot \eta_m}{2\pi} \cdot \frac{Q^2 \cdot \rho}{2\mu^2} \cdot \left(\frac{1}{S_{\min}^2(t)} - \frac{1}{S_{\max}^2(t)} \right), \quad (6)$$

де p_n – тиск в нагнітальній порожнині; $p_{зл}$ – тиск в зливній порожнині; S_{\max} и S_{\min} – максимальне і мінімальне значення площі прохідного перетину розподільної системи; V – робочий об'єм гідромотора.

Аналіз рівнянь (3)-(6) показує, що на величину амплітуди коливань пропускної здатності розподільної системи, частоти обертання валу гідромотора, тиску робочої рідини та крутного моменту на валу гідромотора істотно впливає зміна площі прохідного перетину S .

Величина пульсації потоку робочої рідини оцінюється коефіцієнтами пульсації площі прохідного перетину $P_S(t)$ розподільної системи та частоти обертання $P_n(t)$ валу гідромотора, які визначаються



рівнянням (7), тиску $P_p(t)$ робочої рідини та крутного моменту $P_M(t)$ на валу гідромотора, які визначаються рівнянням (8):

$$P_s(t) = P_n(t) = \frac{2 \cdot (S_{\max}(t) - S_{\min}(t))}{S_{\max}(t) + S_{\min}(t)} 100\%, \quad (7)$$

$$P_p(t) = P_M(t) = \frac{2 \cdot \left(\frac{1}{S_{\min}^2(t)} - \frac{1}{S_{\max}^2(t)} \right)}{\left(\frac{1}{S_{\max}^2(t)} + \frac{1}{S_{\min}^2(t)} \right)} 100\%, \quad (8)$$

де $S_{\max}(t)$, $S_{\min}(t)$ – максимальне та мінімальне значення площі прохідного перерізу розподільної системи відповідно, визначене як поточне значення площі $S_i(t)$.

Аналіз рівнянь (7), (8) показує, що на величину пульсації потоку робочої рідини, що генеруються розподільною системою планетарного гідромотора, істотно впливають коливання площі її прохідного перетину. Аналіз виразу (1) показує, що зміна (коливання) площі прохідного перетину розподільної системи залежить від її кінематичної схеми, яка визначається кількістю вікон Z_2 нерухомого розподільника. Істотний вплив на зміну (коливання) площі прохідного перетину надає кутовий зазор між розподільними вікнами рухомого і нерухомого розподільників. Габаритні розміри розподільної системи, обумовлені внутрішнім R_1 і зовнішнім R_2 радіусами, що обмежують розташування розподільних вікон, не викликають коливань площі прохідного перетину, а лише змінюють абсолютне значення.

Дослідження впливу кінематичної схеми, кутового зазору та кількості додаткових розвантажувальних вікон на зміну коефіцієнтів пульсації потоку робочої рідини проводилися шляхом імітаційного моделювання робочих процесів планетарних гідромашин, що відбуваються в розподільних системах, за допомогою прикладного пакету VisSim. З урахуванням досліджень [47] були прийняті та обґрунтовані такі початкові умови:

- геометричні (кутові) параметри розчину розподільних вікон рухомого та нерухомого розподільників рівні;
- внутрішній R_1 та зовнішній R_2 радіуси розташування розподільних вікон дорівнюють $R_1 = 29$ мм, $R_2 = 43$ мм і в процесі досліджень не змінювалися;
- максимальний кутовий зазор між вікнами рухомого і нерухомого розподільників з урахуванням досліджень [48] дорівнює $\Delta = 0^\circ 51'$, мінімальний – $\Delta = 0^\circ$, проміжне значення кутового зазору становить $\Delta = 0^\circ 25' 30''$;
- при дослідженні, з урахуванням даних [46] розглядалися п'ять кінематичних схем розподільних систем планетарних гідромоторів, які часто застосовуються: 5/4; 7/6; 9/8; 11/10 та 13/12;



– кількість використовуваних додаткових розвантажувальних вікон рухомого розподільника з конструктивних міркувань і з урахуванням даних [46] була прийнята: 0, 2, 3 і 4.

На рис. 2 представлена структурно-функціональна схема взаємозв'язку геометричних параметрів розподільної системи, яка дозволяє визначити коефіцієнти пульсації площі прохідного перетину розподільної системи, частоти обертання валу гідромотора та тиску робочої рідини, крутного моменту на валу гідромотора в залежності від кінематичної схеми, кутового зазору між розподільними вікнами та кількості додаткових розвантажувальних вікон.

При моделюванні вихідні дані задаються блоком 1 структурно-функціональної схеми взаємозв'язку геометричних параметрів розподільної системи (рис. 2).

Зміну площі прохідного перетину та пропускної здатності розподільної системи в залежності від кінематичної схеми та кутового зазору між розподільними вікнами, що визначаються рівняннями (1) та (2) представлено блоком 2.

Зміну амплітуди коливань пропускної здатності розподільної системи, частоти обертання валу гідромотора, тиску робочої рідини та крутного моменту на валу гідромотора, що визначаються рівняннями (3)-(6) представлено блоком 3.

Блок 4 дозволяє визначити величину пульсації потоку робочої рідини, яка оцінюється коефіцієнтами пульсації площі прохідного перетину розподільної системи та частоти обертання валу гідромотора, що описується рівнянням (7), тиску робочої рідини та крутного моменту на валу гідромотора, що описується рівнянням (8).

У таблиці 1 наведено можливі варіанти використання додаткових розвантажувальних вікон рухомого розподільника та коефіцієнти пульсації при значеннях зазору $\Delta = 0^\circ 51'$, $\Delta = 0^\circ 25' 30''$, $\Delta = 0^\circ$ між вікнами рухомого та нерухомого розподільників для різних кінематичних схем.

Аналіз таблиці 1 показує, що найкращими є кінематичні схеми розподільних систем:

- 5/4; 9/8; 13/12 без використання розвантажувальних вікон рухомого розподільника ($\Delta = 0^\circ$);
- 7/6; 1/10 із використанням двох розвантажувальних вікон рухомого розподільника ($\Delta = 0^\circ$);
- 5/4; 9/8; 13/12 із використанням чотирьох розвантажувальних вікон рухомого розподільника ($\Delta = 0^\circ$).

При використанні зазначених кінематичних схем повністю відсутні коливання потоку робочої рідини, що позитивно впливає на функціональні характеристики планетарного гідромотора.

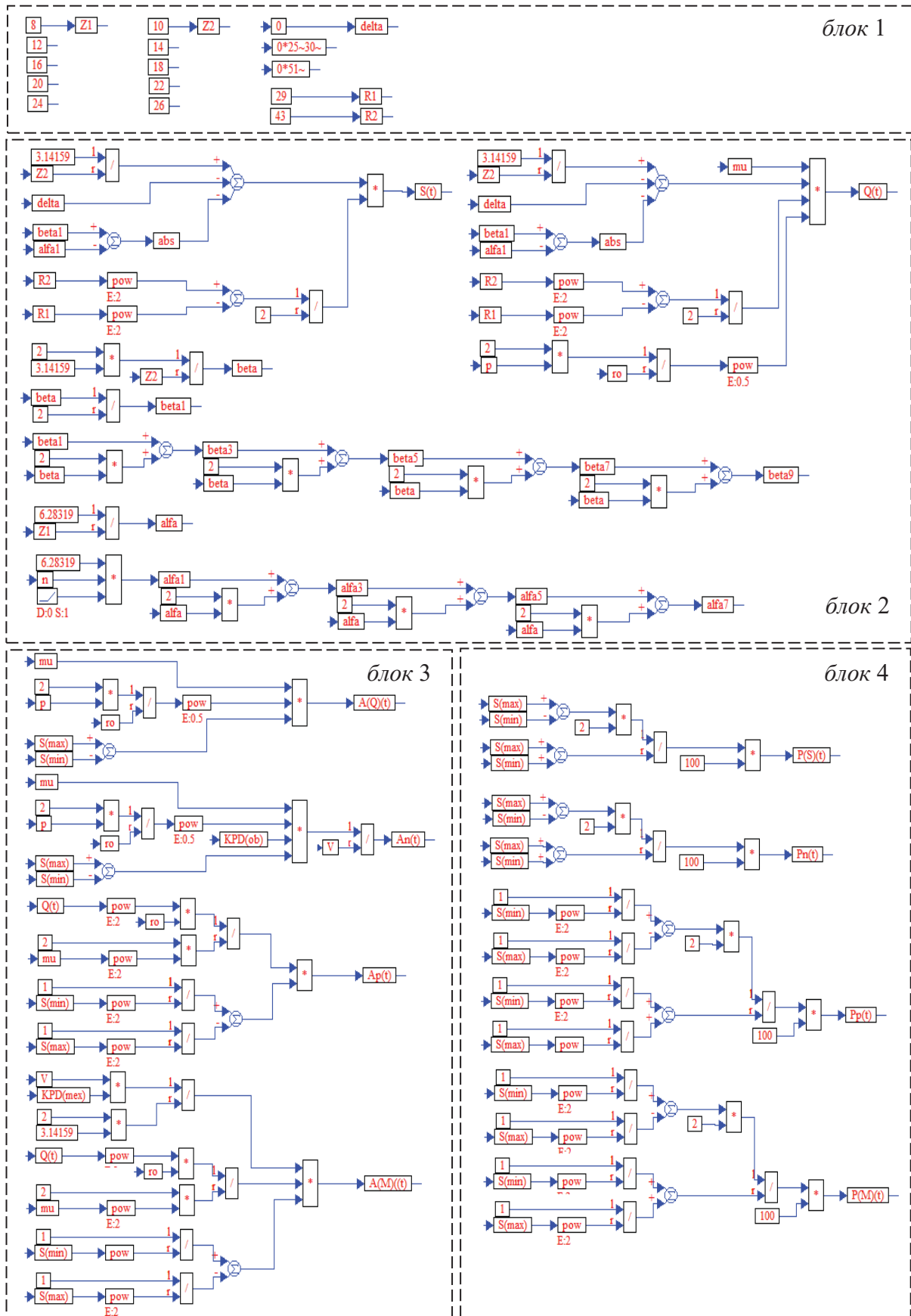


Рис. 2. Структурно-функціональна схема взаємозв'язку геометричних параметрів розподільної системи

Таблиця 1

Вплив зазору між вікнами рухомого і нерухомого розподільників на коефіцієнти пульсації площі прохідного перерізу, частоти обертання валу гідромотора, тиску і крутного моменту в залежності від кінематичної схеми та кількості додаткових розподільних вікон рухомого розподільника

Кінематична схема	Кількість вікон нерухомого розподільника, Z_2	Кількість розвантажувальних вікон рухомого розподільника	Коефіцієнт пульсації. %					
			$P_A = P_n$			$P_p = P_V$		
			$\Delta = 0^\circ 51'$	$\Delta = 0^\circ 25' 30''$	$\Delta = 0^\circ$	$\Delta = 0^\circ 51'$	$\Delta = 0^\circ 25' 30''$	$\Delta = 0^\circ$
5/4	10	0	5.5	4.73	0	11.73	9.67	0
		3	23.2	15.1	16.19	47.7	33.9	32.9
		2	20.5	21.6	22.3	43	44.6	46
		4	2.4	0.99	0	4.6	2.18	0
7/6	14	0	20	11.3	21.9	41.3	23.4	43.9
		2	4.1	1.9	0	8.56	3.72	0
		3	2.3	3.8	5.1	4.4	7.32	9.83
		4	6.9	7.6	8.1	13.2	14.9	16.6
9/8	18	0	4.05	3.38	0	8.43	6.92	0
		2	3.3	3.98	3.6	6.48	8.04	7.22
		3	18.9	10.89	10.21	38.9	22.1	19.7
		4	3.6	1.7	0	7.19	3.28	0
11/10	22	0	5.4	4.0	8.89	11.12	8.07	18.3
		2	4.6	2.6	0	9.18	5.11	0
		3	15.33	6.03	3.1	31.3	12.3	7.53
		4	2	3.1	3.97	4.02	6.14	7.86
13/12	26	0	5.0	3.59	0	10.13	7.28	0
		2	4.3	4.8	6.1	8.51	9.55	12.2
		3	2.3	3.5	1.8	4.65	7.09	3.45
		4	4.3	2.3	0	8.59	4.59	0

В результаті проведених досліджень отримано залежність (рис.3) зміни коефіцієнтів пульсації пропускної здатності, частоти обертання валу гідромотора (криві 1), тиску робочої рідини та крутного моменту (криві 2). Аналізом отриманих результатів показав, що не коректне проектування розподільної системи планетарного гідромотора перетворює його на джерело (генератор) пульсацій робочої рідини.

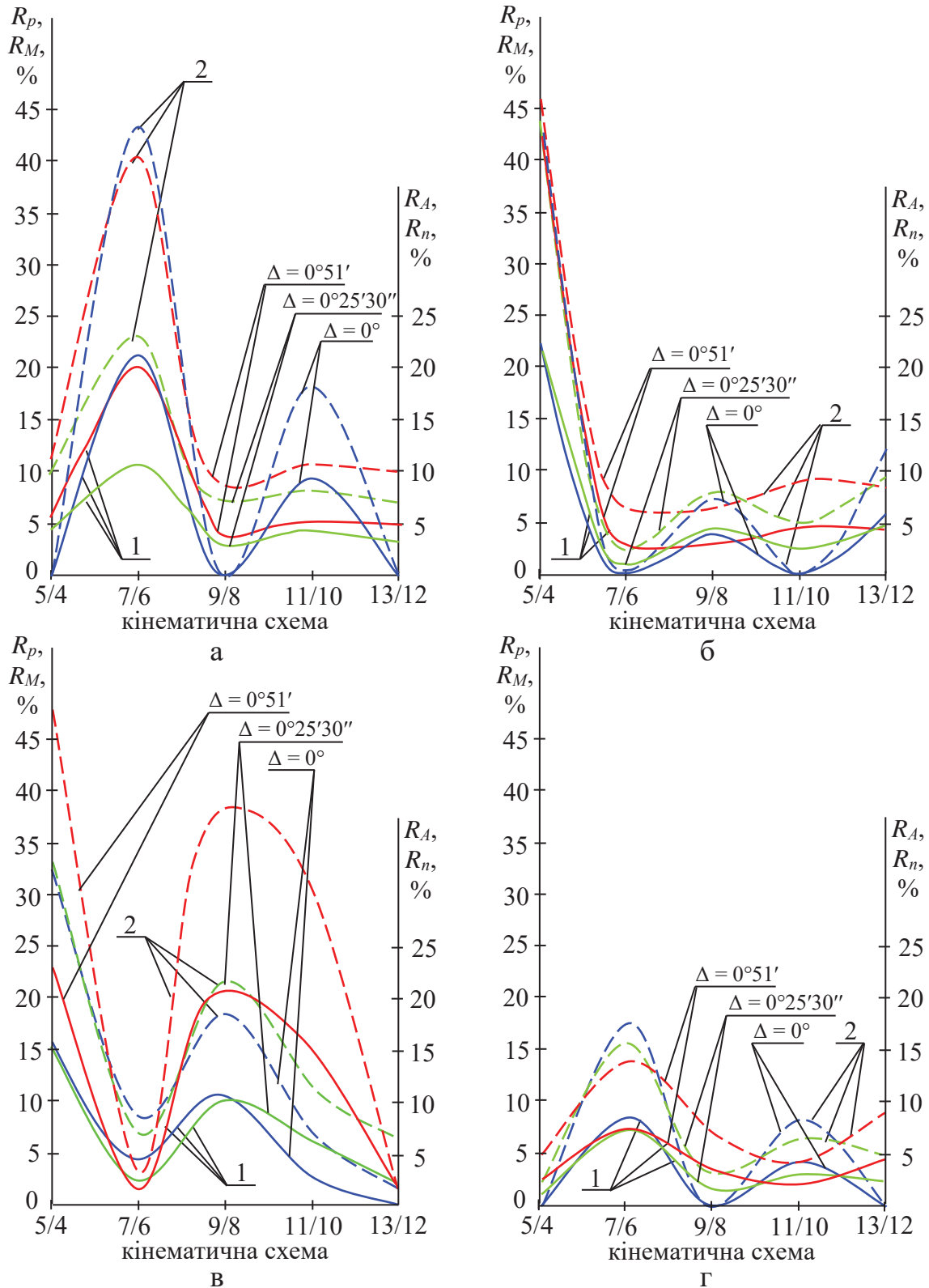


Рис. 3. Залежності зміни коефіцієнтів пульсації пропускної здатності та частоти обертання валу гідромотора (криві 1), тиску робочої рідини та крутного моменту (криві 2): а – без розвантажувальних вікон; б – з двома розвантажувальними вікнами; в – із трьома розвантажувальними вікнами; г – з чотирма розвантажувальними вікнами



Встановлено, що зміна коефіцієнтів пульсації викликана трьома параметрами розподільної системи: кінематичною схемою, кутовим зазором між розподільними вікнами та кількістю використання додаткових розвантажувальних вікон рухомого розподільника. Аналіз проведених досліджень показав, що коректне варіювання цими параметрами дозволяє усунути пульсацію потоку робочої рідини або наблизити її до нуля.

На підставі результатів проведених досліджень (рис. 3, табл. 1) розроблено рекомендації для проектувальників розподільних систем планетарних гідромашин, що дозволяють конструювати гідромотор із заданою кінематичною схемою. Проектування розподільних систем із застосуванням розроблених рекомендацій дозволить усунути (або призвести до нульового значення) пульсації робочої рідини.

Отже, таке проектування забезпечує стабілізацію вихідних характеристик планетарного гідромотора та гідроприводу в цілому. Проектування розподільних систем гідромотора починається з вибору (обґрунтування) кінематичної схеми, тому рекомендації склалися для кожної схеми.

Аналіз (рис. 3, а) показує, що для кінематичних схем 5/4, 9/8 і 13/12 нульова пульсація (коефіцієнт пульсації) робочої рідини, забезпечується з кількістю додаткових розвантажувальних вікон, яка дорівнює нулю та кутовому зазору між розподільними вікнами, що дорівнює нулю ($\Delta = 0^\circ$).

При використанні кінематичних схем 7/6 і 11/10 (рис. 3, б) нульову пульсацію робочої рідини можна забезпечити, з використанням двох додаткових розвантажувальних вікон і кутовим зазором рівним нулю ($\Delta = 0^\circ$). Досить хороші результати отримані для кінематичної схеми 7/6 при використанні двох розвантажувальних вікон та кутовому зазору, що дорівнює $\Delta = 0^\circ 25' 30''$. Використання такого зазору дозволяє підвищити об'ємний ККД гідромотора, при порівняно малому коефіцієнті пульсації до 2,5%.

При конструктивній необхідності використання трьох додаткових вікон (рис. 3, в), можна, використовуючи кутовий зазор рівний $\Delta = 0^\circ 51'$, забезпечити максимальне значення об'ємного ККД розподільної системи для кінематичних схем 7/6 і 13/12 при зміні коефіцієнта пульсації до 2,5%.

Встановлено, що при використанні чотирьох додаткових вікон (рис. 3, г) зміни коефіцієнтів пульсації пропускної здатності, частоти обертання валу гідромотора, тиску робочої рідини та крутного моменту за характером відповідають результатам з кількістю використовуваних додаткових вікон рівним нулю (рис. 3, а). Величина коефіцієнтів пульсації, за таких показників розподільної системи зменшилася практично вдвічі. До рекомендацій можна віднести



кінематичні схеми 5/4, 9/8 та 13/12 з нульовим значенням коефіцієнта пульсації при кутовому зазорі рівному $\Delta = 0^\circ$ між вікнами та схеми 5/4 та 11/10, забезпечивши кутовий зазор рівний $\Delta = 0^\circ 51'$ при значеннях коефіцієнта пульсації до 5%, що є цілком прийнятним.

Використання розвантажувальних вікон рухомого розподільника в якості додаткових робочих вікон дозволяє не тільки забезпечити кінематичну відповідність системи розподілу з кількістю зубів роторів планетарного гідромотора, але і суттєво збільшити абсолютне значення площі прохідного перетину. У свою чергу збільшення площі прохідного перетину системи розподілу дозволяє збільшити номінальне значення вихідної потужності гідромотора.

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено розрахункову схему, математичний апарат та обґрунтовано вихідні дані, що дозволяють дослідити вплив зміни геометричних параметрів розподільної системи на пульсацію її площі прохідного перетину залежно від кінематичної схеми, кутового зазору між розподільними вікнами та кількості додаткових розвантажувальних вікон. Обґрунтовано та прийнято початкові умови та досліджено коефіцієнти пульсації пропускної здатності розподільної системи та частоти обертання валу гідромотора, тиску робочої рідини та крутного моменту на валу гідромотора, що дозволяють моделювати роботу розподільної системи планетарного гідромотора.

Моделювання робочих процесів, що відбуваються в розподільних системах планетарних гідромашин дозволило дослідити всі можливі варіанти використання додаткових розвантажувальних вікон рухомого розподільника в залежності від кінематичних схем розподільних систем та зміни зазору між розподільними вікнами рухомого та нерухомого розподільників планетарного гідромотора.

Досліджено вплив кінематичної схеми розподільної системи, кутового зазору між розподільними вікнами та кількості додаткових вікон на зміни коефіцієнтів пульсації потоку робочої рідини, що дозволяє сформулювати стартові умови для проектування розподільчих систем.

Обґрунтовано стартові умови для проектування розподільних систем, що виключають пульсацію потоку робочої рідини у планетарних гідромашинах для кінематичних схем 5/4, 7/6, 9/8, 11/10 та 13/12. Кутовий зазор між розподільними вікнами приймався 0° , $0^\circ 25' 30''$ та $0^\circ 51'$. Кількість додаткових розвантажувальних вікон у системі розподілу приймалося 0, 2, 3 та 4.

В результаті проведених досліджень отримано зміни коефіцієнтів пульсації пропускної здатності, частоти обертання валу гідромотора, тиску робочої рідини та крутного моменту. Аналізом отриманих результатів встановлено, що не коректне проектування розподільної



системи планетарного гідромотора перетворює його на джерело (генератор) пульсацій робочої рідини. Зміна коефіцієнтів пульсації викликана трьома параметрами розподільної системи: кінематичною схемою, кутовим зазором між розподільними вікнами та кількістю додаткових розвантажувальних вікон рухомого розподільника. Встановлено, що коректне варіювання цими параметрами дозволяє усунути пульсацію потоку робочої рідини або наблизити її до нуля.

При проектуванні розподільних систем планетарних гідромоторів найбільш раціональними є кінематичні схеми 5/4, 9/8 та 13/12 без використання додаткових розвантажувальних вікон та з використанням чотирьох розвантажувальних вікон рухомого розподільника, 7/6 та 13/12 – з використанням двох розвантажувальних вікон рухомого розподільника при нульовому зазорі між розподільними вікнами. При використанні даних кінематичних схем повністю відсутня пульсація потоку робочої рідини, що дозволяє стабілізувати вихідні характеристики планетарних гідромашин.

Список використаних джерел

1. Gamez-Montero P., Codina E. and Castilla R. A Review of Gerotor Technology in Hydraulic Machines. *Energies*. 2019. 12. No 2423. <https://doi.org/10.3390/en12122423>.

2. Panchenko A., Voloshina A., Milaeva I., Luzan P. Operating conditions' influence on the change of functional characteristics for mechatronic systems with orbital hydraulic motors. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. 2019. P. 169–176. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_18.

3. Панченко А. І., Волошина А.А., Панченко І. А., Волошин А. А. Модель гідравлічного приводу мехатронної системи. *Праці ТДАТУ*. 2018. Вип. 18, т. 2. С. 59–83. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-18-2-58-82>.

4. Panchenko A., Voloshina A., Boltyansky O. [et al.]. Designing the flow-through parts of distribution systems for the PRG series planetary hydraulic motors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/1(93). P. 67–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132504>.

5. Панченко А. І., Волошина А.А., Панченко І. А. Обґрунтування кінематичних схем розподільних систем гідромашин планетарного типу. *Праці ТДАТУ*. 2018. Вип. 18, т. 2. С. 30–49. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-18-2-29-48>.

6. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Обґрунтування геометричних параметрів розподільних систем планетарних гідромашин. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20, т. 2. С. 23–35.



<https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-2-23-35>.

7. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Засядько А. І. Поліпшення вихідних характеристик планетарних гідромашин. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 2. С. 68–85. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-2-68-85>.

8. Panchenko A., Voloshina A., Panchenko, I., Pashchenko V., Zasiadko A. Influence of the Shape of Windows on the Throughput of the Planetary Hydraulic Motor's Distribution System. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. 2021. Vol. 2. P. 146–155. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_15.

9. Kiurchev S., Luzan P., Zasiadko A., Radionov H., Boltianska N. Influence of the flow area of distribution systems on changing the operating parameters of planetary hydraulic motors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. No 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>.

10. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Дослідження динамічних характеристик мехатронних систем з гідравлічним приводом. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20, т. 4. С. 58–72. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2020-20-4-58-72>.

11. Makarov V., Rezvaya K., Drankovskiy V., Mikhaylo C. Determination of the main parameters of the pump-turbine using the block-hierarchical approach. *Week on Advanced Technology*. 2020. No 9250164. P. 536–540. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250164>.

12. Barrio R., Fernández J., Blanco E., Parrondo J., Marcos A. Performance characteristics and internal flow patterns in a reverse-running pump-turbine. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012. Vol. 226 (3). P. 695–708. <https://doi.org/10.1177/0954406211416304>.

13. Egusquiza E., Valero C., Presas A. [et al.]. Analysis of the dynamic response of pump-turbine impellers. *Influence of the rotor. Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. Vol. 68(69). P. 330–341. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.05.034>.

14. González J., Oro J., Argüelles-Díaz K. Flow analysis for a double suction centrifugal machine in the pump and turbine operation modes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2009. Vol. 16(2). P. 220–236. <https://doi.org/10.1002/fld.1951>.

15. Rundo M. Models for Flow Rate Simulation in Gear Pumps: A Review. *Energies*. 2017. Vol. 9(10). P. 1261. <https://doi.org/10.3390/en10091261>.

16. Rogovyi A., Korohodskyi V., Khovanskyi S., Hrechka I., Medvediev Y. Optimal design of vortex chamber pump. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741(1). No 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012018>.

17. Rogovyi A., Korohodskyi V., Medvediev Y. Influence of



Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021. Vol. 218. No 119432. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119432>.

18. Korohodskiy V., Kryshtopa S., Migal V., Rogovyi A., Polivyanchuk [et al.]. Determining the Characteristics for the Rational Adjusting of an Fuelair Mixture Composition in a Two-stroke Engine with Internal Carburation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 2(5). No 39–52. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/200766>.

19. Rogovyi A., Khovanskyi S., Hrechka I., Gaydamaka A. Studies of the Swirling Submerged Flow Through a Confuser. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. 2020. P. 85–94, https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_9.

20. Liu C., Jin Y., Zhou J., Tang F., Hao C., Han J. Study of internal flow in cube-type bidirection passages of axial-flow pump system by numerical simulation and experiment. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2011. Vol. 30(5). P. 192-198.

21. Andrenko P., Rogovyi A., Hrechka I., Khovanskyi S., Svyntarenko M. Characteristics improvement of labyrinth screw pump using design modification in screw. In *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741(1). No 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012024>.

22. Yao J., Shi W., Wu S. [et al]. Numerical calculation and experiment on pressure fluctuation in axial flow pump. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2013. Vol. 44(1). P. 119-124. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.022>.

23. Altare G., Rundo M. Computational Fluid Dynamics Analysis of Gerotor Lubricating Pumps at High-Speed: Geometric Features Influencing the Filling Capability. *Journal of Fluids Engineering*. 2016. Vol. 138(11). FE-15-1757. <https://doi.org/10.1115/1.4033675>.

24. Chiu-Fan H. Flow Characteristics of Gerotor Pumps With Novel Variable Clearance Designs. *Journal of Fluids Engineering*. 2015. Vol. 137(4). FE-14-1137. <https://doi.org/10.1115/1.4029274>.

25. Yang D., Yan J., Tong S. Flowrate Formulation of Deviation Function Based Gerotor Pumps. *Journal of Mechanical Design*. 2010. Vol. 132(6). No 064503-5. <https://doi.org/10.1115/1.4001595>.

26. Ding H., Lu J., Jiang B. A CFD model for orbital gerotor motor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2012. Vol. 15(6). No 062006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/6/062006>.

27. Furustig J., Almqvist A., Bates C.A., Ennemark P., Larsson R. A two scale mixed lubrication wearing-in model, applied to hydraulic motors. *Tribology International*. 2015. Vol. 90. P. 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.04.033>.



28. Van de Ven J. On Fluid Compressibility in Switch-Mode Hydraulic Circuits. – Part I: Modeling and Analysis. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012. Vol. 135(2). No 021013-021013-13. <https://doi.org/10.1115/1.4023062>.

29. Van de Ven J. On Fluid Compressibility in Switch-Mode Hydraulic Circuits. – Part II: Experimental Results. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 2012. Vol. 135 (2). No 021014-021014-7. <https://doi.org/10.1115/1.4023063>.

30. Volkov G., Smirnov V. Systematization and comparative scheme analysis of mechanisms of planetary rotary hydraulic machines. *MATEC Web of Conferences*. 2018. P. 224. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822402083>.

31. Volkov G., Kurasov D. Planetary Rotor Hydraulic Machine with Two Central Gearwheels Having Similar Tooth Number. *Mechanisms and Machine Science*. 2018. Vol. 51. P. 435–446. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60399-5_21.

32. Volkov G., Smirnov V. Computation and structural methods to expand feed channels in planetary hydraulic machines. *Journal of Physics Conference Series*. 2019. Vol. 1210. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1210/1/012131>.

33. Shah Y., Vacca A., Dabiri S. A fast lumped parameter approach for the prediction of both aeration and cavitation in Gerotor pumps. *Meccanica*. 2018. Vol. 53(1/2). P. 175–191. <https://doi.org/10.1007/s11012-017-0725-y>.

34. Vacca A., Klop R., Ivantysynova M. A numerical approach for the evaluation of the effects of air release and vapour cavitation on effective flow rate of axial piston machines. *International Journal of Fluid Power*. 2010. Vol. 11(1). P. 33–45. <https://doi.org/10.1080/14399776.2010.10780996>.

35. Velez E. Study Cavitation Gerotor Motors, Using Computer Simulatio. *Renewable Energies and Innovative Technologies*. 2016. P. 64–66.

36. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Вплив величини діаметрального зазору на кінематику руху внутрішнього ротора орбітального гідромотора. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-3>.

37. Biernacki K. Selection of the optimum tooth profile for plastic cycloidal gears. *Journal of mechanical engineering science*. 2014. Vol. 228 (18). P. 3395–3404.

38. Biernacki K. Methods of Increasing Loadability for the Plastic Cycloidal Gears. *Fundamentals of machine design*, 2012. 490 p.

39. Ivanovic L., Miric N., Devedzic G., Ćuković S. Analysis of forces and moments in gerotor pumps. *Journal of Mechanical Engineering*



Science. 2010. Vol. 224(10). No 2257–2269. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES2041>.

40. Furustig J., Almqvist A., Pelcastre L. A strategy for wear analysis using numerical and experimental tools, applied to orbital type hydraulic motors. *Journal of mechanical engineering science*. 2016. Vol. 230(12). No 2086–2097. <https://doi.org/10.1177/0954406215590168>.

41. Choi T., Kim M., Lee G. [et al.]. Design of Rotor for Internal Gear Pump Using Cycloid and Circular-Arc Curves. *Journal of Mechanical Design*. 2012. Vol. 134(1). No 011005-12. <https://doi.org/10.1115/1.4004423>.

42. Панченко А. І., Волошина А.А., Панченко І. А. Надійність конструкції роторів планетарного гідромотора. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20, т. 1. С. 82–92. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-1-82-92>.

43. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Пастушенко С. І. Дослідження впливу похибки форми виготовлення роторів на вихідні характеристики планетарних гідромоторів. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 33–48. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-33-48>.

44. Kyurchev V., Kiurchev S., Rezvaya K., Pastushenko A., Głowacki S.: Experimental Evaluation of the Impact of the Diametral Clearance on Output Characteristics of a Planetary Hydraulic Motor. *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing V*. 2023. Vol. 2. P. 84–94. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_9.

45. Kiurchev S., Abdullo M. A., Vlasenko T., Prasol S., Verkholtantseva V. Automated Control of the Gear Profile for the Gerotor Hydraulic Machine. *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV*. 2023. P. 32–43. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4.

46. Yeremenko O., Abdullo M. A., Boltianska N., Mikhalchenko S., Verkholtantseva V. Reducing the Pulsation of the Working Fluid in Planetary Hydraulic Machines by Rational Design of Their Distribution Systems. *DSMIE 2022: Advances in Design, Simulation and Manufacturing V*. 2022. Vol. 2. P. 133–143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_13.

47. Voloshina A., Panchenko A., Panchenko I., Titova O., Zasiadko A. Improving the output characteristics of planetary hydraulic machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708(1). No 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012038>.

48. Волков В. С., Мілаєва І. І., Сельська А. А., Шамро А. В., Волошин А. А. Обґрунтування геометричних параметрів розподільної системи планетарного гідромотора. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 320–334. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-320-334>.



Стаття надійшла до редакції 02.10.2023 р.

A. Panchenko¹, A. Voloshina¹, I. Kholod¹, A. Voloshin²
¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
² Melitopol Vocational College of TSATU

INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF DISTRIBUTION SYSTEMS ON STABILIZATION OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF PLANETARY HYDROMASHINES

Summary

Planetary hydraulic machines are widely used in hydraulic drives of active working bodies and running systems of self-propelled vehicles. The main disadvantage of these hydraulic machines is the imperfection of their distribution system, as a result of which the hydraulic motor becomes a source (generator) of working fluid pulsations, which causes unsatisfactory operation of the entire hydraulic drive. Therefore, the study of the influence of the geometric parameters of distribution systems on the output characteristics of planetary hydraulic machines in order to ensure their stabilization at the design stages is an urgent task. As a result of the research, a calculation scheme, a mathematical apparatus and a structural-functional diagram of the relationship between the geometric parameters of the distribution system have been developed, which makes it possible to determine the pulsation coefficients of the area of the flow section of the distribution system, the frequency of rotation of the hydraulic motor shaft and the pressure of the working fluid, the torque on the hydraulic motor shaft. It has been established that the kinematic scheme, the angular gap between the distribution windows and the number of additional windows of the movable distributor used have the main influence on the magnitude of the pulsations. It has been established that the correct variation of these parameters makes it possible to eliminate the pulsation of the working fluid flow. The initial conditions for the design of distribution systems that exclude pulsations of the working fluid in planetary hydraulic machines are substantiated. When designing distribution systems of planetary hydraulic motors, the most rational kinematic schemes are 5/4, 9/8 and 13/12 without the use of additional windows and using four additional windows of the movable distributor, 7/6 and 13/12 – using two additional windows at zero gap between distribution windows. When using these kinematic schemes, there is no pulsation of the working fluid flow, which makes it possible to stabilize the output characteristics of planetary hydraulic machines.

Keywords: oscillation amplitude, pulsation coefficient, passage area, stabilization of output parameters.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-25-32

УДК 637.134

С. В. Кюрчев¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-6512-8118

К. О. Самойчук¹, д-р техн. наук

ORCID 0000-0002-3423-3510

В. Ф. Ялпачик¹, д-р техн. наук

ORCID 0000-0002-0349-2448

О. О. Ковальов¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0002-4974-5201

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*e-mail: oleksandr_kovalov@tsatu.edu.ua, тел. +380963205531

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКТІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ УДОСКОНАЛЕНОГО СПОСОБУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ І НОРМАЛІЗАЦІЇ МОЛОКА

Анотація. В статті проведено аналіз пристроїв, які використовуються для реалізації способу роздільної подачі вершків. Результати аналізу свідчать, що розглянутий пристрій, в якому реалізується спосіб та спосіб гомогенізації та нормалізації молока, обраний в якості прототипу запропонованого способу мають низькі значення енергетичних витрат, але не забезпечують необхідну якість гомогенізації. Для підвищення якості диспергування запропоновано зустрічний спосіб подачі вершків з формуванням кільцевого потоку, що буде забезпечувати рівномірний вплив потоку знежиреного молока на центральну та периферійну частину струменю вершків. Підвищення якості нормалізації досягається за рахунок використання насосів-дозаторів знежиреного молока та вершків, при цьому перший з них регулює інтенсивність впливу потоку знежиреного молока на струмінь вершків, а другий забезпечує точне дозування необхідної кількості вершків, що буде забезпечувати відповідність молочних продуктів вимогам технологічної документації.

Ключові слова: струминний гомогенізатор, вершки, якість диспергування, молоко, спосіб гомогенізації, нормалізація.

Постановка проблеми. Основою забезпечення прибутку підприємств переробної та харчової галузі промисловості України є забезпечення високого рівня якості вихідних продуктів. Споживач обирає продукт враховуючи як власну купівельну спроможність, так і сукупність товарних, смакових, харчових характеристик продукту. Забезпечити високі смакові якості, підвищити харчову цінність продукту та покращити його візуальний вигляд (рівномірність кольору продукту, насичений смак) може проведення гомогенізації. Сутність цієї операції, яку інколи називають диспергуванням жирової фази молочної емульсії полягає в зменшенні середнього діаметра жирових кульок (з яких складається молочний жир, який переважно



містять молочні вершки). В нативному стані цей показник має досить великі значення (близько 3-4мкм), в зв'язку з чим за законом Стокса жирові кульки через короткий проміжок часу підіймаються до поверхні, утворюючи шар вершків [1]. Без проведення диспергування молочні продукти мають неоднорідне забарвлення та слабо виражені смакові властивості, спостерігається втрата цінного молочного жиру на стінках обладнання та пакувальної тари [2]. В зв'язку з цим гомогенізація використовується в якості нормативного процесу в технологіях переробки молока різної жирності, кефіру, морозива та інших продуктів. Відповідно до вимог нормативної документації для отримання молочної продукції високої якості достатньо забезпечити зменшення середнього діаметра жирових кульок в 3-4 рази, або до 0,80 мкм та менше [1,3].

З іншого боку проведення диспергування, для здійснення якого використовуються найбільш розповсюджені клапанні гомогенізатори (що забезпечують необхідні значення середнього діаметру жирових кульок після обробки) відрізняються високими значеннями енергетичних витрат на проведення диспергування (7–8 кВт·год/т гомогенізованого продукту) [4]. Чисельні спроби забезпечити підвищення енергоефективності процесу досі не мали успіхів, враховуючи відсутність єдиної теорії гомогенізації. Відомі понад 10 гіпотез процесу, кожен з яких вичерпно не пояснює процеси та механізми, завдяки яким відбувається зменшення середнього діаметра жирових кульок. Проведення ґрунтовних досліджень ускладнюється високими швидкостями руху рідини, що сягають 100 м/с та більше (що є необхідною умовою диспергування) та мікроскопічними розмірами жирових кульок після диспергування (менше 1мкм).

Конструкції гомогенізаторів, які забезпечують отримання продукту з середнім діаметром жирових кульок, що знаходиться на рівні вимог нормативної документації відрізняються високими витратами енергії (клапанні, мікрофлюїдизатори) або призводять до погіршення якості готового продукту як у випадку з ультразвуковими гомогенізаторами [5,6].

Аналіз останніх досліджень. За останні роки провідними науковцями та фахівцями-практиками в галузі запропоновано низку енергоефективних конструкцій, що забезпечують 3–4 разове зниження енергетичних витрат процесу диспергування (протитечійно-струминний, міні міксери Т-подібної та П-подібної форми) [1]. Однак при цьому середній діаметр жирових кульок після обробки в таких пристроях має досить високі значення і варіює в діапазоні 1,1–1,3 мкм [2,5].

Результатом подальших досліджень можливих шляхів зниження енергетичних витрат диспергування при забезпеченні заданої якості



готової продукції стало висунення гіпотези про можливість суттєвого зниження енергетичних витрат процесу за рахунок створення конструкцій, що ґрунтуються на створенні максимальної різниці швидкостей фаз (дисперсійної–знежирене молоко та дисперсної–вершки) [7,8]. Результати проведених аналітичних досліджень свідчать, що досягти суттєвого зниження енергетичних витрат процесу при забезпеченні якості продукту на рівні вимог нормативної документації можливо при використанні принципу роздільної подачі дисперсійної та дисперсної фаз продукту. Ґрунтуючись на цій гіпотезі та з врахуванням згаданого принципу науковці кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика розробили та провели дослідження декількох конструкцій струминного типу. Отримані при проведенні аналітичних та експериментальних досліджень конструкцій струминного гомогенізатора молока та струминно-щілинного гомогенізатора молока свідчать, що [7,8]:

- при їх використанні можливо отримати продукт з середнім діаметром жирових кульок на рівні 0,80–0,90 мкм;
- енергетичні витрати цих конструкцій знаходяться в межах 0,74–0,90 кВт·год/т.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою даної статті є дослідження можливості підвищення якості при використанні нового способу гомогенізації та нормалізації молока. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- здійснювались дослідження переваг та недоліків конструкцій прототипу та аналогу, в яких реалізується запропонований спосіб при якому молоко розділяється на вершки та знежирене молоко, які подаються до струминного гомогенізатора з роздільною подачею вершків, де вершки подаються по каналах в потік знежиреного молока, сформованого центральним каналом;
- проводилось обґрунтування конструктивного рішення гомогенізатору, реалізація запропонованого способу в якому за рахунок встановлення насосів-дозаторів та забезпечення подачі вершків у вигляді кільцевого потоку у напрямку, зустрічному до руху знежиреного молока дозволить прогнозовано досягти підвищення якості гомогенізації.

Основна частина. Один з відомих пристроїв, в якому реалізується спосіб гомогенізації та нормалізації складається з корпусу з центральним каналом, в місці найбільшого звуження якого розташовані канали для ежектування вершків, корпус виконано з конфузору і дифузору, малі діаметри яких формують щілинний канал, а менший діаметр дифузора є більшим за менший діаметр конфузора [9]. При роботі такого пристрою знежирене молоко під тиском



подається крізь патрубков подачі до малого діаметру конфузора, при досягненні якого спостерігається зниження тиску та підвищення швидкості руху потоку. В місці виходу потоку знежиреного молока з конфузору формується зона зниженого тиску, що обумовлює всмоктування з камери до основного потоку крізь щілинні канали вершків. На ділянці, де відбувається ежекція тонкого кільцевого шару вершків до потоку знежиреного молока різниця між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз продукту має найбільше значення, що згідно до критерію Вебера забезпечує необхідні гідродинамічні умови для диспергування жирової фази молочної емульсії [9,10].

Недоліком відомого пристрою, в якому реалізується спосіб гомогенізації та нормалізації молока є недостатня якість гомогенізації та нормалізації. Відповідно до ідеї авторів, певна кількість вершків ежектується до потоку знежиреного молока крізь щілинні канали. Отже точність дозування при складанні нормалізованої суміші в цьому випадку буде недостатньою. Крім цього, відповідно до умов роботи пристрою, вершки надходять до потоку знежиреного молока у вигляді кільцевого струменю, що має певну товщину. В цьому випадку гідродинамічні умови в зоні кільцевої щілини будуть недостатніми для забезпечення ефективного руйнування жирових кульок молока [3,11]. Це пояснюється тим, що при певній товщині струменю вершків потік знежиреного молока не зможе однаково ефективно впливати на його центральну та периферійну частини. Реалізація принципу роздільної подачі вершків в цьому пристрої та створення максимальної різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз буде забезпечувати зниження енергетичних витрат диспергування (орієнтовно до 0,8–0,9 кВт·год/т), але якість гомогенізації в цьому випадку буде недостатньою [8].

В якості прототипу конструкції розглянемо спосіб гомогенізації та нормалізації молока, при якому вершки надходять по каналах, що виконані в місцях найбільшого звуження центрального каналу [12]. При цьому площа каналів, по яких подається жирова фаза визначається з алгебраїчного співвідношення та залежить від коефіцієнтів витрат каналів подачі молока та вершків, жирності молока та вершків, надлишкового тиску подачі знежиреного молока та вершків, площі перетину камери в місці найбільшого звуження [12].

Попередньо знежирене молоко з високою швидкістю надходить до місця найбільшого звуження центрального каналу, де до нього по тонких каналах в перпендикулярному до руху потоку напрямку, з мінімальною швидкістю подаються вершки. Завдяки високій швидкості обтікання жирових кульок потоком знежиреного молока, встановлюється гідродинамічний режим, за якого досягаються

необхідні для руйнування жирових кульок значення критерію Вебера, що призводить до руйнування жирових кульок.

Недостатня якість гомогенізації та нормалізації при використанні відомого способу пояснюється принципом подачі жирової фази. При реалізації цього способу ефективна дія потоку знежиреного молока буде забезпечуватись лише для периферійної частини струменів вершків, що надходять по каналах [13]. Разом з цим, жирові кульки, що будуть знаходитись ближче до центральної частини струменю вершків будуть зазнавати мінімального впливу при включенні до потоку до того часу, поки швидкості дисперсійної та дисперсної фаз не зрівняються та гомогенізація не буде відбуватись взагалі [14]. Таким чином, як і в конструкції аналогу при реалізації цього способу за рахунок створення максимальної різниці між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз та принципу роздільної подачі вершків забезпечується суттєве зниження енергетичних витрат процесу (до 0,9 кВт·год/т переробленого молока, але якість диспергування має недостатні значення) [7].

Вдосконалення відомого способу гомогенізації та нормалізації молока досягається шляхом встановлення насосів-дозаторів (рис.1) та забезпечення подачі вершків у вигляді кільцевого потоку у напрямку, зустрічному до руху знежиреного молока.

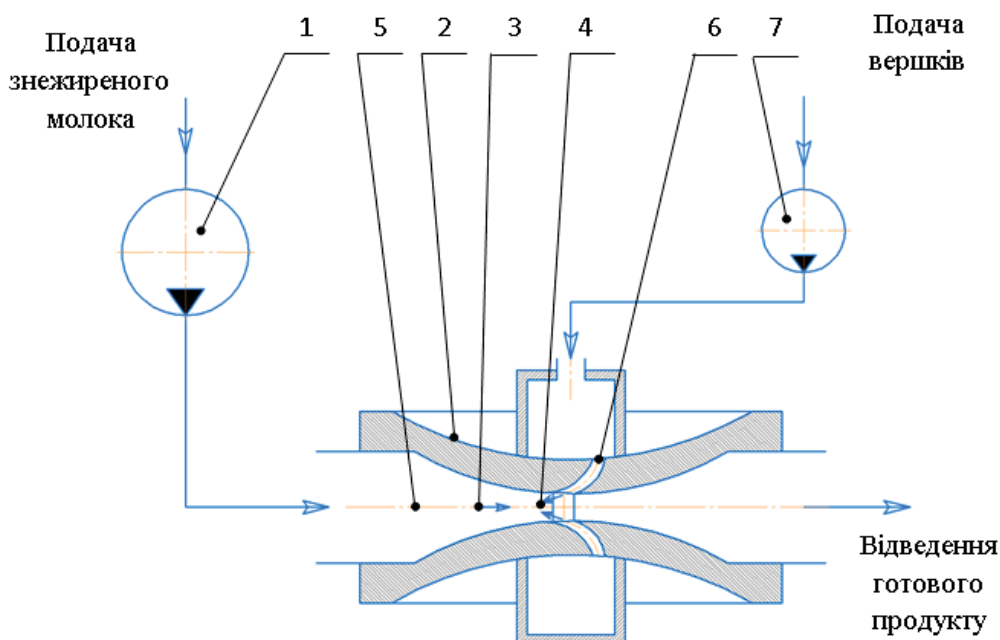


Рис. 1. Спосіб гомогенізації і нормалізації молока: 1–насос-дозатор для подачі знежиреного молока; 2–струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків; 3–потік знежиреного молока; 4–кільцевий потік вершків; 5–центральный канал; 6–канали подачі вершків; 7–насос подачі вершків



Заявлений спосіб реалізується таким чином. Попередньо молоко розділяється в сепараторі-вершковідділювачі з отриманням молочної плазми та жирової фази (вершків). Після цього за допомогою насос-дозатору 1 знежирене молоко 3 подається до центрального каналу 5 струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків 2, внутрішній профіль якого формує місце найбільшого звуження. В середній частині центрального каналу, до потоку знежиреного молока за допомогою насоса подачі 7 через канали 6 подаються молочні вершки. Таким чином до потоку знежиреного молока 3 завдяки зустрічному розташуванню каналів подачі вершків забезпечується зустрічне включення кільцевого потоку вершків 4. При цьому забезпечується досягнення необхідних значень швидкості обтікання жирових кульок молока потоком плазми, внаслідок чого відбувається гомогенізація. подача жирової фази у вигляді кільцевих струменів забезпечує рівномірний вплив потоку знежиреного молока на центральну та периферійну частину струменів, що призводить до підвищення якості гомогенізації [6,15]. Швидкість потоку молочної плазми, а відтак і якість диспергування регулюється за допомогою насоса-дозатора 1. Зміною подачі насоса-дозатора 7 досягається відсотковий вміст жиру в молочних продуктах, що регламентується технологічними вимогами для кожного виду молочних продуктів. Отже, співвідношення між необхідними об'ємами молочних вершків та знежиреного молока встановлюється за допомогою насосів-дозаторів та буде залежати від заданого технологічними вимогами вмісту жиру в молоці та жирності вершків, що використовуються при проведенні нормалізації-гомогенізації. Молоко, що буде переробляється у такий спосіб матиме заданий вміст жиру з мінімальними коливаннями за жирністю, а отже задовольнятиме потреби потенційних покупців.

Висновки. Аналіз пристроїв, в яких використовується відомий спосіб роздільної подачі вершків свідчить, що розглянутий пристрій, в якому реалізується спосіб не здатен забезпечити ефективний вплив та рівномірність подачі жирової фази, а отже високу якість гомогенізації. Розглянутий в якості прототипу спосіб гомогенізації і нормалізації не здатний забезпечити рівномірний вплив потоку знежиреного молока на центральну та периферійну частину струменю вершків.

Реалізація запропонованого способу в групі взаємопов'язаних пристроїв передбачає зустрічну подачу вершків з формуванням кільцевого потоку. Зустрічний спосіб подачі дозволяє забезпечити найбільш ефективну дію потоку знежиреного молока на центральну та периферійну частину кільцевих потоків вершків та підвищити швидкість обтікання жирових кульок (з яких складаються вершки) потоком знежиреного молока, що підвищить якість гомогенізації.



Встановлення насосів-дозаторів забезпечує високу якість нормалізації, що пояснюється чітким дотриманням подачі необхідної кількості вершків (в залежності від жирності вершків, знежиреного молока та нормалізованого продукту). Отже нормалізоване за жирністю молоко буде мати заданий вміст жиру з мінімальними його коливаннями.

Дослідження виконано в рамках науково-технічної роботи "Розроблення технології переробки молочних продуктів з використанням нових типів гомогенізаторів", яка фінансується МОН за договором № ДЗ/132 - 2022.

Список використаних джерел

1. Huppertz T. Homogenization of Milk|Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd Edition. 2011. P 761–764.
2. Liao Y. X., 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.
3. Innings F., Trägårdh C. Visualization of the drop deformation and break-up process in a high pressure homogenizer. *Chem. Eng. Technol.* 2005. Vol. 28. P. 882–891.
4. Ward K., Fan Z. H. Mixing in Microfluidic Devices and Enhancement Methods. *J. Micromech. Microeng.* 2015. Vol. 25(9). No 94001–94017.
5. Tartar L. The General Theory of Homogenization. *Lecture Notes*. 2009. P. 470.
6. Walstra P., Wouters J. T. M. and Geurts T. J. Homogenization. *Dairy Science and Technology*. Second Edn. 2006. P. 279.
7. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: автореф. дис ... д-р. техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018. 44 с.
8. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. ТДАТУ. Мелітополь, 2021. 20 с.
9. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. № 106522 Україна, МКИ⁷ А 01 J 11/16. № u 201511244; заявл. 16.11.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.
10. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом. 2007. 264 с.
11. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. № 4(5). P. 1-8.



12. Спосіб гомогенізації та нормалізації молока: пат. № 94048 Україна, МКИ⁷ А 01 J 11/00. № u 2014 05343; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.10.2017, Бюл. № 20.

13. Vladisavljevic G., Al Nuamani R., Nabavi S. Microfluidic production of multiple emulsions. *Micromachines*. 2017. Т. 8. С. 75.

14. Haponiuk E., Zander L., Probola G. Effect of the homogenization process on the rheological properties of food emulsions. *Pol. J. Nat. Sci.* 2015. Vol. 30. P. 149–158.

15. Morales J., Watts A., McConville J. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 2016. Vol. 22. P. 165–213.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023 р.

S. Kiurchev¹, K. Samoichuk¹, V. Yalpachik¹, A. Kovalyov¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

IMPROVING PRODUCT QUALITY USING AN IMPROVED METHOD OF MILK HOMOGENIZATION AND NORMALIZATION

Summary

The article analyzes the devices used to implement the method of separate feeding of cream, which ensures the implementation of the principle of creating the maximum difference in speed of skimmed milk and cream, which is a necessary condition for effective dispersion. The results of the analysis show that the considered device, which implements the method and the method of homogenization and normalization of milk, chosen as a prototype of the proposed method, has low values of energy costs, but does not provide the necessary quality of homogenization.

The basis of the method is the task of improving the known method of homogenization and normalization of milk, which is achieved by installing dosing pumps and ensuring the supply of cream in the form of an annular flow in the direction opposite to the movement of skimmed milk. The task is solved by separating the milk into cream and skimmed milk using a separator-cream separator, which are fed to a jet homogenizer with a separate supply of cream, where the cream is fed through channels into the flow of skimmed milk formed by the central channel, according to the proposed method, to supply skimmed for milk and cream, own dosing pumps are used, and the cream supply channels form an annular flow directed against the flow of skimmed milk

In order to improve the quality of dispersion, a counter feeding method of cream with the formation of an annular flow is proposed, which will ensure a uniform effect of the flow of skimmed milk on the central and peripheral part of the cream jet. Increasing the quality of normalization is achieved through the use of skim milk and cream dosing pumps, while the first of them regulates the intensity of the flow of skim milk on the stream of cream, and the second ensures accurate dosing of the required amount of cream. This will ensure compliance of dairy products with the requirements of technological documentation and, therefore, greater competitiveness of products and, accordingly, a higher level of profit of enterprises in the processing and food industry.

Key words: jet homogenizer, cream, dispersion quality, milk, method of homogenization, normalization.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-33-45

УДК 662.8.055:665.3

К. О. Самойчук¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-3423-3510

В. А. Самохвал¹, аспірант

ORCID: 0000-0001-5539-3647

О. О. Червоткіна¹, інженер

ORCID: 0000-0002-6214-0566

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: kyrylo.samoichuk@tsatu.edu.ua, тел.: +380978805485

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВІДТИСКАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОЛІЙ В ГВИНТОВИХ ПРЕС-ЕКСТРУДЕРАХ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ

Анотація. Актуальність дослідження направлена на подолання проблеми з перегріванням шнекового пресового обладнання та сировини при виготовленні паливних брикетів з оліємістких сировин з відтисканням надмірного вмісту технічних олій, яке в свою чергу в значній мірі, впливає як на якість самих технічних олій так і на якість брикету. З даною проблемою стикаються власники шнекового пресового обладнання особливо в літній період, коли температура навколишнього середовища досить висока. Дане дослідження спрямовано на подолання проблеми перегріву найбільш високотемпературних частин обладнання, на визначення оптимальних температур при виготовленні паливних брикетів на гвинтових прес – екструдерах та розробці системи охолодження пресів. Головною метою роботи є підвищення якості готової продукції за рахунок контролю температури та зниження собівартості готової продукції. Найбільш дієвими для вирішення даної проблеми є емпіричні методи дослідження. Проведено аналіз методів усунення проблеми перегріву камери дожиму та пристрою остаточного формування брикету. При розробці та реалізації ефективних засобів реалізації належного охолодження, проаналізовано конструкції відомого пресового обладнання даного типу, та обґрунтовано необхідність розроблення нового пресового обладнання в якому камера дожиму та частина секцій пристрою остаточного формування обладнана системою контролю температури..

Ключові слова: паливний брикет, прес, пресування, температурні параметри, дожимний пристрій, вихід олії.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день при постійному підвищенні цін на енергоносії, виготовлення паливних брикетів є дуже перспективним напрямом, яке стрімко розвивається в багатьох країнах [1, 2]. Україна є аграрною країною та вирощує в великих обсягах соняшник, сою, рапс, льон та коріандр, що гарно підходять для виготовлення паливних брикетів, так як мають вміст олій, який



забезпечує високу тепловіддачу при згоранні. Найбільш підходять для переробки даної сировини шнекові прес – екструдери, так як їх конструкція дає можливість з регульованим відсотком, віджимати технічні олії під час виготовлення брикету та забезпечувати високі показники якості готової продукції.

Процес виготовлення паливних брикетів з рослинної сировини, складається з:

- провіювання сировини з розділенням її на фракції;
- дозована подача в пресуючу камеру де відбувається стискання та розтирання сировини, що приводить до нагрівання;
- подача в камеру дожиму, де вона піддається додатковому стисненню;
- стиск та транспортування дожимним шнеком в формуючу матрицю та остаточне формування брикету [3].

При цьому з сировини відтискається певний відсоток технічної олії, від кількості якої в брикеті залежить якість продукції та її екологічні показники [1]. В більшості випадків, при виготовленні паливних брикетів в літній період та при роботі з пересушеною сировиною з невеликим вмістом олій, більшість виробників стикаються з проблемою перегріву пресового обладнання, що в свою чергу призводить до погіршення якості як паливних брикетів так і технічних олій. При цьому зменшується ресурс самого пресового обладнання та збільшуються витрати на обслуговування обладнання. На сьогоднішній день в світі існує безліч технологій та конструкцій пресового обладнання здатного працювати з різними видами сировини окремо. Але практично відсутнє обладнання, яке б могло працювати з широким спектром оліємісткої сировини, здатного поєднати всі процеси в одному пресі та забезпечити гарну якість як паливних брикетів так і технічних олій. Для пресування даного типу сировини найбільше підходять преса екструдерного типу. Відмінністю даного типу пресового обладнання від інших є те, що вони гарно себе зарекомендували при роботі з оліємісткими культурами, та легко дообладнується додатковим пристроєм кінцевого формування з системою відбору технічних олій та з системою охолодження. Все частіше використовуються преса як одна та і багатошнекові. Дане пресове обладнання все більше набирає популярності завдяки невеликій собівартості та низьким витратам на обслуговування. Конструкція даного пресового обладнання дозволяє легко переобладнувати його під різні види сировини, та включає в себе заміну шнеків, камер та формуючих пристроїв.

На даний час головною метою при розробці нового пресового обладнання є розробка та виготовлення найбільш універсального преса, здатного працювати з різними типами оліємісткої сировини й



при цьому забезпечувати стабільну регульовану температуру обладнання та сировини на всіх етапах формування брикету при мінімальних затратах електроенергії. Обладнання повинно забезпечити регульований віджим технічних олій забезпечивши високу якість брикету. На сьогоднішній день існує безліч видів та пропозицій удосконалення шнекового пресового обладнання. Деякі з пропозиції, передбачають модернізацію або заміну окремих частин обладнання, а деякі – додавання цілих агрегатів. При стрімкому розвитку галузі до обладнання постійно підвищуються вимоги, так як зростає конкуренція. Шнекове обладнання постійно вдосконалюють, а також вдосконалюється і сам технологічний процес шляхом одночасної дії різних фізико–механічних факторів впливу на сировину.

Аналіз останніх досліджень. Більшість наукових досліджень з напрямку виготовлення паливних брикетів з рослинної оліємісткої сировини, зосереджені на аналізі та вивчення процесів які відбуваються під час підготовки та пресування її з технологічними особливостями самого пресового обладнання різного типу. В основу більшості досліджень покладено завдання удосконалення відомого обладнання та розробка нового більш досконалого [4]. Напрямок – виготовлення паливних брикетів з відходів рослинництва є дуже перспективним, так як має постійний потенціал поповнення сировиною, та відноситься до відновлюваних джерел енергії і не несе забруднення навколишньому середовищу. На сьогоднішній день напрямок швидко розвивається, а тому, потребує постійного розвитку та удосконалення обладнання, яке використовується в галузі. Найбільш перспективним на сьогоднішній день є використання оліємісткої сировини, так як їх в нашій країні велика кількість. До них відносять відходи соняшника, сої, льону, коріандру. При цьому останнім часом дослідженню пресуванню рослинних матеріалів вчені приділяють все більше уваги [5]. Процес утворення паливних брикетів з окремих частинок оліємісткої сировини розглядається вченими як зближення їх до початку прояву сил механічної взаємодії. При цьому досить значущу частину тут займають фракції частинок та їхнє взаємне переплетення з подальшим їх з'єднанням даних під дією сил міжмолекулярного зчеплення. Зближення частинок супроводжується подоланням сировиною сил пружності просторових структур матеріалу, руйнуванням скелета сировини, видаленням газової складової, адгезійними та іншими явищами. Все частіше дослідження опираються на досвід виробників та операторів пресового обладнання, який направляють на вдосконалення та розробку більш інноваційного пресового обладнання здатного



поєднувати в собі все більше операцій, при цьому знижувати собівартість готової продукції [7].

Хоча шнекове обладнання задіяне в різних сферах вже багато років, але в напрямку виготовлення паливних брикетів з оліємісткої сировини існує недостатня кількість розробок, спроможних працювати з широким спектром оліємісткої сировини та забезпечувати стабільну роботу, при цьому поєднувати всі потрібні характеристики в одному пресі.

Якість готової продукції при виготовленні паливних брикетів з оліємістких відходів має велику залежність від багатьох факторів: вологість, температура, однорідність сировини. Сировина таких рослин як соняшник, льон, соя, рапс повинна мати вологість в межах від 5 до 12%. У разі перевищення в значній мірі зазначених вимог по вологості, паливний брикет розпадається на довільні шматки через виділення вологи, що виходить у вигляді пари з брикету, та погано відділяються технічні олії. Температура в формуючій камері повинна бути від 60 до 80°C. При виході за цей діапазон різко падають показники якості так як починається пароутворення, що призводить до збільшення навантаження на пресове обладнання, та зменшує ресурс самого обладнання [8, 9].

При процесі формування паливних брикетів з оліємісткої сировини потрібно приділити велику увагу часу перебування сировини в формуючому пристрої. При збільшенні часу обробки сировина формується більш якісно, при цьому найкраще зарекомендував себе багатосекційний пристрій остаточного формування, який дає змогу відрегулювати потрібний тиск та час при формуванні сировини в паливний брикет та відділити потрібну кількість технічних олій на потрібному нам етапі формування [10].

З аналізу літератури, патентів та наукових праць [9-11], можна виділити те, що для підвищення якості при виготовлення паливних брикетів з сировини, яка містить певний відсоток залишкової олії, часто в лінію включають додатково маслопрес для відділення олії а потім вже знежирену сировину подають на брикетування. Це в свою чергу значно здорожує собівартість лінії по виготовленню брикетів та збільшує витрати електричної енергії, а відповідно, і кінцева вартість виробу на такому обладнанні буде сильно завищеною.

Формулювання мети статті. Для визначення сучасного напрямку розвитку та вдосконалення відомих конструкцій робочих органів і вузлів шнекового обладнання було здійснено аналіз сучасних наукових праць та патентів, спираючись на досвід операторів пресового обладнання. Метою даної роботи було розробити власну більш інноваційну розробку пресового обладнання, здатну працювати з всіма видами оліємісткої сировини та поєднати всі процеси по



виготовленню готової продукції, без втрати якості в одному пресі, при цьому зберегти низькі витрати на обслуговування.

Основна частина. Всі експериментальні дослідження проводились на шнековому прес-екструдері для виготовлення паливних брикетів [11]. Прес обладаний системою контролю температури робочих органів. Даний універсальний прес-екструдер здатний працювати з оліємісткою сировиною та забезпечувати при виготовленні брикетів одночасний контрольований віджим технічної олії. Усі експериментальні дослідження проводились в умовах максимальної завантаженості обладання. При виконанні дослідів досліджувалася система контролю температури та її взаємодія з пристроєм остаточного формування брикету та її вплив на якість готової продукції та витрати електроенергії [12]. При експериментальних дослідах в якості сировини використовували відходи соняшника з однорідною структурою та вмістом зернової частини не менше 20%, вологість якої складала 9%. За умов температури навколишнього середовища від +25 до +35°C. Під час експерименту сировина подавалася в прес рівномірним, постійним потоком за допомогою дозатора, а саме обладнання заздалегідь було виведене на робочий режим роботи.

Основна технічна характеристика серійного прес-екструдера який використовувався при дослідженнях приведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічна характеристика прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів.

Показник	Величина
Продуктивність (по відходах соняшника), кг/год	120-150
Встановлена потужність, кВт	до 7,5
Споживана потужність, кВт/т	55
Потужність електродвигуна, кВт	11
Температура нагріву корпусів (залежно від сировини), °C	Від 60...80
Частота обертання валів, об/хв	70-85
Об'єм охолоджуючої рідини, л.	25
Потужність насоса для прокачки охолоджуючої рідини, кВт.	0,15

Всі досліді проводилися в декілька етапів. Перший етап включав в себе виведення пресового обладнання на робочий режим, та налаштування усіх робочих органів. Під час другого етапу дослідів вивчалася залежність якості паливних брикетів та технічної олії від температури в камері дожиму та температури всіх секцій пристрою остаточного формування паливного брикету, та виходу на



максимальний показник по відбору технічної олії з паливного брикету [13]. Було поставлено завдання дослідити розроблені камеру дожиму з системою охолодження та пристрій остаточного формування з системою охолодження, які одразу повинні були вирішити частину проблем з якими стикаються виробники паливних брикетів з оліємісткої сировини.

Розроблений прес-екструдер для виготовлення паливних брикетів з оліємісткої сировини працює таким чином. Сировина, за допомогою дозатора, рівномірним потоком подається в завантажувальний бункер 3, який розташований на загрузочній камері преса 1, при цьому сировина захоплюється шнеком 20. В рух який приводить привод 19 та вал приводу 2. Під час обертання шнеків сировина переміщується в зазорі між витками шнека і стінками пресуючої камери 21, щоб сировина не оберталася на витках щнеку а переміщалася та стискалася камера обладнана змінними направляючими ребрами 24. При цьому сировина розтирається та стискається, завдяки чому відбувається її нагрів, та через конічні отвори 22 які заходять в пресуючій камері 21 частково починає виділяється рідка фракція сировини – технічна олія [14]. Тиск з яким шнек діє на сировину регулюється за допомогою зміни зазору між торцевою поверхнею пресуючого шнека 20, що значно розширює можливості даного пресового обладнання, та вхідною частиною дожимної камери 6, яка за допомогою накидної гайки має можливість осьового зсуву та фіксується фіксатором 4 який не дає камері переміщуватися в процесі роботи. Потім вже підготовлена сировина під великим тиском протискається через зазор між торцевою поверхнею пресуючого шнека 20 і вхідною частиною стінки дожимної камери 6 що забезпечує додаткове стискання сировини, проходячи між витками дожимного шнека 5 і дожимної камери 6 без провертання, що забезпечується ребрами 28. Щільність сировини стає граничною що сприяє зростанню температури. Для того щоб температура не перевищувала граничну використовується охолоджувальний пристрій 7, який знижує температуру в зоні дожимання сировини та формування брикету. Він потрібний для унеможливлення пароутворення в середині брикету, що значно поліпшує якість готового виробу [15]. Тиск на виході з дожимної камери можливо змінювати в залежності від сировини, за допомогою матриці 8, осьовим переміщенням за рукоятку 27 за рахунок різьбового з'єднання 25. В процесі проходження матриці сировина набуває форми матриці та подається в пристрій пристрій остаточного формування 9, який представляє собою трубу 23, просовуючись через кожену секцію труб 11, 15, 17. При проходженні кожної нової секції зростає ступінь ущільнення брикетів, а рідка фракція сировини

виділяється через зазори між секціями труб. Секції труб (а отже і брикети) охолоджуються за допомогою проходження охолоджуючої рідини через системи охолодження секцій труб 12, 16, 18.

Конструкція робочих органів зображено на (рис. 1). [11]

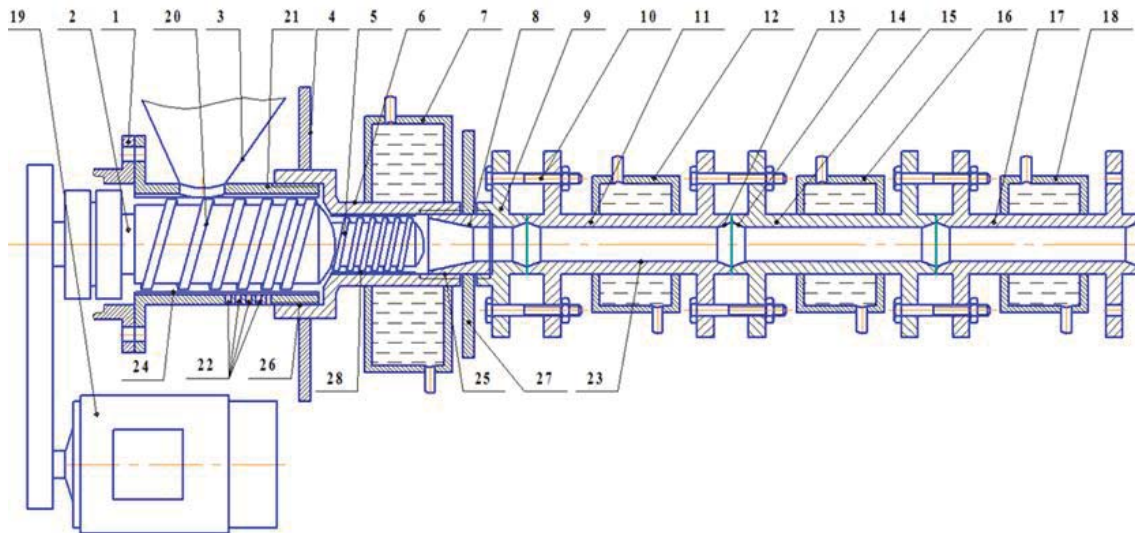


Рис. 1. Схема шнекового прес-екструдера для отримання паливних брикетів з пристроєм остаточного формування: 1 – підшипниковий вузол; 2 – вал приводу; 3 – бункер; 4 – фіксатор; 5, 20 – шнек; 6 – камера дожиму; 7, 12, 16, 18 – сорочка охолодження; 8 – матриця; 9 – пристрій остаточного формування; 10 – болт; 11, 15, 17 – секції труб; 13, 14 – масло згінні фаски; 19 – електродвигун; 21 – пресуюча камера; 22 – отвори для відводу масла; 23 – труба; 24, 28 внутрішні ребра; 25, 26 – різьбове з'єднання; 27 – рукоятка

Під час проведення дослідів температуру робочих органів пресового обладнання вимірювали інфрачервоним пірометром GM320. Силу струму на кожній з фаз заміряли кліщами струмовимірювальними UNI-T UT-204. Заміри проводилися як з задіяною системою охолодження так і без. За допомогою системи охолодження плавно змінювали температурні показники на камері дожиму та на пристрої остаточного формування брикету, при цьому робили заміри виходу технічних олій, продуктивності по брикету та сили струму яку використовує обладнання. Температуру охолодження регулювали за рахунок зміни потоку охолоджуючої рідини через робочі органи та радіатор охолоджувач.

Конструкція робочих органів з системою охолодження зображено на (рис. 2) [11].



Рис. 2. Фрагмент робочих органів, до складу якого увійшли розроблені камера дожиму та орган остаточного формування брикету з системою контролю температури та відбору технічних олій

Для підвищення точності, всі заміри робилися на завчасно прогрітому пресі та повторювалися по 5 разів та бралось середнє значення величин. Час для всіх замірів складав 30 хв. Готова продукція збиралася в окремі ємкості а потім проходила зважування на електронних вагах. Для дослідів в якості сировини використовували відходи провіювання соняшника. Під час дослідів було задіяно сім секцій пристрою остаточного формування, з яких три секції були обладнані системою охолодження [16-18]. Вся система охолодження побудована таким чином, що частини пресу, які піддаються найбільшому нагріву, тобто камера дожиму та перші три секції пристрою остаточного формування, завдяки системі охолодження, мають однакову регульовану температуру, так як мають послідовне з'єднання вхідних та вихідних патрубків. Вся система охолоджується за допомогою прокачки охолоджуючої рідини через радіатор з вентилятором. Довжина пристрою остаточного формування становила 1,67 м.

З дослідів ми бачимо що при занадто низькій температурі робочих органів пресу різко зменшується відділення технічних олій [19-21] та збільшується навантаження на електродвигун. А при високих температурах відбувається пароутворення та закипання олій. З даних занесених в (табл. 2). ми бачимо що оптимальною



температурою при роботі з відходами соняшника є температура від 65 до 80°C.

Таблиця 2

Кількісні показники

Температура робочих органів °С	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Кількість технічної олії при виготовленні 100кг. брикету, кг	1,9	3,2	4,1	4,5	4,9	5,1	5,2	5,6	5,2
Сила струму на фазу А	20,0	18,5	17,9	17,4	17,0	16,6	16,5	16,0	16,5

Вихід олії вираховували на основі рівняння:

$$V_o = \frac{m_m}{m_o} \cdot 100, \quad (1)$$

де V_o - вихід олії, %;

m_o – маса віджатої олії, кг;

m_m – маса паливних брикетів, кг.

З отриманих даних ми бачимо, що основними технологічними і конструктивними параметрами які мають великий вплив на ефективну роботу прес-екструдера для виготовлення паливних брикетів з оліємісткої сировини, є величини: температури нагріву робочої зони, зазору в матриці, часу перебування сировини в пристрої остаточного формування та частоти обертання шнеку [22-25]. З метою отримання найбільшого результату були проведені поетапні дослідження при різних значеннях цих величин.

Висновки. На підставі досліджень фізико-механічних і теплофізичних властивостей відходів соняшнику можна зробити такі висновки.

На основі проведеного аналізу принципів дії та конструкцій відомого пресового обладнання та його роботи з різними видами сировини розробили нове пресове обладнання та провели експериментальні дослідження, якими підтвердили, що температура робочих органів найбільшим чином впливає на якість готової продукції та на вихід олії з оліємістких відходів, та витрат електричної енергії. Відносна вологість для виготовлення паливних брикетів з одночасним відтисканням технічних олій є 5 – 12 % а температура пресування 65...80°C є оптимальною.

Експериментальним шляхом підтверджено, що при правильно підбраному температурному режиму робочих органів та при



поетапному відборі олії за допомогою пристрою остаточного формування можливо працювати з сировиною з високим вмістом олій та отримувати високоякісний брикет та технічні олії.

Розроблене обладнання найбільшим чином спрямоване для регіонів, де вирощують в великих об'ємах такі культури як соняшник, льон, рапс, сою. Дане обладнання забезпечує стабільну роботу та високу якість готової продукції незалежно від температури навколишнього середовища та дає можливість отримати додатковий прибуток від продажу технічних олій.

Список використаних джерел

1. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії: підручник / О. Адаменко, В. Височанський, В. Лютко В та ін. Івано-Франківськ: Полум'я, 2000. 225 с.
2. Єременко О. І., Василенков В. Є., Руденко Д. Т. Дослідження процесу брикетування біомаси шнековим механізмом. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3(17). С. 15-22.
3. Choton S., Gupta N., Bandal J. D., Anjum N., & Choudary, A. Extrusion technology and its application in food processing. *The Pharma Innovation Journal*. 2020. Vol. 9(2). P. 162-168. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i2d.4367>.
4. Полянський О. С., Дьяконов В. І., Дьяконов О. В. Комплексна оцінка і аналіз енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2018. Вип. 190. С. 192–202.
5. Bogaert L., Mhemdi H., & Vorobiev E. 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/ocf/2020060>.
6. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Розробка міні-лінії для виготовлення паливних брикетів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2021. Вип. 21, т. 1. С.152-159.
7. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко та ін. Київ: ПрофКнига, 2021. 468 с.
8. 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.
9. Mushtruk M., Gudzenko M., Palamarchuk I., Vasylyv V., Slobodyanyuk N., Kuts A., Nychyk O., Salavor O., & Bober A. 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>.

10. Кіндзера Д. П., Атаманюк В. М., Госовський Р. Р., Мотіль І. М. Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 16. С. 138–146.

11. Шнековий прес-екструдер для отримання брикетів: пат. 127064, Україна, МПК В 11/22, В 30 В 11/24. № а202007249: заявл. 13.11.2020: опубл. 30.03.2023, Бюл. № 13.

12. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Характеристики використання брикетування в переробній промисловості. *Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв*: міжнародна науково-практична інтернет-конференція, 24 листопада 2020 р. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. С. 182–184.

13. Pedretti F., Gatto D., Pieri S., Mangoni L., Ilari A., Mancini M., Feliciangeli G., Leoni E., Toscano G., & Duca D. Experimental study to support local sunflower oil chains: Production of cold pressed oil in central Italy. *Agriculture*. 2019. Vol. 9(11). No 231. <https://doi.org/10.3390/agriculture9110231>.

14. Alabi K., Busari R. & Joel O. Development and performance evaluation of a variable-pitch tapered-shaft screw press for palm oil extraction. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*. 2022. Vol. 9(2). P. 49-61. <https://doi.org/10.54287/gujisa.1069996>.

15. 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. 25, № 2021168. doi: 10.1590/1981-6723.16821.

16. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Виготовлення паливних брикетів на пресі екструдерного типу. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: III Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених (24 лютого 2023). Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. С. 11.

17. Carré P. New approach for the elucidation of the phenomena involved in the operation of vegetable oil extraction presses. *Oilseeds & Fats Crops and Lipids*. 2022. Vol. 29(6). <https://doi.org/10.1051/ocl/2021048>.

18. Дідур В., Кюрчев В., Чебанов А., Асеев А. Підвищення ефективності технологічного процесу переробки насіння рицини на рицинову олію. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. 2019. С. 17-27. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_3.



19. Самойчук К. О., Самохвал В. А. Підвищення ефективності виробництва паливних брикетів з оліємістких сировин в шнекових прес-екструдерах. *Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2023*: Зб. тез доповідей XIX Міжнар. наук. конф. (18-19 травня 2023 року). . Київ: НУБіП, 2023. С. 56-59.

20. Самохвал В. А., Самойчук К. О. Дослідження ефективності роботи обладнання для інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів. *Праці ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т.1. С. 16. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-16>.

21. Самойчук К.О., Самохвал В. А. Перспективи використання біопалива з рослинної сировини. *Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії* : Матер.VI між нар. наук.-прак. конф. (3-4 листопада 2022 р). Черкаси, 2022. С. 158–161.

22. Alonge A. F., Jackson N. Extraction of vegetable oils from agricultural materials: A review. *Proceedings of the 12th CIGR Section VI International Symposium*. 2019. P. 1184-1206.

23. Bălțatu C., Mateescu M., Anghelache D., Tăbărașu A. The importance of moisture in extracting oils from oilseeds. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*. 2022. Vol. 2. P. 167-170.

24. Fakayode O., & Ajav E. Development, testing and optimization of a screw press oil expeller for moringa (*Moringa oleifera*) seeds. *Agricultural Research*. 2019. Vol. 8. P. 102–115. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0342-6>.

25. 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. <https://doi.org/10.31548/animal2021.03.001>.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2023



K. Samoichuk¹, V. Samokhval¹, O. Chervotkina¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agro-technological University

STUDYING THE EFFICIENCY OF THE COOLING SYSTEM DURING THE INTENSIFICATION OF EXTRUSION OF INDUSTRIAL OILS IN SCREW PRESS EXTRUDERS FOR THE MANUFACTURE OF FUEL BRIQUETTES

Summary

The relevance of the study is aimed at overcoming the problem of overheating of screw press equipment and raw materials in the manufacture of fuel briquettes from oil-containing raw materials with the squeezing out of excessive content of industrial oils, which in turn significantly affects both the quality of the industrial oils themselves and the quality of the briquette. This problem is faced by owners of screw press equipment especially in summer, when the ambient temperature is quite high. This study aims to overcome the problem of overheating of the most heated parts of the equipment and to determine the optimal temperatures for the production of fuel briquettes using screw press extruders and the development of a cooling system. The main goal of the work is to improve the quality of finished products by controlling the temperature and reducing the cost of finished products. Empirical methods of research are the most effective for solving this problem. The paper analyzes methods for eliminating the problem of overheating of the squeezing chamber and the final briquette formation device. When developing and implementing methods for solving this problem, the designs of well-known press equipment of this type were analyzed, and the need to develop new press equipment in which the press chamber and part of the sections of the final forming device are equipped with a temperature control system was substantiated. Each of the sections of the final molding device should be equipped with a system of regulated selection of industrial oils, with the ability to interchange sections. Since when forming a briquette from oil-containing raw materials, the time spent in the press plays an important role, increasing which allows for better compression of the raw material to be formed into a briquette and separation of a larger percentage of industrial oils, the new device should increase the time spent in the compressed state. The developed equipment is mainly intended for regions where such crops as sunflower, flax, rapeseed, soybean are grown in large volumes. This equipment ensures stable operation and high quality of finished products regardless of the ambient temperature and provides an opportunity to obtain additional profit from the sale of technical oils.

Key words: production of briquettes, press, temperature parameters, pressing device, oil output.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-46-53

УДК 664.8.037:634.7

С. В. Кюрчев¹, д-р. техн. наук

ORCID: 0000-0001-6512-8118

В. О. Верхоланцева¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1961-2149

Н. О. Паляничка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-8510-7146

¹Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: valentyna.verkholantseva@tsatu.edu.ua , тел.: +380978285043

ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДУ ПРИ ЗБЕРІГАННІ ЯГІД

Анотація Для того щоб зберегти ягоди в презентабельному, з погляду споживача, вигляді, необхідно створити оптимальні умови зберігання ягід, за яких припиняться або сильно сповільняться процеси гниття і псування. Тому, щоб створити правильні умови для зберігання ягідної продукції, необхідно застосовувати відповідну технологію. Інакше кажучи, десь можна обійтися просто приміщенням з хорошою професійною вентиляцією, а десь потрібна холодильна камера з регульованою атмосферою і системою мікробіологічного знезараження.

Швидкість охолодження залежить не тільки від часу, температури і контакту з товаром, а також залежить від застосовуваного методу охолодження ягід. Існують різні технології охолодження і мають різні можливості для відведення тепла.

Крім оптимальної температури та вологості повітря, треба враховувати фактор сумісності ягід під час зберігання. Не всі ягоди можна зберігати в одному об'ємі, тому що вони можуть впливати один на одного, виділяючи та поглинаючи речовини та запахи, які можуть вплинути на якість продукції.

Ягідний ринок в нашій країні поки що тільки формується, тому розробка або впровадження дадуть більший вигідний спосіб зберігання. Стаття присвячена питанням дослідження існуючих технологій зберігання ягід.

Ключові слова: ягода, зберігання, технологія, холод.

Постановка проблеми. В Україні вирощуванням ягід здебільшого займаються дрібні фермери. Зараз урожайність ягідних культур в Україні на 7-20% нижча, ніж у Польщі. Пов'язано це з тим, що фермери не інвестують у нові високопродуктивні сорти. Але наша мета, щоб ситуація змінилась. Зараз через високу рентабельність ягідного напрямку, яка може сягати 50%, ним стали цікавитися великі виробники [1, 2]. Завдяки цим дослідженням дозволить визначити раціональні технології зберігання ягід, що забезпечать якісну готову продукцію на ягідному ринку. [3, 4]

Аналіз останніх досліджень. Значну роль у розвиток технології зберігання ягід належить видатним вченим, які запропонували



стратегічні напрямки та практичних засад виробництва та експорту аграрної продукції, як, зокрема, Т. П. Богдан [1, 2], О. М. Бородіна, Є. М. Данкевич, В. М. Геєць, Т. О. Зінчук, С. М. Кваша, Л. А. Костюк, П. В. Кондратенко, Т. О. Осташко, Л. М. Шевчук, В. В. Юрчишин [3, 4].

Велика кількість наукових робіт й досліджень присвяченні вивченню та дослідженню проблем розвитку харчової і переробної промисловості України займалися такі науковці: Артимонова І. В., Бабич М. М., Богданов О. О., Буряк Р. І., Єгоров Б. В., Єременко Д. В., Завгородній А. В., Збарський В. К., Коломицева О. В., Кордзая Н. Р., Кузьменко С. В., Лагодієнко В. В., Пчелянська Г. О., Шаповалова І. О., Шевченко Н. В. та ін. [5, 6]. У дослідженнях учених аналізувалися різні аспекти становлення харчової та переробної промисловості, її підгалузей, а також пропонувалися теоретичні і практичні рекомендації щодо піднесення рівня господарювання у цій провідній галузі господарського комплексу країни.

Також значні роботи були проведені у період 50–70-х рр. ХХ ст. дослідження у кріобіологічних центрах США, Англії, які дали змогу узагальнити результати перших робіт із кріобіології. Вони розвинуті в сучасних працях Р. А. Carrow та провідних українських учених А. Білоуса, В. Грищенка, М. Пушкаря та Є. Гордієнка [1, 7].

Вчені прийшли до висновку, що розвиток руйнівного поза- та внутрішньоклітинного кристалоутворення істотно гальмується у процесі заморожування клітин і тканин, а також що воно відбувається під захистом, що допоможуть модифікації структури рідкої фази і характеру її кристалоутворення.

Постановка завдання. Попит на заморожену ягідну продукцію зростає в світі, а її нажаль обіг збільшується занадто мало на 4% щороку [1, 2]. Використання штучного холоду спричиняє мінімальні зміни харчової та біологічної цінності сировини і отриманих з неї готових продуктів, їх якості та органолептичних властивостей та готової продукції, їх якості та органолептичних показників [3]. Недарма, за оцінками експертів, пріоритетним методом консервування харчової сировини визнано штучний холод у всіх його модифікаціях та застосувань [5-7]. У той же час, особливо питомих енерговитрат і особливо питомих енерговитрат, метод консервування харчових матеріалів заморожуванням має значні переваги перед такими методами теплової обробки.

Якщо ж взяти ситуацію по Україні, то все ще виробляється недостатньо власної замороженої рослинної продукції [8], що надходить до торговельної мережі, здебільшого має низької якості через недосконалість традиційних технологій заморожування та зберігання.



Основна частина. Після того, як ягода зібрана, в ній тривають процеси життєдіяльності. Щоб уповільнити дихання і виділення тепла, її необхідно якомога швидше охолодити або заморозити. [2, 9-11].

Зазвичай використовують способи охолодження: повітряне, льодом, вакуумне за допомогою морозильних камер.

Уже охолоджену ягоду фасують у дерев'яні або полімерні ящики, картонні коробки, лотки, кошики.

Охолодження льодом використовують для охолодження та підтримки температури під час транспортування ягід. Тепло від продуктів поглинається льодом, змушуючи його танути [9, 11]. Поки контакт між льодом і плодами зберігається, охолодження відбувається інтенсивно, а лід, що розтанув, служить для підтримки високого рівня вологості в об'ємі, який продовжує зберігати свіжі овочі та фрукти. Нерівномірний розподіл льоду знижує ефективність охолодження.

Існує два типи контактних способи охолодження льодом [12]:

- поверхні ягід охолодити льодом ;
- пакування ягід у лід.

Охолодження льодом поверхні ягід, передбачає розміщення подрібненого льоду, який можна виробляти за допомогою льодогенератора, над верхнім шаром продукту в контейнері. Хоча це спосіб відносно недорогий, але швидкість охолодження може бути доволі повільною, оскільки лід безпосередньо впливає тільки на верхній шар плоду. З цієї причини, рекомендується, щоб цей метод охолодження льодом овочів і фруктів застосовувався після попереднього охолодження для сільськогосподарських культур з більш низькою швидкістю дихання, але не для плодів врожаю, теплої пори року [15, 16]. При використанні льоду слід проявляти обережність, щоб уникнути блокування вентиляції продукції. Обмеження потоку повітря, що призводить до потепління продукту в центрі вантажу, під час транспортування ягід. Саме лід має бути підготовлений таким чином, щоб уникнути заморожування продукту.

Тому робимо висновок, що ягода - продукт дуже делікатний з обмеженим терміном життя. Таким чином, щоб зберегти її максимально довго та належного вигляду важливо[13, 14, 17,]:

- берегти від механічних пошкоджень. Транспортувати тільки за потреби і в придатній упаковці;
- не складувати разом з іншим типом вантажу;
- для тривалого зберігання завантажувати тільки якісні ягоди;
- температура та вологість повітря мають відповідати вимогам;
- необхідно укладати таким чином, щоб забезпечити хорошу вентиляцію.

Для перевезення та/або тривалого зберігання охолодженої чи замороженої ягоди використовують рефрижераторні контейнери. Це зручно тому що:

- встановлюється і контролюється температура, вологість і вміст CO₂;
- обладнання, щоб було просте у використанні;
- температур в діапазоні від -30 до +25°C;
- контейнер мобільний і може працювати навіть у полі за наявності дизельгенератора.

Таким чином, ми пропонуємо виділити наступні основні ж правила, які використовують при зберіганні і забезпечать отримання якісну продукцію після зберігання [2, 4,18].:

- для заморозки підходять тільки зрілі свіжі плоди;
- ягоди можна заморожувати розсипом, після чого скласти порційно в контейнери або пакети для тривалого зберігання;
- заморожувати ягоди разом із цукром або в сиропі;

Перед заморожуванням ягоди потрібно ретельно вимити і просушити. Не допускається повторне заморожування розмороженого продукту. Термін зберігання заморожених ягід можливий не більше року в разі дотримання всіх умов зберігання і підготовки. [19, 20, 21].

Приводимо наступні внутрішні та зовнішні чинники, які впливають на втрату після збирання (рис. 1).



Рис.1. Внутрішні та зовнішні фактори впливу на післязбиральні втрати ягід

Враховуючи втрати ягід можливо зберегти споживчу якість продукції, яка буде запропонована споживачу.

Важливий факт споживання ягід в Україні не відповідає раціональній нормі харчування, нами пропонуються пропозиції щодо зберігання ягід (рис. 2).

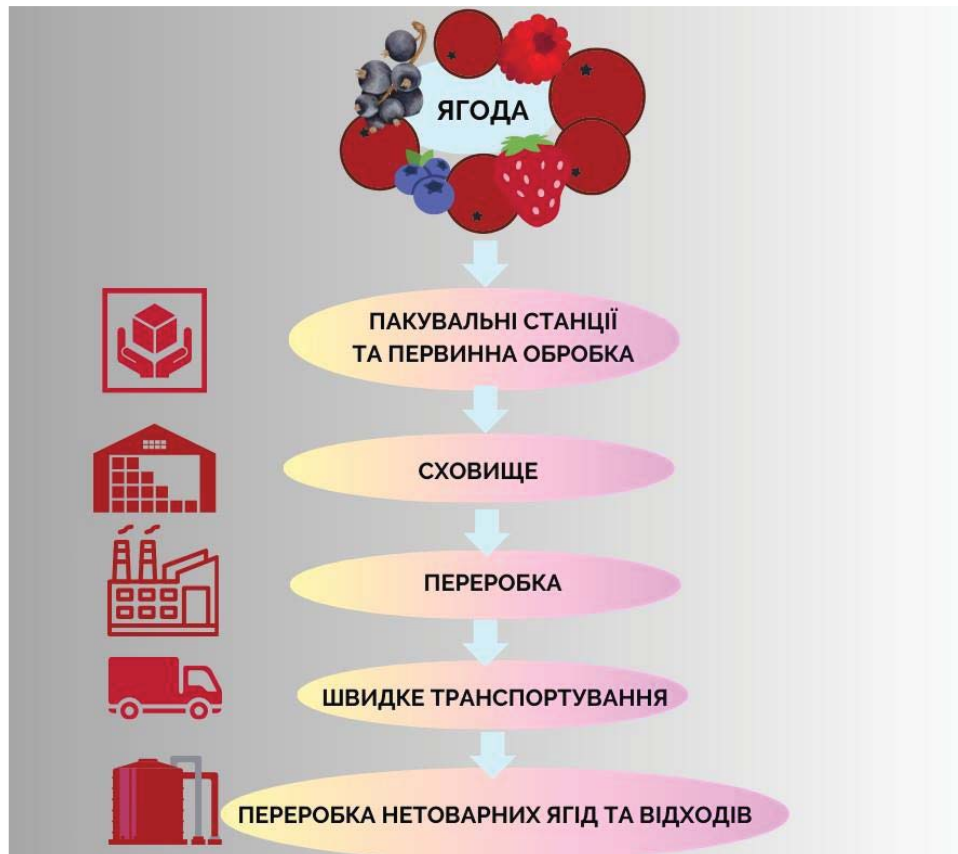


Рис. 2 Стратегічні напрями щодо вдосконалення системи зберігання ягід в Україні

Заморожування ягід традиційними методами, що використовуються в харчовій промисловості, може призвести до значних втрат більшості біологічно активних речовин, особливо під час розморожування ягід. Це є наслідком криогенних пошкоджень рослинних клітин кристалами льоду, що утворюються при заморожуванні, які спричиняють окислення аскорбінової кислоти. Тому вдосконалення існуючих низькотемпературних технологій заморожування переробки ягід з поєднанням холоду з іншими фізико-технологічними факторами, є актуальним для виробників.

Висновки. Таким чином, слід відмітити, що на сьогоднішній день, ринок ягідної продукції в нашій країні переживає стадію становлення: у бізнесі з вирощування ягід задіяні фермери, агрокомпанії, тому ягідний бізнес, орієнтований на експорт, є високорентабельним, та



прогнозується зростання кількості учасників. Основною проблемою з якою стикаються учасників ягідного бізнесу – це якість кінцевого продукту, який би сподобався споживачам. Було проведено дослідження, яке дозволило виділити внутрішні та зовнішні чинники, які впливають на втрату після збирання та наведено пропозиції щодо зберігання ягід. Також, актуальним є вдосконалення існуючих низькотемпературних технологій заморожування переробки ягід з поєднанням холоду з іншими фізико-технологічними факторами.

Список використаних джерел

1. Бабич М. М. Проблеми забезпечення продовольчої безпеки в Україні. *Агросвіт*. 2017. №3. С. 32–39.
2. Буряк Р. І., Кузьменко С. В. Продовольча безпека України в умовах євроінтеграції. *Інноваційна економіка*. 2018. № 1-2. С. 20–26.
3. Rickman J. C., Barrett D. M. and Bruhn C. M. Nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds. *Journal of Sci Food Agric*. 2007. № 87. P. 930–944.
4. Frozen Foods Handling. URL: <http://www.cold.org.gr/library/downloads/Docs/FrozenFoodsHandling.pdf>. (дата звернення 12.09.2023).
5. Li B., Sun D. W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods: A Review. *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 54 (3). P. 175–182.
6. Wagner C. T., Martowicz M. L., Livesey S. A., Connor J. Biochemical stabilization enhances red blood cell recovery and stability following cryopreservation. *Cryobiology*. 2019. Vol. 45(2). P. 153–166.
7. DeAncos B., Sanchez-Moreno C., Pascual-Teresa D., Cano M.P. Freezing preservation of fruits. *Handbook of Fruits and Fruit Processing*. Oxford, UK : Wiley-Blackwell, 2012. P. 103–119.
8. Kotykova O., Babych M., Pohorielova O. Food loss and waste along the value chain of food products in Ukraine. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, 2020. Vol. 6, No. 3. P. 191-220. <https://are-journal.com/index.php/are/article/view/344/258> (дата звернення 05.09.2023).
9. Langelaan H. C., PereiradaSilva F., Thodenvan Velzen U., Broeze J., Matser A. M., Vollebregt M., Schroën K. Technology options for feeding 10 billion people – Options for sustainable food processing. European Union. 2013. Brussels, October 2013.
10. Сімахіна Г. О., Халапсіна С. В. Ефективність використання кріопротекторів при заморожуванні дикорослих і культивованих ягід. *Наукові праці НУХТ*. 2017. Т. 23, № 3. С. 179–185.



11. Єгоров Б. В., Лагодієнко В. В., Кордзя Н. Р. Удосконалення організаційно-економічного механізму формування регіональної системи продовольчого забезпечення. *Вісник ХНАУ. Серія "Економічні науки"*. 2020. № 3. С. 317-331. <https://doi.org/10.31359/2312-3427-2020-3-317>.
12. Обладнання складів. Зберігання зерна і зернопродуктів / В. Ф. Ялпачик, Н. П. Загорко, О. Г. Скляр та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2018. 293 с.
13. Kiurchev S., Valentyna V., Kiurcheva L., Hutsol T., Semenyshyna I. Study of changes in currant during fast freezing. *International Scientific and Practical Conference on Environment. Technology. Resources, ETR 2021* Rezekne17 June 2021-18 June 2021 p. 113. <https://doi.org/11610.17770/etr2021vol1.6539>.
14. Паламарчук І. П., Кюрчев С. В., Верхоланцева В. О., Паляничка Н. О. Застосування процесу флюїдизації для заморожування ягід. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 2.
15. Korjar M., Tiban N. N., Pilizota V., Babic J. Stability of anthocyanins, phenols and free radical scavenging activity through sugar addition during frozen storage of blackberries. *J. Food Process. Preserv.* 2009. Vol. 33. P. 1–11. <https://www.bib.irb.hr/425908> (дата звернення 22.09.2023).
16. Ponder A., Swietlikowska K., Hallmann E. The qualitative evaluation of the fruit of individual cultivars *Rubus* taking into account their usefulness to organic farming. *J. Agric. Eng. Res.* 2017ю Vol. 62. P. 99–102. URL: https://www.researchgate.net/publication/355826755_Preservation (дата звернення 11.09.2023).
17. Прісс О. П., Малкіна В. М., Калитка В. В. Інтегральне оцінювання антиоксидантного статусу плодів овочів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 5, №. 11. С. 38–41.
18. Масліков М. М. Способи швидкого заморожування харчових продуктів. *Мясное дело*. 2005. № 12. С. 54-55.
19. Белінська С. О. Управління безпечністю та якістю швидкозамороженої плодоовочевої продукції : дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.15. Київ: КНТЕУ, 2010. 356 с.
20. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко, О. П. Ломейко. Мелітополь: ВПЦ «Лух», 2020. 330 с.
21. Машина, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції : навч. посібник: практикум / В.Ф. Ялпачик, В. О. Олексієнко, Ф. Ю. Ялпачик та ін. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2015. 196с.



22. Конструкції і розрахунки машин та апаратів переробних виробництв: підручник / В. С. Бойко, К. О. Самойчук, В. Г. Тарасенко, О. П. Ломейко та ін. Київ : ПрофКнига, 2021. 319 с.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2023 р.

S. Kiurchev¹, V. Verkholtantseva¹, N. Palianychka¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

RESEARCH ON COLD STORAGE OF BERRIES

Summary

The government program envisages perfection and development of complex in economic terms, berry freezing is a highly profitable business. The price of finished products in winter is several times its cost price, including all the costs of refrigeration units for freezing and storing frozen products. The technology of freezing technology has made it possible to export perishable berries to any country in the world, as if the necessary refrigeration containers, the products do not spoil for a long time.

When food products or materials are exposed to low temperature, heat is removed from the surface of the object low-temperature processing is transferred by means of an intermediate coolant to the environment. As a result, the following is achieved the desired effect - cooling, freezing of the object of low-temperature processing or maintaining its temperature at a certain level. Freezing a product involves cooling it to a temperature significantly lower than the corresponding temperature freezing. Frozen food and raw materials can be stored for many months for many months, i.e. much longer than when using moderately lowered temperatures. This is not only due to the purely quantitative difference in the low-temperature level of the processes of freezing and cold storage processes, but also due to the fact that in frozen most of the moisture is converted into a solid state. Therefore, microorganisms that feed osmotically, i.e. by absorbing liquid by absorption of liquid nutrient media, are deprived of the opportunity to use the ability to use solidified food products containing a very small proportion.

The development of modern agriculture, along with obtaining high yields, requires solving the problem of long-term storage and high-quality processing of agricultural products. In this regard, one of the most important of the most important tasks is the development of new technologies for storage and processing of products, which would minimize crop losses, while appearance and useful properties of the products would be preserved in a natural and unchanged throughout the entire shelf life.

Keywords: berry, storage, technology, cold.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-54-66

УДК 631.363.28

С. П. Тримбач¹, здобувач,

ORCID: 0009-0007-1605-6294

С. П. Степаненко¹, д-р техн. наук,

ORCID: 0000-0002-8331-4632

¹ Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва
Національна академія аграрних наук Україниe-mail: stepanenko_s@ukr.net

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЧАСТИНОК СИПКОВОГО МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ ГРАНУЛЮВАННЯ

Анотація. Проведені теоретичні дослідження були спрямовані на вивчення переміщення частинок сипкого матеріалу у просторі між обертовою поверхнею кільцевої матриці гранулятора та роликом з метою визначення їхньої швидкості руху.

У результаті була запропонована гіпотеза, згідно з якою переміщення частинок сипкого матеріалу може статися лише тоді, коли сила тертя між поверхнею ролика та цими частинками досягає значення, достатнього для подолання сил тертя між самими частинками та поверхнею матриці. На підставі цієї гіпотези були отримані математичні залежності, які дозволили розрахувати значення кутової і лінійної швидкості руху частинок матеріалу в торцевому зазорі між роликом та матрицею.

Виявлено, що кутова швидкість залежить від коефіцієнта тертя матеріалу на ролик та матриці, а також від радіуса ролика. Лінійна швидкість частинок найменша на початку процесу гранулювання і найбільша в кінці даного процесу, зі збільшенням радіуса ролика вона також збільшується.

У результаті проведених теоретичних досліджень були отримані рівняння, які дозволяють визначити значення кутової швидкості ω_{ch} і лінійної швидкості v_{ch} руху частинки матеріалу при її переміщенні в просторі між роликом та матрицею в процесі гранулювання сипких матеріалів.

Ключові слова: сипкий матеріал, лінійна швидкість, процес гранулювання, тертя, переміщення частинок матеріалу, швидкість руху частинок.

Постановка проблеми. Процес гранулювання сипких матеріалів з кільцевою матрицею є досить складним і залежить від багатьох факторів, які впливають на якість виконання цієї операції. Процес гранулювання сипких матеріалів можна здійснювати декількома основними робочими органами, які можна розділити: I-вальцеві; II-шнекові; III-штемпельні; IV-матричні [1-5].

Проте слід відмітити, що в першій, другій та третій групі процес гранулювання відбувається не якісно та зі значними енерговитратами,

що в свою чергу призводить до зниження питомої продуктивності процесу гранулювання [1-3]. Тому нами запропоновано використання технічного засобу для процесу гранулювання з кільцевою матрицею IV група та трироlikовою системою пресування сипкого матеріалу де спостерігається збільшення питомої продуктивності та зменшення питомих витрат енергії [1, 3, 5, 14, 18].

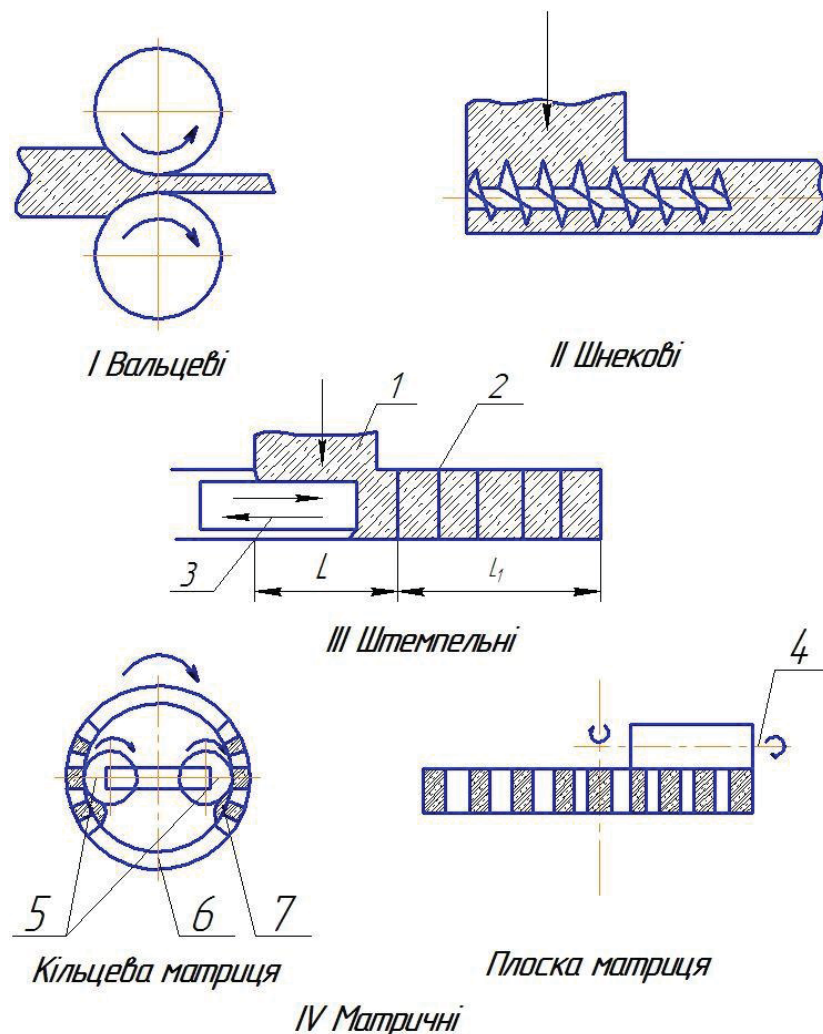


Рис. 1. Робочі органи для гранулювання [1-5]:

- 1 – завантажувальне вікно; 2 – пресувальний канал; 3 – штампель;
4 – упор; 5 – валець; 6 – матриця; 7 – робоча зона

Запропонований технічний засіб розглянуто в наукових працях [10, 11] та принцип його роботи полягає в наступному. Кільцева матриця обертається за годинниковою стрілкою. В середині з внутрішньою частиною матриці встановлені пресувальні ролики, які обертаються в тому ж напрямку що і матриця. В робочу частину матриці потрапляє матеріал який за рахунок обертання матриці подається в зону контакту ролика де починається процес ущільнення з



подальшим запресовуванням його в радіальні отвори матриці. На виході з отворів гранули ламаються при зустрічі з нерухомим ножом.

Слід відмітити, що на даний час відсутня аналітична залежність для визначення значення кутової швидкості і лінійної швидкості руху частинок матеріалу при їх переміщенні в просторі між роликком та матрицею в процесі гранулювання, тому визначення даної взаємозалежності є актуальним завданням для подальшого конструювання грануляторів з кільцевою матрицею.

Аналіз останніх досліджень. Дослідники [4-5] провели аналіз основних досліджень, спрямованих на вивчення роботи шестеренних прес-грануляторів. В ході аналізу ними було встановлено шляхи підвищення продуктивності та надійності таких прес-грануляторів з кільцевою матрицею, зменшення витрат енергії під час процесу гранулювання і скорочення робочого навантаження на обслуговування їх робочих компонентів. Братішко В. В. та Болтянська Н. І. визначили можливості регулювання якості отриманих гранул та виявлено ряд конструктивних і технологічних недоліків. В результаті цього були вирішені окремі завдання щодо структурного синтезу для поліпшення конструкцій прес-грануляторів.

У сучасних умовах важливе значення має вдосконалення складних технологічних процесів, що використовуються в промисловості, з метою забезпечення ресурсозбереження та підвищення енергоефективності [6-9].

В агропромисловому секторі одним із таких процесів є пресове гранулювання у прес-грануляторах типу екструзійного з циліндричними робочими органами. Цей процес використовується для обробки сільськогосподарських сировини при виробництві гранульованих комбікормів і їх окремих компонентів, виготовлення паливних гранул з відходів агропромислового комплексу та отримання гранульованих проміжних продуктів для підвищення ефективності технологічних процесів, як зазначають автори роботи [6-10].

Авторами [8, 9] вказано на доцільні напрямки удосконалення процесу пресового гранулювання. Встановлено, що для всіх існуючих прес-грануляторів з кільцевою матрицею характерно видавлювання продукту у бічному напрямку. Інтенсивність цього бокового видавлювання матеріалу визначається його напруженим станом в клиновидному просторі і значно залежить від ряду факторів, таких як структурно-механічні (реологічні) властивості оброблюваного продукту, конструктивні параметри прес-гранулятора та коефіцієнт контактного тертя, як вказують автори.

Науковими дослідженнями [2, 3, 6-8] обґрунтовано напрямок удосконалення робочого процесу вальцово-матричних прес-



грануляторів з кільцевою матрицею шляхом впровадження торцевого обмеження клиновидного простору додатковими контактними поверхнями. У прес-грануляторах з таким обмеженням клиновидного простору між робочими органами, механічна енергія передається оброблюваному матеріалу через контактні поверхні матриці, пресуючих роликів і обмежувальних кілець. Науковцями [4-9, 14-20] розроблена математична модель процесу пресового гранулювання рослинної сировини в умовах замкненого клиновидного простору між матрицею і кожним з пресуючих роликів.

Формулювання мети статті полягає в аналітичному описі процесу переміщення частинок сипкого матеріалу в просторі між обертовою поверхнею ролика та кільцевою матрицею, а також встановленні математичних залежностей для визначення швидкостей переміщення частинок сипкого матеріалу в даному пристрої.

Основна частина. Згідно з сформульованою гіпотезою про те, що необхідною умовою для переміщення частинок матеріалу є досягнення силою тертя \bar{F}_b між поверхнею ролика та частинками значення, достатнього для подолання сил тертя \bar{F}_a між частинками та обертовою поверхнею матриці. Ми припускаємо, що матеріал складається з рівномірного шару з товщиною h_{cp} , який складається з окремих елементів з шириною l_{cp} , які переміщуються в проміжку (зазорі) між роликом і матрицею, як наведено на (рис.2). Припускаємо, що елемент шару сипкого матеріалу складається з окремих частинок (матеріальних точок).

Отже введемо координатну систему xu , початок якої розташований в центрі O обертового ролика з постійною кутовою швидкістю ω (рис. 2). З певною похибкою можна припустити, що траєкторія руху частинок проходить на однаковій відстані від кола ролика радіусом R_R і матриці, з радіусом R_M , зі зміщеним центром O_1 від центра обертового ролика O зміщеного на відстань k (рис. 3). Радіус кривизни траєкторії частинок обчислюється за допомогою виразу:

$$R = R_M - R_R, \quad (1)$$

де R_M - радіус матриці, вимірюється в метрах (м);

R_R - радіус ролика, також вимірюється в метрах (м).

Цей вираз допомагає визначити радіус кривизни траєкторії руху частинок матеріалу в зазорі, який має зміщений центр O_1 відносно центра обертання ролика.

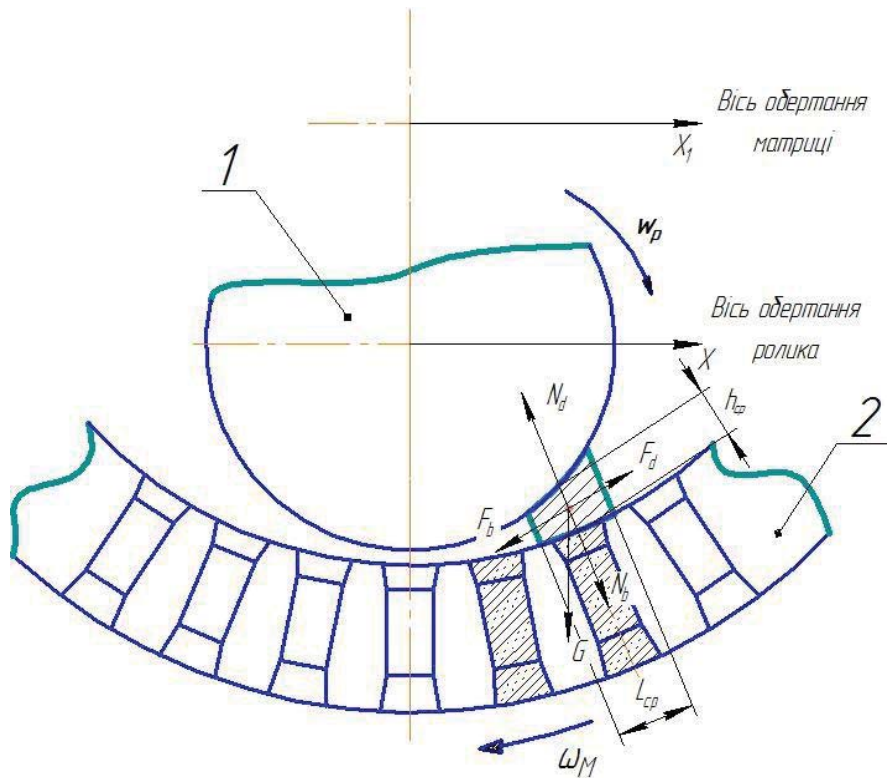


Рис. 2. Схема елемента шару гранульованого сипкого матеріалу:
1 – ролик; 2 – матриця

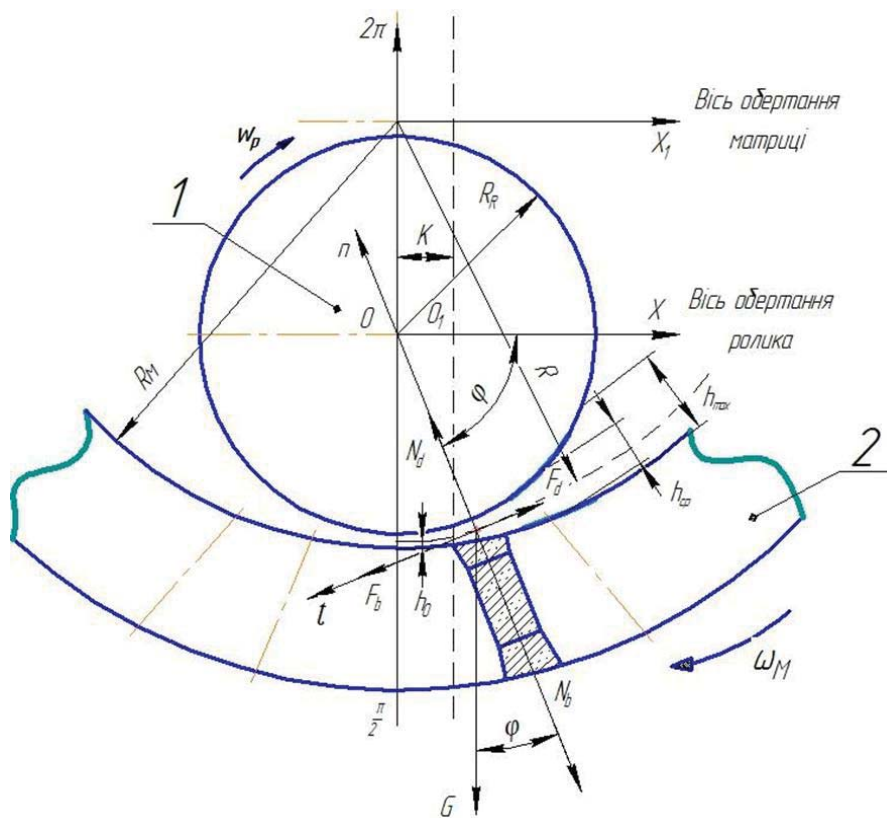


Рис. 3. Схема сил, що діє на елементарну частинку сипкого матеріалу за умов її руху між роликом (1) та кільцевою матрицею (2) в процесі гранулювання



Для початку, радіус R_M матриці можна визначити за допомогою виразу:

$$R_M = R_R + \frac{h_0 + h_{max}}{2} \quad (2)$$

де h_0 – мінімальний зазор сипкого матеріалу, який достатній для початку процесу гранулювання між роликом та матрицею, (м);

h_{max} – максимальний значення зазору сипкого матеріалу, який подається в простір між роликом та матрицею для початку процесу гранулювання, (м).

У натуральній системі координат з осями $\bar{\tau}$ та \bar{n} , векторне рівняння руху частинки в просторі між роликом і матрицею матиме такий вигляд:

$$m \cdot \frac{d^2 \bar{s}}{dt^2} = \bar{N}_d + \bar{N}_b + \bar{F}_d + \bar{F}_b + \bar{G} \quad (3)$$

де \bar{s} – швидкість частинки у відносному русі;

N_d - сила нормального тиску на частинку від поверхні ролика, (Н);

N_b - сила нормального тиску на частинку з боку матриці, (Н),

$N_d = N_b = K \cdot h_{cp}(\varphi)$;

K - модуль пружності сипкого матеріалу, (Н/м);

$h_{cp}(\varphi)$ - зміна товщини шару сипкого матеріалу в залежності від кута φ та часу t ;

φ - кут, який визначає положення частинки матеріалу в зазорі між роликом та матрицею, рад.;

F_d - сила тертя частинки по поверхні ролика, (Н): $F_d = N_d \cdot f_d$;

f_d - коефіцієнти тертя частинок матеріалу по поверхні ролика;

F_b - сила тертя частинки по поверхню матриці, (Н): $F_b = N_b \cdot f_b$;

f_b - коефіцієнти тертя частинок матеріалу по поверхні матриці;

G - сила тяжіння, яка діє на частинку, (Н): $G = m \cdot g$.

Отже, в результаті цього рівняння руху проекції частинки на вісь $\bar{\tau}$ та \bar{n} можна виразити наступним чином [2, 12-19]:

$$\tau: m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} = F_b - F_d + m \cdot g \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

$$n: \begin{cases} m \cdot \frac{dv}{dt} = F_b - F_d + m \cdot g \cdot \cos \varphi; \\ m \cdot \frac{v^2}{R} = N_d - N_b - m \cdot g \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (5)$$

Враховуючи, що $N_d = N_b = K \cdot h_{cp}(\varphi)$; $F_d = N_d \cdot f_d$; $F_b = N_b \cdot f_b$ і з урахуванням певних змін в системі диференціальних рівнянь (4, 5), можна подати рух частинки в наступному вигляді [16-21]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{F_b}{m} - \frac{F_d}{m} + g \cdot \cos \varphi; \\ \frac{v^2}{R} = -g \cdot \sin \varphi. \end{cases} \quad (6)$$



$$\begin{cases} \frac{F_d}{m} = K \cdot h_{cp}(\varphi) \cdot f_d; \\ \frac{F_b}{m} = K \cdot h_{cp}(\varphi) \cdot f_b. \end{cases} \quad (7)$$

Припустимо, що товщина шару сипкого матеріалу змінюється залежно від кута φ згідно з наступним виразом:

$$h_{cp}(\varphi) = \chi \cdot \varphi, \quad (8)$$

де χ - коефіцієнт пропорційності, що відображає зміну товщини h_{cp} шару матеріалу залежно від зменшення зазору між роликком і матрицею по мірі руху частинки від ущільнення до гранулювання, (м/рад).

Після вирішення системи рівнянь (6, 7) [2, 4, 7, 9, 16, 21] з урахуванням (8), ми отримуємо вираз:

$$\frac{dv}{dt} = K \cdot \chi \cdot \varphi \cdot f_b - K \cdot \chi \cdot \varphi \cdot f_d + g \cdot \cos \varphi \quad (9)$$

Для спрощення рівняння (9) вводимо значення ξ , яке визначається за таким виразом:

$$\xi = \frac{(f_b - f_d) \cdot \chi \cdot \varphi}{R} \quad (10)$$

Після цих перетворень рівняння (9) отримуємо:

$$\dot{\varphi} \frac{d\dot{\varphi}}{d\varphi} = \xi \cdot \varphi + \frac{g}{R} \cdot \cos \varphi, \quad (11)$$

$$\dot{\varphi} \cdot d\dot{\varphi} = \xi \cdot \varphi \cdot d\varphi + \frac{g}{R} \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi, \quad (12)$$

$$\int_{\dot{\varphi}_0}^{\dot{\varphi}_k} \dot{\varphi} d\dot{\varphi} = \xi \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \varphi d\varphi + \frac{g}{R} \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \cos \varphi d\varphi, \quad (13)$$

$$\frac{\dot{\varphi}}{2} \Big|_{\dot{\varphi}_0}^{\dot{\varphi}_k} = \xi \cdot \frac{\varphi}{2} \Big|_{\varphi_0}^{\varphi_k} + \frac{g}{R} \cdot \sin \varphi \Big|_{\varphi_0}^{\varphi_k}, \quad (14)$$

де $\dot{\varphi}_0, \dot{\varphi}_k$ - початкове і кінцеве значення кутової швидкості руху частинки, (рад/с).

Після виконаних перетворень рівняння (14) воно набуде наступного вигляду:

$$\frac{(\dot{\varphi}_k)^2 - (\dot{\varphi}_0)^2}{2} = \xi \cdot \frac{(\varphi_k)^2 - (\varphi_0)^2}{2} + \frac{g}{R} \cdot (\sin \varphi_k - \sin \varphi_0). \quad (15)$$

Під час розв'язання рівняння (15) для визначення початкової та кінцевої кутової швидкості руху частинки ми отримали формулу для обчислення кутової швидкості руху частинки:

$$\dot{\varphi}_k = \sqrt{(\dot{\varphi}_0)^2 + 2 \cdot \left[\left(\frac{(f_b - f_d) \cdot \chi \cdot \varphi}{R} \right) \cdot \frac{(\varphi_k)^2 - (\varphi_0)^2}{2} + \frac{g}{R} \cdot (\sin \varphi_k - \sin \varphi_0) \right]} \quad (16)$$

З певними припущеннями, середню кутову швидкість руху ω_{ch} частинки в зазорі між роликком та матрицею можна визначити як середнє значення між початковою та кінцевою швидкістю:

$$\omega_{ch} = \frac{\dot{\varphi}_k + \dot{\varphi}_0}{2} \quad (17)$$



При цьому середня кутова швидкість руху ω_{ch} частинки зменшується зі збільшенням значення f_b , і рух триватиме до того моменту, поки сили тертя не перевищать сили руху в зазорі між роликом та матрицею, тобто доки виконається умова $f_b > f_d$.

На рис. 4 наведено залежності середньої кутової швидкості руху ω_{ch} частинки в зазорі між роликом та матрицею від коефіцієнтів тертя f_b і f_d при різних радіусах ролика та матриці.

Лінії на графіку відповідають різним значенням коефіцієнта тертя f_d по поверхні матриці. З графіку видно, як змінюється середня кутова швидкість руху частинки в залежності від цих параметрів.

Коефіцієнти тертя гранульованого матеріалу щодо поверхні матриці f_d можуть мати значення від 0,2 до 0,4 для тирси з вологістю не більше 14% [10], від 0,3 до 0,45 для корму з вологістю не більше 15% [10]. Середня кутова швидкість руху ω_{ch} частинки збільшується зі збільшенням коефіцієнта тертя f_d матеріалу по поверхні матриці та зменшується зі збільшенням коефіцієнта тертя f_b до поверхні ролика в процесі гранулювання. Зі збільшенням радіуса матриці також зменшується середня кутова швидкість. Наприклад, середня швидкість ω_{ch} може змінюватися від 0 до 20 рад/с при $R_M = 0,240$ м, $f_b = 0,3$ та зі збільшенням f_d до 0,3. При $f_b = 0,4$, $R_M = 0,240$ м та зі збільшенням f_d до 0,4 середня швидкість ω_{ch} може змінюватися від 0 до 20 рад/с. При збільшенні радіуса ролика за однакових умов ($f_b = 0,4$ та $f_d < 0,4$), ω_{ch} може змінюватися від 0 до 20 рад/с.

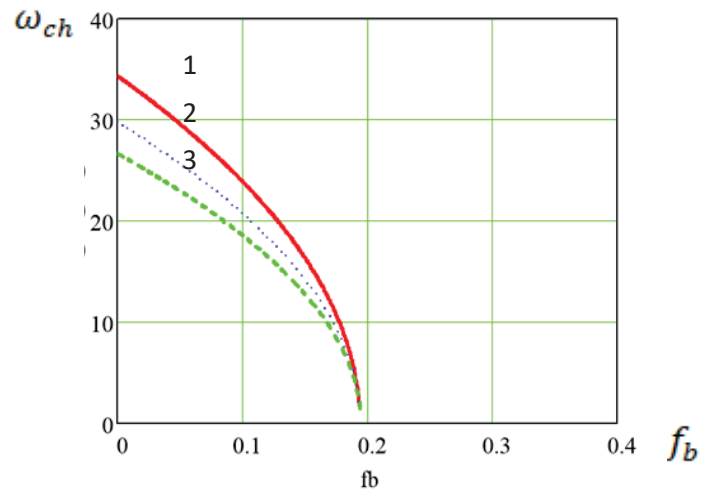
Лінійну швидкість руху v_{ch} частинки можна визначити за формулою:

$$v_{ch} = \omega_{ch} \cdot R \quad (18)$$

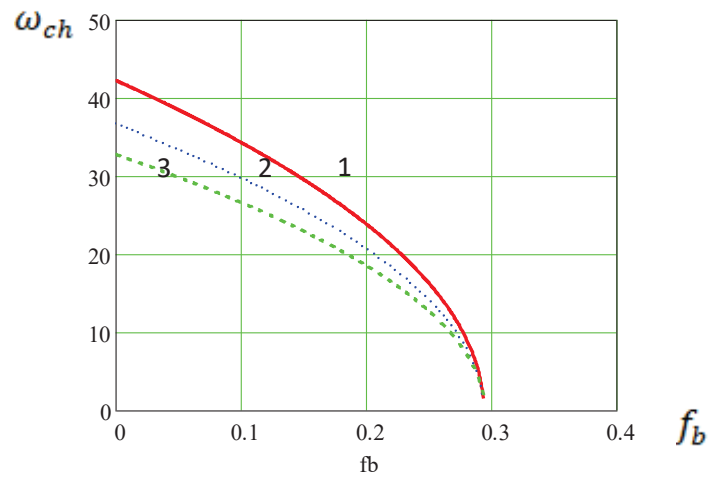
Рівняння (17) і (18) були розв'язані за таких початкових даних: $f_b = 0,4$; $f_d = 0,15$; $\dot{\varphi} = 0$ (рад/с); $\varphi = \frac{\pi}{18} \dots \pi$ (рад) із кроком $\frac{\pi}{20}$. При цьому припускається, що швидкість v_0 введення частинок сипкого матеріалу в простір між роликом та матрицею приблизно дорівнює нулю. Результати обчислень швидкості руху частинки v_{ch} в залежності від кута φ подані наведени на рис. 5.

Ці графіки демонструють, як змінюється лінійна швидкість руху частинки в залежності від впливових параметрів.

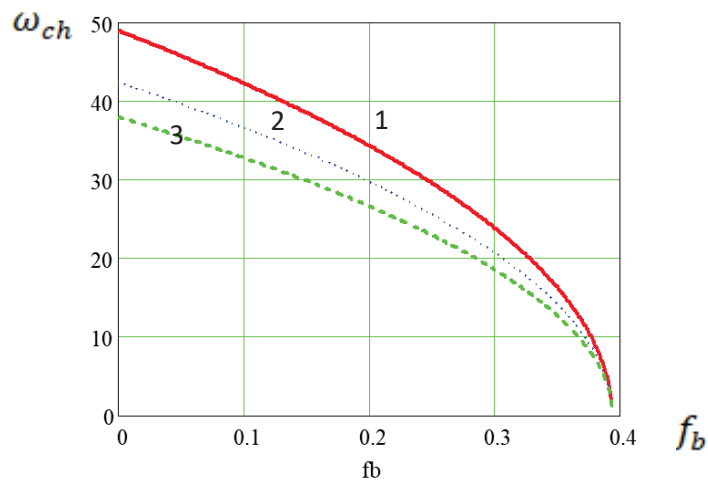
Аналіз залежностей на рис. 5 вказує, що на вході в простір між роликом та матрицею швидкість v_{ch} має мінімальне значення, а максимальне значення досягається при значенні кута φ , рівному 180° , на виході. При цьому швидкість v_{ch} зростає зі збільшенням радіуса ролика.



a - $f_d = 0,2$



б - $f_d = 0,3$



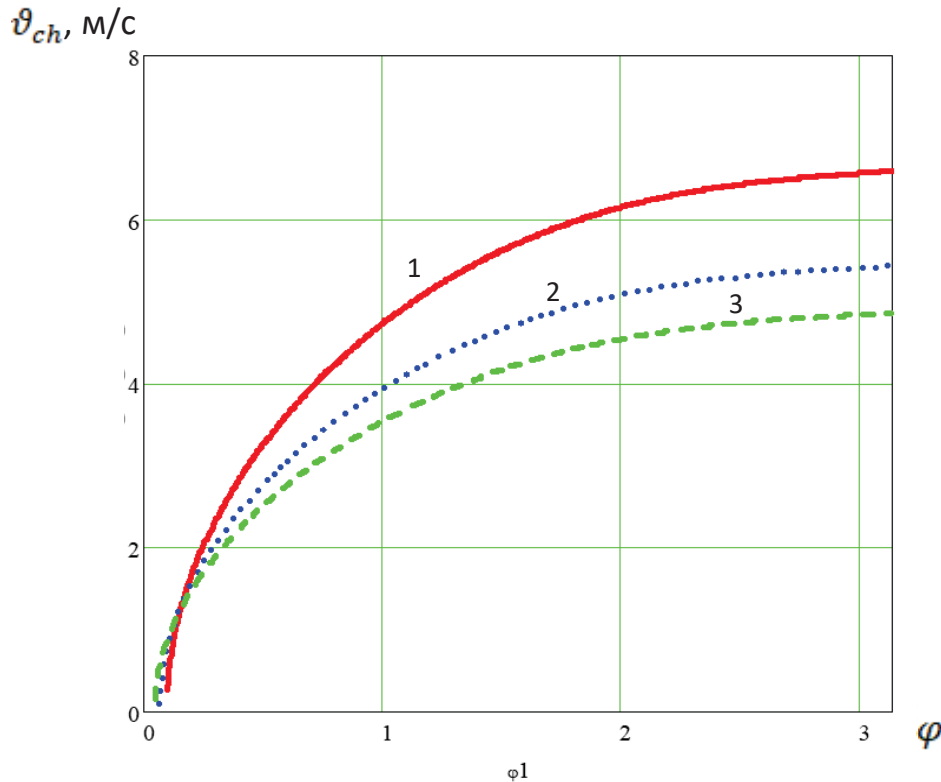
в - $f_d = 0,4$

1 - $R_R = 0,095$ м; 2 - $R_R = 0,097$ м; 3 - $R_R = 0,10$ м;

Рис. 4. Залежність середньої кутової швидкості руху ω_{ch} частинки від коефіцієнта тертя f_d матеріалу по поверхні матриці при різних значеннях радіуса ролика R_R



Наприклад, при радіусі $R_R = 0,095$ м максимальна швидкість $v_{ch} = 3,5$ м/с; при $R_R = 0,097$ м $v_{ch} = 5,7$ м/с; при $R_R = 0,1$ м $v_{ch} = 7,1$ м/с.



1 - $R_R = 0,095$ м; 2 - $R_R = 0,097$ м; 3 - $R_R = 0,1$ м;

Рис. 5. Залежності лінійної швидкості v_{ch} руху частинки від кута φ при значеннях зазорів $h_0 = 0,5$ мм і $h_{max} = 1$ мм для різних значень радіуса ролика R_R

Висновки. У результаті проведених теоретичних досліджень були отримані рівняння, які дозволяють визначити значення кутової швидкості ω_{ch} і лінійної швидкості v_{ch} руху частинки матеріалу при її переміщенні в просторі між роликом та матрицею в процесі гранулювання сипких матеріалів.

Список використаних джерел.

1. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль, 2001. 975 с.
2. Братішко В. В. Механіко-технологічні основи приготування повнораціонних комбикормів гвинтовими грануляторами: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2017. 43с.
3. Братішко В. В. Узгодження конструкційних параметрів матриць гвинтових грануляторів кормів за тиском та пропускнуою



здатністю. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2014. Вип. 27. С. 187-191.

4. Boltianska N. Ways to Improve Structures Gear Pelleting Presses. *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 18(2). P. 23- 29.

5. Болтянська Н. І. Шляхи вдосконалення конструкцій шестеренних прес-грануляторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. 10(109). С. 104-110.

6. Болтянська Н. І., Комар А. С. Обґрунтування шляхів вдосконалення процесу гранулювання у прес-грануляторах з кільцевою матрицею. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2019. Вип. 199. С. 176 – 186.

7. Payne J., Rattink W., Smith T., Winowiski T. *Pelleting Handbook*. Sarpborg, Vorregaard Lignotech, 2001. 73 p.

8. Болтянська Н. І. Взаємодія пресуючого ролика і матеріалу в пресгрануляторі. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 260-269.

9. Комар А. С. Методика експериментальних досліджень установки для виготовлення пелет з перепелиного посліду. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 2.

10. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Дослідження технологічного процесу гранулювання кормів. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей VIII Міжнар. наук.-техн.конф. 24-25 лютого 2022 р., м. Київ*. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2022. С. 261-266.

11. Тримбач С. П., Степаненко С. П. Дослідження процесу механічної взаємодії пресуючого механізму гранулятора з матеріалом. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матер. V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21-22 лютого 2023 р.)*. Полтава: ПДАУ, 2023. С.173-177.

12. Sevostyanov M., Osokin A. Methodological Principles and Algorithm for Forming Technogenic Fibrous Materials with Low Bulk Density in a Flat-Matrix Extruder. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_5.

13. Комар А. С., Болтянська Н. І. Гранулювання органічних відходів рослинного походження на прикладі очерету. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2020. Вип. 10, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2020-1-21>

14. Boltianska N. I., Manita I. Y. Justification of the energy saving mechanism in the agricultural sector. *Engineering of nature management*. 2021. Vol. 1(19). P. 7–12.



15. Chłopek M. & Dzik Tomasz & Hryniewicz Marek. Determining the grip angle in a granulator with a flat matrix. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2014. Vol. 16. P. 337–340.

16. Hejft Roman Selected problems in construction of granulators for plant materials. Part 2. Granulating and briquetting matrix. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 64(1). P. 30–35.

17. Shkarpetkin E & Osokin A. Features of fibrous materials agglomeration in flat-matrix granulators. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. T. 698. No 066047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/6/066047>.

18. Болтянська Н. І. Взаємодія пресуючого ролика і матеріалу в прес-гранулятор. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 260–269. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-260-269>.

19. Мілько Д. О., Рогач Ю. П., Комар А. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гранулятора з нерухомою матрицею. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія Проблеми надійності машин*. 2018. Вип. 192. С. 202–209.

20. Рогач Ю. П. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гранулятора з нерухомою матрицею. *Вісник ХНТУСГ. Серія Проблеми надійності машин*. 2018. Вип. 192. С. 202–209.

21. Döring S. *Power from Pellets: Technology and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 226 p.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2023 р.

S. Trimbach¹, S. Stepanenko¹

¹ **Institute of mechanics and automatics of agroindustrial production of the national academy of agrarian sciences of Ukraine.**

THEORETICAL STUDIES OF THE MOVEMENT VELOCITY OF PARTICLES OF BULK MATERIAL IN THE GRANULATION PROCESS

Summary.

Theoretical research was aimed at studying the movement of particles of bulk material in the space between the rotating surface of a ring die of a granulator and a roller in order to determine their velocity of motion.

As a result, a hypothesis was proposed suggesting that the movement of particles of bulk material can occur only when the frictional force between the roller surface and these particles reaches a value sufficient to overcome the frictional forces between the particles themselves and the surface of the die. Based on this hypothesis, mathematical relationships were derived that allowed for the calculation of the values of angular and linear velocity of particle motion in the end gap between the roller and the die.



It was found that the angular velocity depends on the friction coefficient of the material on the roller and die, as well as the radius of the roller. The linear velocity of particles is lowest at the beginning of the granulation process and highest at the end of the process, and it also increases with the increase in the radius of the roller.

The analysis of the dependencies shown in Figure 5 indicates that at the entrance to the space between the roller and the die, the velocity ϑ_{ch} reaches its minimum value, while the maximum value is achieved when the angle φ is equal to 180 degrees at the exit.

The aim of this article is to analytically describe the process of particle movement within the space between the rotating surface of a roller and a ring die. Additionally, it aims to establish mathematical relationships for determining the velocities of particle displacement within this device.

The average angular velocity of particle motion, ω_{ch} , increases with an increase in the friction coefficient, f_d , of the material against the die surface, and it decreases with an increase in the friction coefficient, f_b , against the roller surface during the granulation process. Additionally, as the radius of the die, R_M , increases, the average angular velocity ω_{ch} decreases. For instance, the average velocity ω_{ch} can vary between 0 and 20 radians per second when R_M is 0.240 meters, f_b is 0.3, and with an increase in f_d up to 0.3.

As a result of the conducted theoretical research, equations were obtained that allow determining the values of angular velocity (ω_{ch}) and linear velocity (ϑ_{ch}) of the movement of material particles as they move in the space between the roller and die during the granulation process of bulk materials.

Keywords: bulk material, linear velocity, granulation process, friction, particle displacement, particle velocity.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-67-77

УДК 004.942: 621.926.4

О. В. Соломка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3997-4270

О. М. Ачкевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9878-6563

В. І. Ачкевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1537-6997

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування
Україниe-mail: oleksiisolomka@gmail.com, тел.: +380632558249

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

Анотація. У статті розглянуто застосування систем автоматизованого проектування в галузевому машинобудуванні, а також, як саме CAD/CAM/CAE-системи перетворюють сільськогосподарське машинобудування, надаючи інженерам та виробникам інструменти для створення більш сучасної, продуктивної та конкурентоспроможної техніки. Розглянуто роль цих систем у вдосконаленні технологічності, дизайну, виробництва та тестування сільськогосподарських машин, а також їх вплив на якість та продуктивність в аграрному секторі на прикладі методики дослідження руху зернового матеріалу в камері ротаційного подрібнювача та його контактної взаємодії з робочими органами ротаційного подрібнювача, що безпосередньо впливає на процес подрібнення, його якість та енергозатрати.

Ключові слова: CAD-системи, CAE-системи, САПР, SolidWorks, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, 3D-модель, ротаційний подрібнювач зернових матеріалів.

Постановка проблеми. Сільське господарство - це достатньо широка та вимоглива галузь світового господарства, яка динамічно розвивається з роками, адаптуючи сільськогосподарську техніку та технології до зростаючих потреб світового населення [11]. Сучасне сільськогосподарське машинобудування, наповнене вимогами до продуктивності, ефективності та сталого розвитку, стає більш складним та інноваційним завдяки розширенню використання систем графічного проектування (CAD), інженерних розрахунків, аналізу і симуляції фізичних процесів (CAE) та комп'ютерного управління виробництвом (CAM) [21, 24, 25].

На сучасному етапі досить актуальним є питання підвищення ефективності використання та зниження енергомісткості технологічного обладнання для переробки зернових матеріалів. Пошук і втілення у виробництво нових рішень стримується рядом як



об'єктивних, так і суб'єктивних факторів. Одним з таких факторів є відсутність необхідних даних про механічні властивості зернових матеріалів, в першу чергу, про властивості, що визначають показники їх міцності [12].

Аналіз останніх досліджень. Подрібнення зернових матеріалів на частки фіксованих розмірів з мінімально можливим вмістом пиловидної фракції є найбільш важливою та енергоємною операцією технологічного процесу виробництва комбікормів.

Враховуючи, що зернові матеріали споживаються переважно в подрібненому вигляді [2, 13], а витрати енергії на їх подрібнення в сумі загальних витрат становлять від 30% до 70% [4], то вибір способу подрібнення і типу подрібнювача, а також визначення його раціональних параметрів та режимів роботи з врахуванням фізико-механічних властивостей конкретної зернової культури суттєво впливають на ефективність процесу в цілому. Також варто зазначити, що для оптимізації процесу важливе значення має чітке дотримання вимог до стану готового продукту, бо надмірне подрібнення зернового матеріалу призводить до зростання енергозатрат і утворення значної кількості пиловидної фракції, яка погано засвоюється тваринами [12, 14].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Розробка методики дослідження технології роботи сільськогосподарських машин на прикладі дослідження руху зернини в камері ротаційного подрібнювача та аналіз результатів її зіткнення з робочими органами подрібнювача з застосуванням системи автоматизованого проектування SolidWorks.

Основна частина. Застосування CAD/CAM/CAE систем при розробці ротаційних подрібнювачів зерна для приготування кормів тварин відкриває широкі можливості для покращення ефективності та продуктивності цієї важливої сільськогосподарської техніки [1].

CAD системи дозволяють інженерам створювати детальні 3D-моделі сільськогосподарської техніки. Це сприяє оптимізації форм та розмірів пристроїв для досягнення максимальної продуктивності та зниження матеріаломісткості конструкції і споживання енергії.

CAE (Computer-Aided Engineering) системи дозволяють проводити аналіз міцності, динамічних та теплових характеристик ротаційних подрібнювачів. Це важливо для забезпечення довговічності та надійності обладнання в умовах високого навантаження.

CAD/CAM/CAE системи дозволяють віртуально тестувати різні конфігурації сільськогосподарської техніки перед фізичним виготовленням прототипів. Це допомагає заощадити час і кошти на дорогі фізичні експерименти.

CAM системи допомагають програмувати верстати з числовим керуванням (CNC) для виготовлення точних та складних деталей.

Незалежно від способу дії робочого органу на матеріал і виду деформації, на процес подрібнення впливають, в першу чергу, властивості зерна, що характеризують його спроможність чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх механічних сил (міцність). Ці властивості коливаються в широких межах і залежать від культури, сорту, вологості, розмірів зернини та ступеня її дозрівання, а також способу прикладання механічного навантаження (удар, стискання, стирання і т.д.).

В межах даного дослідження виконаємо проектування та розглянемо розроблену раніше конструкцію ротаційного подрібнювача зернових матеріалів [12].

При створенні 3D-моделі виробу сучасні системи автоматизованого проектування дозволяють використовувати широкий спектр інструментів і технологій. Основним робочим органом запропонованої конструкції є бильний елемент, який виготовляється з кутника стандартного сортаменту, який доступний на металобазах. Для створення в САД-системі моделі даного виробу використовуємо операцію витягування поперечного перерізу. Другою операцією створення моделі є додавання отворів з зенківкою для кріплення бильного елемента за допомогою гвинтів з потайною головкою (рис. 1).

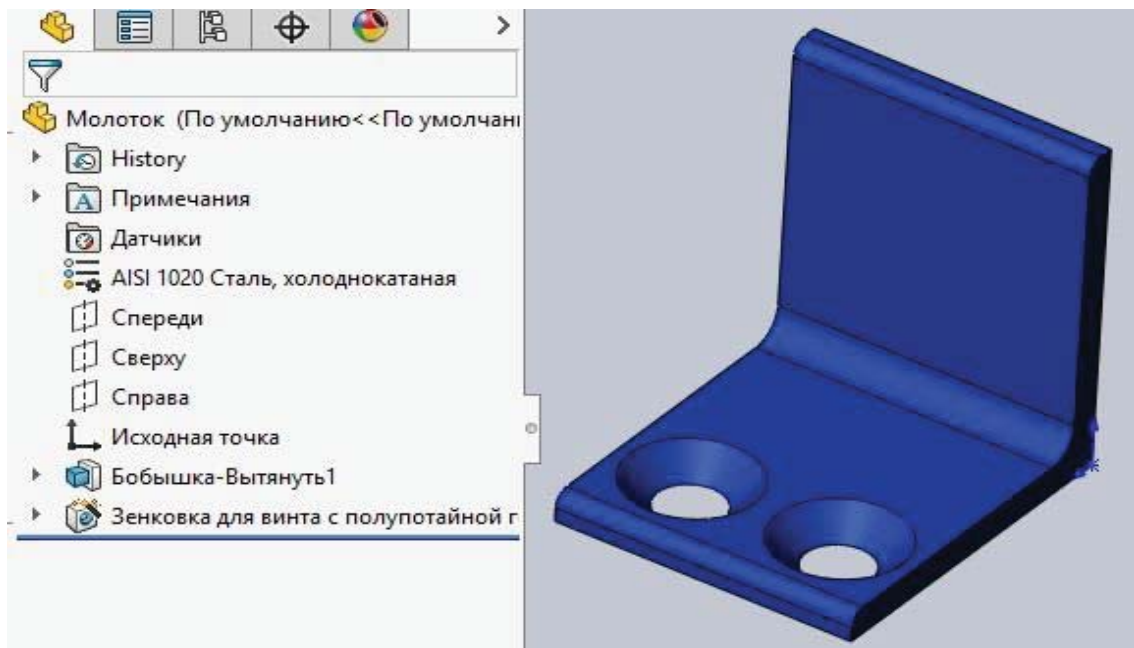


Рис. 1. Бильний елемент ротаційного подрібнювача зернових матеріалів

Змодельовані бильні елементи прикріплюються до диску, який обертається. У розробленій конструкції ротаційного подрібнювача зернових матеріалів диск з бильними елементами встановлюється безпосередньо на вал електродвигуна. Також у запропонованій конструкції передбачено регулювання частоти обертання диску подрібнювача за допомогою застосування частотного перетворювача для керування електродвигуном. Це дозволяє змінювати швидкість руху бильних елементів, що значно впливає на такі показники подрібненого зернового матеріалу, як модуль помелу, однорідність фракційного складу, вміст пиловидної фракції тощо [9, 12].

3D-модель диску створюємо операцією обертання профілю навколо осі. Після цього до моделі додаємо фаски і операцією вирізання розташовуємо кріпильні отвори для бильного елемента. Конструкцією передбачено, що на диску розташовуються 6 бильних елементів, тому за допомогою операції масиву елементів по колу виконуємо копіювання кріпильних отворів (рис. 2).

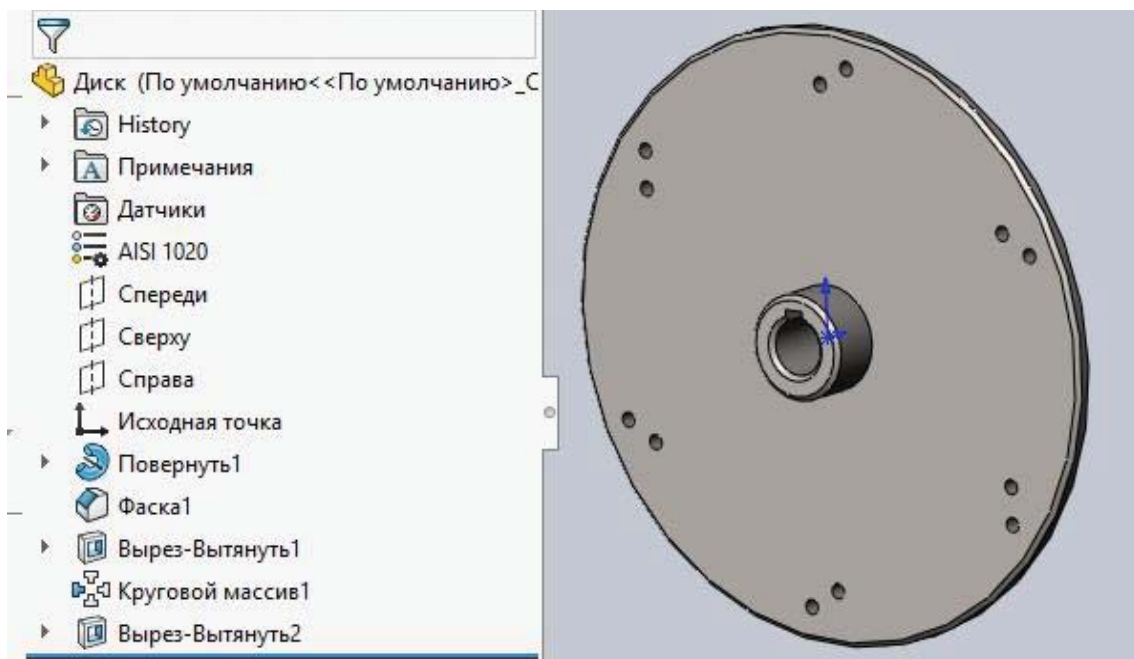


Рис. 2. Ротаційний диск подрібнювача зернових матеріалів

Всі елементи конструкції розміщуються в 6-гранному корпусі подрібнювача. Виготовити його можливо з окремих елементів або, за наявності відповідного оснащення, з листової сталі методом згинання. Саме останній метод і застосовано в межах даного дослідження. Для цього потрібно створити базовий елемент, а потім додати відповідні кромки. Після цього потрібно додати отвори для кріплень, вивантажувальне вікно і отвір для валу приводу диску подрібнювача. При застосуванні методу 3D-моделювання з листового матеріалу

система в будь який момент дозволяє перейти до відображення розгортки майбутньої деталі (рис. 3).

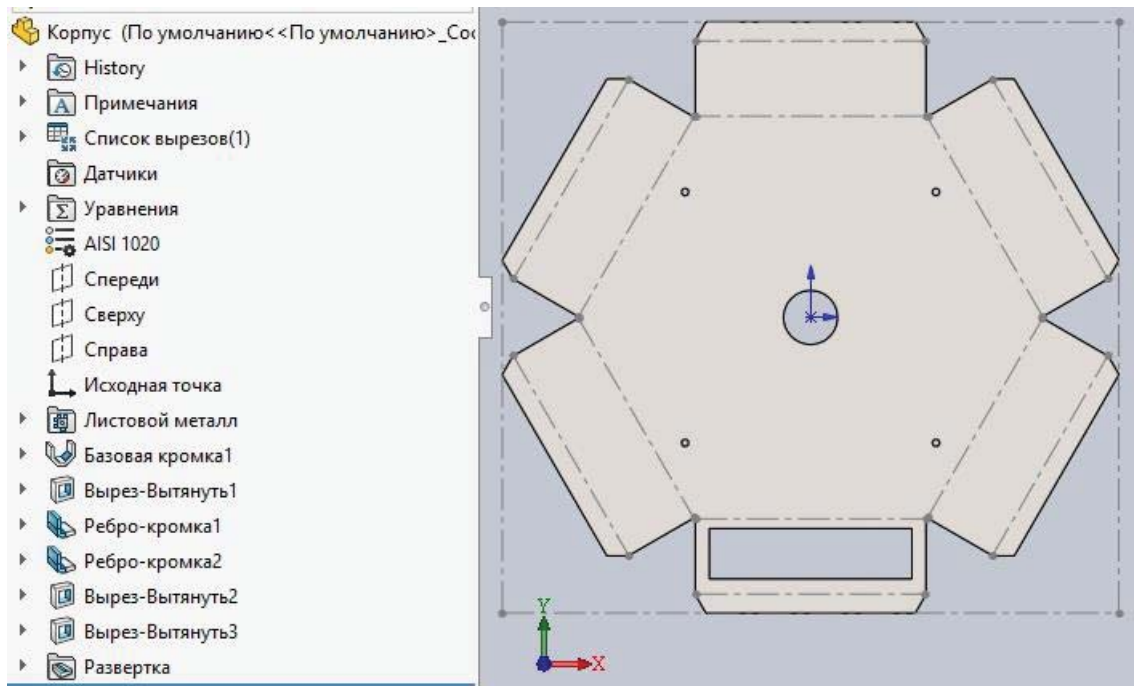


Рис. 3. Розгортка корпусу ротаційного подрібнювача

Обмежують камеру подрібнення решета (рис. 4) та ребристі деки (рис. 5), які встановлюються в корпусі навколо ротаційної частини подрібнювача. Для моделювання даних елементів застосовано інструменти витягування профілю, лінійні масиви та масиви елементів по колу.

Після моделювання всіх необхідних деталей ротаційного подрібнювача зернових матеріалів переходимо до середовища CAD-системи для створення складань деталей. Для початку потрібно виконати складання ротаційної частини. Для цього за допомогою інструментів спряжень встановлюємо розташування більших елементів на диску та додаємо з бібліотеки стандартних виробів кріпильні елементи. Для того щоб розташувати в складанні 6 комплектів більших елементів застосовуємо інструмент «масив елементів по колу» (рис. 6.).

В корпус подрібнювача встановлюються решета, деки, їх тримачі та ротаційна частина. Тому наступним етапом є створення складання корпусу подрібнювача та розміщення в ньому складання ротаційної частини (рис. 7).

У якості зернового матеріалу для годівлі сільськогосподарських тварин, а відповідно і для подрібнення можуть використовуватися зерна різних культур але найбільш поширеними для годівлі тварин набули такі культури, як пшениця, кукурудза, ячмінь, овес.

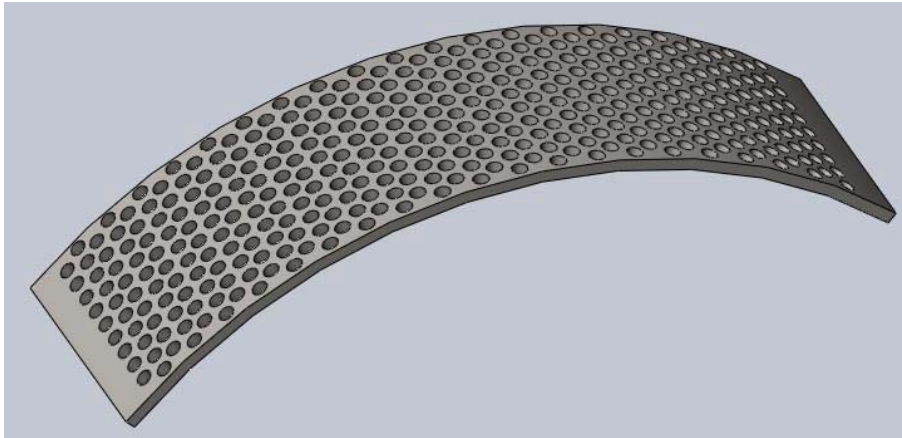


Рис. 4. Решето ротaцiйного подрiбнювача

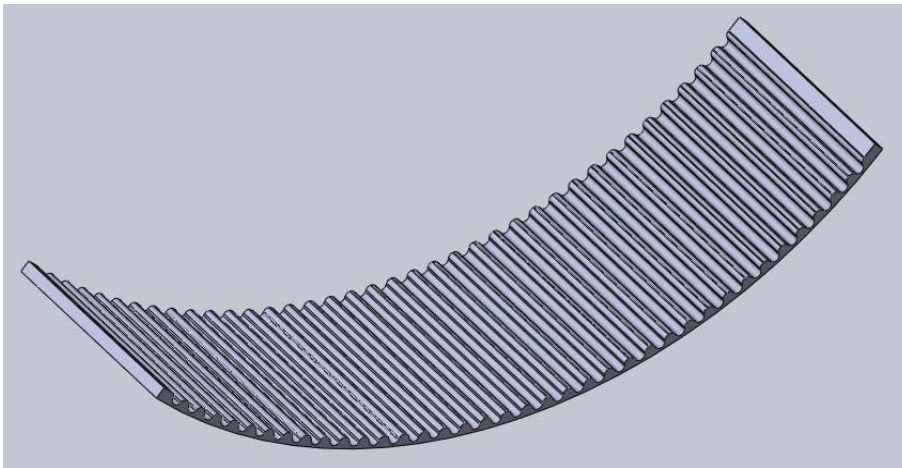


Рис. 5. Ребристі деки ротaцiйного подрiбнювача

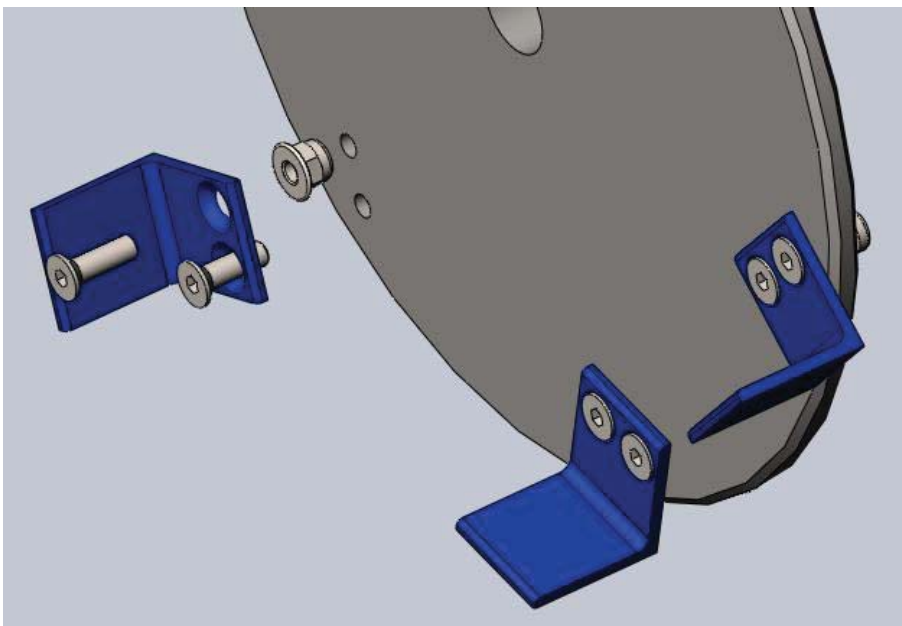


Рис. 6. Складання ротaцiйної частини подрiбнювача

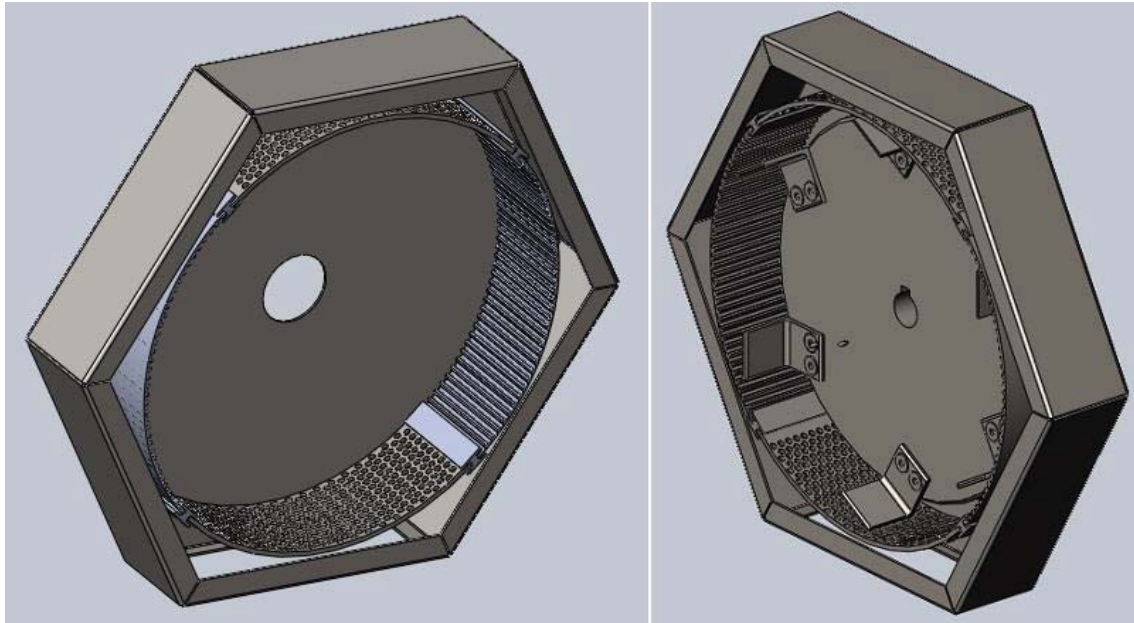


Рис. 7. Складання корпусу ротаційного подрібнювача зернових матеріалів

Для проведення даного експерименту оберемо зерно пшениці, змодельємо його орієнтовну геометричну форму (за допомогою інструменту «бобика/основа обертанням» профілю еліптичної форми навколо однієї з осей) згідно середніх розмірів [2, 4]. Після цього зернину потрібно розмістити в подрібнювальній камері в області завантажувального вікна, а саме трохи нижче осі обертання ротаційної частини подрібнювача.

Для проведення досліджень руху зернини в камері подрібнювача та процесу її контакту з робочими органами і поверхнями подрібнювача можна скористатися такими модулями системи автоматизованого проектування SolidWorks, як SolidWorks Motion та SolidWorks Simulation. Слід зазначити, що модуль SolidWorks Motion дозволяє не лише створювати базову анімацію, а і проводити дослідження руху механізмів та фізичних тіл з зазначенням взаємозв'язків елементів, сил, що діють в той чи інший момент часу, умов контакту, коефіцієнтів тертя тощо. SolidWorks Simulation – модуль, що забезпечує вирішення задач з моделювання лінійного та нелінійного статичного і динамічного аналізу, аналізу частоти, стійності, температурного аналізу, втомлюваності, тиску в ємностях, досліджень ударних навантажень, а також аналізу оптимізації [15, 17].

Для проведення досліджень потрібно задати матеріали всіх елементів конструкції, а також налаштувати матеріал або його фізико-механічні показники для зернини. В цілому зернина має досить складну і неоднорідну будову, але в межах даного дослідження припустимо, що зернина має рівномірну структуру і характеристики.

Наступним кроком задаємо силу тяжіння, яка буде діяти на всі елементи складання, в тому числі і на зернину для імітування її вільного падіння. Також встановлюємо умови контактної взаємодії зернини з поверхнями подрібнювача і налаштовуємо швидкість ротора додаванням двигуна з заданою постійною частотою обертання. Після проведення обчислень системою ми можемо отримати цілий ряд графічних та числових даних стосовно процесу зіткнення зернини з бильним елементом подрібнювача, наприклад, зміна швидкості та прискорення зернини, моменти та сили, які діють на неї, кінетична та потенційна енергія, напруження в зернині та деформації тощо (рис. 8).

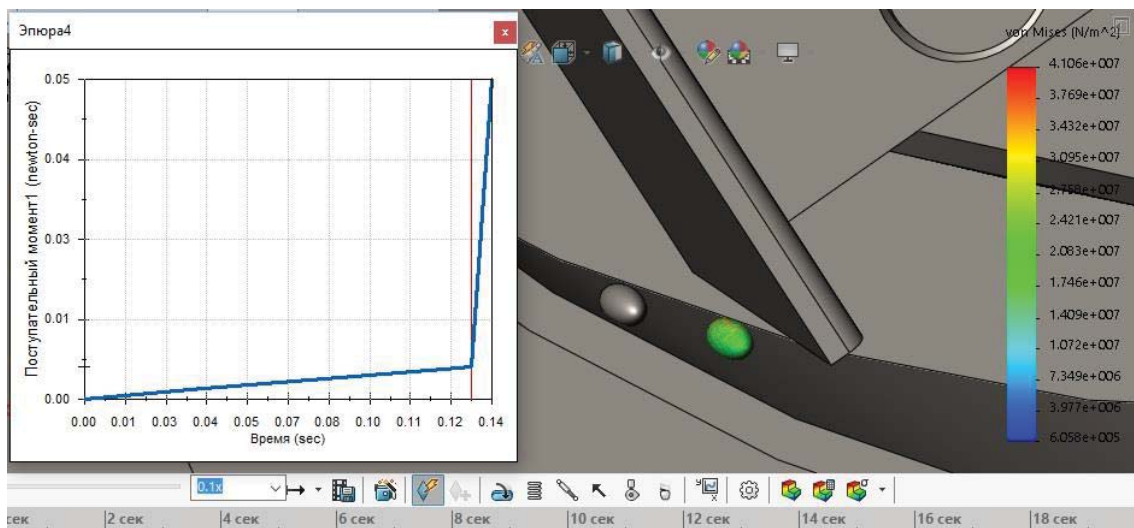


Рис. 8. Епюри зміни моменту, що діє на зернину та напружень в зернині в момент контакту її з поверхнею бильного елемента

Попередніми дослідженнями встановлено [8, 9, 10], що при статичних навантаженнях зусилля руйнування зерна пшениці сколюванням значно менше, ніж стисканням, причому при прикладенні сили вздовж зернини опір руйнуванню менший, ніж при поперечній дії. Суттєву роль відіграють і розміри зерна: збільшення розмірів зернини в межах сорту підвищує опір його руйнуванню. Збільшення вологості зерна знижує опір роздавлювання при стисканні, підвищуючи залишкову (пластичну) деформацію. У кукурудзи, навпаки, при збільшенні вологості до 25% опір зерна руйнуванню зростає, а при подальшому збільшенні вологості – падає. Найбільш міцним при стисканні є зерно ячменю, найменш міцним – вівса. Також встановлено, що при збільшенні швидкості прикладання навантаження пружні властивості зерна зростають, а пластичні – знижуються.

За допомогою сучасних систем автоматизованого проектування можна достатньо легко дослідити процес подрібнення зернових



матеріалів, наприклад, за розвитком напружень в зернині, змінюючи її геометричні форми, розміри, розташування в момент удару та її фізико-механічні властивості.

Висновки. Дослідження механічних властивостей зерна лише з застосуванням САД/САЕ систем не дозволяють отримати повну і достовірну оцінку показників його міцності в залежності від сорту, форми, вологості та характеру прикладання навантажень, але отримані результати доцільно використовувати, як для підтвердження попередніх так і для подальших теоретичних досліджень.

В будь-якому дослідженні з застосуванням систем автоматизованого проектування можна швидко змінювати вихідні характеристики як самого технологічного процесу так і матеріали та геометричні форми елементів для досягнення оптимальних результатів.

Список використаних джерел

1. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон: Олді-плюс, 2018. 252 с.
2. Механизация приготовления кормов: Справочник / Под ред. В. И. Сыроватка. Москва: Агропромиздат, 1985. 368 с.
3. Механіка матеріалів і конструкцій. Лаб. роботи. Навч. посібник для вузів / І. А. Цурпал, С. І. Пастушенко, М. П. Барабан, М.В. Швайко. Київ: Аграрна освіта, 2001. 272 с.
4. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / О. М. Царенко, Д. Г. Войтюк, В. М. Швайко та ін.; За ред. С. С. Яцуна. Київ: Мета, 2003. 448 с.
5. Мороз С. М., Васильковська К. В., Лещенко С. М. Використання САД-програм при проектуванні сільськогосподарських машин. *Сільськогосподарські машини*. 2023. Вип. 49. С. 15-21. <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1010>.
6. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навч. посібник. Луцьк: Вежа, 2018. 172 с.
7. Ревенко І. І., Брагінець М. В, Ребенко В. І. Машини та обладнання для тваринництва. Київ: Кондор, 2012. 731 с.
8. Соломка О. В. Аналіз результатів експериментальних досліджень процесу подрібнення зерна. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2012. Вип. 120. С. 402-410.
9. Соломка О. В., Ковбаса В. П. Аналіз процесу подрібнення зернових матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2009. Вип. 78. С. 132-140.



10. Соломка О. В., Ковбаса В. П. Визначення показників міцності зернових матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2010. Вип. 96. С. 267-278
11. Соломка О. В., Новицький А. В. Моніторинг забезпечення сільськогосподарських підприємств технікою для кормовиробництва. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2014. Вип. 196, ч.1. С. 376-382.
12. Соломка О. В., Ковбаса В. П., Соломка В. О. Обґрунтування параметрів і режимів роботи ротаційного подрібнювача зерна. Київ, 2016. 139 с.
13. Технологія виробництва продукції тваринництва / О. Т. Бусенко та ін. Київ: Агроосвіта, 2013. 492 с.
14. Трикін Д. М., Мороз С. М., Васильковська К. В., Карпушин С. О. Використання сучасних систем САПР при проектуванні сільськогосподарських машин. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2019. Вип. 49. С. 233-241. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.233-241>.
15. Gaurav Verma, Matt Weber. SolidWorks Simulation 2020 Black Book. CAD/CAM/CAE Works. 2020. 428 p.
16. James D. Bethune, Nathan Brown. Engineering Design and Graphics with SolidWorks® 2023. US: Peachpit Press, 2023. 1824 p.
17. Paul Kurowski. Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2022. Kansas: SDC Publications, 2022. 582 p.
18. Paul Tran. SOLIDWORKS 2020 Basic Tools. Kansas: SDC Publications, 2020. 681 p.
19. Paweł Keška. SOLIDWORKS® 2021: Part, Modeling, Assemblies and Drawings. Warszawa: Cadvantage, 2021. 1586 p.
20. Randy H. Shih. SOLIDWORKS 2020 and Engineering Graphics. Kansas: SDC Publications, 2020. 727 p.
21. Selvi, Kemal Çağatay, Önder Kabas. Use of SOLIDWORKS in designing agricultural machines (a sample: rotary tiller). *ANNALS of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2018. T.16. P. 101-106.
22. Subrata K. R. Mandal, Basudeb Bhattacharyya, Somenath Mukherjee, P. Chattopadhyay. Use of Cad Tool for Design and Development of Rotavator Blade. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2014. Vol. 20 (2). P. 171-177. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.20.02.11564>.
23. Tayseer Almattar. Learn SOLIDWORKS 2020. Birmingham: Packt Publishing, 2019. 576 p.
24. Vegad G. M., Yadav R. Design analysis and optimization of rotary tiller blades using computer software. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2018. Vol. 49, №1. P. 43-49.



25. Zi Yue Wu, Shuai Zhang, Ting Gao. Design of 3D Modeling for the New Hammer Mill Based on the SolidWorks. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 224 P. 320-324. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.224.320>.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2023 р.

O. Solomka¹, O. Achkevych¹, V. Achkevych¹

¹ National university of life and environmental sciences of Ukraine

APPLICATION OF AUTOMATED DESIGN SYSTEMS IN AGRICULTURAL ENGINEERING

Summary

The article discusses the use of computer-aided design systems in industrial engineering, as well as how exactly CAD/CAM/CAE systems are transforming agricultural engineering, providing engineers and manufacturers with the tools to create more modern, productive, and competitive equipment. The role of these systems in improving the manufacturability, design, production and testing of agricultural machines, as well as their impact on the quality and productivity in the agricultural sector is considered using the example of a methodology for studying the movement of grain material in the rotary chamber of a chopper and its contact interaction with the working bodies of a rotary chopper, which directly effects on the grinding process, its quality and energy consumption.

The article examines the use of automated design systems in industrial engineering, as well as how exactly CAD/CAM/CAE systems transform agricultural engineering, providing engineers and manufacturers with tools to create more modern, productive, and competitive equipment. The role of these systems in improving the technology, design, production, and testing of agricultural machines, as well as their impact on quality and productivity in the agricultural sector, is considered. on the grinding process, its quality and energy consumption.

CAD systems allow engineers to create detailed 3D models of agricultural machinery. This helps to optimize the shapes and sizes of the devices to achieve maximum productivity and reduce the material consumption of the structure and energy consumption.

CAE (Computer-Aided Engineering) systems allow analysis of strength, dynamic and thermal characteristics of rotary shredders. This is important to ensure the durability and reliability of the equipment under high load conditions.

CAD/CAM/CAE systems allow virtual testing of various configurations of agricultural machinery before physical production of prototypes. This helps to save time and money for expensive physical experiments.

Studying the mechanical properties of grain only using CAD/CAE systems does not allow obtaining a complete and reliable assessment of its strength indicators depending on the variety, shape, humidity, and the nature of the application of loads, but the obtained results should be used both to confirm previous and for further theoretical studies.

Keywords: CAD systems, CAE systems, SolidWorks, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, 3D-model, rotary Hammer Mill for grain.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-78-98

УДК 631.364:621.311.243

С. В. Коробка ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-4717-509X
І. Г. Стукалець ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-7107-4865
С. В. Сиротюк ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-9966-6299
О. Г. Скляр ² , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-0456-2479
Р. В. Скляр ² , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-1547-5100
Б. В. Болтянський ² , канд. техн. наук	ORCID 0000-0003-2072-4025
С. М. Баранович ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-8671-6517

¹ Львівський національний університет природокористування² Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasy@ukr.net, тел.: +380989699534

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФРУКТІВ У ГЕЛІОСУШАРЦІ

Анотація. В статті запропоновано математичну модель процесу сушіння фруктів у геліосушарці та методику для розрахунку інтенсивності сушіння. В поданій методиці використовуються спрощені моделі для розрахунку характеристики протікання процесу сушіння та обміну теплом і масою між теплоносієм і висушуваним матеріалом, де враховується, що волога в матеріалі знаходиться у рідкому стані, тепло- та масообмін між теплоносієм і матеріалом відбувається шляхом конвекції, температурний градієнт матеріалу є невеликим, а переміщення вологи всередині матеріалу зумовлене дифузією. Розроблено і науково обґрунтовано рекомендації щодо прогнозування тепломасообмінних процесів, вдосконалення технології і обладнання для сушіння фруктів у геліосушарці.

Ключові слова: сонячна енергія, геліосушарка фруктів, температура, вологість, тепломасоперенесення, інтенсифікація, конвективне сушіння.

Постановка проблеми. Значна частина обсягів сушіння фруктів припадає на геліосушальні камери періодичної дії (ГКПД). Умови поліпшення роботи ГКПД і підвищення якості сушіння – автоматизація цього процесу. Проте, для інтенсифікації процесу сушіння – ведення його у режимах, близьких до оптимальних, наявні системи керування малоефективні. Вирішити це завдання можна, застосовуючи системи керування з урахуванням стану матеріалу із використанням мікропроцесорних засобів і ЕОМ. Розробка економічно ефективних систем керування сушінням фруктів на базі нових технічних засобів автоматизації і обчислювальної техніки вимагає глибокого вивчення сушильних камер, як об'єктів керування і



побудови адекватних математичних моделей. Розробки науково обґрунтованих математичних моделей об'єктів керування є тим фундаментом, на якому зводиться весь комплекс «Алгоритм – Програма – ЕОМ – Об'єкт».

Аналіз літератури [1,2,14] і практика проектування і експлуатації систем автоматичного регулювання процесу сушіння фруктів свідчать, що дослідження ГКПД як об'єктів керування та їх математичне обґрунтування виконувались на недостатньо високому рівні і лише для окремих каналів регулювання, що неприпустимо і не відповідає вимогам, які ставляться до математичних моделей для цифрових систем оптимального керування. Цим зумовлений розгляд у цій статті розробки математичної моделі ГКПД.

Схеми побудови математичних моделей, придатних для кожного конкретного випадку не існує, оскільки різні технологічні процеси сушіння (сушильні камери) мають специфічні особливості.

Перевага моделювання із використанням фізичних законів сушіння полягає у тому, що воно дає змогу зрозуміти фізичні характеристики процесу; параметри і змінні у цьому випадку мають зрозумілий фізичний зміст. Навіть у випадку розв'язання задачі ідентифікації, як процесу експериментального визначення математичних моделей на основі знання вхідних і вихідних сигналів попередньо потрібно мати параметричну фізичну модель.

Накопичені експериментальні дані по визначенню динамічних характеристик ГКПД сумнівні щодо використання їх: для синтезу високоякісних оптимальних систем керування. Так, у літературних джерелах для експериментального визначення динамічних характеристик ГКПД різні автори наводять різні кількісні оцінки тих самих параметрів, причому, конкретні значення їх іноді сумнівні. Наприклад, для коефіцієнта підсилення по каналу регулювання: температура пари у колекторі – температура агента сушіння по сухому термометру ($t_n \rightarrow t_c$), – пропонуються значення у діапазоні від 0,22 до 0,46 ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$), тобто для одержання в середині камери температури 60°C при середньому коефіцієнті підсилення 0,3 температура у колекторі повинна становити 20°C або тиск насиченої пари понад $15 \text{ кгс}/\text{см}^2$, що не відповідає технічним характеристикам ГКПД.

Дослідження не дали точних значень динамічних характеристик самих сушильних камер, тому що у всіх випадках був значним вплив динаміки використовуваних для вимірювання датчиків. На точність одержаних даних впливала наявність ненульових початкових умов, оскільки у процесі сушіння фруктів при визначенні кривих розгону неможливо домогтися стабілізації решти параметрів.



Суперечливі експериментальні дані щодо динаміки каналів: витрати пари на зволожувальні труби – температура агента сушіння за «сухим» термометром ($G_n \rightarrow t_c$) і температура пари у колекторі – температура агента сушіння за змоченим термометром ($t_n \rightarrow t_m$). Дослідження перехідних функцій за цими перехресними каналами потрібне для визначення спільного ступеня зв'язку між двома регульованими величинами t_c і t_m .

Немає спільної думки і щодо апроксимації сушарок як поєднання типових елементів системи автоматичного регулювання. Під час експериментального вивчення сушильної камери, як об'єкта регулювання дуже важко дослідити вплив на динамічні показники її конструктивних технологічних параметрів і властивостей фруктів.

Таким чином, аналіз літературних джерел з питань математичного моделювання геліосушільних камер дає підстави вважати потрібною аналітичну розробку математичної моделі ГКПД, тому, що одержана експериментально модель виявилась неефективною для синтезу цифрових систем керування.

Головні вимоги, що ставляться до математичної моделі при її розробці – відбиття тих властивостей функціонування ГКПД, і відомості про які потрібні для розробки алгоритмів керування, хоча бажано застосовувати цю модель і для визначення оптимальних технологічних режимів на стадії проектування сушильних агрегатів.

Аналіз останніх досліджень. Одним з найбільш поширених способів природної сушіння фруктів в Україні є сушіння в навісах. У стінах навісу є отвори для забезпечення постійного повітрообміну, а всередині навісу встановлюють кілька рядів жердин для розвішування фруктів. Висушений продукт відрізняється гарним смаком, однак при цьому способі тривалість сушіння становить 15–20 діб.

В Україні застосовується штабельний спосіб сушіння фруктів [3]. Цей спосіб заснований на висушуванні фруктів із застосуванням ошпарювання його киплячим розчином лугу і наступним обкурюванням сірою відразу після лужної обробки. Потім фрукти штабелюється в підносах і затінюється поверхнево тканинними завісами. Через кілька днів підв'ялені плоди перенавантажують на інші підноси і переставляють верхні вниз, а нижні нагору. Тривалість процесу сушіння коливається від 8 до 15 днів.

Зазначені способи сушіння мають такі недоліки: процес дуже тривалий; великі витрати ручної праці; висока вартість висушених фруктів.

Авторами [4] досліджена технологія сушіння фруктів в тунельних сушарках фірми «Чачак» (Сербія). Дослідження проводилися в основному на яблуках з бланширувкою в 0,5-1%-ному розчині NaOH при температурі 95-99°C впродовж від 2 до 30 с., причому в якості



контролю сушили небланшировані яблука. Сушіння проводилася при температурі сушильного агента близько 78°C і швидкості сушильного агента 5 м/с.

Результати дослідження показали, що тривалість процесу сушіння до стандартної вологості в бланшированому і не бланшированому вигляді вирівнюється, однак яблука мають більш світле забарвлення.

Більш стабілізована забарвлення світлих сортів фруктів досягається під час обкурювання впродовж 2 годин, а також при застосуванні мокрої сульфитації до змісту сірчистого ангідриду у фруктах 0,06-0,08%.

Автори [5] пропонують комбінований штучний і повітряно-сонячний режим сушіння фруктів. Штучне сушіння вони пропонують проводити в тунельній сушарці при температурі $80-82^{\circ}\text{C}$ до вологості продукту 25-30%, а потім решту кількість вологи видаляти при подачі повітря навколишнього середовища зі швидкістю 5 м/с або «досушувати» при температурі повітря $40-50^{\circ}\text{C}$. Тривалість процесу сушіння в тунельній сушарці 12 годин, а в повітряно-сонячній установці – 15 годин.

Однак такому методу сушіння притаманний також ряд недоліків:

- великі енергетичні витрати в процесі виробництва (на 1 т сушеного фруктів витрата палива складає 240-360 л і електроенергії 146-224кВт·год.);
- труднощі контролю процесу сушіння в тунельних сушарках, так як неможливі відбір проб і візуальний огляд в процесі сушіння;
- при зазначеному температурному режимі сушіння невелике від відхилення (підвищення) температури, сприяє карамелізації цукру в фруктах.

Київським інститутом технічної теплофізики проведено сушіння фруктів на сушарці СКО-90 [6]. Продуктивність СКО-90 по фруктам 75-80 кг/год., витрата палива 40 кг/год. Основним елементом сушильної установки є робоча камера, в якій розташовано декілька ярусів контейнерів для висушуваної сировини.

Одним з недоліків цієї установки є укладання фруктів для сушіння щільним шаром, тому що при цьому теплоносії омиває лише поверхню шару, проникаючи всередину матеріалу на незначну глибину. До того ж при переробці з верхнього конвеєра на нижній, фрукти звальюються на купу, що призводить до погіршення якості одержуваної продукції.

Автори роботи [7] досліджували осцилюючий режим сушіння фруктів з періодичним обдувом його маси теплоносієм з температурою 140°C , а потім холодним повітрям. Слід відзначити, що температура теплоносія значно перевищує допустимі норми.



Певний інтерес представляє дослідження процесу сушіння фруктів конвективним способом автором роботи [8,9], посвяченої розробці сушильної установки безперервної дії, з примусовим дискретним переміщенням матеріалу в процесі сушіння.

До недоліків цієї установки слід віднести:

- використання у великому обсязі ручної праці;
- значна витрата тепла на нагрів конструктивних елементів сушильної камери.

Конструкції розглянутих вище сушильних установок не отримали широкого впровадження у виробництво через зазначених вище недоліків.

Останнім часом отримує розвиток конвективний метод сушіння при нагріванні повітря за рахунок використання сонячної енергії [10, 11]. Авторами роботи [12] розроблена сонячна фруктосушильна установка площею 120 м². При безперервному режимі сушіння продуктивність сушіння складає 0,5-0,6 кг сухофруктів в день з 1 м² закленої поверхні.

У геліоустановках типу «гарячий» ящик влаштовані гофровані котли, в яких сонячні промені, що падають на гофровану поверхню, зазнають в гофрах ряд багаторазових віддзеркалень, що призводить до збільшення їх поглинання і підвищенню ККД установки. У робочій камері продукт висушується повітрям, нагріти у вищевказаній установці. При цьому тривалість сушіння нарізаних яблук скорочується в 2-3 рази в порівнянні з природною сушкою, фруктів, персиків і абрикосів в 3-5 рази, чорносливу та аличі в 10 разів тощо.

Основними елементами цієї установки зачорнений гофрованих – перфорований металевий лист товщиною 0,5 мм, що знаходиться усередині дерев'яного ящика, покритого зверху подвійним віконним склом і сушильна камера. Нагрітий у ящику до температури 333-352 К повітря нагнітається вентилятором і з швидкістю 1,3 м/с надходить в сушильну камеру. Установка складається з 20 секцій. Робоча поверхня однієї секції дорівнює 6 м². Секції орієнтовані на південь під кутом 25° до горизонту. Сушильна камера установки розміром 1,5-2 м розрахована на завантаження 500-600 кг сирової продукції. Всередині камери поміщаються 25 сітчастих дек, розташованих на відстані 8 см. Нагріте повітря надходить в сушильну камеру через отвори, розташовані під нижнім деком, проходить через шар фруктів і прямує в атмосферу. Таким чином здійснюється конвективна сушіння фруктів.

Недоліками даної сушарки є мала продуктивність, великі втрати тепла, громіздкість конструкції [14].

Крім того, тривалість одного завантаження камери складає 2-3 дні в залежності від виду фруктів, за цей час відбувається псування



вологих фруктів. Якість отриманих сухофруктів нище, чим при сушінні традиційним способом.

У США побудована сонячна сушильна установка з площею геліоповітрянагнітачем 8 м^2 , орієнтованих на південь і установлених під кутом 45° . Кількість повітря, що подається в сушильну камеру становить $0,13 \text{ м}^3/\text{с}$. При цих умовах вологість kwasолі була знижена у верхньому ярусі з 20% до 13,5%, в нижньому шарі до 10,5%, а час сушіння зменшилася в 4 рази в порівняно з природним способом [7].

Виходячи з вище викладеного можна зробити висновок про перспективне застосування сонячної енергії в процесах сушіння харчових продуктів, причому особливо ефективним є застосування сонячної енергії по всій території України [13-20].

Основним завданням є подальше дослідження процесу сушіння в геліосушарці з метою розробки високопродуктивної установки, яка може працювати цілодобово впродовж всього сезону збирання фруктів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою даного дослідження є розроблення математичної моделі та дослідження тепломасообмінних характеристик під час сушіння фруктів з урахуванням руху зони випаровування для нестационарного режиму сушіння у геліосушарці.

Основна частина. У агропромисловому комплексі геліотермічні установки знайшли широке застосування. Наприклад, для сушіння рослинної сировини, зокрема фруктів, активно використовують сонячну енергію для потреб сушильного господарства. Для зони західного Полісся можна повноцінно застосовувати такий вид зневоднення матеріалу. Зокрема, в Львівському національному університеті природокористування на кафедрі енергетики була розроблена геліосушарка з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором, що є періодичною системою використання сонячної енергії [8]. Функціонально-параметрична схема геліосушарки наведена на рисунку 1.

Аналітичний спосіб розробки технології сушіння та сушильної установки на основі математичної моделі, який ґрунтується на фізичних законах процесу сушіння, дає змогу вивчати ГКПД в цілому і виявляючи нові залежності, властивості і внутрішні зв'язки, одержувати кількісну оцінку ступеня впливу збурюючих і регулювальних дій, а також визначати коефіцієнти математичної моделі із конструктивно-технологічних характеристик камери.

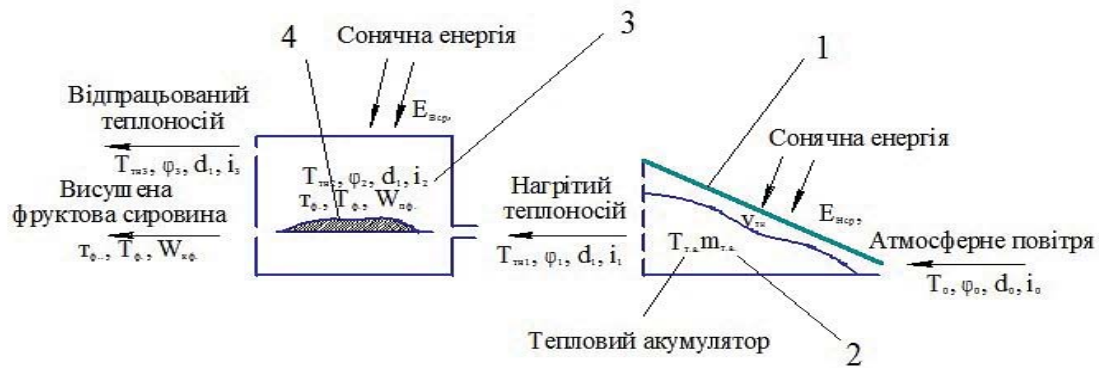


Рис.1. Функціонально-параметрична схема геліосушарки:
1 – повітряний колектор; 2 – тепловий акумулятор; 3 – сушильна камера; 4 – фруктова сировина

Розроблена за таким способом математична модель хоча й має пізнавальну цінність, але нечутлива до впливу випадкових неконтрольованих факторів. Одержані теоретичні залежності не можуть враховувати зміни конструктивних і технологічних характеристик через зношеність і старіння обладнання, а також неправильну експлуатацію. Все ж таки ця модель, доповнена статистичними характеристиками випадкових збурюючих впливів і шумів вимірювальної апаратури, призначається для використання у структурі системи керування, тому що, застосовуючи принцип оптимальної фільтрації і ґрунтуючись на визначених вихідних параметрах і розробленій моделі, можна оцінити вектор стану ГКПД, який використовується для розробки керуючого впливу.

Повітряні колекторні ГКПД – технологічні об'єкти, у яких висушують матеріали у середовищі повітря (вологого повітря) із підведенням теплоти і видаленням вологи комп'ютерним способом. Конвективне сушіння фруктів – складним нестаціонарний процес теплообміну. З одного боку воно характеризується тепло- і вологопровідністю фруктів, тобто внутрішнім тепло- і вологообміном у висушуваній сировині і з другого – тепловіддачею від агента сушіння до фруктів і вологовіддачею від фруктів до агента сушіння, або зовнішнім тепло- і вологообміном. При цьому спостерігається нерівномірність температурних і вологісних полів за об'ємом сушильних камер. Зокрема ґрунтуючись на початковій формалізації апріорних даних про сушильну камеру, складемо узагальнену структурну схему (рис 1).

На ній ГКПД апроксимована еквівалентною моделлю, складеною із декількох взаємопов'язаних місткостей із зосередженими параметрами.

Вихідні параметри моделі:

t_c – температура сушильного агента за сухим термометром, °С;



X – вологовміст сушильного агента, кг/кг;

U – вологовміст фруктів, кг/кг;

t_{ϕ} – температура фруктів, °С.

Проміжні параметри:

t_k – температура колектора, °С;

t_{ozi} – температура i -го огороження, °С.

Вхідні параметри:

t_n – температура пари у колекторі, °С;

G_n – кількість пари, яка надходить через зволожувальні труби, кг/с;

v – швидкість циркуляції сушильного агента у камері, м/с;

L_0, L_1 – витрати повітря, яке надходить до камери і виноситься з неї, кг/с;

Збурюючі фактори:

$t_{нов}$ – температура свіжого повітря, °С;

t_{zi} – температура зовнішнього середовища i -го огороження, °С.

Теплоємність із боку подавання теплоти – теплоємність колектора, а з боку споживання теплоти – агента сушіння, фруктів, огорожень. Окремо виділена ємність агента сушіння, яка характеризується матеріальним балансом вологи в ньому. Враховуючи закон зберігання енергії, можна перехідний процес для теплоємності колектора описати рівнянням:

$$\delta_c \alpha_1 F_{вн} (t_n - t_k) - C_3 \alpha_{зв} F_{pc} (t_n - t_k) = C_k m_k \frac{dt_k}{d\tau}, \quad (1)$$

де δ_c – коефіцієнт теплових втрат колектора (наприклад, втрати теплопровідності через підвіски колектора, тощо);

α_1 – середнє значення коефіцієнта теплопередачі від конденсуючої пари до внутрішньої поверхні колектора, Вт/(м²·°С);

$F_{вн}$ – площа внутрішньої поверхні колектора, м²;

C_3 – коефіцієнт стану тепловіддавальної поверхні колектора;

$\alpha_{зв}$ – зведений коефіцієнт тепловіддачі ребристої поверхні колектора, Вт/(м²·°С);

F_{pc} – площа повної зовнішньої поверхні колектора, м²;

C_k – питома теплоємність металу колектора, Дж/(кг·°С);

m_k – маса колектора, кг; τ – час, с.

Коефіцієнт тепловіддачі α_1 рекомендується визначати за критеріальним виразом Д. А. Лабунцева:

$$Re_n = 0,95 Z_n^{0,78} \varepsilon_t, \quad (2)$$

що одержаний з відомого виразу Нуссельта для визначення коефіцієнта тепловіддачі за умов плівкової конденсації практично нерухомої чистої пари [5]. Якщо подати критерії Re_n (2) через величини, які входять до нього, то одержимо вираз для розрахунку



коефіцієнта теплопередачі від пари, яка конденсується, до внутрішньої поверхні колектора:

$$\alpha_1 = 0,95 \frac{g^{0,26} \lambda_{p.n}^{0,78} r^{0,22} \rho_p^{0,22} \varepsilon_t}{v_{p.n}^{0,32} h^{0,22} (t_n - t_k)^{0,22}}, \quad (3)$$

де g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

$\lambda_{p.n}$ – коефіцієнт теплопровідності конденсату із температурою насичення, Вт/(м·°С);

$v_{p.n}$ – кінематична в'язкість конденсату із температурою насичення, м²/с;

r – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

ρ_p – щільність конденсату, кг/м³;

h – висота колектора, м;

ε_t – поправка, яка враховує залежність фізичних параметрів конденсату від температури [5].

Зведений коефіцієнт $\alpha_{зв}$ тепловіддачі ребристої поверхні колектора пропонується визначати за методикою, наведеною М.Ю. Лур'є [7]. Цей коефіцієнт – функція швидкості агента сушіння і його можна подати у такому вигляді:

$$\alpha_{зв} = K v^m, \quad (4)$$

де K і m – визначають із загального виразу для $\alpha_{зв}$, що одержують за наведеною методикою.

Тоді вираз (1) динаміки колектора можна записати у такому вигляді:

$$\delta_c \alpha_1 F_{вн} (t_n - t_k) - C_3 K v^m F_{pc} (t_n - t_k) = C_k m_k \frac{dt_k}{d\tau}, \quad (5)$$

що дозволить виявити вплив швидкості агента сушіння на процес теплообміну між колектором і агентом сушіння.

Для складання диференційованого рівняння теплового балансу ємності агента сушіння припускають, що через інтенсивну рівномірну циркуляцію сушильного агента його температура і вологовміст однакові за простором зони сушіння, де підтримуються і контролюються їх задані властивості. У такому випадку, виходячи із структурної схеми (рис. 1), рівняння динаміки набуває вигляду:

$$C_3 \alpha_{зв} F_{pc} (t_k - t_c) + G_n i_n + L_0 (C_{нов} + C_n X_{нов}) t_{нов} Br_0 - C_2 \alpha_{оп} F_{оп} (t_c - t_\phi) - C_2 \sum_{i=1}^n C \alpha_{оз.i} F_{оз.i} (t_c - t_{оз.i}) - C_2 L_1 (C_{нов} + C_n X) t_c = (V_{a.c} \rho_{a.c} C_{a.c} + m_m C_m) \frac{dt_c}{d\tau}, \quad (6)$$

де i_n – ентальпія 1 кг пари, Дж/кг; $C_{нов}$;

C_n – питома ізобарна теплоємність сухого повітря і водяної пари, Дж/(кг·°С);

$X_{нов}$ – вологовміст свіжого повітря, кг/кг;



r_0 – прихована теплота пароутворення, Дж/кг;

C_2 – коефіцієнт неврахованих витрат теплоти, які покриваються колектором [5, 8];

α_{dp} – коефіцієнт тепловіддачі від агента сушіння до фруктів, Вт/(м²·°C);

F_{dp} – площа поверхні теплообміну фруктів, м²;

C – коефіцієнт, який враховує умови роботи сушильних камер;

n – кількість огорожень;

$\alpha_{oz.i}$ – коефіцієнт теплообміну агента сушіння з i -м огороженням, Вт/(м²·°C);

$F_{oz.i}$ – площа внутрішньої поверхні i -го огороження, м²;

$V_{a.c}$ – об'єм агента сушіння, м³;

$\rho_{a.c}$ – щільність агента сушіння, кг/м³;

$C_{a.c}$ – питома ізобарна теплоємність агента сушіння, Дж/(кг·°C);

m_m – маса металу у камері, кг;

C_m – питома теплоємність металу у камері, Дж/(кг·°C).

У правій частині (6) $m_m C_m (dt_c/d\tau)$ характеризує приріст кількості теплоти металу у сушарці (екранів, повітроводів, треків), який з метою спрощення загального математичного опису сушарки віднесений до ємності агента сушіння. Це спрощення зроблено на тій підставі, що наведений матеріал сушарки практично повністю знаходиться у середовищі агента сушіння, його теплообмін здійснюється головним чином з агентом сушіння і його температура через відносно значну теплопровідність швидко досягає значень температури агента сушіння.

Вираз $V_{a.c} (dt_c/d\tau)$ характеризує зміни кількості теплоти $dQ_{a.c}$ агента сушіння за нескінченно малий проміжок часу $d\tau$:

$$\rho_{a.c} = \frac{0,622P(1+X)}{R_{нов}(273+t_c)(0,622+X)},$$

де P – барометричний тиск, Па; $R_{нов}$ – газова стала повітря, Дж/(кг·°C) [5, 7].

$$C_{a.c} = \frac{C_{нов} + C_n X}{1+X}.$$

Беручи до уваги, що процес змінювання температури агента сушіння відбувається одночасно із змінюванням його вологовмісту X , у загальному вигляді:

$$\frac{dQ_{a.c}}{d\tau} = \frac{\partial Q_{a.c}}{\partial t_c} \cdot \frac{dt_c}{d\tau} + \frac{\partial Q_{a.c}}{\partial X} \cdot \frac{dX}{d\tau}.$$

На підставі виразів для визначення $\rho_{a.c}$ і $C_{a.c}$:

$$\frac{dQ_{a.c}}{d\tau} = \frac{169,8PV_{a.c}(C_{нов} + C_n X)}{R_{нов}(0,622+X)(273+t_c)^2} \cdot \frac{dt_c}{d\tau} + \frac{0,622PV_{a.c}(0,622-C_{нов})}{R_{нов}(273+t_c)(0,622+X)^2} \cdot \frac{dX}{d\tau}. \quad (7)$$



Числовий аналіз свідчить, що другий член правої частини (7) менший від першого понад один порядок, значення першого члена не на багато відрізняється від значень виразу:

$$V_{a.c} \rho_{a.c} C_{a.c} (dt_c/d\tau).$$

Через це праву частину рівняння динаміки ємності агента сушіння записують за рівнянням (6).

У виразі (6) приймають, що значення витрат повітря L_0 і L_1 різні, хоча у технологічних розрахунках $L_0=L_1$ [5,7]. У даному разі враховують можливість регулювання сухого повітря, яке надходить L_0 і яке виходить L_1 із сушарок за допомогою дроселюючих органів (шиберів). $X_{нов}$ із виразу (6) у загальному випадку можна вважати зовнішнім збурюючим фактором.

Інтенсивність випаровування вологи із фруктів [5,9]:

$$J = -G_0 \frac{dU}{d\tau}, \quad (8)$$

де G_0 – маса абсолютно сухої фруктів, кг;

U – середнє інтегральне значення вологовмісту фруктів; кг/кг.

Коефіцієнт тепловіддачі від агента сушіння фруктів [6]:

$$\alpha_{dp} = \frac{\lambda}{l} 0,072 \left(\frac{vl}{v} \right)^{0,8}, \quad (9)$$

де l – характерний розмір матеріалів у напрямі руху агента сушіння, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності агента сушіння, Вт/(м·°C);

v – кінематична в'язкість агента сушіння, м²/с.

Оскільки коефіцієнт α_{dp} залежить від швидкості агента сушіння, то при потребі у виразі (6) можна простежити вплив останньої на теплообмін між деревиною і агентом сушіння.

Із урахуванням припущень, зроблених при виведенні рівняння динаміки теплоємності агента сушіння, а також того, що процес змішування водяної пари, яка надходить до камери, з агентом сушіння відбувається миттєво, рівняння матеріального балансу для вологи у ємності агента сушіння (див. рис. 1) набуває вигляду:

$$G_n + L_0 X_{нов} + B - L_1 \beta_n X = \frac{dM}{d\tau},$$

де β – коефіцієнт неорганізованого повітрообміну;

$M = \frac{V_{a.c} \rho_{a.c} X}{1 + X}$ – кількість вологи у сушильному агенті, кг.

Хоча у загальному випадку $\rho_{a.c} = f(X, t_c)$, числовий аналіз рівняння динаміки свідчить, що для конкретного ступеня технологічного режиму можна вважати $\rho_{a.c} = const$. У такому разі рівняння матеріального балансу для вологи в агенті сушіння:



$$G_n + L_0 X_{нов} + B - L_1 \beta_n X = \frac{V_{a.c} \rho_{a.c}}{(1+X)^2} \cdot \frac{dX}{d\tau} \quad (10)$$

У період сталої швидкості сушіння теплота, яка надійшла до фруктів, витрачається на випаровування вологи. Припускаємо, що середня температура фруктів t_ϕ дорівнює температурі її поверхні, а в період спаду швидкості сушіння мало відрізняється від неї [6]. Тому на підставі закону зберігання енергії можна записати рівняння балансу теплоти для ємності фруктів [6,10] (рівняння кінетики), яке вірне при $U > U_{кр}$, у такому вигляді:

$$\alpha_\phi (t_s - t_\phi) = k_3 r_0 \rho_0 R_v \frac{dU}{d\tau}, \quad (11)$$

де $U_{кр}$ – вологовміст матеріалу в момент закінчення періоду сталої швидкості і на початку періоду спаду швидкості сушіння [6];

ρ_0 – умовна щільність фруктів, кг/м³;

R_v – відношення об'єму абсолютно сухої фруктів у шарі до поверхні теплообміну вологої фруктів, м;

k_3 – коефіцієнт уповільнення сушіння у шарі [6].

У період спаду швидкості сушіння відповідно до закону зберігання енергії кількість теплоти, яка надходить до фруктів, дорівнює витраченій на її нагрівання і випаровування вологи.

За таких умов тепловий баланс для ємності фруктів знаходять за рівнянням [6] – основним рівнянням кінетики сушіння, яке вірне при $U > U_{кр}$:

$$\alpha_\phi (t_s - t_\phi) = \left(r_0 \frac{dU}{d\tau} + C_\phi \frac{dt_\phi}{d\tau} \right) \rho_0 k_3 R_v, \quad (12)$$

де $C_{\phi p}$ – питома теплоємність вологої фруктів, Дж/(кг·°C).

Вирази (11) і (12) визначають взаємозв'язок середніх інтегральних значень вологовмісту U і температури t_ϕ фруктів.

Для теплоємності огорожень камери (див. рис. 1), що складаються із стін, підлоги, стельового покриття і дверей (на підставі закону зберігання енергії і припущення щодо рівномірного розподілу температури $t_{oz.i}$ за об'ємом кожного огороження), вираз перехідного процесу [5]:

$$\alpha_{oz.i} (t_c - t_{oz.i}) - \alpha_{3,i} (t_{oz.i} - t_n) = C_{oz,i} \rho_{oz,i} \delta_i \frac{dt_{oz,i}}{d\tau}, \quad (13)$$

де $\alpha_{3,i}$ – середнє значення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні i -го огороження до зовнішнього середовища, Вт/(м²·°C);

$C_{oz,i}$ – питома теплоємність матеріалу i -го огороження, Дж/(кг·°C);

$\rho_{oz,i}$ – щільність матеріалу i -го огороження, кг/м³;

δ_i – товщина i -го огороження, м;

$i=1,2,3...n$.



Одержана система диференціальних рівнянь (1), (6), (10) – (13) є вихідною математичною моделлю ГКПД, до складу якої входить значення швидкості сушіння $dU/d\tau$.

Для грубих шарів [3,6]:

$$-\frac{dU}{d\tau} = \frac{D\pi^2}{4R^2}(U - U_p), \quad (14)$$

де R – половина товщини дошки, м;

D – коефіцієнт вологопровідності фруктів, м²/с;

U_p – рівноважна вологість фруктів, кг/кг.

Для $\varphi = 0 - 0,5$

$$U_p = 0,36 \left[13,9 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^2 \right] \cdot 10^{-2} + 0,72\varphi \left[29,5 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^2 \right] \cdot 10^{-2}; \quad (15)$$

для $\varphi = 0,5 - 1,0$ [63]

$$U_p = \frac{0,512 \cdot 10^{-2}}{1,21 - \varphi} \left[21,5 - \left(\frac{t_c + 273}{100} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

У виразах (15) і (16) відносна вологість агента сушіння:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_n}, \quad (17)$$

де P_n – парціальний тиск водяної пари у сушильному агенті, Па;

P_n – тиск насиченої пари при температурі перегрітої пари, Па.

$$P_n = \frac{PX}{0,622 + X}, \quad (18)$$

де P – атмосферний тиск, Па.

Значення P_n визначається за імперичним виразом Філоненка [6]:

$$\lg \frac{P_n}{P_0} = \frac{7,5t_c}{238 + t_c}, \quad (19)$$

де P_0 – тиск насиченої пари при температурі 0°C, Па.

Для одержання в математичному описі вихідної температури t_m агента сушіння за «змоченим» термометром слід вологовміст X агента сушіння визначити через t_m і t_c [64]:

$$t_m = t_c - \frac{r_M(X_M - X)}{C_{нов} + C_n X}, \quad (20)$$

де r_M і X_M – прихована теплота паротворення і вологовмісту агента сушіння при температурі t_m .

Залежність $t_m = f(t_c, X)$ для обмеженого діапазону змінювання t_m також можна визначити за $I - d$ -діаграмою

$$t_m \approx C_0 + C_1 X + C_2 t_c, \quad (21)$$



де C_0, C_1, C_2 – сталі коефіцієнти [5,9].

Одержані диференціальні рівняння (1), (6), (10) – (13), а також вирази, які визначають зв'язок між параметрами агента сушіння, є нелінійними. Проте, виходячи із постановки завдання автоматичного регулювання (вимоги щодо малих відхилень параметрів) і враховуючи безперервність і рівномірність математичних залежностей, які поєднують між собою параметри сушильних камер, їх можна лінеаризувати на малих інтервалах змінювання вихідних даних. Лінеаризація виконується на підставі припущення сталості теплофізичних величин: коефіцієнта теплопередачі, вологопровідності, вологовіддачі фруктів, питомих теплоємностей, щільності у межах незначних відхилень вихідних параметрів ГКПД, а також розкладання інших нелінійних залежностей у ряд Тейлора довкола «точки усталеного процесу сушіння».

Для конкретних сушильних камер і умов сушіння, виконавши нескладні математичні перетворення, зумовлені лінеаризацією наведених рівнянь і виразів, можна одержати систему лінійних диференціальних рівнянь із незначними відхиленнями змінних параметрів, які характеризують процес сушіння, тобто ГКПД можна розглядати як стаціонарну лінійну динамічну модель простішу серед класу динамічних моделей. Хоча це й грубе наближення до реальних процесів, що відбуваються у камері, але воно досить точно характеризує досліджувану ГКПД як об'єкт керування.

Через різні підходи до розв'язання задач синтезу і аналізу систем автоматичного керування процесом сушіння фруктів, математичну модель ГКПД опишемо за Лапласом (зображення) у вигляді рівнянь типу «Вхід – Вихід», а також за часом у вигляді рівнянь стану.

Застосовуючи безпосереднє перетворення Лапласа

$$F_p(p) = \int_0^{\infty} f(\tau) e^{-p\tau} d\tau$$

для відносного приросту змінних, наведених на схемі (рис. 1), з урахуванням нульових початкових умов, одержимо рівняння типу «Вхід – Вихід»:

$$L(p)Y(p) = G(p)U_1(p) + R(p)F(p), \quad (22)$$

де $L(p) = [t_n^*(p) X^*(p) U^*(p) t_n^*(p)]^T$ – вектор стовпець вихідних координат;
 $U_1(p) = [t_n^*(p) G_n^*(p) v^*(p) L_0(p) L_1^*(p)]$ – вектор стовпець вхідних (керуючих) координат;

$F = [t_{nos}^*(p) t_{31}^*(p) \dots t_{3,n}^*(p)]$ – вектор стовпець збурень;

T – знак транспортування;

p – комплексна змінна;

* – відносний приріст відповідних змінних;



$L(p)$, $G(p)$ і $R(p)$ – матриці, елементи яких у загальному випадку є многочленами і сталими коефіцієнтами стосовно p .

Коефіцієнти елементів матриць $L(p)$, $G(p)$ і $R(p)$ передаються величинами, які входять до складу вихідних рівнянь і виразів.

На підставі матричного рівняння (22) можна записати передаточні функції сушильної камери на каналах керування і збурення:

$$W_{\kappa}^j = \frac{y_j^*(p)}{u_{\kappa}^*(p)} = \frac{\det L_{\kappa}^j(p)}{\det L(p)} \quad \text{і} \quad V_l^j = \frac{y_j^*(p)}{f_l^*(p)} = \frac{\det L_l^j(p)}{\det L(p)}, \quad (23)$$

де $\det L(p)$ – визначник матриці $L(p)$;

$\det L_{\kappa}^j(p)$ і $\det L_l^j(p)$ – визначники, які одержують із матриці $L(p)$ заміною стовпця із i -им параметром вихідних координат $y_j^*(p)$ відповідно стовпцям із k -ою вхідною координатою $u_{\kappa}^*(p)$ із матриці $G(p)$ і стовпцем із l -им збурюючим параметром $f_l^*(p)$ із матриці $R(p)$.

Із урахуванням виразу (23), лінійну динамічну модель ГКПД як об'єкт керування описують таким матричним рівнянням:

$$Y(p) = W(p)U_1(p) + V(p)F(p); \quad (24)$$

де $W(p) = [W_{\kappa}^j(p)]$; $V(p) = [V_l^j(p)]$ – матриці сушарки.

Виходячи із практичних завдань синтезу автоматичного регулювання, для конкретного прикладу ГКПД, наведеного нижче, рівняння стану ГКПД:

$$X(\tau) = AX(\tau) + B_v U_1(\tau) + B_f F(\tau); \quad (25)$$

$$Y(\tau) = CX(\tau), \quad (26)$$

де $X(\tau) = [t_{\kappa}^*(\tau) t_c^*(\tau) t_m^*(\tau) t_{op}^*(\tau) U^*(\tau) t_{oz}^*(\tau)]^T$ – вектор стовпець параметрів стану;

$U_1(\tau) = [t_n^*(\tau) C_n^*(\tau) L^*(\tau)]^T$ – вектор стовпець керування;

$F(\tau) = t_s^*(\tau)$ – збурюючий параметр – температура зовнішнього середовища;

$Y^T(\tau) = [t_c^*(\tau) t_m^*(\tau)]^T$ – вектор стовпець вимірюваних вихідних параметрів;

A , B_v , B_f , і C – сталі матриці відповідних розмірностей.

Таким чином, на підставі аналізу тепло- і масообмінних процесів, які відбуваються у ГКПД одержано їх загальний математичний опис у вигляді системи диференціальних рівнянь і відповідних обмежень, які характеризують даний клас сушильних камер, як об'єктів, керування і призначені для використання як математичні моделі у системах керування процесом сушіння фруктів. При цьому лінеаризований варіант математичного опису можна подавати у вигляді рівнянь стану і типу «вхід – вихід».



Для проведення досліджень щодо ефективності процесу сушіння в геліосушарці були обрані місяці, коли більшість фруктів досягають стадії дозрівання, а саме липень і вересень. Конкретні дати досліджень включали 15 липня – 3 вересня 2022 року та 15 липня – 3 вересня 2023 року.

На підставі аналізу погодних спостережень, здійснених на найближчій метеорологічній станції першого розряду в Корецькому районі Рівненської області, Україна, встановлено, що в цей період року зазвичай панує стало сонячна погода, яка наближена до ідеальних умов для проведення експериментів з сонячними енергетичними системами.

У процесі сушіння фізичні параметри навколишнього середовища коливалися в таких межах: температура повітря (T_{nc}) від 16 до 30⁰С; відносна вологість повітря (φ_{nc}) від 26% до 86,8%; енергетична освітленість (E) від 100 до 800 Вт/м²; кут падіння прямого сонячного випромінювання (кутів падіння) від 20 до 60 градусів.

Теплотехнічні параметри повітря, яке подавалося до сушильної камери, в денний час (від 8⁰⁰ до 21⁰⁰ години) включали температуру T_{mn} від 20 до 60⁰С, а в нічний час (від 22⁰⁰ до 7⁰⁰ години) від 30 до 20⁰С. Швидкість циркуляції повітря (v_{mn}) коливалася від 1 до 3 метрів на секунду, а відносна вологість (φ_{mn}) від 9,8% до 86%.

Теплопродуктивність повітряного колектора Q для поглинальної поверхні S_{nk} розміром 1,5 м² знаходилася в діапазоні від 117 до 480 Вт. Температура акумулятора (T_{ma}) в денний час (від 8⁰⁰ до 21⁰⁰ години) варіювала від 30,5 до 45,6⁰С, а в нічний час (від 22⁰⁰ до 7⁰⁰ години) від 45,6 до 20,9⁰С.

У таблиці 1 представлено інформацію щодо специфіки геліосушарки та об'єктивних умов, в яких вона функціонувала під час проведення серії досліджень.

Таблиця 1

Представлені умови та результати сушіння яблук і груш у геліосушарці під час дослідів, який відбувся протягом періоду з 15 липня по 3 вересня 2023 р.

№ з/п	Дата	Тривалість, год.	Конфігурація	
			ТА	ДК
1	15 – 17.07	50	+	+
2	15 – 21.07	119	–	–
3	28 – 31.07	74	–	–
4	07 – 10.08	77	–	–
5	10 – 12.08	50	+	+
6	15 – 17.08	50	+	+
7	31 – 3.09	98	–	–

Отже, тривалість процесу сушіння фруктів у геліосушарці залежить від того, наскільки швидко висушуваний матеріал віддає вологу в зоні, де діє теплоносій та змінюється залежно від координати x і часу:

$$J_m = -D \cdot \rho_{np} \cdot (\Delta U \pm \delta_T \cdot \Delta T(\tau)), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (27)$$

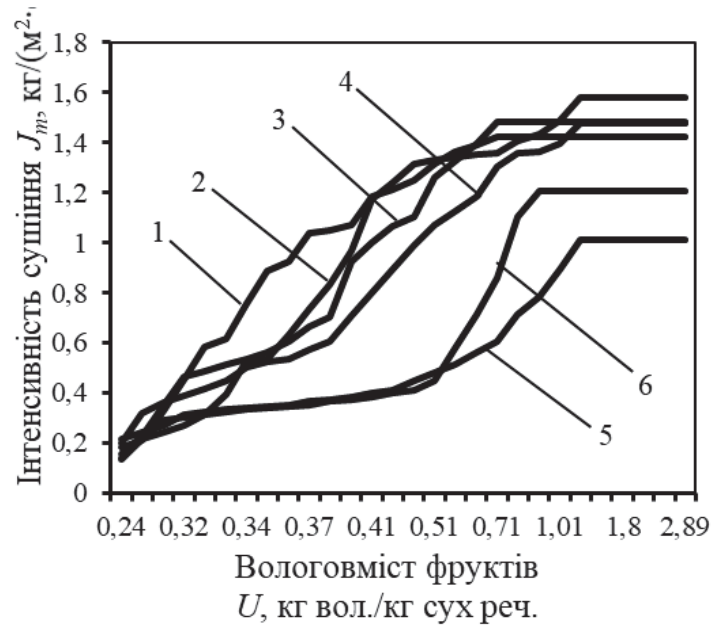


Рис. 2. Криві інтенсивності сушіння яблук з товщиною нарізки кружечків: 1, 2 – 5 мм; 3, 4 – 8 мм; 5, 6 – 11 мм

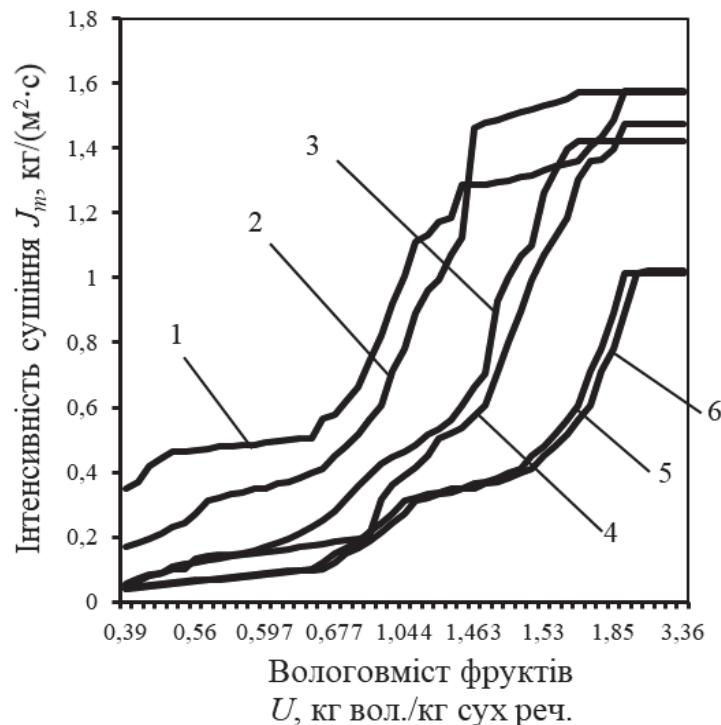


Рис. 3. Криві інтенсивності сушіння груш з товщиною нарізки дольок: 1, 2 – 5 мм; 3, 4 – 6 мм; 5, 6 – 7 мм



Аналіз результатів (рис. 2 та рис. 3) виявив, що криві інтенсивності сушіння, (J_m) для яблук з вологовмістом U від 2,89 до 0,24 кг вологи на 1 кг сухої речовини перебуває у діапазоні від 1,57 до 0,18 кг/(м²·с), а для груш з вологовмістом U від 3,36 до 0,39 кг вологи на 1 кг сухої речовини від 1,58 до 0,049 кг/(м²·с).

Отже, аналіз порівняльних експериментальних кривих інтенсивності сушіння (рис. 2 та 3) свідчить, що геліосушарка під час сушіння забезпечує однакову інтенсивність і тривалість процесу сушіння.

Висновки. Нами було розроблено математичні моделі (вирази (1), (6), (10) – (13)), які дозволяють розрахувати показник поглинання вологи у ситуаціях, коли відбувається дифузний перенос вологи всередині матеріалу, і також регулювати глибину проникнення теплового потоку в поверхневий шар, де відбуваються фазові перетворення. Ми визначили збіжність інтенсивності сушіння, використовуючи аналіз відносної похибки, і переконалися у відповідності отриманих результатів, порівнюючи їх з відомими експериментальними даними.

Список використаних джерел

1. Озарків І. М., Кобринович М. С., Копинець З. П. Особливості перенесення вологи в процесі сушіння фруктів. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету*. 2007. Вип. 17(4). С. 124-125.
2. Pathare P. V. Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying. *Biosystems Engineering*. 2006. No 93. P. 285-291.
3. Goya R. K., Kingsly A. R. P., Manikantan M. R., Ilyas S. M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*. 2007. No 79. P. 176-180.
4. Garau M. C. Drying of orange skin: drying kinetics modeling and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 2006. No 75. P. 288-295.
5. Menges, H. O. Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums. *Energy Conversion and Management*. 2006. No 47. P. 2337-2348.
6. Скляр Р. В. Доцільність використання економіко-математичних моделей в сільському господарстві. *Інноваційні технології в АПК: матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф.* Луцьк: Луцький НТУ, 2021. С. 122-124.
7. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Григоренко С. М. Методика моделювання та оптимізації структури посівних площ. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674->



[2023-1-7.](#)

8. Midilli A., Kucuk N. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2003. No 44(7). P. 1111-1122.

9. Wang Z. J. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Journal of Food Engineering*. 2006. No 40. P. 39-46.

10. Геліосушарка з тепловим акумулятором: пат. 97139 У Україна: МПК А23L3/00. № UA 97139 U; заявл. 26.12.2014; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4.

11. Korobka S., Babych M. Substantiation of the constructive-technological parameters of a solar fruit dryer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 1/8(85). P. 13-19.

12. Korobka S., Syrotyuk S., Zhuravel D., Boltianskyi B., Boltianska L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*. 2021, Vol. 2. P. 60-75.

13. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. *Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі*: матер. XI Міжнар. наук. конф. (Львів, 04–06 жовтня 2022 р.). Львів: ЛНУП, 2022. С. 16-18.

14. Шершенівський О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки. *Проблеми механізації та електрифікації технологічних процесів*: матер. V Всеукр. наук.-техн. Інтернет-конференції. Мелітополь: ТДАТУ, 2018. Вип. 5. С. 158-161.

15. Skliar A., Boltianskyi B., Boltianska N., Demyanenko D. Research of the cereal materials micronizer for fodder components preparation in animal husbandry. *Modern Development Paths of Agricultural Production*. 2019. P. 249-259.

16. Болтянський Б. В., Болтянська Л. О., Сиротюк С. В. Аналіз структури витрат енергії при виробництві сільськогосподарської продукції. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. I Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 436-442.

17. Мозговий Я. Ю. Розрахунок навантаження сонячної радіації для гарячого водозабезпечення корівника на 200 голів. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. I Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 449-453.

18. Тристан Р. В. Розрахунки щодо автономного енергозабезпечення фермерського господарства. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*:



матер. І Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. (Мелітополь, 01-24 квітня 2020 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 465-468.

19. Кисельова Л. Експериментальні дослідження режимів теплообміну при первинній обробці молока. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матер. І Міжнар. наук.-практ. конф. мол. учених. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 52.

20. Болтянська Л. О., Болтянський Б. В. Аспекти механізму інвестиційного забезпечення інновацій у відновлюваній енергетиці АПК України. *Аграрна галузь сучасної України: проблеми та перспективи розвитку*: матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., 14 трав. 2021 р. Слов'янськ, 2021. С. 22-24.

Стаття надійшла до редакції 13.10.2023 р.

**S. Korobka¹, I. Stukalets¹, S. Syrotyuk¹, O. Skliar², R. Skliar²,
B. Boltianskyi², S. Baranovych¹**

¹ Lviv National Environmental University

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FRUIT DRYING IN A SOLAR DRYER

Summary

The article delves into the regularities of the process of drying fruits in a solar dryer under non-stationary modes. The work provides a detailed analysis of the methods used for studying the threshold moisture content and ways to measure the intensity of fruit drying. It is proven that the intensification of the drying process should be based on the study of the thermophysical, physical-chemical, and other properties of fruits as drying objects, and their direct relation with the coefficients of heat and moisture exchange, energy, and the form of the moisture relation with the material. Despite the vast theoretical and experimental works in the domain, creating a single consolidated theoretical base of convective drying of fruits required a complex combination of thermophysical, physical-chemical properties of fruits, and their kinematic heat and mass exchange characteristics.

The work describes a mathematical model of the process of heat and mass transfer for fruit drying, which takes into account the threshold of deepening the evaporation zone. The research provides analytical results for the study of temperature and moisture fields in the dried material at any moment, depending on the coordinates of the phase transition as well as the parameters of the coolant change.

Based on the analysis of the intensity of the drying processes, the authors uncover peculiarities of their development in combination with the moisture content of the material U , speed of the coolant move v_{TH} , temperatures of the material T_{ϕ} and the coolant T_{TH} bound to the given coordinate X , duration of the drying, form of the drying diffusion curves. The value of the indicators of heat and mass exchange in fruit during the convective heat transfer is significantly influenced by the depth of the heat flow penetration, thickness of the object of drying, temperature, and speed of the coolant



circulation. It is reasonable to use a low speed of the coolant circulation at the start of drying when the fruit surface temperature is not high, and the intensity of the heat exchange is at its maximum.

The study of the threshold moisture content in the drying process will provide for obtaining mathematical models for calculating the drying period and the following production of dryers. The research describes methods for computing the coefficients of heat, moisture, mass exchange, diffusion, and water activity in the process of convective fruit drying in different periods of the solar dryer work.

Key words: solar energy, solar dryer for fruit, temperature, moisture, heat and mass transfer, intensification, convective drying.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-99-112

УДК 631.331.85:621.54

В. Б. Бойко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-1014-7201

В. О. Улексін¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3360-8376

О. В. Золотовська¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5617-9271

Є. І. Лепеть¹, аспірант

ORCID: 0000-0002-0482-538X

Б. В. Бойко¹, студент*Дніпровський державний аграрно-економічний університет,*e-mail: boiko.v.b@dsau.dp.ua, тел.: +380994471292

ПРОЄКТ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ГІДРОПНЕВМАТИЧНОЇ СІВАЛКИ

Анотація. Дана стаття присвячена розробці проекту мехатронної системи керування основними елементами експериментальної гідропневматичної сівалки. Висів насіння овочевих культур відбувається на досить невелику глибину в більшості випадків в сухий шар ґрунту, що впливає на рівномірність та строки появи сходів. Використання гідравлічного висіву дозволить здійснити посів пророслого насіння з необхідним запасом вологи для прискорення початкової вегетації культур та підвищення рівномірності їх сходів. Запропоноване конструктивне рішення гідропневматичної сівалки в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті дозволить реалізувати гідравлічний посів пророслого насіння овочевих культур. Для реалізації злагодженої роботи основних елементів та систем контролю сівалки розроблено проект мехатронної системи гідропневматичної сівалки працездатність та надійність якої доведено експериментальним шляхом. Запропонована мехатронна система дозволяє змінювати технологічні параметри робочих елементів сівалки, а саме тривалість імпульсів відкриття пневматичного і гідравлічного клапанів та витрату робочої рідини насосом для формування заданої щільності насіння в дозуючій камері сівалки. Дослідженнями підтверджено працездатність мехатронної системи та гідропневматичної сівалки в цілому.

Ключові слова: гідросівалка, мехатронна система, електроклапан, гідравлічний висів, проросле насіння, псевдозріджений шар, тригер, одинвібратор, блок керування, відцентровий насос, частота спрацювання.

Постановка проблеми. Одним із напрямків рослинництва, який інтенсивно розвивається в останні часи являється овочівництво [1]. З кожним роком на Дніпропетровщині збільшується частка земельних угідь під вирощування овочів, особливо з втратою контролю над окупованими територіями така частка зросла до 30 % [2]. Враховуючи кліматичні особливості регіону, а саме посушливі весни постає нагальна потреба посіву насіння в вологий шар ґрунту з метою



прискорення початку вегетації культур та підвищення ефективності овочівництва в цілому. Сучасні посівні машини забезпечують досить точне розміщення насіння, як по глибині так і в рядку. Посів насіння овочевих культур здійснюється на досить невеликі глиби від 1 до 3 см [3, 4], в більшості випадків в малозволожений шар ґрунту, що негативно впливає на енергію проростання та врожайність культур. Вирішити дану проблему можливо використовуючи посівні машини, які одночасно з посівом здатні вносити необхідний запас вологи для початкової вегетації овочевих культур. Аналіз конструкцій посівних машин показав, що на сівалках з сухим методом посіву не можливо провести конструктивне удосконалення з реалізацією додаткового внесення вологи [5, 6]. За результатами аналізу гідравлічних сівалок встановлено можливість реалізації висіву насіння з достатнім запасом вологи, але з досить низькою точністю. Посів такими сівалками відбувається методом проливання рідини з насінням, що має ймовірний характер розподілення останнього в рядку. Перевагою таких сівалок є можливість висіву пророслого насіння з одночасним внесенням засобів захисту рослин та стимуляції їх росту, що зумовлює прискорення появи дружніх сходів від 2 до 14 днів, в залежності від виду овочевих культур [7-9]. Поряд з зазначеними перевагами гідравлічні сівалки мають і ряд недоліків, а саме травмування насіння дозуючими пристроями, значні енерговитрати на перемішування рідини з насінням, ймовірний розподіл насіння в рядку. Тому вирішення питань зниження енергії на перемішування рідини з насінням, точного висіву, усунення травмування насіння елементами гідравлічної сівалки є актуальним завданням на шляху до підвищення ефективності процесу посіву овочевих культур. Вирішити дані питання можливо розробкою сівалок з використанням мехатронних систем керування основними їх процесами та вузлами.

Аналіз останніх досліджень. Якість посіву гідросівалок безпосередньо залежить від основних процесів їх роботи, а саме процесу перемішування насіння з рідиною в бакові, відбору та дозування насіння, процесу висіву насіння до насінневого ложе. Вивченню та дослідженню процесу перемішування насіння в бакові формуванню псевдозрідженого шару, в подальшому ПЗШ присвячені роботи науковців Харківського національного технічного університету [10, 11], Дніпровського державного аграрно-економічного університету [12-14], Національного університету біоресурсів і природокористування України [15]. Закордоном цьому питанню присвячені роботи Sang Won Han, Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly [16-18]. Процес дозування насіння з бака та подачі по насіннепроводу детально розглянуто в працях вітчизняних [19-22] та закордонних науковців [23, 24].



В результаті проведеної роботи науковцями описано теоретичні залежності процесу формування псевдозрідженого шару з урахування турбулентності, яка виникає при перемішуванні рідини з насінням. Обґрунтовано конструктивно-технологічні параметри дозуючих пристроїв для реалізації однонасінного точного висіву насіння.

За результатами проведеного аналізу не встановлено зв'язок основних технологічних процесів гідросівалок з технічним забезпеченням, яке базується на інтелектуальному управлінні не лише їх функціональним рухом, а і процесом перемішування рідини з насінням, підтриманням заданої концентрації насіння в рідині, висів насіння в задані точки на полі для реалізації точного (координатного) висіву насіння. Технічне забезпечення гідросівалок повинно базуватися на основі мехатронних систем, тобто об'єднанням основних виконавчих пристроїв (пневматичних та гідравлічних електроклапанів, насосів), електронних елементів контролю та керування (датчиків, блоків керування). Частково питання впровадження мехатронних систем в класичних посівних агрегатах розглянуто в роботах [25-27].

Формулювання мети статті (постановка завдання).

Для реалізації точного висіву враховуючи результати проведеного аналізу наукових робіт необхідно розробити мехатронну систему сівалки використовуючи агрегатний метод проектування [28, 29] з розробкою основних складових (створення ПЗШ необхідної концентрації, дозована подача насіння, висів в задані точки поля), що впливають на якість процесу посіву з обґрунтуванням їх конструктивно-технологічних параметрів.

Основна частина. Для стендових досліджень роботи мехатронної системи гідропневматичної сівалки розроблено її експериментальний зразок наведений на рис. 1 та принципову схему рис. 2. Корпус сівалки виготовлено з прозорих матеріалів, що дозволяє візуально спостерігати за протіканням основних процесів, вести відео та фото фіксацію. З метою встановлення працездатності та бажаних значень основних конструктивно-технологічних параметрів елементів мехатронної системи сівалки в схему включено необхідні контрольно-вимірні прилади.

В нижній частині корпусу 6 (рис. 2) у вигляді клину виконано дозуючу камеру 12, насіння потоком що створює насос 26 піднімається вгору формуючи ПЗШ. За допомогою рухомих стінок 22 підбирається оптимальний кут дозуючої камери використовуючи важелі 19 ущільнені прокладкою 18.



а



б

Рис. 1. Експериментальний зразок гідропневматичної сівалки:
а – для стендових випробувань; б – для польових випробувань

Необхідна концентрація насіння 15 в зоні дозуючої камери 12 підтримується шляхом зміни швидкості потоку, який створює насос 26. Фотодатчик 20 виконує постійний контроль оптичної щільності насіння в камері 12 та вносить корективи за допомогою регулятора 28 в разі відхилення показників щільності від заданого значення шляхом збільшення або зменшення рівня напруги живлення електронасоса 26. Сітка 8 та 16 надійно захищають насос від потрапляння насіння.

Для забезпечення нормальної роботи сівалки по завершенню завантаження насіння в рідину необхідно видалити повітря з корпусу бака 6 через дренажну трубку 7. Заряджання насінням ствола 2 відбувається з сформованого ПЗШ в дозуючій камері за умови відкриття гідравлічного клапану 24. Під надлишковим тиском рідина надходить з ємності 17 через відкритий клапан 24 в дозуючу камеру, витісняючи насіння по насіннепроводу 25 до датчика заряду насіння 14. Датчик заряджання зреагує на насінину, та сформує сигнал на закриття гідравлічного клапану, процес заряджання завершено.

Процес висіву відбувається за надходження сигналу з датчика переміщення сівалки на блок керування 5 та відкриття електропневматичного клапану 3. Стиснутим повітрям насінина разом з рідиною виштовхується з ствола до мірного стакану 1.

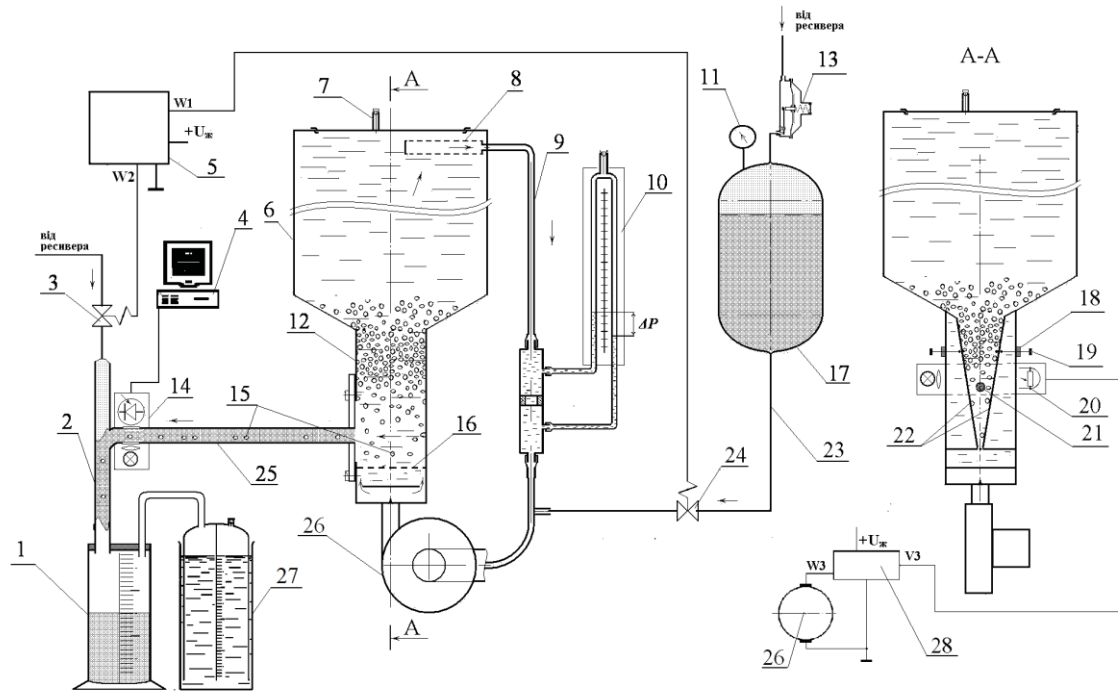


Рис. 2. Експериментальна установка гідропневматичної сівалки:
1 – мірний стакан; 2 – ствол; 3 – електропневматичний клапан;
4 – вимірювально-реєстраційний комплекс; 5 – блок керування;
6 – корпус; 7 – дренажна трубка; 8 – сітчастий фільтр;
9 – обвідна трубка; 10 – ротаметр; 11 – манометр; 12 – дозуюча камера; 13 – редуктор низького тиску; 14 – датчик заряду насіння;
15 – насіння; 16 – сітка; 17 – ємність для рідини; 18 – ущільнювач;
19 – важіль; 20 – датчик щільності насіння; 21 – вхід в насіннепровід;
22 – рухомі стінки; 23 – трубопровід; 24 – електрогідравлічний клапан; 25 – насіннепровід; 26 – електронасос; 27 – витратомір повітря (спірометр); 28 – регулятор витрати електронасоса

Використовуючи агрегатний метод проектування (28, 30) розроблено схему проекту мехатронної системи гідропневматичної сівалки (рис. 3), яка дозволить реалізувати узгоджену роботу основних складових сівалки. В якості джерела живлення 1 сівалки використовується акумуляторна батарея Logipower 12V 7.0 Ah AGM. Заряджання насіння в ствол і переміщення сівалки здійснюємо за допомогою фотодатчиків 5, 7 – ITR9608. Враховуючи швидкість технологічних процесів, витрату рідини і повітря, в якості запірної арматури обрано електроклапани 9, 10 серії SV-F-ES-22NC-06-DC12V, призначені для роботи з стиснутим повітрям та рідиною. Враховуючи попередньо проведені дослідження формування псевдозрідженого шару обрано електронасос OEM 2110-5208009 з продуктивністю 0,6 л/хв.

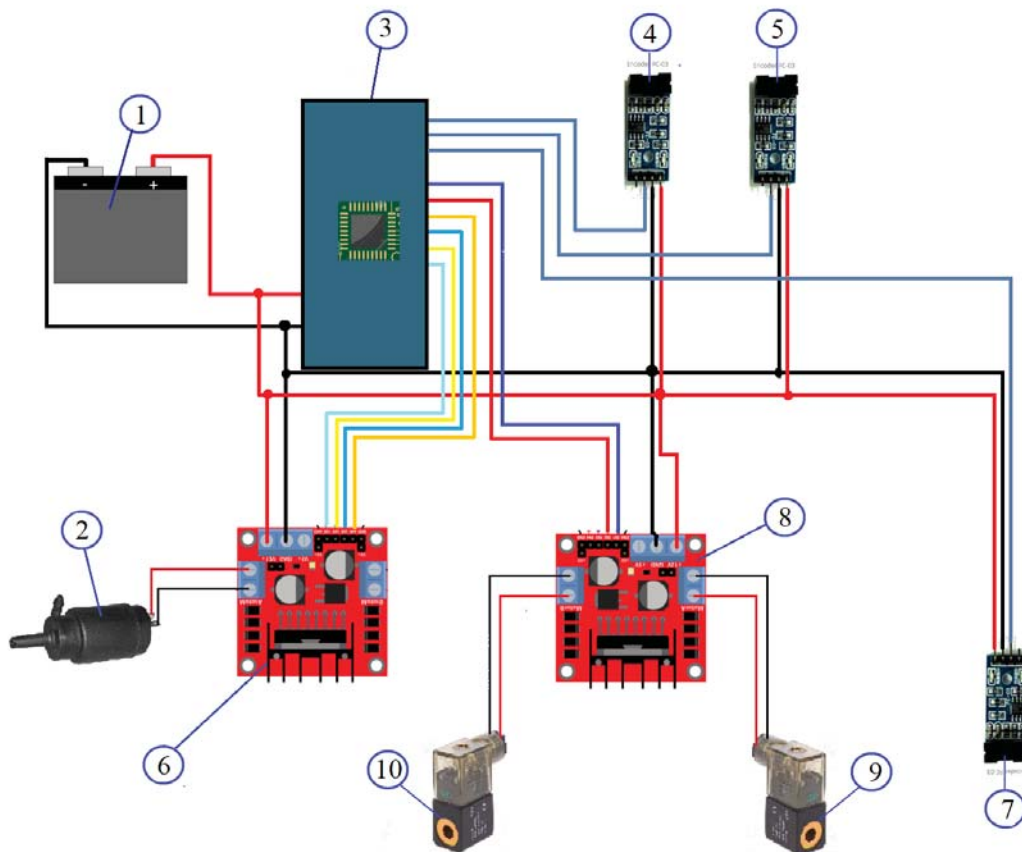


Рис. 3. Схема проекту мехатронної системи гідропневматичної сівалки:

- 1 – акумуляторна батарея ; 2 – електронасос; 3 – блок керування;
4 – датчик щільності насіння; 5 – датчик заряджання насіння;
6 – регулятор витрати електронасоса; 7 – датчик переміщення сівалки;
8 – підсилювач сигналу; 9 – електрогідравлічний клапан;
10 – електропневматичний клапан

Підтримання заданої концентрації насіння в дозуючій камері сівалки здійснюється шляхом зміни витрати насоса 2, яким керує регулятора 6 з оптичним датчиком щільності насіння 4.

Керування основними складовими мехатронної системи сівалки здійснюється електронним блоком 3. Розроблений блок керування забезпечує:

- ручний режим керування електроклапанами;
- керування клапанами в автоматичному режимі з частотою 2...25 Гц;
- регулювання часу відкриття електропневматичного 10...40 мс та електрогідравлічного 10...150 мс клапанів;
- керування електроклапанами за допомогою датчиків заряду насіння та переміщення сівалки.

На рисунку 4 приведена принципова схема електронного блока керування гідропневматичною сівалкою.

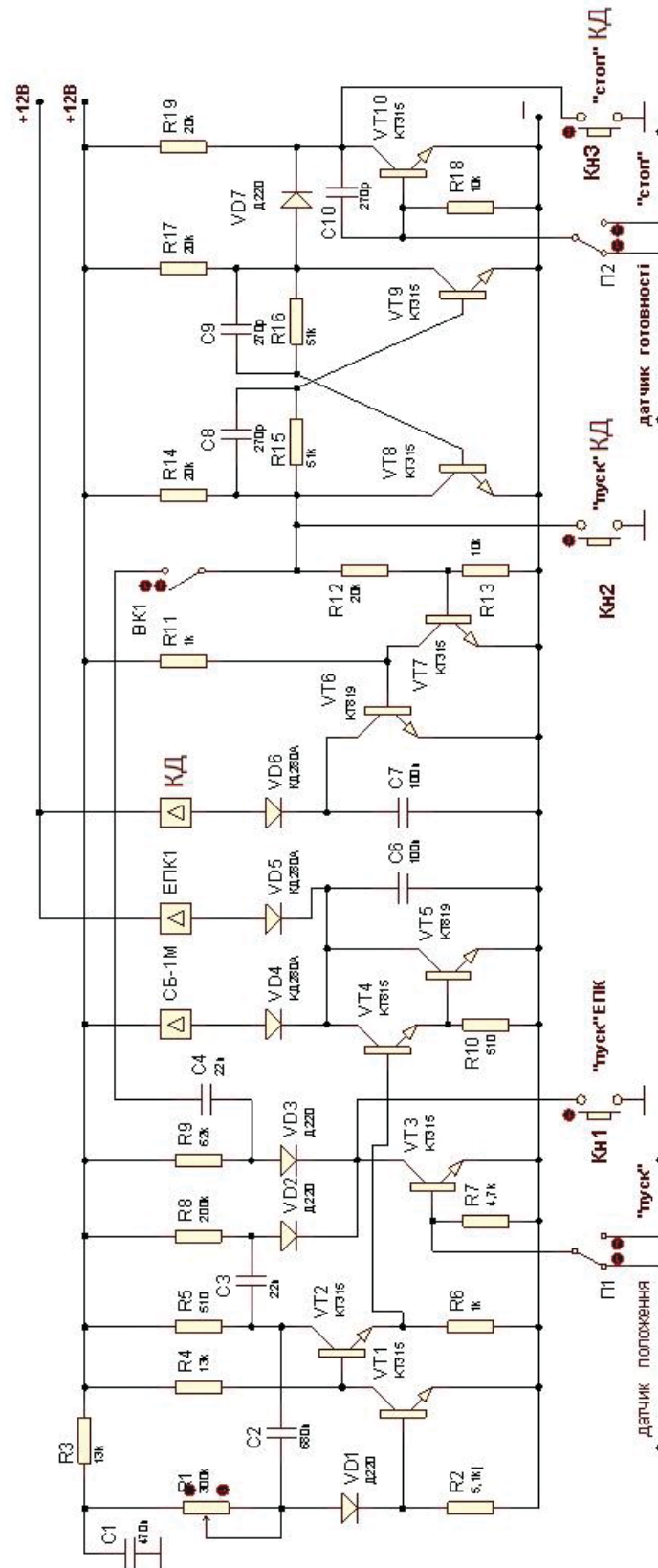


Рис. 4. Принципова електрична схема блока керування гідропневматичною сівалкою

Керування електропневматичним клапаном ЕПК здійснюється транзисторами VT4, VT5. Ключ виконаний на транзисторі VT6 з вхідним інвертором VT7 забезпечує комутацію електрогідравлічного клапана ЕГК. Паралельно з електропневматичним клапаном включено електромеханічний лічильник СБ-1М/100. За допомогою діодів VD4 і VD5 реалізовано розв'язку по живленню клапана та лічильника. Конденсатори C5-C7 і діод VD6 забезпечують захист ключів від комутаційної електрорушійної сили.

Тригер виконаний на транзисторах VT8 і VT9 керує ключем ЕГК в автоматичному (від датчика переміщення та заряду) або в ручному режимі (кнопками Кн2 і Кн3). Перемикачі П1 і П2 дозволяють при виконанні стендових досліджень використовувати замість датчиків генератор імпульсів. Інвертор VT10 узгоджує полярність керуючих імпульсів.

Тривалість відкриття ЕПК встановлюється за допомогою резистора R1, конденсатору C2 та одновібратора виконаного на транзисторах VT1, VT2. Одновібратор запускається вручну (кнопка Кн1) або від датчика переміщення через узгоджувальний інвертор VT3 і конденсатор C3. При замкнутому вимикачі Вк1 разом з пневматичним клапаном через конденсатор C4 включається гідравлічний клапан, і залишається включеним до приходу імпульсу управління «стоп». Розв'язку входу одновібратора і тригера забезпечують діоди VD2 і VD3.

Для проведення частотних випробувань електроклапанів розроблено блокінг-генератор [31], що працює у автоколивальному режимі (рис. 5). За допомогою змінного резистору R2 задаємо необхідну частоту спрацювань електроклапанів.

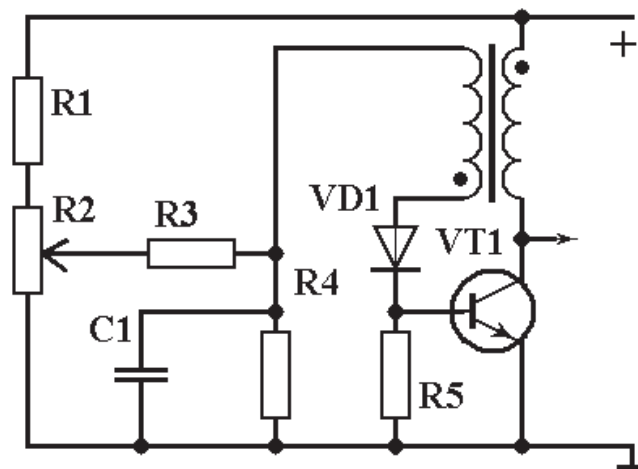


Рис. 5. Принципова електрична схема блокінг-генератора

Використання автономного генератора та незалежне регулювання тривалості імпульсів, дозволяє встановити частотні характеристики роботи окремих елементів та сівалки в цілому.

На рисункові 6 представлено схему регулятора витрати рідини електричного насосу. Регулятор складається з оптопар DA1 та DA2 датчика щільності насіння, які розміщені на стінках дозуючої камери сівалки. На початку пуску сівалки насіння заповнює весь об'єм камери. Фотоприймачі оптопар затінені, відповідно транзистор VT1 закритий, а транзистори VT2, VT3 – відкриті. За цієї умови двигун Д1 відцентрового електронасосу розвиває максимальну подачу рідини до дозуючої камери. Поток рідини насіння виноситься до верхньої частини дозуючої камери знижуючи його щільність. Освітлення фотоприймача оптопари зростає, транзистор VT1 відкривається та прикриває транзистори VT2, VT3 зменшуючи витрату насоса та швидкість потоку в дозуючій камері. За допомогою вимірювального моста і підсилювача напруги DA3 підтримується необхідний рівень напруги живлення насосу забезпечуючи необхідну щільність насіння в зоні його забору до насіннепроводу.

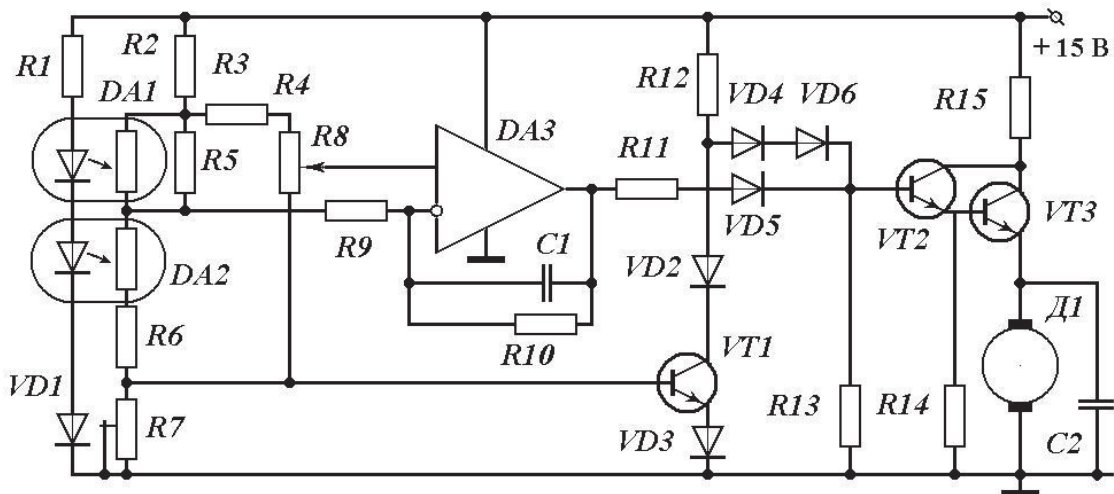


Рис. 6. Схема регулятора приводу електронасоса

За результатами стендових досліджень отримано частотні характеристики роботи запірних елементів. Залежність циклової витрати води від частоти імпульсів відкриття електрогідравлічного клапана представлено на рисунку 7. Дослідженнями встановлено максимальне значення частоти спрацювань ЕГК не повинно перевищувати 14 Гц. При збільшенні цього значення візуальними спостереженнями встановлено появу резонансних явищ викликаних коливанням рідини в порожнинах сівалки.

В результаті дослідження частотних характеристик електропневматичного клапана отримано залежність циклової подачі

повітря від тривалості електричних імпульсів при тиску в межах 1..3 атм. Отримана залежність (рис. 8) практично лінійна, відсутність резонансних явищ за тривалості імпульсів від 15 до 35 мс підтверджує задовільну роботу клапана з частотою до 50 Гц.

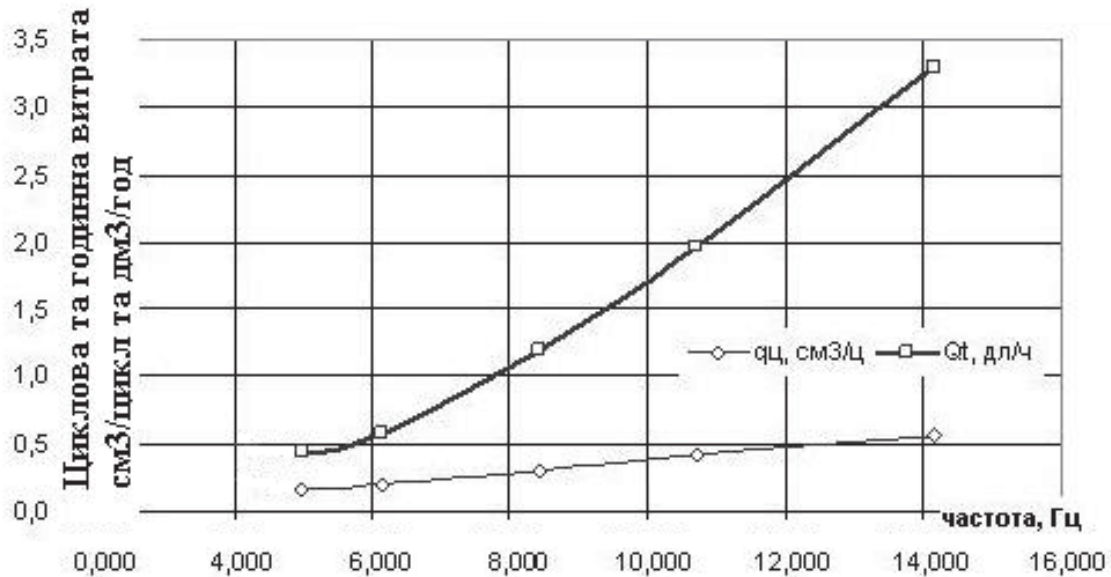


Рис. 7. Частотна характеристика роботи електрогідравлічного клапана

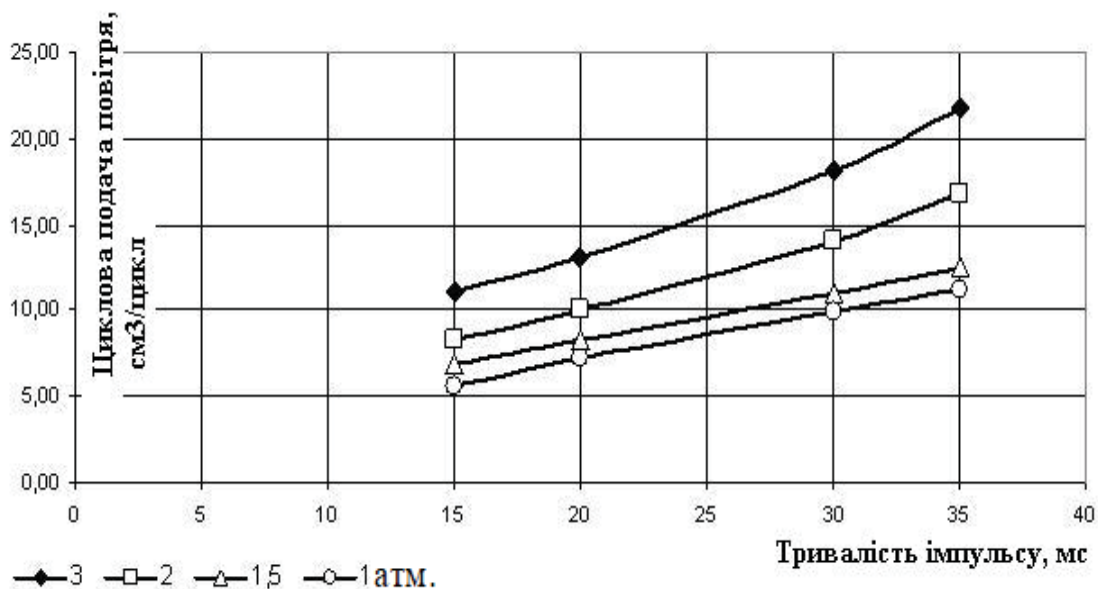


Рис. 8. Залежність циклової подачі повітря від тривалості імпульсу відкриття електропневматичного клапана

Проведені дослідження підтвердили працездатність запірних елементів та достатню їх швидкодію.

Висновки. Для реалізації точного висіву гідропневматичною сівалкою необхідно встановити зв'язок основних технологічних



процесів сівалки з технічним забезпеченням, яке базується на інтелектуальному управлінні не лише її функціональним рухом, а і процесом перемішування рідини з насінням, підтриманням заданої концентрації насіння в рідині, висіву насіння в задані точки на полі. Врахувавши досвід науковців в вирішенні даних задач розроблено проект мехатронної системи, здатної забезпечити узгоджену роботу основних складових гідропневматичної сівалки. За результатами експериментальних досліджень отримано частотні характеристики роботи клапанів та встановлено граничні максимальні значення частоти спрацювання електрогідравлічного клапана не більше 14 Гц і електропневматичного клапана 50 Гц. Дослідженнями підтверджено працездатність мехатронної системи та гідропневматичної сівалки в цілому

Список використаних джерел

1. <https://agroportal.ua/news/rastenievodstvo/v-ukrajini-z-yavlyayutsya-novi-centri-ovochivnictva> (дата звернення 23.09.2023).
2. <https://agroportal.ua/multimedia/agrariji-dnipropetrovshchini-zbirayut-urozhay-cibuli> (дата звернення 23.09.2023).
3. Гіль Л. С., Пашковський А. І., Суліма Л. Т. Сучасні технології овочівництва закритого і відкритого ґрунту. Ч. 2. Відкритий ґрунт: навч. посібник. Вінниця: Нова Книга, 2008. 312 с
4. Мазур В. А., Поліщук І. С., Телекало Н. В., Мордванюк М. О. Навчальний посібник з дисципліни «Рослинництво». Вінниця: Видавництво ТОВ «Друк», 2020. 352 с.
5. https://agrotimes.ua/article/kompleksi_mashin_dlya_ovochivnictva/ (дата звернення 25.09.2023).
6. Сисолін П. В., Свірень М. О. Висівні апарати сівалок. Кіровоград, 2004. 160 с.
7. Ящук Д. А. Виробничі випробування гідросівалки на висіві насіння селери. *Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип. 165. С. 102-106.
8. Дейнека С. М. Висів пророщеного насіння овочевих культур за допомогою гідросівалки. *Технічні науки та технології*. 2018. № 1 (11). С. 280-286.
9. Parsakhoo A., Jajouzadeh M., Rezaee Motlagh A. Effect of hydroseeding on grass yield and water use efficiency on forest road artificial soil slopes. *J. For. Sci.* 2018. Т. 64. Р. 157–163. <https://doi.org/10.17221/2/2018-JFS>.
10. Бакум Н., Ящук Д., Крєкот Н. Повышение урожайности томатов за счёт посева пророщенными семенами. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2015. Vol.17(7). Р. 49-52.



11. Бакум М. В., Ящук Д. А. Результати порівняльних польових досліджень способів сівби насіння овочевих культур. *Вісник ХНТУСГ*. 2013. Вип. 135. С. 374–379.
12. Улексін В. О., Бойко В. Б. Циркуляційний насос для гідропневматичного висівного апарата. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2012. Вип. 3(37). С. 91-94.
13. Бойко В. Б. Теоретичні дослідження процесу формування псевдозрідженого шару в гідро-пневматичному висівному апараті. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. Вип. 3. С. 10-16.
14. Бойко В. Б., Алієв Е. Б. Теоретичні дослідження руху рідини в ємності гідропневматичного висівного апарата. *Інженерія природокористування*. 2015. № 2(4). С. 78-84.
15. Aniskevich L. V., Deyneka S. M. Technical and economic evaluation of efficiency of hydroseeder. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2020, Vol. 11(1). P.121-126. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.121-126>.
16. Manabu I. *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering*. Springer, 2014. 260 p.
17. Sang Won Han. Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 6. P. 411-415.
18. Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified k-ε Turbulence Model. *CFD Letters*. 2009. Vol. 1(2). P. 87-94.
19. Улексін В. О., Бойко В. Б. Обґрунтування параметрів дозатора для гідропневматичного висівного апарата. *Вісник ХНТУСГ. Серія Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2015. Вип. 156. С. 52-60.
20. Бойко В. Б. Дослідження процесу заряджання насінини в насіннепровід координатного гідропневматичного висівного апарата. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2015. № 45(1). С. 291-297.
21. Дозатор-обмежувач гідровисіваючого апарату: пат. України № 118028. МПК А 01 С 7/20. № u201610886. Заявл. 31.10.2016; Опубл. 25.07.2017, Бюл. № 14.
22. Pastukhov V., Boiko V., Tesliuk H., Ulexin V., Kyrychenko R. Study of seed agitation in the fluid of a hydropneumatic precision seeder. *European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5/ 1(107). P. 36-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212517>.
23. Chen N. H. An Explicit Equation for Friction factor in Pipe. *Eng. Chem. Fundam*. 1979. Vol. 18(3). P. 296-297.



24. Kubicki D. Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia. 2012. P. 1-6.

25. Пастухов В. І., Бакум М. В., Кириченко Р. В. та ін. До розробки мехатронних систем посівних машин точного висіву. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Серія Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2015. Вип. 156. С. 156-161.

26. Бакум М. В., Кириченко Р. В., Басов О. І. Використання мехатронних пристроїв в посівних машинах точного висіву. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Серія Механізація сільськогосподарського виробництва*. 2016. Вип. 173. С.125-131.

27. Мельник В. І., Бакум М. В., Пастухов В. І., Кириченко Р. В., Басов О. І., Кириченко О. А. Просапна сівалка з мехатронним пристроєм. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матер. XII Міжнар. наук.-практ. конф.* 2019. С. 25-28.

28. Сучасні електромехатронні комплекси і системи: навч. посібник / Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, О. С. Козлова, Н. П. Лукашова; ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 116 с.

29. Bishop R. H. The Mechatronics Handbook / R. H. Bishop. Boca Raton : CRC Press, 2002. 1229 p.

30. R. K. Raiput. A Textbook of Mechatronics/ R. K. Raiput, S. Chand & Company LTD. Rom Nogar, New Delhi, 2007. 618 p.

31. L. Minati G., Innocenti G., Mijatovic H., Ito M. Frasca. Mechanisms of chaos generation in an atypical single-transistor oscillator. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022. Vol. 157. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111878>.

Стаття надійшла до редакції 19.10.2023 р.

V. Boiko¹, V. Ulexin¹, O. Zolotovska¹, E. Lepet¹, B. Boiko¹
¹ Dnipro State Agrarian and Economic University

PROJECT OF MECHATRONIC SYSTEM OF EXPERIMENTAL HYDROPNEUMATIC SEEDER

Summary

This article is devoted to the development of a mechatronic system project and the creation of the main elements of an experimental hydropneumatic seeder. Vegetable crops are sown at a shallow depth, in most cases in a dry layer of soil, which affects the uniformity and timing of emergence. The use of hydraulic sowing will make it possible to sow sprouted seeds with the necessary supply of moisture to accelerate the initial growing season of cultivated vegetable crops and increase the uniformity of their



harvesting. The Dnieper State Agrarian and Economic University has proposed a design solution for hydropneumatic seeders, which allows for the implementation of hydraulic sowing of sprouted vegetable seeds. To implement the coordinated operation of the main elements and control systems of the seeder, a project has been developed for a mechatronic system for a hydropneumatic seeder, the operability and reliability of which has been improved experimentally. The proposed mechatronic system allows you to change the technological parameters of the working elements of the seeder, as well as the duration of the pulses of the open state of the pneumatic and hydraulic valves and the flow rate of the working fluid by the pump to form a given seed density in the dosing chamber of the seeder. Based on the results of the experimental studies, the frequency characteristics of the valves were obtained and the maximum limit values of the operating frequency of the electro-hydraulic valve were determined to be no more than 14 Hz and the electro-pneumatic valve was 50 Hz. In general, research has proven the operability of the developed mechatronic system and hydropneumatic seeder.

Keywords: hydroseeder, mechatronic system, electric valve, hydraulic seeding, sprouted seeds, fluidized bed, trigger, single vibrator, control unit, centrifugal pump, operating frequency.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-113-123

УДК 631.363.28

О. О. Червоткіна¹, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

Н. О. Фучаджи¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9433-6282

Н. О. Паляничка, канд. техн. наук

ORCID 0000-0001-8510-7146

В. А. Самохвал, аспірант

ORCID: 0000-0002-3423-3510

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: oleksandra.chervotkina@tsatu.edu.ua, тел.: +380677413346

ВПЛИВ РІЗНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОЦЕС ГРАНУЛЮВАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ТА ЯКІСТЬ ГРАНУЛ

Анотація. Аналіз показав, що попередня теплова обробка та зволоження рослинної сировини, а також її склад і розміри частинок є факторами, які найбільше впливають на якість кормових та біопаливних гранул. Підвищення тиску в діапазоні 20-200 МПа призводить до збільшення міцності гранул, а температура матриці близько 100 °С є оптимальною для отримання щільних якісних гранул з рослинної сировини. Важливу роль отриманні якісних гранул при обробці рослинної сировини грають конструктивні параметри прес-гранулятора. Виконання вхідної частини фільтри матриці у формі звуження конуса сприяє зниженню енергоємності та тиску гранулювання, а збільшення відношення довжини каналу фільтри до його діаметра експоненційно збільшує тиск гранулювання та його енергоємність. Взаємодійність між фізичними процесами, що відбуваються в прес-грануляторі, ускладнює інтерпретацію впливу кожного параметра на процес гранулювання, внаслідок цього автори по-різному оцінюють внесок окремих факторів отримання якісних гранул. Тому необхідно заповнити прогалину у знаннях про взаємодію між окремими параметрами гранулювання та їх вплив на результати процесу.

Ключові слова: корма, біопаливо, прес-гранулятор, фільтри матриці, щільність гранул, міцність гранул, енергоємність гранулювання.

Постановка проблеми. В даний час гранулювання одержуваної в результаті змішування попередньо подрібненої сировини комбікормів стало стандартною технологічною операцією для великих та середніх комбікормових заводів і отримує дедалі більше застосування у невеликих внутрішньогосподарських виробництвах сільгосппідприємств [1]. Застосування гранульованих кормів, що складаються в основному рослинної сировини, стало в останні роки стандартом у птахівництві та свинарстві, тоді як інші галузі тваринництва охоплені їм меншою мірою.



В той же час в аквакультури гранулювання комбікормів, отримавши у ХХ столітті стала вельми поширеною, нашого часу поступається місцем їх екстрагування [2]. Тим не менш, гранулювання кормів залишається актуальним для годування всеїдних риб, зокрема коропових, у прісноводній аквакультури [3].

Метою гранулювання рослинного сировини під час виробництва кормів є перетворення однорідної суміші інгредієнтів, у міцні частки (гранули), які мають фізичними характеристиками, які роблять їх придатними для годування конкретного виду та статеву групи тварин [2, 4].

Гранулювання розсипного корму зменшує його втрати при транспортуванні та годівлі, збільшує термін зберігання, покращує поживну цінність [4].

В даний час збільшується використання біопалива, що виготовляється з рослинної сировини, а саме відходів деревообробної промисловості (тирса, кора та ін) та відходів сільського господарства (лузга соняшнику, соломи та ін.) у вигляді паливних гранул (пеллет). Метою гранулювання рослинної сировини при виробництві біопалива є забезпечення можливості його ефективного транспортування, зберігання та використання як паливо.

Процес гранулювання, як відомо, полягає у пресуванні розсипної сировини у гранули шляхом його продавлювання пресуючими роликками через отвори (фільтери) матриці. Важливе значення для успішного здійснення процесу має попередня обробка розсипної рослинної сировини пором або додавання до нього води, а при виробництві кормів та меляси – жирів або інших сполучних речовин [4]. Операцію гранулювання здійснюють у спеціальних машинах-грануляторах (прес-грануляторах), які оснащені вертикальними кільцевими або горизонтальними плоскими матрицями з каналами (фільтрами).

Але, незважаючи на широке використання операції гранулювання в технологічному процесі виробництва комбікормів та біо-палива, продовжуються наукові дослідження, спрямовані на встановлення закономірностей процесу одержання гранул з рослинного сировини з метою вдосконалення відповідних технологій та технічних засобів у напрямку зниження енергоємності процесу та поліпшення якості гранул [5].

Аналіз останніх досліджень. Систематичний огляд наукових статей з тематики гранулювання рослинної сировини виконували за методикою, наведену в роботах Р. Дж. Торрако та Ч. Околі, що викладає послідовність відбору публікацій, їх критичного аналізу та синтезу резюмуючих висновків.



Постановка завдання. Узагальнення результатів досліджень та аналіз наукових статей, присвячених впливу різних параметрів на процес гранулювання рослинної сировини і якість одержуваних кормових та біопаливних гранул, для виявлення актуальних результатів та перспективних напрямів досліджень у цій галузі.

Основна частина. Ключовими параметрами, що впливають на протікання процесу гранулювання рослинної сировини і якість гранул, є склад сировини та розмір її частинок, а також вологість [4, 5]. Значний вплив на процес гранулювання рослинної сировини та його результати надають температура та тиск [5]. Також протікання процесу залежить від типу гранулятора та технічних характеристик його робочих органів, зокрема пресуючих роликів, матриці та її фільтр.

Вплив розміру частинок сировини. Розмір частинок рослинної сировини впливає на продуктивність гранулювання та якість гранул [4, 6]. Дослідження показали, що зменшення розміру частинок сировини збільшує силу тертя у каналі фільтри, площа їх поверхні, тим самим збільшуючи кількість та площу контактних майданчиків між частинками, внаслідок чого у частках посилюється міжмолекулярна адгезія, зокрема дія сили Ван-дер-Ваальса [4]. Все це призводить до підвищення щільності гранул, що позитивно позначається з їхньої якості.

Зменшення розміру частинок сировини збільшує капілярність між їх твердою та рідкою складовими, сприяючи кращому та більш рівномірному проникненню вологи при попередньому зволоженні сировини [6, 9]. Крім того, підвищене тертя, якому піддаються частки, призводить до їх більшого нагрівання, чому також сприяють їх малий розмір та підвищена капілярність [4, 6]. Усе це призводить до зменшення вологості готових гранул.

Результати експериментів свідчать, що зменшення розміру частинок сировини підвищує міцність готових гранул [4]. Так, Д. Бергстрем та співавтори (D. Bergström et al.) встановили, що гранулювання рослинної сировини з розміром частинок менше 1 мм вимагає менше енергії та забезпечує отримання гранул з більш високою міцністю на стиск, ніж при використанні сировини з частками розміром 1-2 та 2-4 мм [7].

Різні дослідники вважають оптимальним при гранулюванні рослинної сировини розмір часток від 1 до 3 мм. Зокрема, С. Мані (S. Mani) вважає оптимальним розмір частинок менше 3,2 мм, а Стелте (W. Stelte) - Від 1 до 3 мм. Але слід враховувати, що попереднє подрібнення сировини до розміру частинок менше 1 мм значно збільшує енергоємність технологічного процесу та знижує його продуктивність, що відповідно підвищує собівартість готових гранул



[5]. Крім того, результати досліджень показали, що занадто дрібний розмір частинок сировини (менше 0,5 мм) погіршує цінність гранул [4].

Виробникам необхідно шукати компроміс між збільшенням міцності гранул при зменшенні розміру часток рослинного сировини та підвищенням собівартості готового гранульованого корму чи біопалива.

Вода, вміст спрацьовується в сировину, а також додається в змішувач при його змішуванні або введена у вигляді пари під час кондиціонування, сприяє зв'язуванню частинок при гранулюванні [4]. Ця аглютинуюча здатність води заснована на капілярному ефекті та поверхневому натягу [4, 8]. Дж. С. Моріц та співавтори досліджували вплив додавання води в змішувач у кількості 0,25 та 50 г/кг і встановили, що значення PDI (індекс довговічності гранул) в результаті склало відповідно 75,6 та 79,6 %. Абдоллахи та співавтори встановили, що додавання води у кількості 24 г/кг корму, кондиціонованого при 60 °С, збільшило PDI з 56,5 до 67,2%. Таким чином, попереднє зволоження рослинного сировини збільшує міцність одержуваних гранул.

Однак при надмірному зволоженні вода може діяти як мастило, знижуючи тертя у фільтрі у процесі гранулювання, що негативно позначається на довговічності та міцності гранул. Це явище докладно досліджував Р. Колович, який встановив, що підвищення вологості сировини нівелює позитивний вплив збільшення довжини каналу матриці на міцність гранул.

В цілому, гранули, виготовлені при недостатній кількості вологи, є сухими та розсипчастими, а надлишок вологи призводить до отримання недостатньо міцних гранул [3].

Зміст жирів у сировині впливає на процес і результати гранулювання кормів. Тиск, надається на частинки рослинної сировини при гранулюванні призводить до того, що жири та олії переміщуються на їх поверхню [4]. Поверхневий шар ліпідів діє як мастило, зменшуючи тертя у фільтрі та тим самим знижуючи тиск гранулювання та зменшуючи витрати енергії. Жир зменшує контакт сировини зі стінками каналу фільтри, полегшуючи проходження корму через нього та цим зменшуючи його ущільнення [4]. Тому гранульований корм повинен містити кілька жирів – мінімум 2% [3].

С. К. Герінг встановив, що введення до складу корму жирів у змішувач позитивно впливає на поживну цінність гранул, тому що утворюється на поверхні гранул жировий шар сприяє зниженню тиску і температури в процесі гранулювання, що сприяє кращому збереженню термолабільних речовин, таких як вітаміни.



Таким чином, збільшення змісту жирів у сировині, з одного боку, діє позитивно, зменшуючи енергоємність процесу гранулювання та підвищуючи поживну цінність корму, з іншого боку, негативно, знижуючи щільність і міцність гранул.

Тому нині більшість фахівців вважає, що кількість жирів у кормі, що піддається гранулюванню, повинно бути щонайменше 2-3 % і трохи більше 8-10 % [3]. У тих випадках, коли потрібно включити в склад комбікорму більша кількість жирів, раціонально виконувати цю операцію вже після гранулювання за допомогою вакуумного наплення.

Вплив кондиціонування сировини. Попереднє кондиціонування сировини необхідно для отримання гранульованого корму гарної якості, що забезпечується зволоженням сировини і зміною її структури [6]. Під час кондиціонування гаряча пара руйнує структуру крохмалю, що призводить до його желатинізації, і це дозволяє пов'язувати частинки корму, забезпечуючи одержання міцних гранул [4, 6]. При правильному процесі кондиціонування гранули мають високу міцність, знижується витрата енергії, що використовується для їх виробництва, а також зменшується знос фільтр [6, 8].

Таким чином, кондиціонування при вищій температурі дозволяє покращити якість гранул, але при гранулюванні слід враховувати вплив на перебіг процесу складу рослинної сировини.

Тиск є одним із важливих змінних параметрів процесу гранулювання [5].

Воно обумовлено опором при продавлюванні сировини пресуючими роликками через канали у матриці [5]. Тиск гранулювання (пресування) також називають протитиском [5]. Воно обумовлено внутрішнім тертям між частинками сировини в результаті виникнення напруги зсуву та зовнішнім тертям між сировиною та стінками каналу матриці.

Тиск гранулювання залежить від сировини, типу гранулятора та інших параметрів процесу і піддається прямому контролю.

Тиск гранулювання рослинної сировини зазвичай має значення діапазоні 20-200 МПа, причому більш високий тиск характерний для біопаливних гранул.

У прес-грануляторах тиск безпосередньо не вимірюють, а оцінюють за споживаною ними в процесі роботи електричної потужності.

В. Стелте та співавтори при вивченні гранулювання паливних гранул із деревини та соломи встановили, що тиск гранулювання активно знижується при підвищенні температури сировини до 140 °С, після досягнення якої швидкість зниження значно зменшується.



К. Уйтaker та І. Шіелд встановили, що більш високий тиск гранулювання призводить до отримання більш міцних гранул. При підвищенні тиску гранулювання щільність одержаних гранул збільшується, але, лише до визначеної межі [5].

В. Стелте та співавтори встановили, що збільшення тиску гранулювання понад 200 МПа вже не призводить до підвищення щільності гранул. Це узгоджується з результатами більш раннього дослідження М. О. Фабороді, який розділив процес стиснення волокнистих сільськогосподарських матеріалів під тиском на дисперсну та щільну фази. У дисперсній фазі стиску домінує сила інерції окремих частинок сировини, у той час як у щільній фазі переважають пружні сили, оскільки ущільнена сировина діє як єдине тверде тіло. Таким чином, гранули формуються у каналах матриці під впливом тиску гранулювання [9].

С. Мані досліджував та описав процес формування гранул із рослинного сировини з погляду прикладеного тиску. На його думку, початкова стадія утворення гранул, також звана перегрупованням частинок, відбувається при низькому тиску, коли частинки сировини переміщуються і перебудовуються, заповнюючи порожнечі. На другій стадії, у міру збільшення тиску, зростатиме щільність гранул, усередині яких відбувається зчеплення частинок в результаті міжмолекулярної адгезії.

Результати досліджень С. Мані з гранулювання рослинної сировини (подрібнена солома та стебла) також показали, що при збільшенні тиску в діапазоні 30...160 МПа щільність гранул підвищується. Але якщо в діапазоні тиску 30...80 МПа щільність інтенсивно підвищується, то зі збільшенням тиску понад 90 МПа густина гранул підвищується незначно.

Таким чином, збільшення тиску гранулювання в діапазоні 20-150 МПа сприяє підвищенню щільності гранул.

Температура процесу гранулювання залежить від трьох параметрів: температури сировини на вході; вологість сировини; тертя та опір у каналах матриці гранулятора [5]. Температура та вологість сировини визначаються параметрами процесу кондиціонування, тоді як нагрівання в каналах матриці залежить від їх конструкції та складу сировини [9].

Д. А. Агар встановив, що температура гранул із рослинної сировини знижується зі збільшенням вологості сировини, що він пояснює високою теплоємністю води та прихованою теплотою випаровування [38].

У ході експериментів вчені вимірювали температуру матриці у процесі гранулювання рослинної сировини [9]. Щодо них повідомлень, вона становить від 70 до 150 °С.

У статті С. К. Нільсен приведена термографічна фотографія кільцевої вертикальної матриці, зроблена відразу після зупинки гранулятора, що гранулював подрібнену деревину евкаліпта (рис. 2) [5].

Як видно з рисунку 2, температура різних ділянок матриці змінюється в діапазоні 63-135 °С, причому температура поблизу зовнішнього ряду каналів матриці нижче проти внутрішніми рядами. Це може бути пояснена втратою тепла з поверхні матриці, що призводить до більш високої температури у її центральній частині.

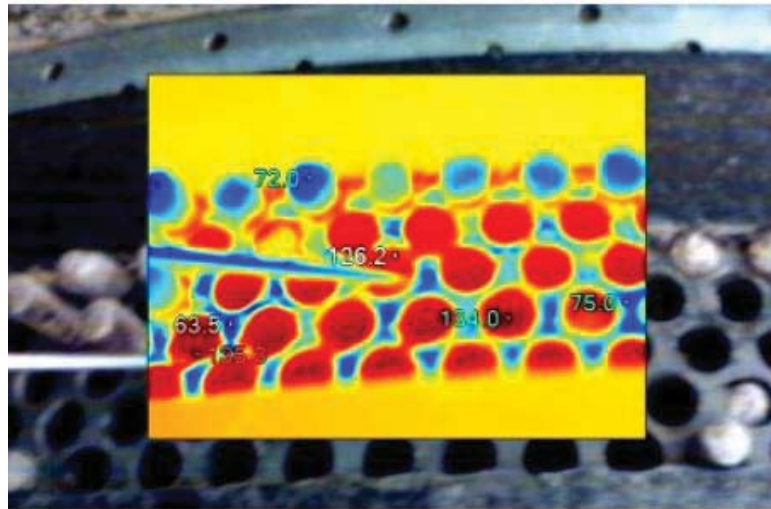


Рис. 1. Термографічна фотографія кільцевої вертикальної матриці, зроблена відразу після зупинки прес гранулятора

Температура процесу гранулювання впливає на зв'язування частинок у гранулах [9]. К. Уїтaker встановив, що температура гранулювання надає вплив на тертя та склеювання частинок, при цьому висока температура призводила до кращого склеювання.

В. Стелте та співавтори вивчали механізми склеювання частинок у паливних гранулах з деревини та соломи та встановили, що гранули, вироблені при вищій температурі, витримують велику силу стиснення до руйнування та мають більш щільну структуру.

Багато досліджень присвячені питанню оптимальної температури гранулювання рослинної сировини. На думку В. В. Кувшинова, оптимальна температура гранулювання кормів - 100-140 °С. К. Серрано вважає, що оптимальна температура матриці гранулятора для отримання пелет із ячмінної соломи під час роботи у стабільних умовах становить близько 90 °С. М. Є. Мостафа та Дж. С. Туму-луру встановили, що оптимальна температура матриці для гранулювання біопаливної рослинної сировини близька до 100 °С.



Але Б. Шафран виявив, що підвищення температури від 170 до 220 °С при гранулюванні деревини може збільшити щільність гранул, що, свою чергу, підвищує теплотворну здатність біопалива.

На основі аналізу наукових праць можна зробити висновок, що оптимальна температура гранулювання необхідно експериментально визначати для кожного виду рослинного сировини.

Вище було показано вплив входять до складу рослинної сировини води та жирів, а також розміру його частинок процес гранулювання. Кожен вид сировини має свої особливості перебігу процесу гранулювання залежно від наведених параметрів.

При виготовленні біопаливних пилет велику роль відіграє механічна міцність вихідної сировини, тому до його складу крім деревини твердих порід раціонально включати деревину м'яких порід і сільгоспну сировину [9]. Дослідження Н. Ю. Харун і М. Афзал показали, що змішування сільськогосподарської біомаси з деревною покращує механічні та фізичні властивості паливних гранул.

Ж. Кошак та А. Кошак докладно досліджували вплив складу комбікорму для птиці на питому енергоємність процесу гранулювання [51]. Вони встановили, що збільшення вміст зерна в кормі на 35,16 % призводить до підвищення питомої енергоємності процесу на 60,13%. Збільшення змісту шротів та олій у кормі на 7,2 % викликає зниження питомої енергоємності на 18,1%.

Декілька факторів можуть спільно впливати на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул [4, 52]. При цьому частка впливу кожного фактора на кінцевий результат різна.

На думку К. Мурамацу, внесок у вплив різних факторів на

PDI (індекс довговічності гранул) корми наступний: теплова обробка (кондиціонування) - 44%; вологість сировини – 16%; вміст жирів – 9%; розмір частинок сировини - 1%; інші фактори - 31% [4]. Результати моделювання показали, що найбільш ефективним дією для покращення якості гранул є кондиціонування сировини, за яким у порядку зменшення слідує додавання вологи, зменшення вмісту жирів і, нарешті, зменшення розміру частинок сировини.

На думку К. П. Кумарагуру Васагам, якість гранул приблизно на 60% залежить від попередньої обробки рослинної сировини [3].

На думку О. Клименка та О. Гуцовой- Митропольській, внесок у дію різних факторів на якість гранул корму: склад корму – 40%; кондиціонування – 20%; розмір часток – 20%; технічні характеристики гранулятора – 15%; охолодження - 5%. На думку спеціаліста фірми «Vorregaard LignoTech» М. Іванов, співвідношення впливу факторів при гранулюванні кормів таке: склад сировини – 45 %; кондиціонування – 30%; розмір частин сировини – 10%; параметри матриці – 10%; вологість і температура - 5%.



Думки дослідників про співвідношення впливу різних факторів на процес гранулювання рослинної сировини зведено у таблицю. На думку С. К. Нільсен та співавторів, складна взаємодія між численними фізичними процесами, що відбуваються одночасно в прес-гранулятор, ускладнює інтерпретацію впливу кожного параметра на процес одержання біопаливних гранул [5]. Вони вважають, що в сучасній науковій літературі існує прогалина у розумінні взаємодії між деякими параметрами гранулювання та їх впливом на результати процесу.

Таблиця 1

Думки дослідників про співвідношення впливу різних факторів на процес гранулювання рослинної сировини та якість гранул

Фактор	Частка впливу фактора на процес гранулювання та якість гранул, %		
	<i>К. Мурамацу</i>	<i>А. Кліменко і А.Гущева- Митропольска</i>	<i>М. Іванов</i>
Теплова обробка (кондиціювання)	44	20	30
Вологість сировини	16	-	2
Вміст жирів	9	-	-
Розмір частинок сировини	1	20	10
Склад сировини	-	40	45
Конструктивні параметри прес-гранулятора	-	15	10
Охолодження	-	5	-
Температура	-	-	3
Інші фактори	31	-	-

Тому, незважаючи на значний обсяг знань, накопичених за останні роки, необхідні подальші дослідження взаємодії факторів, що впливають на якість гранул із рослинної сировини.

Висновки. Підвищення ефективності процесу гранулювання рослинної сировини для виробництва біопаливних пелет та гранульованих кормів знаходиться у центрі уваги інженерів та вчених.

Аналіз результатів досліджень показав, що попередня теплова обробка та зволоження рослинної сировини, а також його склад та розміри частинок є факторами, які мають найбільший вплив на якість кормових та біопаливних гранул. На якість гранул комбікорму, крім цього, великий вплив має вміст жирів у вихідній сировині.

*Список використаних джерел*

1. Blagov D. A., Gizatov A. Y., Smakuyev D. R., Kosilov V. I., Pogodaev V. A., Tamaev S. A. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*. 2021. Vol. 11. P. 264-270.
2. Regupathi E. R., Suriya A., Geethapriya R. S. On studying different types of pelletizing system for fish feed. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2019. Vol. 7(2). P. 187-192. URL: <https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-4-857.pdf> (дата звернення 23.09.2023).
3. Kumaraguru Vasagam K. P., Ambasankar K., Dayal J. S. An overview of aquafeed formulation and processing. *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. Springer, New Delhi, 2015. P. 227-240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21.
4. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that affect pellet quality: a review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015. Vol. 9(2). P. 717-722. <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>.
5. Dujmovic M., Safran B., Jug M., Radmanovic K., Antonovic A. Biomass Pelletizing Process. *Drvna Industrija*. 2022. Vol. 73(1). P. 99-106. <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2139>.
6. Harun N. Y., Afzal M. Effect on particle size on mechanical properties of pellets made from biomass. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 148. P. 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>.
7. Bergström D., Israelsson S., Ohman M., Dahlqvist S. A., Gref R., Boman C., Wasterlund I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*. 2008. Vol. 89(12). P. 1324-1329. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.001>.
8. Froetschner J. Conditioning Controls Quality of Pellet. *Feed Tech*. 2006. Vol. 10(6). P. 12-5. URL: <https://vk.cc/chaXTz> (дата звернення 28.09.2023).
9. Червоткіна О. О., Тарасенко В. Г. Аналіз умов залучення сировини до зони стиснення та обґрунтування довжини каналу пресування. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матер. III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. (Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.)*. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 360-363.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2023 р.



O. Chervotkina¹, N. Fuchadzy¹, N. Palianychka¹, V. Samohval¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

INFLUENCE OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE PROCESS OF GRANOU-LUVANNE OF ROSLINY SYROVINE AND YACTERITY GRANULES

Summary

Determining the regularities of the process of pelleting vegetable raw materials is relevant for the improvement of technologies and technical equipment in order to reduce energy intensity and improve the quality of pellets. The generalization of the results of the research aimed at studying the influence of various parameters on the process of pelleting vegetable raw materials and the quality of feed and biofuel pellets is the purpose of the research.

A selection and systematic review of the scientific literature on the subject of the study for the period of 2007-2022 has been carried out. The analysis has proved that heat pre-treatment and moistening of vegetable raw materials, as well as their composition and particle size are the factors that have the greatest impact on the quality of feed and biofuel pellets. Increasing the pressure in the range of 20...200 MPa results in increasing the pellets durability. A die temperature of around 100°C is optimum for obtaining dense pellets of highquality from vegetable raw materials. The design parameters of the pelletizer play an important role in obtaining high-quality pellets when processing vegetable raw materials.

The design of the inlet in the form of a tapering cone helps to reduce energy consumption and pelleting pressure. An increase in the ratio of the die channel length to its diameter exponentially increases the pelleting pressure and its energy intensity. The interplay between the physical processes occurring in the pelletizer makes it difficult to interpret the impact of each parameter on the pelleting process, so different authors have different assessments of the contribution of individual factors in producing high-quality pellets. Therefore, the interaction between the individual pelleting parameters and their influence on the results of the process should be examined more precisely.

Keywords: feeds, biofuel, pelletizer, die, pellet density, pellet durability, pelleting energy intensity.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-124-133

УДК [631.363:662.63]:665.35

В. С. Кошулько¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0744-6318

О. М. Пацула², старш. наук. спів.

ORCID: 0000-0000-0000-0000

¹ Дніпровський державний аграрно-економічний університет² Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук Україниe-mail: vitaliykoshulko@gmail.com, тел.: +380969248267

РОЗРОБКА БРИКЕТУВАЛЬНОГО ГВИНТОВОГО ПРЕСУ ЛУШПИННОЇ ФРАКЦІЇ МАКУХИ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

Анотація. Лушпинна фракція, що включає основну масу клітковини використовується для виготовлення паливних брикетів. З цією метою в конструктивно-технологічну схему переробки макух з насіння олійних культур включено установку для виготовлення паливних брикетів, що дозволить одержувати брикети питомою вагою не менше 1000 кг/м³ при температурі не вище 150 °С з питомою теплотою згорання до 19 МДж/кг. Для реалізації технологічної лінії по переробці олійного насіння розроблено конструкцію і виготовлено брикетувальний гвинтовий прес. Встановлена залежність продуктивності Q і потужності приводу N брикетувального гвинтового пресу від довжини фільери L і частоти обертання гвинта n . Обґрунтовані раціональні значення основних конструктивно-технологічних параметрів: продуктивність – 260 кг/год, частота обертів гвинта – 320 об/хв, діаметр гвинта – 100 мм, діаметр фільери – 50 мм і довжина фільери – 150 мм.

Ключові слова: пресування, щільність, експериментальна установка, конструкція, параметри, частота обертання, фільера, продуктивність, потужність

Постановка проблеми. Під час переробки сільськогосподарської сировини одержують велику кількість різноманітних відходів. В Україні у якості цінного корму для сільськогосподарських тварин та птиці використовують відходи оліє-жирової промисловості – макухи з насіння олійних культур, які одержують при добуванні олії пресуванням на гідравлічних або гвинтових пресах [1–2]. Білки макух, зокрема білок насіння соняшнику, характеризується високою біологічною цінністю та перетравністю [3].

З огляду на створення нових виробництв для переробки нешеретованого насіння соняшнику, ріпаку, льону, гірчиці і інших культур з використанням прес-екструдерів, виробництво макухи поступово збільшується. Високий вміст клітковини в цих макухах, особливо завдяки лушпинній фракції, впливає на якість макуху та обмежує його використання у комбікормах для свиней і птиці. Так,



макуха з насіння соняшнику за вмістом протеїну відноситься до концентрованих кормів, а за вмістом клітковини наближається до грубих [4–6].

За покращення продуктивності тварин і птиці, важливою є задача збільшення виробництва та підвищення якості білкових кормів. Це може бути досягнуто шляхом вдосконалення технології переробки макухи. На сьогодні основним способом переробки макухи є подрібнення з послідуочим введенням в комбікорми [7]. В його задачу входить одержання максимально однорідних часток, 80 % яких повинно пройти через решето з діаметром отворів 1 мм [8].

Підвищення ефективності обробки макухи завдяки введенню додаткового процесу механічного розділення роздробленої макухи дозволяє виділити більше 40 % білкової фракції з вмістом протеїну не менше 38 % [9–11].

Для виконання даної операції було виготовлено щітковий роторний просіювач, переваги якого – якісне фракціонування подрібненої макухи, що має в своєму складі до 12 % олії [12–13].

Лушпинна фракція, що включає основну масу клітковини використовується для виготовлення паливних брикетів. З цією метою в конструктивно-технологічну схему переробки макух з насіння олійних культур включено установку для виготовлення паливних брикетів, що дозволить одержувати брикети питомою вагою не менше 1000 кг/м³ при температурі не вище 150 °С з питомою теплотою згорання до 19 МДж/кг [14–16].

При одержанні брикетів з лушпинної фракції процеси подрібнення і сушки відсутні, що значно знижує затрати на їх виготовлення, а наявність в ній до 12 % олії дозволяє знизити енергоємність процесу брикетування в 2,5–3 рази.

Аналіз останніх досліджень. Тверде біопаливо виготовляється у вигляді брикетів або пелет. Пелети та брикети – види поновлюваного палива, що виробляються методом термічного пресування з відходів деревини та сільськогосподарської промисловості (сировина: тирса, солома, відходи з рапсу, лузга соняшника, торф тощо). Вимоги до сировини: вологість – 6–14 %; фракційний склад 1–8 мм [17–19].

Брикети, незалежно від того, з якої сировини їх виготовляють різні за формою: прямокутна або шестигранна призма, циліндр з отвором всередині або без нього. Стандартних розмірів у даного виду палива немає. Загальноприйнята довжина брикету 20–30 см [20].

Основним фактором, який визначає механічну міцність, водостійкість і калорійність брикету, є його питома вага. Чим більша питома вага брикету, тим вищі показники його якості. Наприклад, якщо питома вага брикету 650–750 кг/м³ калорійність дорівнює 12–14 МДж/кг; при питомій вазі 1200–1300 кг/м³ калорійність складає 25–

31 МДж/кг [9, 21–22].

Для виготовлення паливних брикетів використовуються гвинтові брикетні преси або преси ударної дії. Паливні брикети виготовлюються шляхом використання екструдерного пресування при високих температурах. В якості зв'язуючої речовини використовується лігнін, який є природним продуктом і виділяється під час нагрівання. Цей вид палива не містить жодних додаткових хімічних добавок [23–25]. Виробництво паливних брикетів включає такі основні етапи:

1. Подрібнення вихідної сировини до фракції, яка підходить для подальшого брикетування.
2. Сушка сировини до рівня вологості 12 % або менше.
3. Пресування сировини за допомогою екструдерного методу.

Деякі види сировини, такі як, наприклад, соняшник, не вимагають додаткового подрібнення та сушки, адже вони мають вже відповідну вологість (нижче 12 %) і достатньо м'яку фракцію. В таких випадках використовується гранулювання методом екструдерного пресування.

Обладнання для виготовлення паливних брикетів не вимагає ніякої спеціальної ліцензії, воно є не стандартне і виготовляється по технічному завданню.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Розробити брикетувальний гвинтовий прес лушпинної фракції макухи олійних культур і обґрунтувати його конструктивно-технологічні параметри.

Основна частина. Конструктивно-технологічна схема і загальний вигляд брикетувального гвинтового пресу лушпинної фракції макухи олійних культур наведені на рис. 1.

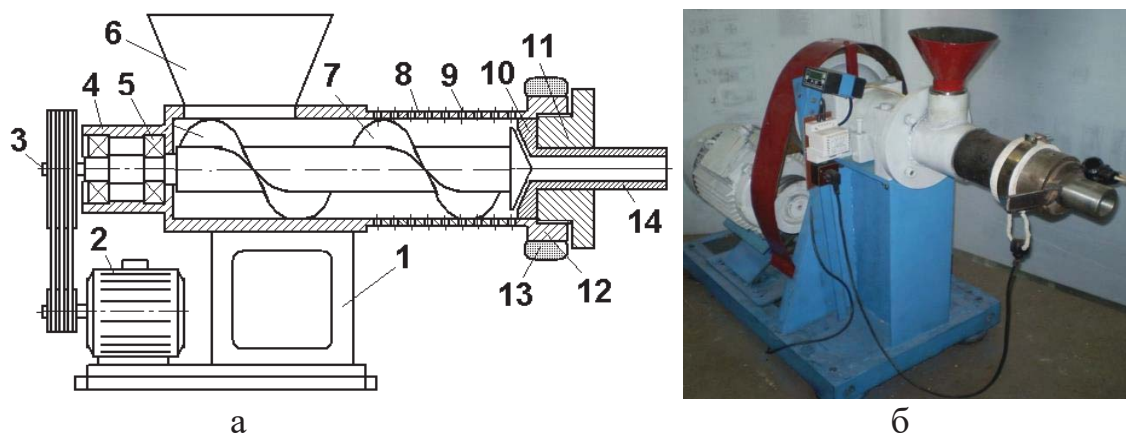


Рис. 1. Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) брикетувального гвинтового пресу лушпинної фракції макухи олійних культур



Прес складається з рами 1, до якої прикріплений електропривід 2, що викликає обертальний рух валу 3, розташованого всередині циліндричного корпусу 4 разом із підшипниковим вузлом 5. Над цим циліндричним корпусом розташований завантажувальний бункер 6, з якого матеріал подається на гвинт 7, який приєднаний до валу 3 і має форму гвинта з конусом на торці. Гвинт обертається всередині перфорованої гільзи 8 з отворами 9. Гільза з одного боку прилягає до циліндричного корпусу 5, а з іншого – до фільтри 10, яка має конічну форму з переходом у циліндричну поверхню 14. Фільтри розташована в стакані 11 і може переміщуватися відносно гайки 12. На зовнішній поверхні гайки 12 закріплено електронагрівач 13.

Для виконання експериментальних досліджень змонтована механізована технологічна лінія переробки макух з насіння олійних культур з одержанням протеїнових добавок і твердого біопалива (рис. 2). Базовим обладнанням цієї лінії стали гвинтова норія, молоткова дробарка, щітковий роторний просіювач та брикетувальний гвинтовий прес.



Рис. 2. Механізована технологічна лінія переробки макух з насіння олійних культур з одержанням протеїнових добавок і твердого біопалива



При проведенні досліджень було використано:

- частотний регулятор асинхронних двигунів Danfoss Micro Drive;
- комплект вимірювальний К-50 – для визначення потужності;
- тахометр ТЧ-10-Р – для визначення частоти обертів робочих органів обладнання;
- секундомір СДПР-12-000 – для визначення продуктивності;
- ваги ВН-10Ц – для зважування досліджуваного матеріалу.

Технічна характеристика брикетувального гвинтового пресу складена на основі даних технічного завдання, технічної документації та результатів експертизи обладнання (табл. 1).

Таблиця 1

Технічна характеристика брикетувального гвинтового пресу

№ п/п	Показники	Значення показника	
		згідно ТЗ	фактично
1	Тип пресу	стаціонарний	стаціонарний
2	Діаметр гвинта, мм	90–110	100
3	Шаг гвинта, мм	17–18	18
4	Діаметр фільтри, мм	40, 50, 60	50
5	Довжина фільтри	130–160	150
6	Частота обертів гвинта, об/хв	не більше 400	320
7	Маса устаткування, кг	не більше 320	290
8	Потужність приводу, кВт	не більше 11	7,5
9	Габаритні розміри, мм:		
	довжина	не більше 1650	1610
	ширина	не більше 1100	1040
	висота	не більше 620	580

Дослідження проведені на лушпинній фракції макухи насіння соняшнику.

В якості факторів досліджень обрано довжину фільтри L (120, 150, 180 мм) і частоту обертання гвинта n (120, 240, 360 об/хв).

Для організації досліджень була використана трирівнева матриця оптимального планування другого порядку Бокса-Бенкіна для аналізу впливу двох факторів.

В результаті обробки даних отримано рівняння залежності продуктивності пресу від факторів досліджень:

$$Q = 295,4455 - 0,6945 L + 0,3441 n + 0,00261 L^2 - 0,0021 Ln + 0,0003 n^2. \quad (1)$$

В результаті статистичної обробки даних і рівняння (1) розраховано: критерій Фішера $F = 2,2512 < F_{05}(5, 30) = 2,53$, коефіцієнт детермінації моделі $R^2 = 0,9730$. Тобто модель (1) – адекватна.

Отримана регресійна модель потужності процесу брикетування:

$$N = 10,5282 + 0,01051 L - 0,02922 n - 1,063 \cdot 10^{-5} L^2 + 4,1668 \cdot 10^{-6} L n + 3,5329 \cdot 10^{-5} n^2. \quad (2)$$

В результаті статистичної обробки даних і рівняння (2) розраховано: критерій Фішера $F = 1,3114 < F_{05}(5, 30) = 2,53$, коефіцієнт детермінації моделі $R^2 = 0,9218$. Тобто модель (2) – адекватна.

Графіки залежностей (1) і (2) наведені на рис. 3.

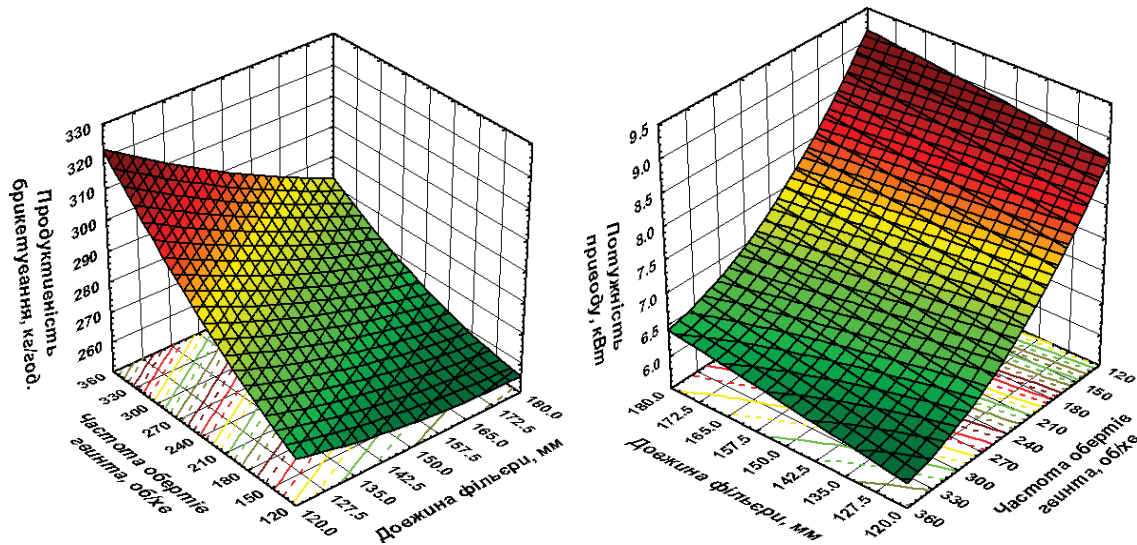


Рис. 3. Залежність продуктивності Q і потужності приводу N від довжини фільтри L (мм) і частоти обертання гвинта n (об/хв.)

Були визначені основні конструктивно-технологічні параметри брикетувального гвинтового пресу, які є раціональними: продуктивність – 260 кг/год, частота обертів гвинта – 320 об/хв, діаметр гвинта – 100 мм, діаметр фільтри – 50 мм і довжина фільтри – 150 мм.

Показники якості роботи брикетувальника наведено в табл. 2

Таблиця 2

Показники якості роботи брикетувального гвинтового пресу

Показники	Значення показника
Тривалість виробничого циклу, год	0,08
Питома вага брикетів з лушпиної фракції, кг/м ³ :	–
– соняшникової макухи	1052
– ріпакової макухи	1012
– гірчичної макухи	1102
Потужність процесу брикетування, кВт	4,9
Потужність холостого ходу, кВт	2,4



Висновки. Для реалізації технологічної лінії по переробці олійного насіння розроблено конструкцію і виготовлено брикетувальний гвинтовий прес.

Встановлена залежність продуктивності Q і потужності приводу N брикетувального гвинтового пресу від довжини фільтри L і частоти обертання гвинта n .

Обґрунтовані раціональні значення основних конструктивно-технологічних параметрів: продуктивність – 260 кг/год, частота обертів гвинта – 320 об/хв, діаметр гвинта – 100 мм, діаметр фільтри – 50 мм і довжина фільтри – 150 мм.

Список використаних джерел

1. Алієв Е. Б. Технологія і технічні засоби комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива. *Пропозиція*. 2019. № 5. С. 187–193.

2. Гриценко В. Т., Бакарджієв Р. О. Перспективи отримання білкових добавок і біопалива з насіння олійних культур. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. Т. 2, вип. 98. С. 152–157.

3. Бегма Н. А. Використання кормів: навчальний посібник. Дніпро: ДДАЕУ, 2018. 168 с. <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/1362> (дата звернення 04.09.2023).

4. Berwanger E., Nunes R. V., Pozza P. C., Oliveira T. M. M. de Scherer C., Frank R., Bayerle D. F., Henz J. R. Nutritional and energy values of sunflower cake for broilers. *Semina: Ciências Agrárias*. 2014. Vol. 35(6). P. 3429–3438. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n6p3429>.

5. Cordeiro C. N., Freitas E. R., Nepomuceno R. C., Pinheiro S. G., Souza D. H., Watanabe G. C. A., Freitas C. A., Watanabe P. H. Nutritional Composition, Metabolisable Energy and Total Use of Sunflower Seed Cake for Meat Quail. *Braz. J. Poult. Sci.* 2022. Vol. 24(2). P. 1–10. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2021-1470>.

6. Vasudha C., Sarla L. Nutritional quality analysis of sunflower seed cake (SSC). *The Pharma Innovation Journal*. 2021. Vol. 10(4). P. 720–728. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2021/vol10issue4/PartK/10-3-59-923.pdf> (дата звернення 19.09.2023).

7. Kumar S. Sunflower is a Good Source of Animal Feed. *J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 2018. Vol. 7. P. 2812–2816.



<https://www.ijcmas.com/special/7/Sunil%20Kumar2.pdf> (дата звернення 26.09.2023).

8. Братішко В. В. Механіко-технологічні основи приготування повнораціонних комбікормів гвинтовими грануляторами. Дис. ... д. т. . н.: 05.05.11. Глеваха, 2017. 397 с.

9. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: науково-методичні рекомендації. Запоріжжя: СТАТУС. 2017. 96 с. http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_2.pdf (дата звернення 20.09.2023).

10. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А. та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛПА, 2022. 192 с. http://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_6.pdf (дата звернення 20.09.2023).

11. Алієв Е. Б., Пацула О. М. Результати експериментальних досліджень макетної установки для виготовлення пелет з білкової фракції макух насіння олійних культур. Технічні системи і технології тваринництва: *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 157. С. 222–226. http://aliev.in.ua/doc/stat/2015/stat_3.pdf (дата звернення 26.09.2023).

12. Алієв Е. Б., Колбасін О. О., Ручий І. А. Результати експериментальних досліджень щіткового роторного просіювача. *Олійні культури. тенденції та перспективи*: збірник тез Міжнар.наук. інтернет-конф.(1 листопада 2016 р.). Київ, 2016. С. 132–133. http://aliev.in.ua/doc/stat/2016/stat_9.pdf (дата звернення 19.09.2023).

13. Роторний щітковий просіювач: пат. 89851 Україна, МКИ В07В 1/08. № 200803973; заявл. 31.03.08; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.

14. Бакарджієв Р. О., Гриценко В. Т. Параметри кулісного коромисло-повзунного преса брикетувальника. *Праці ТДАТУ*. 2013. Т. 3, вип. 13. С. 23–31.

15. Nurkina S., Kinzhibekova A., Prihodko E. Research and analysis of characteristics of fuel from organic and industrial waste. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2022. Vol. 5. P. 43–54. <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002357>.

16. Demirel C., Herak D., Gurdil G. A. K., Kabutey A. Briquette densification from ground hazelnut husks and sunflower stalks under compression loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 420. No 012019. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012019>.



17. Nikiforov A., Kinzhibekova A., Prikhodko E., Karmanov A., Nurkina S. Analysis of the Characteristics of Bio-Coal Briquettes from Agricultural and Coal Industry Waste. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 3527. <https://doi.org/10.3390/en16083527>.

18. Ibrahim M. S., Bello S., Ibrahim A. Biomass Briquettes as an Alternative Source of Cooking Fuel towards Green Recovery Post COVID-19. *Saudi Journal of Engineering and Technology*. 2020. Vol. 5(6). P. 285–290. <https://doi.org/10.36348/sjet.2020.v05i06.005>.

19. Spirchez C., Lunguleasa A., Croitoru C. Ecological briquettes from sunflower seed husk. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 80. No 01001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198001001>.

20. Plíštil D., Brožek M., Malat'ák J., Roy A., Hutla P. Mechanical characteristics of standard fuel briquettes on biomass basis. *Res. Agr. Eng.* 2005. Vol. 51(2). P. 66–72. <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/rae/2005/02/06.pdf> (дата звернення 15.09.2023).

21. Kougioumtzis M. A., Kanaveli I. P., Karampinis E., Grammelis P., Kakaras E. Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 171. P. 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>.

22. Bala-Litwiniak A., Musiał D. Computational and Experimental Studies of Selected Types of Biomass Combustion in a Domestic Boiler. *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15(14). No 4826. <https://doi.org/10.3390/ma15144826>.

23. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. Результати лабораторних досліджень процесу виготовлення паливних брикетів з ріпакової соломи. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. Vol. 2(121). P. 23–31. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-3>.

24. Marreiro H. M. P., Peruchi R. S., Lopes R. M. B. P., Andersen S. L. F., Eliziário S. A., Rotella Junior P. Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*. 2021. Vol. 14(24). No 8320. <https://doi.org/10.3390/en14248320>.

25. Kpalo S. Y., Zainuddin M. F., Manaf L. A., Roslan A.M. A Review of Technical and Economic Aspects of Biomass Briquetting. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(11). No 4609. <https://doi.org/10.3390/su12114609>.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2023 р.



V. Koshulko¹, O. Patsula²

¹ Dnipro State Agrarian and Economic University

² Institute of Oilseed Crops of the NAAS

DEVELOPMENT OF A BRIQUETTING SCREW PRESS FOR THE HUSK FRACTION OF THE CAKE OF OIL CROPS

Summary

During the processing of agricultural raw materials, a large amount of various waste is obtained. In Ukraine, the waste of the oil and fat industry is used as valuable fodder for farm animals and poultry – cake from the seeds of oil crops, which is obtained during oil extraction by pressing on hydraulic or screw presses. The husk fraction, which includes the main mass of fiber, is used for the production of fuel briquettes.

For this purpose, the construction and technological scheme of oilseed cake processing includes a plant for the production of fuel briquettes, which will allow to obtain briquettes with a specific weight of at least 1000 kg/m³ at a temperature not higher than 150 °C with a specific heat of combustion up to 19 MJ/kg.

Production of fuel briquettes includes the following main stages. 1. Shredding of raw materials to a fraction suitable for further briquetting. 2. Drying of raw materials to a moisture level of 12% or less. 3. Pressing raw materials using the extruder method.

The purpose of the work is the development of a briquetting screw press for the husk fraction of the cake of oilseed crops and the substantiation of its structural and technological parameters.

For the implementation of the technological line for the processing of oilseeds, a design was developed and a briquetting screw press was manufactured. To carry out experimental research, a mechanized technological line for the processing of cake from oilseeds with the production of protein additives and solid biofuel was installed. The basic equipment of this line became a screw noria, a hammer crusher, a brush rotary sieve and a briquetting screw press.

The length of the spinneret L (120, 150, 180 mm) and the rotation frequency of the screw n (120, 240, 360 rpm) were chosen as research factors. To organize the research, a three-level matrix of optimal planning of the second order of Box-Benkin was used to analyze the influence of two factors.

The dependence of productivity Q and drive power N of the briquetting screw press on the length of the die L and the rotation frequency of the screw n is established. Reasonable rational values of the main structural and technological parameters: productivity – 260 kg/h, screw rotation frequency – 320 rpm, screw diameter – 100 mm, die diameter – 50 mm and die length – 150 mm.

Keywords: pressing, density, experimental setup, design, parameters, rotation frequency, die, performance, power.



**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-134-151**УДК 621.311:621.311.25**С. В. Галько¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7991-0311

О. О. Мірошник², д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-6144-7573

М. М. Сивенко², аспірант

ORCID: 0000-0003-1311-646X

M. Z. Qawaqzeh³, PhD

ORCID: 0000-0001-7027-5577

Huthaifa Al_Issa³, PhD

ORCID: 0000-0002-0768-8325

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*² *Державний біотехнологічний університет, м. Харків*³ *Balqa Applied University, Al Salt, Jordan*e-mail: galkosv@gmail.com, тел.: +380674217508**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
НАКОПИЧУЮЧИХ ТА ГЕНЕРУЮЧИХ ДЖЕРЕЛ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ ЛОКАЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Анотація. У статті розглянуті шляхи забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі відновлюваних джерел енергії і визначені найбільш придатні параметри для зберігання електричної енергії та генеруючого обладнання в автономних локальних електричних системах. Наведено обґрунтування ролі накопичувачів електричної енергії за наявності відновлюваних джерел енергії в автономних локальних електричних системах зі стохастичним режимом роботи. Розглянуто основні положення моделей електричних систем, що використовується. Досліджено залежність параметрів накопичувача енергії залежно від складу генеруючих потужностей. Розглянуто реалізацію задачі визначення параметрів пристроїв накопичення електричної енергії методом цілеспрямованого моделювання. Обґрунтовано результати багатокритеріального вибору потужності та енергоємності накопичувача електричної енергії. Розроблено математичну модель визначення оптимальних параметрів пристроїв накопичення електричної енергії для автономних локальних електричних систем з використанням змішаного цілочисельного програмування з оптимізацією та врахуванням економічних показників. Розглянуто основні положення моделі, що використовується. Досліджено залежності параметрів накопичувачів електричної енергії від складу генерації автономних локальних електричних систем.

Ключові слова: локальні електромережі, відновлювальна енергетика, накопичувачі електроенергії, генерація, автономні джерела.



Постановка проблеми. У структурі автономних локальних електричних систем (АЛЕС) активно використовуються джерела генерації на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1-3].

При цьому необхідно розробити шляхи забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ. Для рішення цієї проблеми, як правило, розглядають та застосовують наступні методи:

- за рахунок використання накопичувачів зберігання електричної енергії в системі;
- за рахунок використання додаткових традиційних джерел генерації;
- шляхом застосування методів керування попитом, тобто за рахунок спотворення графіків навантажень.

Найбільш цікавими і перспективними для використання у АЛЕС є перший метод у поєднанні з третім, але для цього необхідно розробити алгоритм їх об'єднання.

При складанні моделі оптимізації накопичувачі розглядалися разом з генеруючими джерелами. Це вірно з економічної точки зору. Однак накопичувачі електричної енергії характеризуються відмінними від генераторів технічними параметрами і характеристиками. Тому було приділено більше уваги цим елементам системи та алгоритму забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ.

Визначення оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії для АЛЕС здійснюється, в першу чергу, виходячи з техніко-економічних міркувань. Загальне завдання буде вирішуватися як двоступенева задача: виходячи, в першу чергу, з технічних міркувань, підбирається потужність і ємність накопичувача, а потім, з урахуванням економічної оцінки, підбирається його тип. Така постановка задачі є комплексно складною, незважаючи на деякі спрощення. При виборі потужності і ємності накопичувачів все одно доводиться враховувати економічну складову, а при виборі типу - і технічну.

Аналіз останніх досліджень. У питанні забезпечення безперебійного електропостачання споживачів в умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ існує необхідність у переході від використання одного конкретного методу до розробки алгоритму що матиме багатокритеріальний підхід.

Основна мета полягає в тому, щоб визначити два параметри: потужність і ємність накопичувачів електричної енергії. Вибір типу накопичувача електричної енергії здійснюється після визначення цих



параметрів, відповідно до сфери їх застосування, економічних, географічних, технічних та інших параметрів [4-6].

Очевидно, що при роботі АЛЕС з використанням генераторів, що працюють на базі ВДЕ, постійно виникають незбалансовані ситуації. Використання запам'ятовуючих пристроїв просто необхідно для зниження ймовірності виникнення подібних ситуацій [7]. При розрахунку позитивних значень дисбалансів приймаються ситуації, в яких генерація перевищує попит, а як негативні – коли попит перевищує генерацію.

В якості керованих джерел генерації використовуються дизель-генератори, а в якості джерел генерації на основі ВДЕ - вітрові електростанції (ВЕС) [8, 9] і сонячні електростанції (СЕС) [10-12].

Для дослідження взаємозв'язку між часткою генерації на основі ВДЕ в АЛЕС і необхідними при цьому параметрами накопичення електричної енергії наведено 11 варіантів [11-13]. Різниця в опціях полягає у різній частці генерації ВДЕ, яка коливалася від 0 до 100% (з кроком 10%). У першому варіанті передбачається, що необхідна енергія повністю виробляється дизельними генераторами, тоді як у другому варіанті електроенергія повністю виробляється вітровими та сонячними електростанціями.

Формування цілей статті. Розробка методики визначення оптимальних параметрів накопичувачів електроенергії і генеруючих систем як одних з важливих засобів забезпечення функціонування АЛЕС.

Основна частина. Основні параметри накопичувачів електричної енергії можна розрахувати за допомогою наступних співвідношень.

Ємність накопичувача електричної енергії:

$$P_{\text{накоп}} = \max|\Delta P|, \quad (1)$$

де $|\Delta P|$ - різниця між загальною потужністю генеруючих джерел в ізольованій системі і потужністю споживачів для цього режиму.

Ємність накопичувачів визначається наступним виразом:

$$E_{\text{накоп}} = \frac{\max(\int |\Delta P| dt)}{\eta_{\text{накоп}}}, \quad (2)$$

де $\eta_{\text{накоп}}$ – ККД накопичувачів електричної енергії.

У дослідженні застосовується метод цілеспрямованої імітації. При цьому використовується пошук різних варіантів, зокрема з різною часткою генерації з ВДЕ. Це дозволяє відповісти на питання про те, що буде відбуватися за різними параметрами в кожному окремому випадку.

Всі варіанти враховували наявність накопичувачів електричної енергії, встановлена потужність яких визначається як різниця між



загальною встановленою потужністю, що генерується при використанні ВДЕ, і мінімальною потужністю навантаження:

$$P_{накоп} = (P_{вз} + P_{сз}) - \min(P_{нав}), \quad (3)$$

де $P_{вз}$ - енергія, що генерується вітровими генераторами;

$P_{сз}$ - електроенергія, що генерується сонячними електростанціями;

$P_{нав}$ - потужність навантаження.

Загальна потужність, що виробляється генераторами на основі ВДЕ, повинна бути завідомо більшою, ніж значення мінімальної потужності накопичувача. Ця обставина дозволяє накопичувати надлишкову енергію (більше тієї, що пішла на покриття поточного навантаження) виробленої на основі ВДЕ, оскільки одним з припущень є те, що електроенергія, вироблена на основі ВДЕ, має пріоритет при заповненні графіка навантаження. Традиційні генератори викопного палива (в даному випадку дизельні) використовуються тільки тоді, коли сумарна потужність ВДЕ і накопичувачів недостатньо для покриття поточного навантаження [7, 13-15].

При визначенні вартості електричної енергії (з урахуванням експлуатаційних витрат, в тому числі паливної складової), що виробляється дизельними генераторами, використовувалася наступна квадратична функція:

$$(P) = aP^2 + bP + c, \quad (4)$$

Максимальні потужності генераторів вибираються за умови, що вони покривають максимальне (пікове) навантаження ізольованої системи, мінімальна потужність визначається технічними можливостями генераторів.

Цільова функція витрат для дизельних генераторів представлена наступним виразом:

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^4 C_i (X_i P_i(t)), \quad (5)$$

де C_i - вартість виробництва електроенергії;

X_i - бінарна змінна;

$P_i(t)$ - потужність i -того дизельного генератора.

Обмеження для даної цільової функції має вигляд [18]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^F P_i(t) = P_{нав}(t) - P_{вз}(t) - P_{сз}(t) \pm P_{нак}(t) \\ X_i P_i^{min} \leq P_i(t) \leq X_i P_i^{max} \end{cases}, \quad (6)$$

де $P_{нав}(t)$ - потужність навантаження в АЛЕС;

$P_{вз}(t)$ - електроенергія, що генерується ВЕС;

$P_{сз}(t)$ - електроенергія, що генерується СЕС;

При розрахунках величина $P_{накоп}$ при зарядці і розрядці накопичувачів розглядається як навантаження або генерація відповідно. Таким чином, це значення в розрахунках приймається як



позитивне в тому випадку, коли накопичувач заряджається, так і негативне в тому випадку, коли він розряджається [11, 16-19].

Основна відмінність розглянутої процедури полягає в тому, що при визначенні оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії склад генераторів вважається встановленим [12, 20]. Розрахунок проводиться на один рік. Загальна сума річних витрат енергосистеми складається з наступних компонентів:

$$C_p = C_2 + C_{ав} + C_{ндв} + C_{внн}, \quad (7)$$

де C_2 - вартість палива;

$C_{ав}$ – амортизаційні відрахування на систему накопичувачів електроенергії;

$C_{ндв}$ – вартість електроенергії, що не відпущена споживачам через недостатню ємність накопичувача;

$C_{внн}$ – витрати на виробництво електроенергії від ВДЕ, неінтегрованою накопичувачем в АЛЕС на протязі одного року.

Тобто можуть виникнути ситуації, коли при повній зарядці накопичувачів подальша інтеграція ними потужності з ВДЕ неможлива (таку потужність будемо називати неінтегрованою в АЛЕС) [21, 22]. В цьому випадку необхідно скоротити виробництво енергії з ВДЕ, а в подальшому збільшити потужність накопичувачів.

У зв'язку з вищесказаним оптимізована функція буде мати наступний вигляд:

$$OF_2 = \min(C_p). \quad (8)$$

Розрахунок проводився для одинадцяти варіантів, виходячи з терміну служби накопичувача – 10 років та коефіцієнта дисконтування 10%. Очевидно, що зростання загального обсягу електроенергії, що генерується з використанням ВДЕ, вимагає збільшення ємності накопичувачів.

Інвестиційні витрати на установку накопичувачів електроенергії стають рентабельними тільки в тому випадку, якщо енергія, вироблена ВДЕ, становить більше 30% річного споживання електроенергії [23-25]. Ця обставина в основному обумовлена величиною невідпуску електроенергії споживачам [17, 26]. На рисунку 1 наведено залежність параметрів накопичувачів від частки генерації від ВДЕ.

Проведено аналіз впливу складу генерації з використанням ВДЕ на ємність накопичувачів [27-29] і досліджено три випадки:

- частка вітрогенерації складала 0%, сонячної генерації - 100%;
- частка вітрогенерації - 100%, сонячної генерації - 0%;
- частка вітрогенерації - 50%, сонячної генерації - 50%.

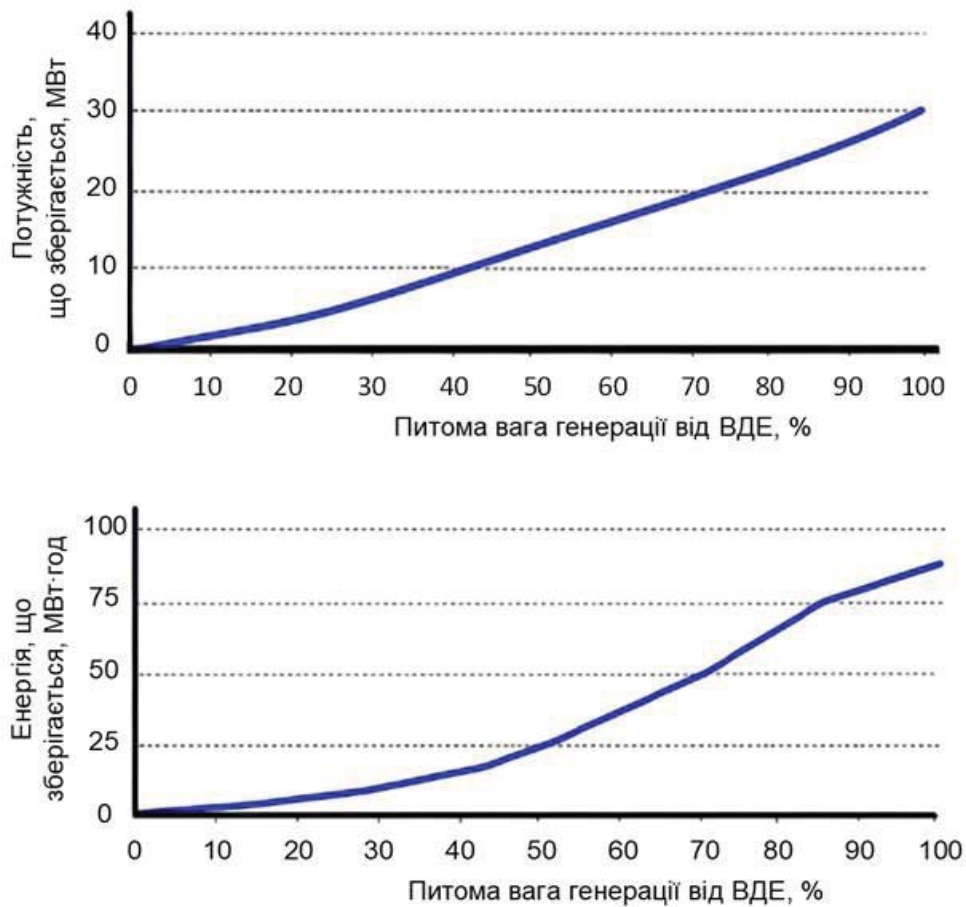


Рис. 1. Залежність параметрів накопичувачів електроенергії для різних відсотків генерації з ВДЕ

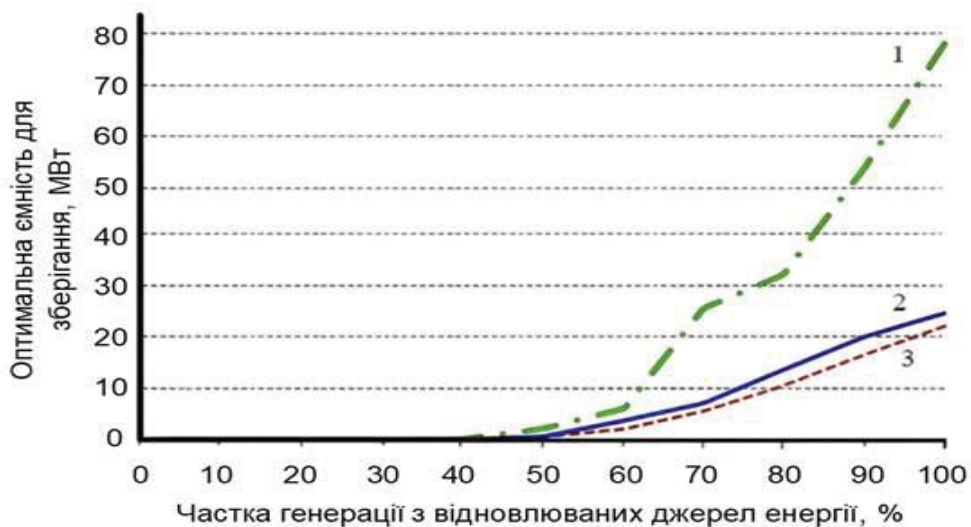


Рис. 2. Аналіз впливу частки ВДЕ на оптимальну ємність накопичувачів електроенергії: 1 – частка в виробленій електроенергії ВЕС - 0% і СЕС - 100%; 2 – частка в виробленій електроенергії ВЕС - 100% і СЕС – 0%; 3 – частка в виробленій електроенергії ВЕС - 50% і СЕС - 50%



Наприклад, якщо енергосистема повністю забезпечується енергією за допомогою енергії сонячних електростанцій, то потрібні накопичувальні агрегати ємністю 80 МВт·год. Використання тільки вітрової генерації в АЛЕС знижує значення оптимальної потужності акумулювання майже до 25 МВт·год, як показано на рисунку 2 [3, 30-33]. Ця обставина зумовлена більшою тривалістю роботи вітрових електростанцій на добу (рік).

Для того щоб визначити параметри накопичувачів електроенергії, необхідних для роботи АЛЕС, знову розглянемо систему, що складається з чотирьох дизель-генераторів, вітрових і сонячних електростанцій [15, 34-37].

Цільова функція для цього випадку представлена наступним виразом:

$$OF_1 = \min \sum_{i=1}^F C_i(P_i(t)), \quad (9)$$

де C_i - витрати на виробництво електроенергії дизельними генераторами;

F – кількість дизельних генераторів (в даному випадку – чотири);

$P_i(t)$ - потужність і-того дизельного генератора.

У реальних умовах збільшення і зменшення потужності генератора відбувається не миттєво, тому розрахунки враховують швидкість набору і зниження потужності дизельних генераторів.

В таблиці 1 наведені технічні параметри генераторів, що використовуються в даній АЛЕС.

Таблиця 1

Технічні параметри генераторів і діапазон виробленої енергії

Генератор	Потужність, МВт		Потужність, МВт/год	Потужність, МВт/год
	P_{\max}	P_{\min}		
Дизельний генератор №1	6	2	4	5
Дизельний генератор №2	6	2	3	5
Дизельний генератор №3	6	2	7	8
Дизельний генератор №4	6	2	4	4
Вітрові турбіни	15	0	-	-
Сонячні електростанції	6	0	-	-

Ці розрахунки дозволяють зробити оцінку роботи системи, а також дозволили визначити оптимальні параметри накопичувачів електричної енергії, необхідні для інтеграції всієї виробленої енергії за допомогою ВДЕ [38, 39]. Для цього залишкове навантаження (потужність), покрите традиційними дизельними генераторами і накопичувачем, оцінюється як:

$$P_i(t) = P_{\text{нав}}(t) - P_{\text{ез}}(t) - P_{\text{сз}}(t), \quad (10)$$

При оцінці залишкового навантаження передбачається, що дизельні електростанції не можна відключати (табл. 1). В результаті, при такому варіанті (без системи накопичення енергії) залишкове навантаження, що аналізується АЛЕС, може бути як позитивним, так і негативним. Позитивні і негативні значення означають, відповідно, наявність надлишку або дефіциту АЛЕС. Профіцит в основному пов'язаний з виробленням електричної енергії вітровими і сонячними електростанціями [5, 40-42].

На основі аналізу залишкового навантаження потужність накопичувача електричної енергії можна оцінити за виразом:

$$P_{\text{накоп}} = \begin{cases} \min P_i(t) \\ \max P_i(t) \end{cases}, \quad (12)$$

Для оцінки ємності накопичувачів електричної енергії можна використовувати два різних підходи. Акумулятор може бути сконструйований як для максимальної інтеграції електроенергії, виробленої з ВДЕ (рис. 3), так і для мінімізації кількості невідпущеної електричної енергії споживачам [21, 43-45]. У першому випадку слід враховувати максимальне значення залишкового навантаження (12), а в другому - його мінімальне значення (12).

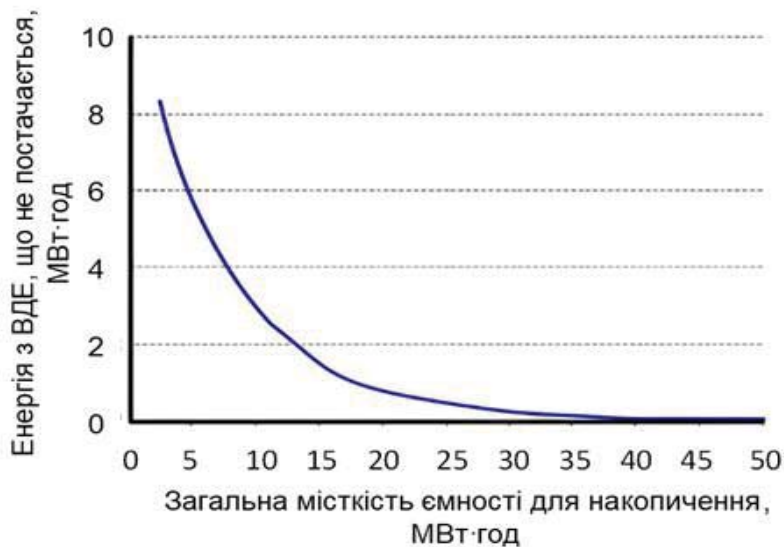


Рис. 3. Залежність величини неінтегрованої енергії, що генерується ВДЕ, від загальної ємності накопичувачів електричної енергії

З метою зниження інвестиційних витрат модель оптимізації аналізується з економічної точки зору.

Для визначення оптимальної ємності накопичувача використовувалися рівновагові критерії:

- 1) вартість палива C_n ;
- 2) амортизаційні відрахування для системи зберігання енергії $C_{ав}$;



3) вартість виробництва електроенергії з ВДЕ, яка не інтегрована в АЛЕС протягом одного року $C_{ндв}$;

4) вартість електроенергії, недовідпущеної споживачам протягом одного року (збиток) $C_{внн}$.

Таким чином, цільова функція вартості буде наступною:

$$OF_2 = \min(C_n + C_{ав} + C_{ндв} + C_{внн}). \quad (13)$$

Результати досліджень. Основні параметри варіантів, що використовуються при пошуку оптимальних параметрів накопичувачів електричної енергії, запропоновані в:

1. Підбір складу генеруючих джерел:

– традиційні генератори, що покривають лише частину потреби в електричній енергії;

– потужності ВЕС і СЕС підбираються таким чином, щоб їх загальна величина генерації була значно більшою мінімального навантаження.

2. За допомогою цілочисельного лінійного програмування було знайдено оптимальний графік роботи генераторів на один тиждень і визначено оптимальні параметри накопичувачів електроенергії.

3. Параметри накопичувачів енергії змінюються ітеративно:

– потужність накопичувачів змінюватись від 1 до 7 МВт з кроком 1 МВт;

– тривалість роботи накопичувачів змінювалася від 4 до 6,5 годин з кроком 0,5 години.

4. На кожному етапі розраховується недовідпуск електроенергії в АЛЕС і енергії, яка могла б генеруватися ВДЕ, але не генерувалася через те, що накопичувачі в той час були повністю заряджені. Мета оптимізації полягає в тому, щоб звести до мінімуму обидва ці значення.

Розрахунок проводився за час роботи 4-х накопичувачів; 4,5; 5; 5,5; 6 і 6,5 годин (всього 7 значень). Таким чином, загальна кількість кроків становила 42. Параметри для кожного кроку розрахунку представлені в таблиці 2.

Для демонстрації результатів розрахунків вираховані дані для всіх 42 кроків зведених в один рисунок 4, в якому графічно представлені результати розрахунків за наступним варіантом:

– максимальне навантаження (заокруглене) – 32 МВт,

– вітрові електростанції – 15 МВт,

– сонячних електростанцій – 6 МВт,

– дизельні генератори – 4 по 6 МВт.

Було виявлено взаємозв'язок між потужністю генерації, що генерується установками ВДЕ, і оптимальною ємністю накопичувачів електричної енергії.



При розрахунках тривалість роботи накопичувачів збільшувалася з 4 до 6,5 годин. Збільшення тривалості роботи сприяло зменшенню величини неінтегрованої електроенергії з джерел ВДЕ, а також зменшенню недовідпуску електричної енергії [14, 32].

Таблиця 2

Базові дані для кожного кроку обчислення

Крок обчислення	Тривалість роботи накопичувачів, год	Потужність накопичувачів, МВт	Крок обчислення	Тривалість роботи накопичувачів, год	Потужність накопичувачів, МВт
1	4	1	22	5,5	1
2	4	2	23	5,5	2
3	4	3	24	5,5	3
4	4	4	25	5,5	4
5	4	5	26	5,5	5
6	4	6	27	5,5	6
7	4	7	28	5,5	7
8	4,5	1	29	6	1
9	4,5	2	30	6	2
10	4,5	3	31	6	3
11	4,5	4	32	6	4
12	4,5	5	33	6	5
13	4,5	6	34	6	6
14	4,5	7	35	6	7
15	5	1	36	6,5	1
16	5	2	37	6,5	2
17	5	3	38	6,5	3
18	5	4	39	6,5	4
19	5	5	40	6,5	5
20	5	6	41	6,5	6
21	5	7	42	6,5	7

Результати показують, що повна інтеграція ВДЕ досягається з використанням накопичувачів електричної енергії загальною потужністю 7 МВт при робочій тривалості 5,5 годин. Проте при таких параметрах накопичувачів все ж таки існує недовідпуск електроенергії.

Отримані результати свідчать, що повна інтеграція ВДЕ досягається за допомогою установок накопичення електричної енергії загальною потужністю 7 МВт при тривалості роботи 5,5 годин. Однак при таких параметрах накопичення все одно спостерігається дефіцит електроенергії.

Для того, щоб мінімізувати величину недовідпуску електроенергії, можуть бути реалізовані різні варіанти. Зокрема: зміна (в сторону збільшення) параметрів накопичувачів електроенергії, збільшення частки традиційної генерації, а також збільшення частки генерації на основі ВДЕ. Очевидно, що необхідний ітераційний процес для пошуку компромісного вирішення. В даному випадку був прийнятий спрощений варіант, і для цих цілей пропонується знайти нову потужність генераторів на основі ВДЕ, що обов'язково спричинить за собою зміну параметрів накопичувачів [16, 39].

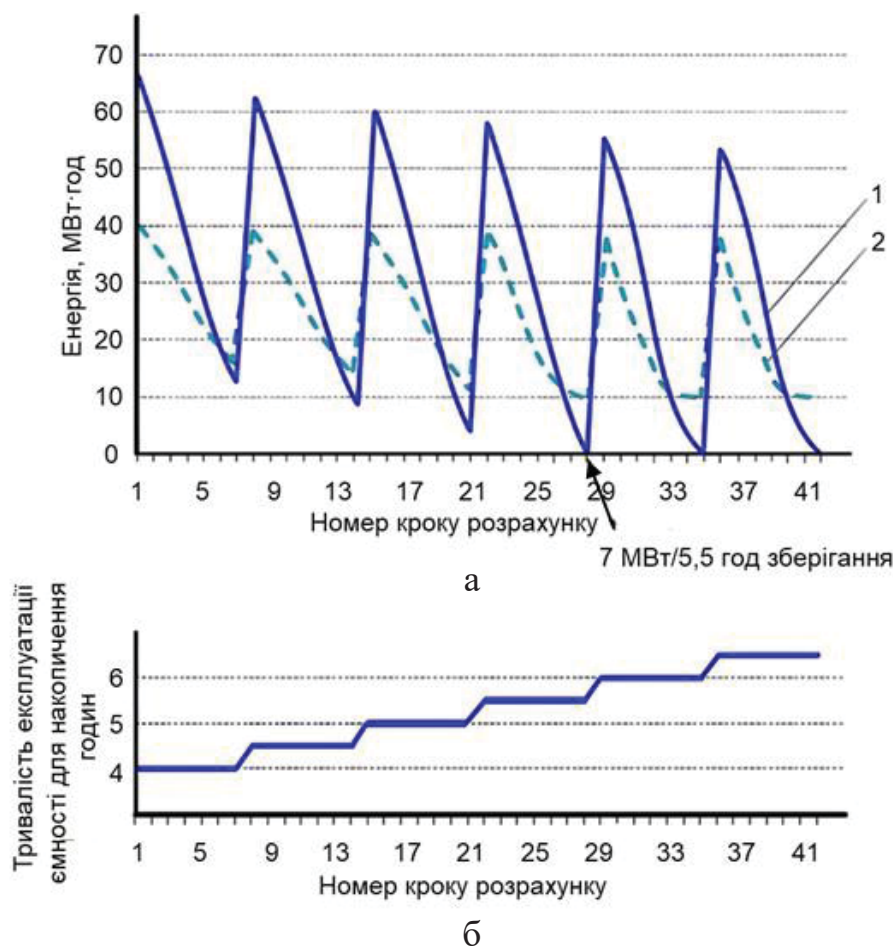


Рис. 4. Енергія (а) і тривалість роботи накопичувачів (б):
1 – електроенергія з ВДЕ, не інтегрована накопичувачами,
2 – недовідпуск електроенергії

Цей процес проілюстровано графічно на рисунку 5. Ми ітеративно змінюємо потужність генераторів на основі ВДЕ. При досягненні їх потужності 26 МВт навантаження в АЛЕС повністю покривається (рис. 5), тобто сама система стає бездефіцитною. Використовуючи програму розрахунку для цих умов, були визначені оптимальні параметри накопичувачів електричної енергії, зокрема: потужність 8 МВт і час роботи 13 годин. Тобто технічні параметри

накопичувача суттєво зростають, відповідно, збільшується вартість накопичувача.

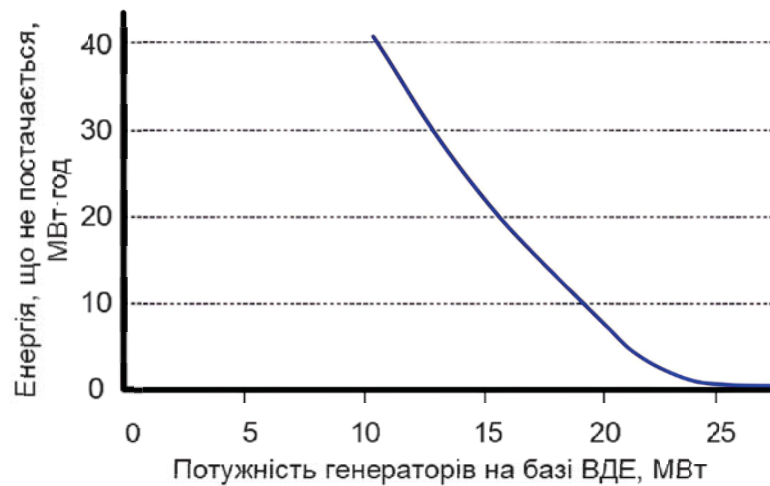


Рис. 5. Залежність недовідпуску електроенергії від потужності генераторів на базі ВДЕ

Слід зазначити, що в даному дослідженні зроблено допущення, що при розрахунках не враховуються втрати, які, очевидно, присутні в реальній системі.

При розрахунку в подальшому ми приймаємо систему накопичувачів з повною інтеграцією електроенергії, що генерується ВДЕ і з розрахованим можливим недовідпуском електроенергії.

З прикладу видно, що повна автономність (при повній інтеграції виробленої енергії ВДЕ і відсутності недовідпуску електроенергії) коштує дорого, оскільки вимагає досить великих накопичувачів, які використовуються лише частково.

Висновки.

1. Описана методика визначення оптимальних параметрів накопичувачів електроенергії як одного з важливих засобів забезпечення функціонування АЛЕС разом з вибором генеруючих блоків.

2. В умовах стохастичної роботи генераторів на основі ВДЕ необхідно розробити шляхи надійного забезпечення електропостачання споживачів АЛЕС.

3. У зв'язку з цим пропонується використовувати накопичувачі електричної енергії. Для забезпечення надійного функціонування АЛЕС необхідно підбирати оптимальні параметри накопичувачів, як з технічної, так із економічної точок зору.

*Список використаних джерел*

1. 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>.
2. Галько С. В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2019. Вип. 19, т. 3. С. 130-141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.
3. 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. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>.
4. Петрук В. Г., Коцюбинська С. С., Мацюк Д. В. Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики та рекомендації по екологізації паливно-енергетичного комплексу України. *Зб. матеріалів II-го Всеукр. з'їзду екологів з міжнар. участю*. Вінниця. 2016.
5. Кузнецов М. П., Мельник О. А. Оптимальна побудова електроенергетичного комплексу на основі відновлюваних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 51. С. 28-32.
6. Кулік М. М., Горбулін В. П., Кириленко О. В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Київ, 2017. 78 с.
7. Кузнецов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. *Відновлювана енергетика*. 2018. Вип. 13. С. 6-15.
8. Szafraniec A., Halko S., Miroshnik O., Figura R., Zharkov A., Vershkov O. Magnetic field parameters mathematical modelling of wind-electric heater. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97(8). P. 36-41. <https://doi.org/10.15199/48.2021.08.07>.
9. 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. № 96. P. 36-40. <https://doi.org/10.15199/48.2020.11.08>.



10. 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>.
11. 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). No 2638. <https://doi.org/10.3390/en16062638>.
12. Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Influence of Temperature on Energy Performance Indicators of Hybrid Solar Panels Using Cylindrical Cogeneration Photovoltaic Modules. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2021 - Conference Proceedings. Kharkiv, Ukraine. 2021. P. 132- 136. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569975>.
13. Haffner S., Pereira L.F.A., Pereira L.A., Barreto L.S. Multistage Model for Distribution Expansion Planning With Distributed Generation— Part I: Problem Formulation. In *IEEE Transactions on Power Delivery*, April 2008. Vol. 23(2). P. 915-923. No <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917916>.
14. Qawaqzeh M., Al_Issa H. A., Buinyi R., Bezruchko V., Dikhtyaruk I., Miroshnyk O., Nitsenko V. The assess reduction of the expected energy not-supplied to consumers in medium voltage distribution systems after installing a sectionalizer in optimal place. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2023. Vol. 34. No 101035. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101035>.
15. 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>.
16. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Romero-Cadaval E. Vinnikov D. Maximum boost control for interleaved single-phase Quasi-Z-Source inverter. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017. P. 7698-7703. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217349>.
17. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 3/4(75). P. 26-31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42484>.
18. Kamel R.M. Standalone micro grid power quality improvement using inertia and power reserves of the wind generation systems. *Renewable Energy*. 2016. Vol. 97. P. 572-584. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.004>.



19. 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>.
20. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Kvitka S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Energy saving in electromechanical grain cleaning systems. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12(3). No 1418. <https://doi.org/10.3390/app12031418>.
21. Georgilakis P.S., Hatziargyriou N.D. A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research. *Electric Power Systems Research*. 2015. Vol. 121. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.12.010>.
22. McDonald J. Adaptive intelligent power systems: Active distribution networks. *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, is. 12. P. 4346-4351. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.038>.
23. 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 (Switzerland)*. 2022. Vol. 12(10). P. 5190. <https://doi.org/10.3390/app12105190>.
24. Mondal A.H., Denich M. Hybrid systems for decentralized power. *Energy for Sustainable Development*. 2010. Vol. 14, is. 1. P. 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.01.001>.
25. Luo Y., Shi L., Tu G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage system. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 80. P. 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.061>.
26. Tan Y., Meegahapola L., Muttaqi K. M. A review of technical challenges in planning and operation of remote area power supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 8. P. 876-889. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.034>.
27. Rubanenko O., Yanovych V., Miroshnyk O., Danylchenko D. Hydroelectric Power Generation for Compensation Instability of Non-guaranteed Power Plants. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey. 2020. P. 52-56. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263151>.
28. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. P. 415-423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43.
29. 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.



30. Shevchenko S., Olubakinde E., Danylchenko D., Nazarenko I., Savchenko N., Shylkova L. Devising a method for reducing active power corona losses based on changing the structural parameters of a power transmission line. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 1/8(115). P. 18-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253384>.

31. Iegorov O., Iegorova O., Mirosnyk O., Savchenko O. Improving the accuracy of determining the parameters of induction motors in transient starting modes. *Energetika*. 2020. Vol 66(1). P. 15-23. <https://doi.org/10.6001/energetika.v66.i1.4295>.

32. Voytenko V., Stepenko S., Velihorskyi O., Chakirov R., Roberts D., Vagapov Y. Digital control of a zero-current switching quasi-resonant boost converter. *2015 Internet Technologies and Applications (ITA)*. 2015. P. 365-369. <https://doi.org/10.1109/ITechA.2015.7317428>.

33. Veligorskyi O., Kosenko R., Stepenko S. High-efficiency solar tracker development and effectiveness estimation. *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, 2014. P. 153-158. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874169>.

34. Qawaqzeh M., Zaitsev R., Mirosnyk O., Kirichenko M., Danylchenko D., Zaitseva L. High-voltage DC converter for solar power station. *International Journal of Power Electronics and Drive System*. 2020. Vol. 11(4). P. 2135-2144. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i4.pp2135-2144>.

35. Stepenko S., Husev O., Vinnikov D., Ivanets S. FPGA control of the neutral point clamped quasi-Z-source inverter. *2012 13th Biennial Baltic Electronics Conference*. Tallinn, Estonia. 2012. P. 263-266. <https://doi.org/10.1109/BEC.2012.6376867>.

36. Savchenko O., Mirosnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskyi 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, KhPI Week 2021 – Conference Proceedings*. 2021. P. 137-140. <https://10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>.

37. Belik M. Emergency island grids with small hydro power stations. *In Proceedings of the 10th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Elektroenergetika 2019*. 2019. P. 116-121.

38. Zaitsev R., Khrypunov G., Veselova N., Kirichenko M., Kharchenko M., Zaitseva L. The cadmium telluride thin films for flexible solar cell received by magnetron dispersion method. *Journal of nano- and electronic physics*. 2017. Vol. 9(3). P. 03015-1–03015-7. https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/2216.

39. Tymchuk S., Mirosnyk O. Calculation of energy losses in relation to its quality in fuzzy form in rural distribution networks. *Eastern-*



European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 1(8). P. 4-10.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36003>.

40. Roncero-Clemente C., Husev O., Miñambres-Marcos V., Stepenko S., Romero-Cadaval E, Vinnikov D. Comparison of three MPPT algorithms for three-level neutral-point-clamped qz-source inverter. *2013 International Conference-Workshop Compatibility And Power Electronics*. Ljubljana, Slovenia. 2013. P. 80-85.
<https://doi.org/10.1109/CPE.2013.6601133>.

41. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. T. 6. P. 163-168.
<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>.

42. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Miñambres-Marcos V., Romero-Cadaval E., Vinnikov D. Three-Level Neutral-Point-Clamped Quasi-Z-Source Inverter with Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems. *Technological Innovation for the Internet of Things. DoCEIS 2013. IFIP Advances in Information and Communication Technology*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. Vol 394.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-37291-9_36.

43. Shevchenko S., Danylchenko D., Kuznetsov D., Petrov S. Use of capacitor batteries to improve the quality of electrical energy. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedings*. 666-669. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570023>.

44. Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S. Experimental Research of the Electrical Strength of the Insulated System “Protected Wire-Line Insulator”. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, Turkey. 2020. P. 83-87. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263212>.

45. Roncero-Clemente C., Husev O., Stepenko S., Vinnikov D., Romero-Cadaval E. Output voltage control system for a three-level neutral-point clamped quasi-Z-source inverter. *Przeegląd Elektrotechniczny*. 2013. Vol. 89(5). P. 76–80.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2023 р.



S. Halko¹, O. Miroshnik², M. Syvenko², M.Z. Qawaqzeh³, Huthaifa Al_Issa³

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²State Biotechnological University

³Balqa Applied University

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF ACCUMULATING AND GENERATING SOURCES OF ELECTRIC ENERGY IN AUTONOMOUS LOCAL ELECTRICAL SYSTEMS

Summary

The article discusses ways to ensure uninterrupted power supply to consumers in the conditions of stochastic operation of generators based on renewable energy sources and identifies the most suitable parameters for storing electrical energy and generating equipment in autonomous local electrical systems. The substantiation of the role of electric energy storage in the presence of renewable energy sources in autonomous local electrical systems with stochastic mode of operation is provided. The main provisions of the model of electrical systems used are presented. The dependence of the parameters of the energy storage depending on the composition of the generating capacities has been studied. The implementation of the problem of determining the parameters of devices for accumulating electrical energy by the method of purposeful modeling is considered. The results of the multi-criteria selection of power and energy intensity of the electric energy storage device are substantiated.

A mathematical model for determining the optimal parameters of electric energy storage devices for autonomous local electrical systems using mixed integer programming with optimization and consideration of economic indicators has been developed. When compiling the optimization model, drives were considered together with generating sources. This is true from an economic point of view. However, electric energy accumulators are characterized by technical parameters and characteristics that differ from generators. Therefore, more attention was paid to these elements of the system and the algorithm for ensuring uninterrupted power supply to consumers in the conditions of stochastic operation of generators based on renewable energy sources. Determination of the optimal parameters of electricity storage devices for autonomous local power grids is carried out, first of all, based on technical and economic considerations. The dependencies of the parameters of electric energy storage devices on the composition of the generation of autonomous local electrical systems are studied.

Keywords: local power grids, renewable energy, electricity storage, generation, autonomous sources.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-152-166

УДК 538.975:621.383.5

А. Ф. Дяденчук¹, канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-6625-9985Є. В. Філіпович², здобувач ВО ORCID: 0000-0002-9633-7251¹ Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного² Національний університет «Запорізька політехніка»e-mail: alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua, тел.: +38066-828-85-19

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕТЕРОПЕРЕХІДНОГО СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ZnO/porous-Si/Si

Анотація. Робота спрямована на дослідження перспективних для сонячної енергетики фоточутливих структур на основі поруватого Si та ZnO. Запропоновано схему пристрою моделі сонячної батареї на основі гетероструктур ZnO/porous-Si/Si. За допомогою програми PC1D були розраховані світлові характеристики виготовленої конструкції (напруга холостого ходу V_{oc} , струм короткого замикання I_{sc} , коефіцієнт заповнення FF і ККД η), а також побудовані вольт-амперні характеристики. Досліджено вплив товщини шарів porous-Si та ZnO, текстуровання та рівня легування шару ZnO, а також вплив температури на продуктивність гетероперехідного сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si з метою отримання пристрою з хорошою ефективністю перетворення. Встановлено, що ефективність перетворення енергії сонячної батареї ZnO/porous-Si/Si може досягати 23,9 %.

Ключові слова: фотоперетворювач, поруватий кремній, комп'ютерне моделювання, плівка ZnO.

Постановка проблеми. Дефіцит викопного палива та пагубний його вплив на оточуюче середовище призводить до зростання залежності людської діяльності від відновлюваних джерел енергії. Однією з найбільш перспективних серед відновлюваних джерел енергії вважається сонячна енергія [1]. На сьогодні достатнього поширення отримали гетероперехідні монокристалічні кремнієві сонячні елементи, проте їх ефективність не перевищує 19 %. Однак вартість виробництва та монтажу монокристалічних кремнієвих панелей досить висока. Меншою є вартість полікристалічних кремнієвих фотоперетворювачів (~10 %), проте ефективність даних панелей зменшується ~5 %.

Прагнучи до здешевлення виробництва і підвищення ККД сонячних елементів (СЕ), вчені вдаються до різноманітних маніпуляцій з конструкціями фотоперетворювачів, матеріалами, які



використовуються при їх виробництві тощо [2-4]. Підвищити ефективність, не збільшуючи при цьому вартість фотоперетворювача (ФП), можна завдяки використанню антивідбивного покриття, які дозволяють за рахунок збільшення кількості поглинутого поверхнею сонячної батареї світла значною мірою підвищити ефективність сонячних елементів. Наразі у фотоелектричній промисловості домінують такі антивідбивні покриття як ІТО, TiO_2 , SnO_2 , LiF , MgF_2 тощо [5-7], проте найбільшого розповсюдження отримали прозорі провідні оксиди (ППО). Крім цього останнім часом з'являються роботи, в яких як антивідбивні покриття використовують поруваті напівпровідники [8].

Тому актуальним є питання дослідження фотоперетворювачів із використанням як поруватих кремнієвих шарів, так і антивідбивних покриттів.

Аналіз останніх досліджень. Відомими прозорими провідними оксидами, які широко використовуються як вікна, а також як випромінювачі на кремнієвій підкладці p-Si, є CdO , SnO_2 та ІТО [9-11]. Однак деякі з них мають певні недоліки, такі як дефіцит, висока вартість основного інгредієнта, токсичність і низька стабільність. Кандидатом з мінімальною кількістю недоліків є оксид цинку ZnO , оскільки він при кімнатній температурі володіє відносно великою прямою забороненою зоною (3,3-3,4 eV), великою енергією зв'язку екситонів 60 MeV [12], низьким питомим опором, рухливістю Холла близько $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [13], високим коефіцієнтом пропускання для видимого світла тощо. Завдяки цьому ZnO є перспективним прозорим струмопровідним оксидом як альтернатива FTO та ІТО [14].

У більшості застосувань ZnO використовується як віконний шар сонячних елементів для поглинання максимуму падаючого світла [15-17]. Дослідження сонячних елементів з ZnO як ППО не є новим, однак ще існує низка нерозв'язаних питань. Так у роботі [18] автори вивчали вплив температури осадження плівки ZnO на параметри сонячних елементів ZnO/Si . У [19] було досліджено електронну структуру інтерфейсу між легованим бором оксигенованим аморфним кремнієвим «віконним шаром» ($\text{a-SiO}_x\text{:H(B)}$) та оксидом цинку, легованим алюмінієм (ZnO:Al). Леговані плівки ZnO (ZnO:Ga , ZnO:Al , ZnO:B , ZnO:In тощо) також поліпшують оптичні властивості структур та сонячних елементів на їх основі [20-22]. Jiangnan Ding та інші [23] повідомляють про зростання ККД до 17,13 % при використанні нелегованих комбінованих шарів $\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$ в гетероструктурних кремнієвих сонячних елементах. Результати в [24] доводять поліпшення електричних та оптичних властивостей плівок Ga:ZnO по відношенню до нелегованої плівки ZnO , одночасно авторами досліджено інтерфейс між плівкою та підкладкою Si з метою



виявлення конкретних проблем, які можуть перешкоджати оптимальному електричному контакту між ними.

З іншого боку, ZnO може бути не лише віконним шаром в СЕ, але й виступати частиною р-п переходу, що розділяє фотозгенеровані носії, у сонячному елементі на основі ZnO/p-Si [25]. Теоретично прогнозується, що гетероперехідний сонячний елемент Si/ZnO матиме ефективність перетворення до 25 % [26]. Проте в переважній більшості робіт доведено, що ефективність перетворення сонячних елементів ZnO/Si значною мірою залежить від властивостей інтерфейсу між плівками ZnO та кремнієвою підкладкою [27, 17]. Наприклад, Chen L. та інші [17] пропонують модель сонячних батарей з гетеропереходом n-ZnO/p-Si та буферним тонким шаром ZnO:B, які, згідно моделювання, можуть досягати ККД ~17,16 %. Кандидатом на використання як буферного шару в сонячних елементах на основі Si є сульфід кадмію. Nawfal Jamil та інші [28] експериментально встановили, що ККД сонячних елементів ZnO/CdS/Si становить 8,9 %. Останнім часом особливу увагу дослідників привертають поруваті наноматеріали і наноматеріали із спеціальними фізико-хімічними властивостями, представником яких є поруватий кремній, що використовуються як самостійні покриття, а також буферні шари. Так у роботі [29] періодичний масив стовпців Si використовується для формування фотоелектричної системи n-ZnO/p-Si завдяки зменшенню об'єму активного матеріалу та максимізації оптичного поглинання. Автори роботи [30] демонструють покращення ефективності (до 18,97 %) гетеропереходів c-Si/ZnO за наявності трапецієподібних пірамід c-Si на вершині активного шару c-Si.

І хоча експериментально виготовлені сонячні елементи в досліджуваних роботах показують ефективність нижче теоретично прогнозованих значень [31], моделювання є ефективним засобом дослідження сонячних елементів, завдяки якому можна підібрати оптимальні параметри шарів, оптимізувати конструкцію сонячного елемента, дослідити взаємодію шарів комірки, мінімізувати дефекти інтерфейсу між шарами гетероструктури тощо, при цьому не витрачаючи ресурси (матеріали, кошти) на експериментальний підбір даних параметрів.

Для оцінки оптимального числового значення ключових фотоелектричних параметрів для сонячних елементів можуть бути використані такі програмні пакети, як AFORS-HET, PC1D, AMPS-1D, SCAPS та ін. Так у роботі [32] авторами отримано ККД $\eta=24,8\%$ моделюванням в програмі PC1D сонячної комірки на основі гетероструктури ZnO/Si при товщині основи 400 мкм, товщині випромінювача 20 мкм, концентрації легування $1,1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в основи і концентрації легування $5,1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ у випромінювачі.



Дещо нижчої ефективності фотоелектричного перетворення 20,23 % було досягнуто моделюванням для c-Si сонячних елементів пірамідально-текстурованої лицьової поверхні з використанням нанострижневих масивів ZnO як антивідбивного шару [33]. Крім того, моделювання в програмі PC1D демонструє, що фотоелектрична властивість для даних сонячних елементів набагато краще, ніж для c-Si сонячних елементів без шару ZnO.

Таким чином, в деяких наукових роботах пропонується використовувати ZnO як віконний або антивідбивний шар сонячної батареї для підвищення ефективності, відомі наукові дослідження, в яких повідомляється про використання ZnO як n-шару в гетероструктурних кремнієвих сонячних елементах, також відомі роботи, в яких як буферний шар використовується періодичний масив стовпців Si, однак не так багато є досліджень використання ZnO як n-шару, так і антивідбивного покриття з використанням проміжного шару porous-Si одночасно для сонячної батареї.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є проведення чисельного моделювання та оптимізації функціональних характеристик фотоперетворювача на основі гетероструктур ZnO/porous-Si/Si, а також дослідження впливу технологічних параметрів на характеристики конструкції.

Основна частина. Моделювання основних характеристик сонячного елемента на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si проведено у вільно розповсюдженій програмі PC1D [34, 35]. Це програмне забезпечення, розроблене Університетом Нового Південного Уельсу (Австралія), дозволяє зв'язати електричні характеристики напівпровідникового пристрою з його топологією. Результати моделювання дозволили отримати числові значення напруги холостого ходу V_{oc} і струму короткого замикання I_{sc} . Значення коефіцієнту заповнення FF та ефективності η теоретично розраховано за формулами [36, 37]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}},$$
$$\eta = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF. \quad (1)$$

Моделювання було виконано шляхом зміни товщини шару ZnO і товщини porous-Si шляхом фіксації другої з метою вивчення ролі кожного параметра на продуктивності комірки. У першому випадку товщина поруватого кремнієвого шару фіксувалася на значенні 0,2 мкм, у другому – 500 мкм, при цьому значення товщини покриття ZnO змінювалося від 10,0 нм до 2,0 мкм. Товщина кремнієвої підкладки залишалася незмінною.

Електричні та оптичні параметри матеріалів, використані в цьому

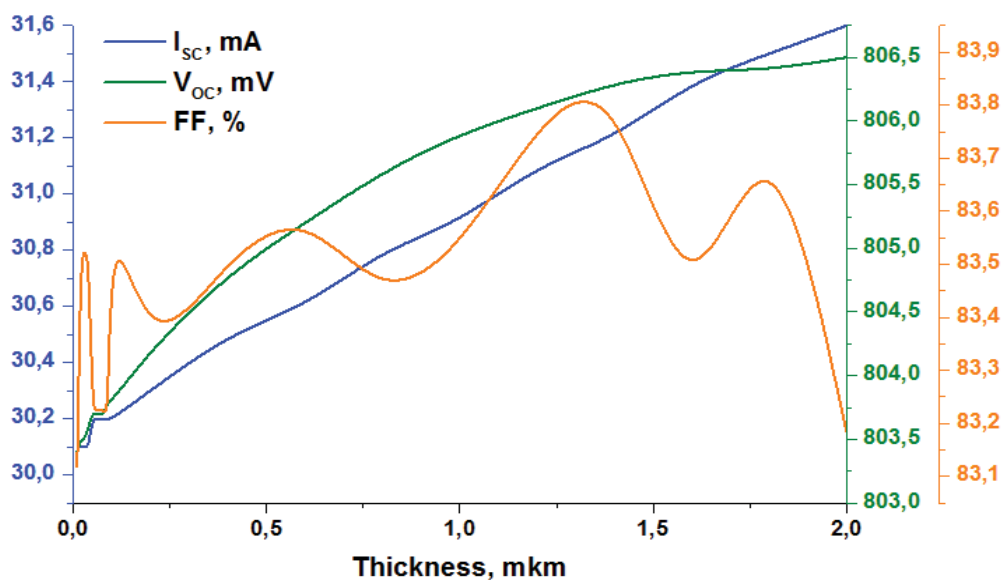
моделюванні (табл. 1), були вибрані з баз даних програмних пакетів для моделювання сонячних елементів та наукової літератури [38-41].

Таблиця 1

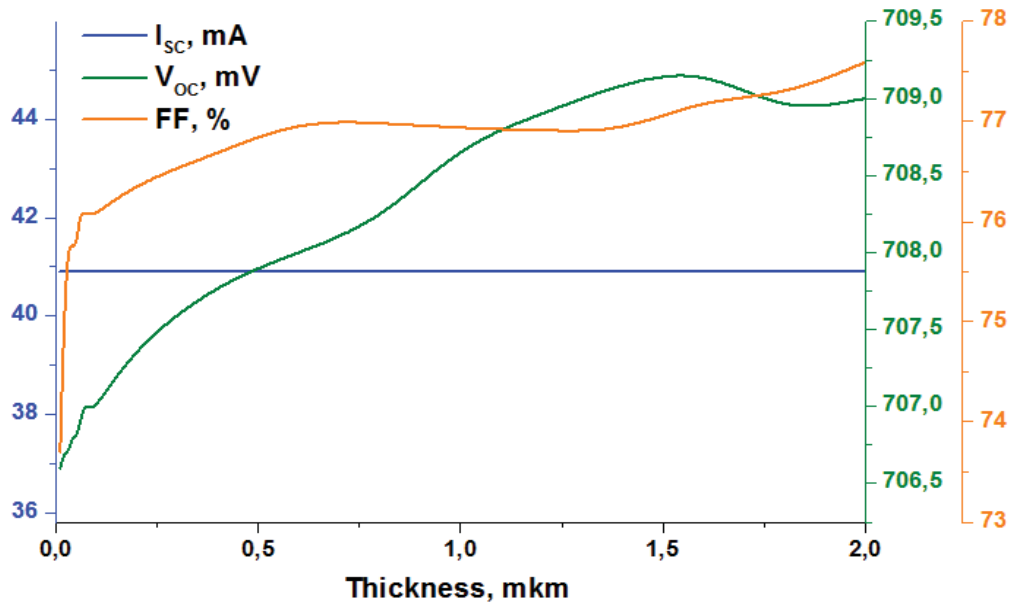
Параметри моделювання сонячних елементів

Параметр	Значення для шару		
	ZnO	Si	porous-Si
Електронна спорідненість, eV	4.0	4.05	4.05
Діелектрична проникність	9.0	11.9	1.6
Ширина забороненої зони, eV	3.3	1.124	2.05
Рухливість електронів, $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	100	1107	30
Рухливість дірок, $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	25.0	424.6	2.0
Концентрація легування акцепторів, cm^{-3}	0	$1 \cdot 10^{16}$	варіюється
Концентрація легування донорів, cm^{-3}	варіюється	0	0

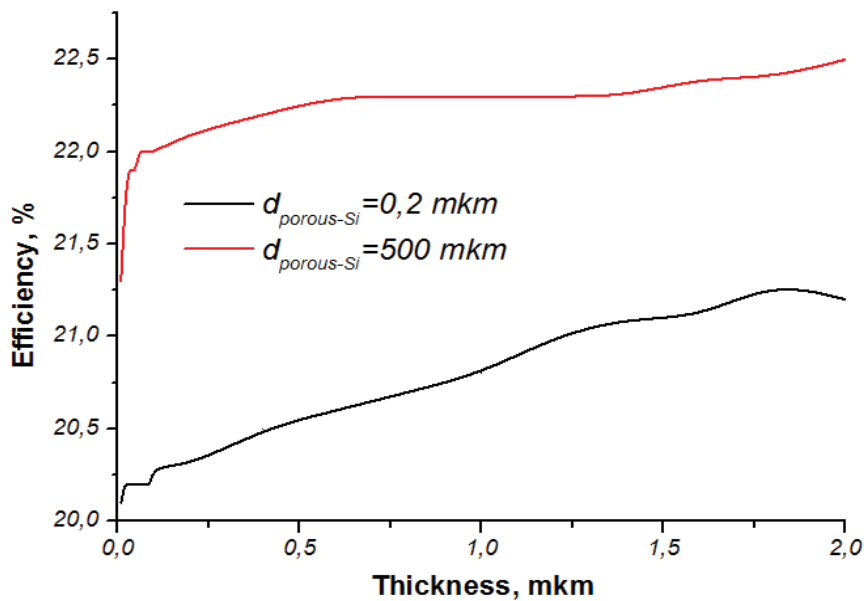
Вплив товщини шарів ZnO та porous-Si на електрофізичні властивості сонячного елемента. Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача, тому доцільним є дослідження впливу товщини шарів ZnO та porous-Si на електричні властивості ФП. На рис. 1 показано зміни струму короткого замикання I_{SC} , напруги холостого ходу V_{OC} , фактору заповнення FF, ефективності при різних значеннях товщини плівки ZnO та шару porous-Si.



a



б



в

Рис. 1. Залежність оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від різних значень товщини плівки ZnO:
а – струм короткого замикання I_{sc} , напруга холостого ходу V_{oc} , фактор заповнення FF при товщині поруватого шару $d_{porous-Si}=0,2$ мкм;
б – струм короткого замикання I_{sc} , напруга холостого ходу V_{oc} , фактор заповнення FF при товщині поруватого шару $d_{porous-Si}=500$ мкм;
в – ефективність фотоперетворювача при різних значеннях товщини поруватого шару.

Встановлено, що для ZnO товщиною 2 мкм було отримано найвищий ККД 22,5 %, тобто ККД зростає, коли товщина покриття ZnO збільшується до 1,8 мкм, і зменшується з подальшим збільшенням товщини, що вказує на оптимальну товщину для кращої продуктивності. Результат очікуваний, оскільки поглинені фотони прямо пропорційні товщині активного шару. Однак подальше збільшення товщини активного шару викликає рекомбінацію вільних носіїв заряду, що сприяє зниженню ККД [42].

Відмічається, що для розглянутих товщин поруватого кремнієвого шару значною мірою відрізняються значення фактору заповнення $\sim 10\%$. Значення струму короткого замикання, у другому випадку (рис. 1, б) в заданому діапазоні товщин змін не зазнає.

Вплив рівня легування шару ZnO на електрофізичні властивості сонячного елемента. Значна частина світла поглинається поверхнею сонячного елемента, що призводить до високої швидкості генерації, тому вивчення впливу концентрації легуючих домішок повинні бути детально досліджені.

Під час моделювання товщина шару ZnO становила 2,0 мкм, для шару поруватого Si – 200 нм, решта параметрів відповідала зазначеним в табл. 1. Результати моделювання наведено на рис. 2.

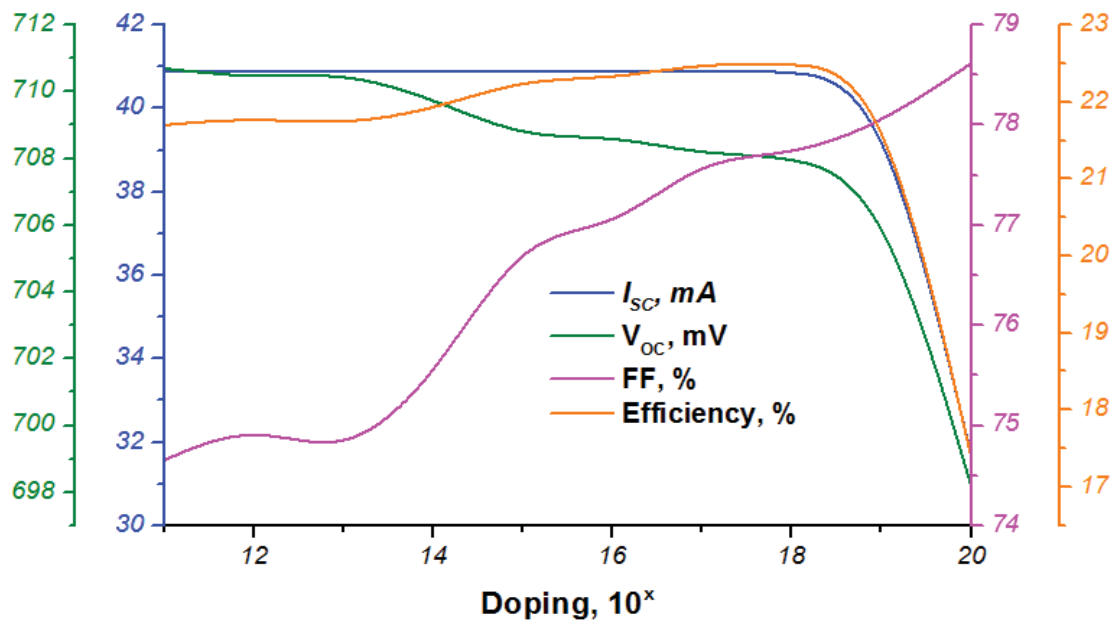


Рис. 2. Залежності оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від рівня легування покриття ZnO.

Згідно рис. 2 висока концентрація легування в шарі ZnO призводить до зниження загальної ефективності через зниження пропускання світла, поглинання та вищої швидкості рекомбінації [43]. Але при значеннях легування 10^{12} - 10^{16} cm^{-3} ефективність SE також знижується, що найімовірніше пов'язано зі зниженням швидкості



дрейфу та зростанням опору структури.

Таким чином, при високих значеннях концентрації легування та товщини плівки ZnO світло майже не проникає в кремнієву підкладку, що впливає на генерацію носія заряду і призводить до зниження ефективності пристрою. Максимальне значення ККД досягається при концентрації легування донорів $\sim 10^{18}$ см⁻³.

Вплив текстурування шарів ZnO на електрофізичні властивості сонячного елемента. Ефективність сонячних елементів із гетеропереходом ZnO/Si можна підвищити шляхом максимізації шорсткості поверхні ZnO на кремнієвих мікропорах. Важливою технікою для зменшення відбиття світла є текстурування поверхні, у зв'язку з цим було проведено моделювання фотоперетворювача ZnO/porous-Si/Si при значеннях кута текстурування в межах 40-85° (табл. 2).

Таблиця 2

Зміна оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si при зміні кута текстурування поверхні фотоперетворювача

Кут текстурування, градуси	Сила струму, I _{SC} , mA	Напруга, V _{OC} , mV	Фактор заповнення FF, %	ККД, %
40	40,9	708,7	76,6	22,2
45	40,9	708,7	76,6	22,2
50	40,9	708,7	76,9	22,3
55	40,9	708,7	76,9	22,3
60	41	708,7	76,7	22,3
65	41	708,7	77,1	22,4
70	41,1	708,6	76,9	22,4
75	41,1	708,4	77,3	22,5
80	41,2	708,3	77,4	22,6
85	41,3	708	77,6	22,7

Аналіз зміни оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si в залежності від кута текстурування поверхні фотоперетворювача (табл. 2) показує, що ефективності перетворення сонячної енергії набуває максимального значення при куті 85° за рахунок зменшення відбиття світла від лицьової поверхні та уловлювання світла в сонячних елементах. Збільшення кількості фотонів, які можуть бути поглинені сонячним елементом, призводить відповідно до більшої щільності струму короткого замикання.

Таким чином, за рахунок текстурування поверхні відбувається збільшення площі гетеропереходу, що призводить до появи більшої кількості електронно-діркових пар під час освітлення та підвищення ефективності сонячних батарей (рис. 3).

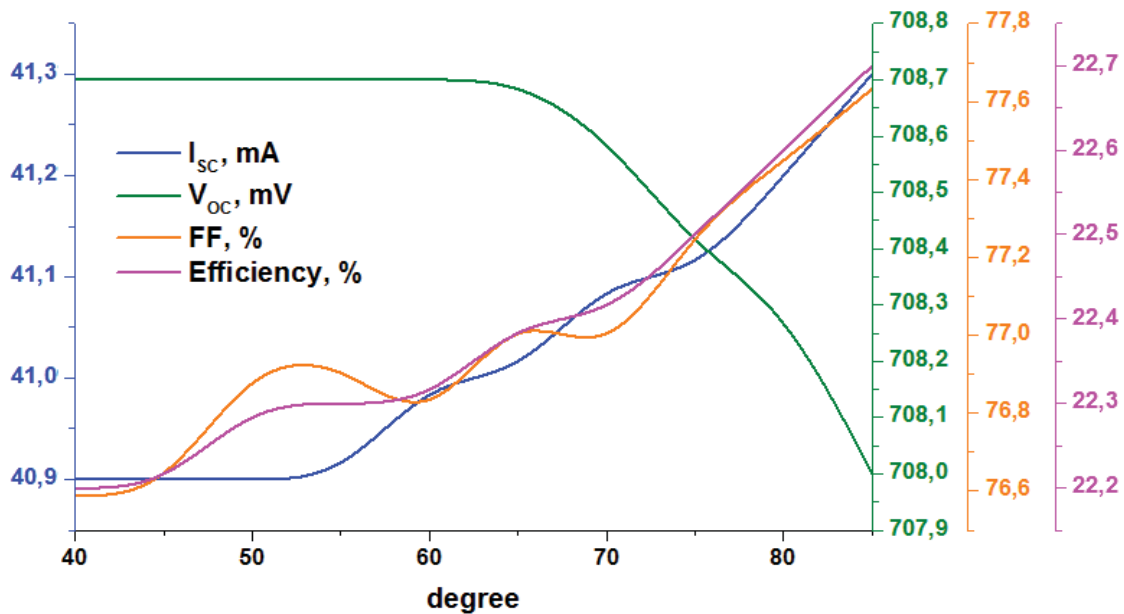


Рис. 3. Залежності оптоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від кута текстурування поверхні фотоперетворювача.

Вплив температури сонячного елемента на електрофізичні властивості. Робоча температура значною мірою впливає на ефективність фотоелектричної панелі. З метою дослідження даного впливу було проведено моделювання фотоелектричних параметрів гетероструктури ZnO/porous-Si/Si від різних значень температур у діапазоні від 280 К до 340 К. Отримані значення представлені на рис. 4.

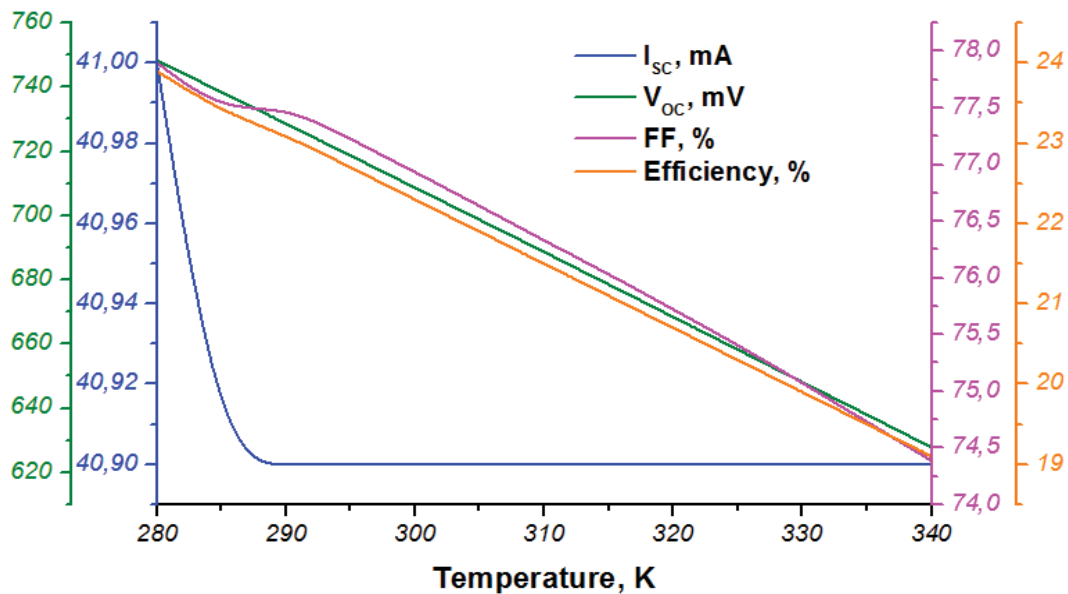


Рис. 4. Оптоелектричні параметри фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/porous-Si/Si при різних значеннях температури.

Рис. 4 демонструє, що підвищення температури значною мірою



впливає на продуктивність сонячної батареї, призводячи до зменшення ККД. Найкраще значення ефективності досягається при 280 К, де коефіцієнт заповнення FF становить майже 78 %. Вплив температури є результатом властивих кремнієвим сонячним елементам характеристик – підвищення напруги зі зниженням температури.

Висновки. За допомогою програми PC1D досліджено фотоелектричні параметри гетероструктурного сонячного елемента ZnO/porous-Si/Si. Вивчено вплив товщини шарів ZnO та porous-Si на електрофізичні властивості сонячного елемента. Встановлено, що для ZnO товщиною 2 мкм та при товщині porous-Si 500 мкм можна отримати найвищий ККД 22,5 %. Зростання концентрації легування в шарі ZnO призводить до зниження загальної ефективності пристрою через зниження пропускання світла. Максимальне значення ККД досягається при концентрації легування донорів $\sim 10^{18}$ см⁻³. Дослідження текстурування поверхні сонячного елемента показує, що ефективність перетворення сонячної енергії набуває максимального значення 22,7 % при куті 85° за рахунок зменшення відбиття світла від лицьової поверхні та уловлювання світла в сонячних елементах. Також встановлено, що підвищення температури з 280 К до 340 К призводить до зменшення ККД на 4,8%. Найкраще значення ефективності 23,9 % досягається при 280 К.

Список використаних джерел

1. Ibraheem Rafah. Modeling and Analysis of Different Antireflection Polymer Coating on Silicon Solar Cell Using PclD Software. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2020. Vol. 43. P. 222-232.
2. Kim J. Y., Lee J. W., Jung H. S., Shin H., Park N. G. High-efficiency perovskite solar cells. *Chemical reviews*. 2020. Vol. 120(15). P. 7867-7918. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00107>.
3. Powalla M., Paetel S., Ahlswede E., Wuerz R., Wessendorf C. D., Magorian Friedlmeier T. Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu (In, Ga) Se₂-, and perovskite-based materials. *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5(4). <https://doi.org/10.1063/1.5061809>.
4. Blakers A., Zin N., McIntosh K. R., Fong K. High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 33. P. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.033>.
5. Köhnen E., Jošt M., Morales-Vilches A. B., Tockhorn P., Al-Ashouri A., Macco B., Kegelmann L., Korte L., Rech B., Schlattmann R., Stannowski B. Highly efficient monolithic perovskite silicon tandem solar cells: analyzing the influence of current mismatch on device performance.



Sustainable Energy & Fuels. 2019. Vol. 3(8). P. 1995-2005.
<https://doi.org/10.1039/c9se00120d>.

6. Zahid M. A., Khokhar M. Q., Kim Y., Yi J. Utilization of CaF₂/ITO Double Layer Anti Reflective Coating for Increasing the Efficiency in Rear Emitter SHJ Solar Cells. *Crystal Research and Technology*. 2022. Vol. 57(8). P. 2100233.
<https://doi.org/10.1002/crat.202100233>.

7. Ho W. J., Yang H. Y., Liu J. J., Lin P. J., Ho C. H. Plasmonic effects of two-dimensional indium-nanoparticles embedded within SiO₂ anti-reflective coating on the performance of silicon solar cells. *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 508. P. 145275.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145275>.

8. Дяденчук А. Ф., Кідалов В. В. Гетероструктури n-ZnO:Al/porous-CdTe/p-CdTe в якості фотоелектричних перетворювачів. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2017. Т. 15, № 3. С. 487-494.

9. Omar A., Ali M. S., Abd Rahim N. Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review. *Solar Energy*. 2020. Vol. 207. P. 1088-1121.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.028>.

10. Zaien M., Ahmed N. M., Hassan Z. Fabrication and Characterization of an n-CdO/p-Si Solar Cell by Thermal Evaporation in a Vacuum. *Int. j. Electrochem. Sci*. 2013. Vol. 8. P. 6988-6996.
[https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)14822-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14822-X).

11. Xu M., Xu Z., Sun Z., Chen W., Wang L., Liu Y., ... Pan S. Surface Engineering in SnO₂/Si for High-Performance Broadband Photodetectors. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023. Vol. 15(2). P. 3664-3672. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c20073>.

12. Yıldırım H. Excitons in nonpolar ZnO/BeZnO quantum wells: Their binding energy and its dependence on the dimensions of the structures. *Physica B: Condensed Matter*. 2022. Vol. 639. P. 413974.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413974>.

13. Vyas S. A short review on properties and applications of zinc oxide based thin films and devices: ZnO as a promising material for applications in electronics, optoelectronics, biomedical and sensors. *Johnson Matthey Technology Review*. 2020. Vol. 64(2). P. 202-218.
<https://doi.org/10.1595/205651320X15694993568524>.

14. Kanmaz İ. Simulation of CdS/p-Si/p⁺-Si and ZnO/CdS/p-Si/p⁺-Si heterojunction solar cells. *Results in Optics*. 2023. Vol. 10. P. 100353.
<https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100353>.



15. Dwivedi D. K. Modeling of CZTSSe solar photovoltaic cell for window layer optimization. *Optik*. 2020. Vol. 222. P. 165407. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165407>.
16. Boudour S., Bouchama I., Hadjab M., Laidoudi S. Optimization of defected ZnO/Si/Cu₂O heterostructure solar cell. *Optical Materials*. 2019. Vol. 98. P. 109433. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109433>.
17. Chen L., Chen X., Liu Y., Zhao Y., Zhang X. Research on ZnO/Si heterojunction solar cells. *Journal of Semiconductors*. 2017. Vol. 38(5). P. 054005. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/38/5/054005>.
18. Najim S. A. Fabrication of p-Si/ZnO Thin Films Solar Cell by CVD at Different Substrate Temperatures. *College Of Basic Education Researches Journal*. 2019. Vol. 15(4).
19. Gerlach D., Wilks R. G., Wippler D., Wimmer M., Lozac'h M., Félix R., ... Bär M. The silicon/zinc oxide interface in amorphous silicon-based thin-film solar cells: Understanding an empirically optimized contact. *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103(2). <https://doi.org/10.1063/1.4813448>.
20. Lai K. C., Liu C. C., Lu C. H., Yeh C. H., Houg M. P. Characterization of ZnO: Ga transparent contact electrodes for microcrystalline silicon thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010. Vol. 94(3). P. 397-401. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.12.002>.
21. Abass K. H., Mohammed M. K. Fabrication of ZnO: Al/Si solar cell and enhancement its efficiency via Al-doping. *Nano Biomedicine and Engineering*. 2019. Vol. 11(2). P. 170-177. <https://doi.org/10.5101/nbe.v11i2.p170-177>.
22. Abe Y., Kagei T., Sichanugrist P., Konagai M. Development of double-textured ZnO: B substrates for improving microcrystalline silicon solar cell performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2014. Vol. 4(6). P. 1374-1379. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2358085>.
23. Ding J., Zhou Y., Dong G., Liu M., Yu D., Liu F. Solution processed ZnO as the efficient passivation and electron selective layer of silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2018. Vol. 26(12). P. 974-980. <https://doi.org/10.1002/pip.3044>.
24. Hussain B., Ebong A., Ferguson I. Zinc oxide as an active n-layer and antireflection coating for silicon based heterojunction solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2015. Vol. 139. P. 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.03.017>.
25. Chala S., Sengouga N., Yakuphanoglu F., Rahmane S., Bdirina M., Karteri İ. Extraction of ZnO thin film parameters for modeling a ZnO/Si solar cell. *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 871-880. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.035>.



26. Wenas W. W., Riyadi S. Carrier transport in high-efficiency ZnO/SiO₂/Si solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2006. Vol. 90. P. 3261-7 <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.026>.

27. Vallisree S., Thangavel R., Lenka L. T. Modelling, simulation, optimization of Si/ZnO and Si/ZnMgO heterojunction solar cells. *Materials Research Express*. 2018. Vol. 6(2). P. 025910. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf023>.

28. Jamil N. Y., Ivashchenko M. M., Abdulla S. N., Muhammed A. A. K., Pogrebnjak A. D. Design and Fabrication Heterojunction Solarcell of Si-CdS-ZnO Thin Film. In Proceedings of the international conference nanomaterials: applications and properties (No. 1, no. 4, pp. 04NMEEE09-04NMEEE09). Sumy State University Publishing. 2012.

29. Zhang M., Gao X., Barra A., Chang P., Huang L., Hellwarth R., Lu J. G. Core-shell structured Si/ZnO photovoltaics. *Materials Letters*. 2015. Vol. 140. P. 59-63. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.10.083>.

30. Zhao F., Lin J., Lei Z., Yi Z., Qin F., Zhang J., ... Wu P. Realization of 18.97% theoretical efficiency of 0.9 μm thick c-Si/ZnO heterojunction ultrathin-film solar cells via surface plasmon resonance enhancement. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2022. Vol. 24(8). P. 4871-4880. <https://doi.org/10.1039/D1CP05119A>.

31. Chabane L., Zebbar N., Trari M., Kechouane M. Opto-capacitive study of n-ZnO/p-Si heterojunctions elaborated by reactive sputtering method: Solar cell applications. *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 636. P. 419-424. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.06.041>.

32. Naim H., Shah D. K., Bouadi A., Siddiqui M. R., Akhtar M. S., Kim C. Y. An In-Depth Optimization of Thickness of Base and Emitter of ZnO/Si Heterojunction-Based Crystalline Silicon Solar Cell: A Simulation Method. *Journal of Electronic Materials*. 2022. Vol. 51(2). P. 586-593. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-09341-5>.

33. Huang F., Guo B., Li S., Fu J., Zhang L., Lin G., ... Cheng Q. Plasma-produced ZnO nanorod arrays as an antireflective layer in c-Si solar cells. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. P. 4011-4023. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3099-1>.

34. Singh Bhim, Vivek Gupta. Modelling and simulation of silicon solar cells using PC1D. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 54. P. 810-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.092>.

35. Sharma Rajinder. Silicon nitride as antireflection coating to enhance the conversion efficiency of silicon solar cells. *Turkish Journal of Physics*. 2018. Vol. 42(4). P. 350-355. <https://doi.org/10.3906/fiz-1801-28>.

36. Dyadenchuk A. F., Kidalov V. V. Films CdS Grown on porous Si Substrate. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2018. Vol. 10(1). No 01007-1-01007-4.



37. Muhfidin Rivani, Song Yu. Temperature Effects on the Performance of Silicon Solar Cells using PC1D. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial and Technology and Information Design, ICITID 2021, 30 August 2021, Yogyakarta, Indonesia*. 2021. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.30-8-2021.2311501>.

38. Abdullah C. A. C., Razak D. F. A., Yunus M. B. M., Zaki M., Yusoff M. Structural and Optical Properties of N-Type and P-Type Porous Silicon Produced at Different Etching Time. *Int. J. Electroactive Mater.* 2019. Vol. 7. P. 28-37.

39. Yadav C., Kumar S. Numerical simulation for optimization of ultra-thin n-type AZO and TiO₂ based textured p-type c-Si Heterojunction Solar Cells. *Silicon*. 2021. P. 1-9. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01212-2>.

40. Bilyalov R., Stalmans L., Beaucarne G., Loo R., Caymax M., Poortmans J., Nijs J. Porous silicon as an intermediate layer for thin-film solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2001. Vol. 65(1-4). P. 477-485. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00130-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00130-6).

41. Ray J., Chaudhuri T. K., Panchal C., Patel K., Patel K., Bhatt G., Suryavanshi P. PbS-ZnO Solar Cell: A Numerical Simulation. *Journal of Nano-and Electronic Physics*. 2017. Vol. 9(3).

42. Husen M. J., Aga F. G., Dibaba S. T. Theoretical Performance Analysis of Inverted P3HT: PCBM Based Bulk Hetero-Junction Organic Solar Cells through Simulation. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 2023. P. 6. <https://doi.org/10.1155/2023/4204298>.

43. King R. R., Mitchell K. W., Gee J. M. Back Surface Cell Structures for Reducing Recombination in CZ Silicon Solar Cells. *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, Waikoloa, USA. 1994. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.519966>.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2023 р.

A. Dyadenchuk¹, Ye. Filipovich²

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

² National University «Zaporizhzhia polytechnic»

SIMULATION OF THE PHOTOELECTRIC CHARACTERISTICS OF THE ZnO/porous-Si/Si HETEROJUNCTION SOLAR CELL

Summary

The work is aimed at researching photosensitive structures based on porous Si and ZnO promising for solar energy. A device scheme of a solar cell model based on ZnO/porous-Si/Si heterostructures is proposed. Using the PC1D program, the light characteristics of the manufactured structure were calculated (no-load voltage V_{oc} ,



short-circuit current I_{SC} , filling factor FF and efficiency η), as well as the current-voltage characteristics were constructed. The effect of the thickness of the porous-Si and ZnO layers, the texturing and doping level of the ZnO layer, as well as the effect of temperature on the performance of the ZnO/porous-Si/Si heterojunction solar cell were investigated in order to obtain a device with good conversion efficiency. It was established that for ZnO with a thickness of 2 μm and with a thickness of porous-Si of 500 μm , the highest efficiency of 22.5% can be obtained. An increase in the doping concentration in the ZnO layer leads to a decrease in the overall efficiency of the device due to a decrease in light transmission. The maximum value of the efficiency is reached at the donor doping concentration of $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. The study of the texturing of the surface of the solar cell shows that the solar energy conversion efficiency reaches a maximum value of 22.7% at an angle of 85° due to the reduction of light reflection from the front surface and the capture of light in the solar cells. It was also found that increasing the temperature from 280 K to 340 K leads to a decrease in efficiency by 4.8%. The best efficiency value of 23.9% is achieved at 280 K.

Keywords: photoconverter, porous silicon, computer simulation, ZnO film.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-167-176

УДК 621.3.045.5

О. Ю. Юрченко¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-3047-6654

Г. В. Барсукова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4261-2182

А. В. Чепіжний¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7540-8313

В. М. Зубко¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-2426-2772

Г. А. Тимошенко¹, інженер,

ORCID: 0000-0003-0451-137X

¹ Сумський національний аграрний університетe-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com, тел.: +380966106782

ПОШУК МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ ОБМОТКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ЗМІНОЮ РОБОЧОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Анотація. Процес роботи енергетичного обладнання базується на дії магнітних полів. Котушки, що є структурними елементами такого обладнання, зазвичай, є однією із причин виходу зі строю генератора, електричного двигуна тощо. В залежності від того, яку саме обмотку пошкоджено, робота установки буде відрізняться. Скажімо, пошкоджено пускову чи робочу обмотку статора електричного двигуна. В результаті чітко прогнозованого методу пошуку місця короткого замикання є можливість визначення яку саме котушку пошкоджено. Представлений у даній статті метод пошуку пошкодження обмоток електроенергетичного обладнання з використанням тепловізора дає чітке уявлення щодо швидкого та безпечного пошуку неробочої котушки. Якісний ремонт обладнання базується на гарантовано чіткому визначенні несправностей. Тому, представлений спосіб передбачає якість ремонту і економічний ефект.

Ключові слова: тепловізор, температура нагрівання, обмотка, котушка, статор, ротор, генератор, електричний двигун.

Постановка проблеми. Для умов сучасного машинобудування і, разом із тим, якісного ремонту машин і обладнання способи реалізації стратегії якості є першочерговими. Внаслідок правильних і раціональних дій у напрямку пошуку несправностей є можливість дотримання належних умов та вимог щодо технічного обслуговування та ремонту обладнання.

Електричний двигун, що є досить розповсюдженим і масовим електроенергетичним пристроєм, складається з певних структурних елементів. Однак, вихід зі строю окремих його частин веде за собою або повну втрату можливості роботи, або часткову. Скажімо, при виході зі строю підшипників, будуть спостерігатися шум, вібрації, нестандартна робота двигуна і т. п. Однак, у варіанті із обмотками, електричний двигун не буде запускатися. У попередніх дослідженнях



автором даної статті було показано способи ремонту електричного двигуна, а саме, - заміну окремих котушок. Не усіх, як це практикують на сьогодні, а лише окремих. Значимим ефектом від такого підходу є економія часу, фізичної праці, коштів на матеріали та обладнання. Крім того, у варіанті із обмотками заводського виконання є можливість їх збереження і заміни лише однієї, несправної котушки електричного двигуна.

Однак, важливим фактором є пошук місця пошкодження обмотки генератора або електричного двигуна. У зв'язку із сучасним машинобудуванням та умовами конвеєру якість укладки обмоток у пази, а також просочення її лаком у переважній більшості випадків не дають можливості пошуку котушки, що вийшла зі строю. Візуальний огляд не дає чіткого уявлення щодо причини поломки, а головне, - її точки.

У зв'язку із цим, актуальним завданням є пошук способів визначення точки виходу зі строю обмотки електроенергетичного обладнання з метою ефективного його ремонту.

Аналіз останніх досліджень. Питання повторного використання ресурсів дозволяє значно зменшити наявні невідновні запаси й унеможливити постійне збільшення завданої шкоди навколишньому середовищу. Ремонт електричних двигунів є складним процесом. В разі виходу зі строю обмотки, - є можливість її заміни. Таку операцію реалізують через зменшення витрат для покупки нового електродвигуна і максимально зменшення питання переробки відпрацьованого устаткування.

Для ремонту електродвигуна у домашніх чи лабораторних умовах при умові невеликих масштабів виробництва мається можливість використання різного обладнання, що значно полегшить виконання ремонтних робіт [1].

Діагностика несправностей електричного двигуна має на меті якісний пошук місць обриву як силового кола, так і кола керування. У роботі [2] показано реалізацію вбудованої системи з виявлення несправностей ротора в режимі реального часу для асинхронного двигуна. Пристрій є прототипом вимірювального пристрою, що може виявляти зламані стрижні ротора у полі без будь-якого додаткового налаштування чи стороннього програмного забезпечення. За мету в дослідженні було поставлено створення нового методу на основі попередніх досліджень із діагностики відмов ротора та розробка вбудованого вимірювального пристрою на базі мікроконтролеру. Новий метод, який поєднує у собі швидке перетворення Фур'є і реляційний аналіз Грея з метою отримання найкращих результатів з діагностики, розроблений для вбудованої системи у компактному й недорогому вимірювальному пристрої.



Циклостаціонарний аналіз отримує теж широке розповсюдження у ролі ефективного інструменту демодуляції при виявленні несправностей машин, які обертаються, на основі аналізу сигнатур вібрації. Дослідження [3] покращує два поточні зрілі циклостаціонарні підходи: спектр циклічної модуляції і швидку спектральну кореляцію. Такий спосіб у поєднанні з новим частотним додатком енергетичного оператора можуть покращити ідентифікацію ознак несправності за меншого обчислювального навантаження. У дослідженні [4] представлено вбудовану апаратну систему, в основі якої лежить вимірювання взаємної інформації й штучних нейронних мереж для діагностики коротких замикань обмоток статора трифазних асинхронних двигунів із синусоїдальним джерелом живлення, підключеним до мережі. В методології використовують міру теорії інформації з метою отримання найважливіших характеристик поточних сигналів фаз. Такі дані передаються до багатошарової нейронної мережі, яка виконує класифікацію шаблонів. Експериментальні випробування із різними умовами експлуатації машини підтверджують надійність й ефективність запропонованої методики.

Асинхронні машини керують багатьма виробничими процесами, а тому їхня несподівана відмова може призводити до великих виробничих втрат. Аналіз спектру струму дає можливість виявити в режимі онлайн характерні ознаки несправності на ранній стадії, уникаючи несподіваних поломок. Тим не менш, аналіз частотної області вимагає стабільних умов роботи, чого не можна сказати про вітрогенератори, двигуни, що приводять в рух змінне навантаження, і т. д. [5]. У статті [6] розглядається аналіз трифазної асинхронної машини із короткозамкненим ротором з несправністю у вигляді міжвиткового короткого замикання і її вплив на пряме керування крутним моментом. Використовувані особливості, такі як поведінка, його стандартний висновок та його характер нелінійного прогноуючого контролера на основі гістерезису, дозволяють вдосконалювати й розробляти альтернативні пояснення явищ. Із метою моделювання на основі еквівалентної схеми Нортонна було розроблено блок, що конфігурується для асиметричного інтермодулю за принципом «пуск/робота». Результати моделювання й експериментів демонструють достовірність проведеного аналізу й теоретичних висновків, які дозволяють проводити подальші дослідження у галузі онлайн-діагностики несправностей і моніторингу стану двигуна з інверторним живленням за такого типу несправностей.

Наявні дослідження з виявлення несправностей статора із використанням нового методу вимірювання радіального потоку [7] та



методу, заснованого на потоці повітряного зазору з метою виявлення міжвиткового замикання й ідентифікації дефектної області [8] перевірені за допомогою моделювання методом кінцевих елементів, а також шляхом проведення кількох експериментальних випробувань. Порівняно, апаратна реалізація методу рекурсивного стаціонарного вейвлет-пакетного перетворення на платі з урахуванням процесора, використовувани для виявлення несправностей асинхронного двигуна за допомоги використання нижчої частоти вибірки й зменшених вибірок струму, дають можливість зменшеного споживання вбудованих ресурсів [9].

Тому, пошук нових методів отримання електричної енергії, раціональних способів в машинобудуванні, використанні енергії [10] та технічному обслуговуванню такого обладнання є важливим завданням.

Формулювання мети статті. Метою даного дослідження є випробування способу визначення котушки з коротким замиканням у роботі генератора за допомогою тепловізора. У зв'язку із цим висувуються такі задачі дослідження:

- проведення експериментального дослідження з сучасним обладнанням;
- використання складного якоря генератора з кількома котушками;
- перевірка несправності з подачею напруги;
- зробити висновки щодо практичного застосування та простоти і дешевизни способу по отриманню якісних показників для подальшого ремонту статора генератора.

Основна частина. Проведення експериментальних досліджень по пошуку котушки з коротким замиканням слід проводити зі зміною напруги. Визначення місця пошкодження потрібно здійснити на робочому статорі генератора. Першочерговим завданням є визначення робочої температури статора генератора при подачі напруги на нього. Потім, з метою визначення нагріву виконати імпровізовану котушку і замкнути накоротко. В дослідженнях нагріву котушок ротора генератора використано тепловізор UTi165A (рис. 1).

З метою якісного зображення експерименту схему сердечника та котушок зображено на рис. 3. Разом із тим, указана вище необхідна для намотки котушка з імпровізованим коротким замиканням схематично зображена на рис. 2, справа.



Рис. 1. Схема проведення експерименту:
А – тепловізор UTi165A; Б – методика



Рис. 2. Досліджуваний статор генератора

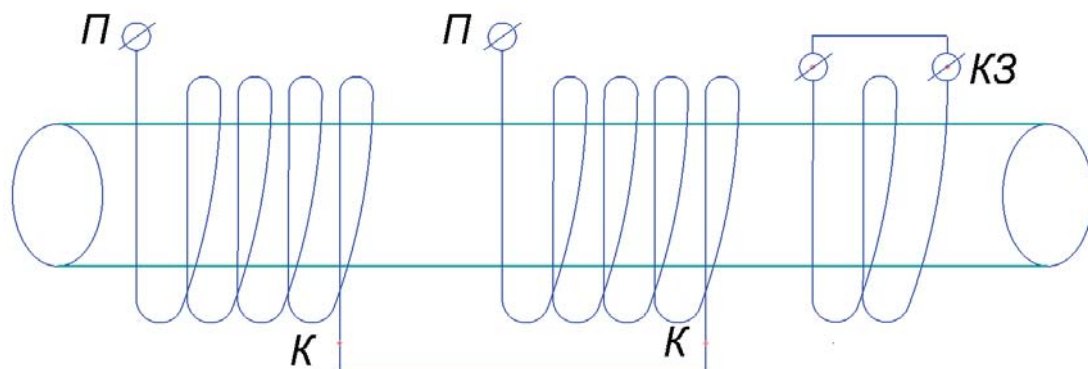


Рис. 3. Схема експериментального ротора генератора

Початок експериментального дослідження із незамкненими накоротко котушками показав нормально холодний їх стан на тепловізорі. За вимкненого стану, без подачі напруги температура обмоток ротора генератора становить 26°C . Послідовна подача напруги до 220 В показує плавний підйом температури обмоток ротора. Однак, це відбувається до робочої допустимої температури без чіткого зображення п'ятна нагріву.

Таблиця 1

Показники нагріву котушок ротора

№ п/п	Час подачі напруги, сек	Робоча температура, °С
1.	5	26,3
2.	10	26,5
3.	15	26,6
4.	20	26,8
5.	25	26,9
6.	30	27
7.	35	27,2
8.	40	27,5

Другою частиною експерименту є створення імпровізованого витка на сердечнику ротора.

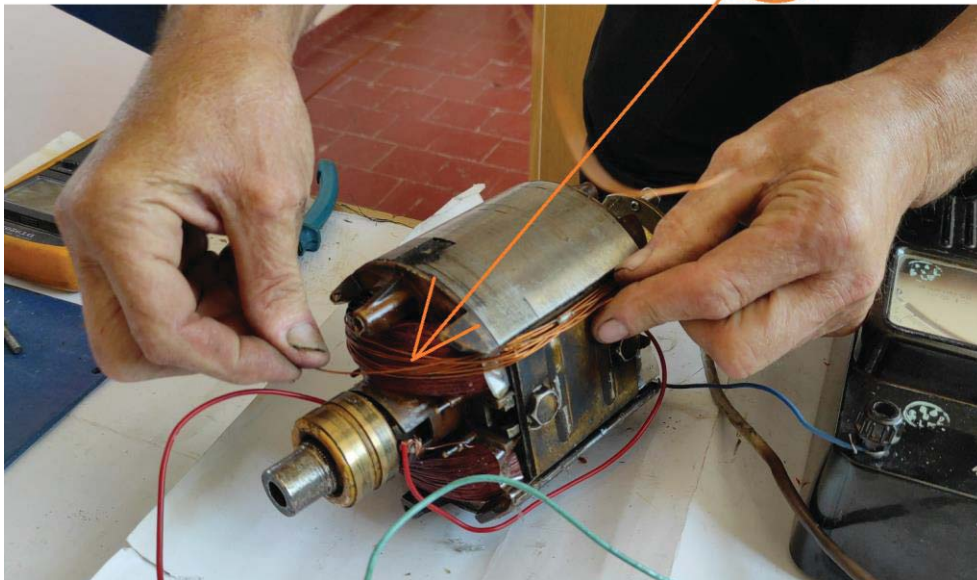
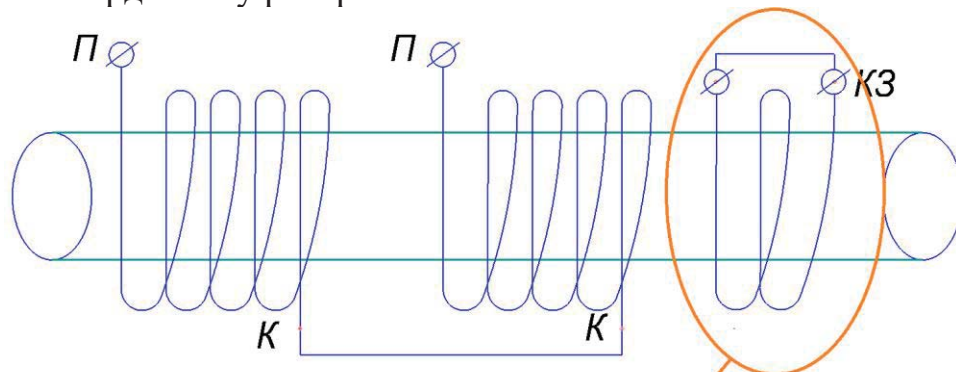


Рис. 4. Створення імпровізованої короткозамкненої котушки

При подачі напруги 220 В у коло ротора тепловізор показує нагрів кола ротора. Особливо це помітно відображається на екрані тепловізора з зображенням котушки, на якій відбувається нагрів. Досить ефективним є те, що інші котушки на екрані тепловізора

залишаються зеленого кольору, тобто, їх температура знаходиться в межах допустимої. А саме імпровізований виток, замкнути накоротко відображається на екрані тепловізора червоним кольором і з постійним збільшенням температури обмотки статора.



Рис. 5. Зміна температури обмотки. А, Б – виміри робочої обмотки; В, Г, Д, Е – короткозамкнена обмотка (32,4; 33,2; 34,3; 36,8°C відповідно)

Таблиця 2

Показники нагріву котушок ротора

№ п/п	Час подачі напруги, сек	Робоча температура, °C
1.	5	27,2
2.	10	28,7
3.	15	30
4.	20	31
5.	25	33
6.	30	35
7.	35	37,5
8.	40	39

Як бачимо з таблиці 2 – стрімкий ріст температури обмотки ротора супроводжується зміною кольору обмотки на екрані тепловізора. В такий спосіб є можливість визначення несправної обмотки статора або ротора електроенергетичного обладнання з метою ремонту або заміни лише однієї котушки, а не одразу усіх.

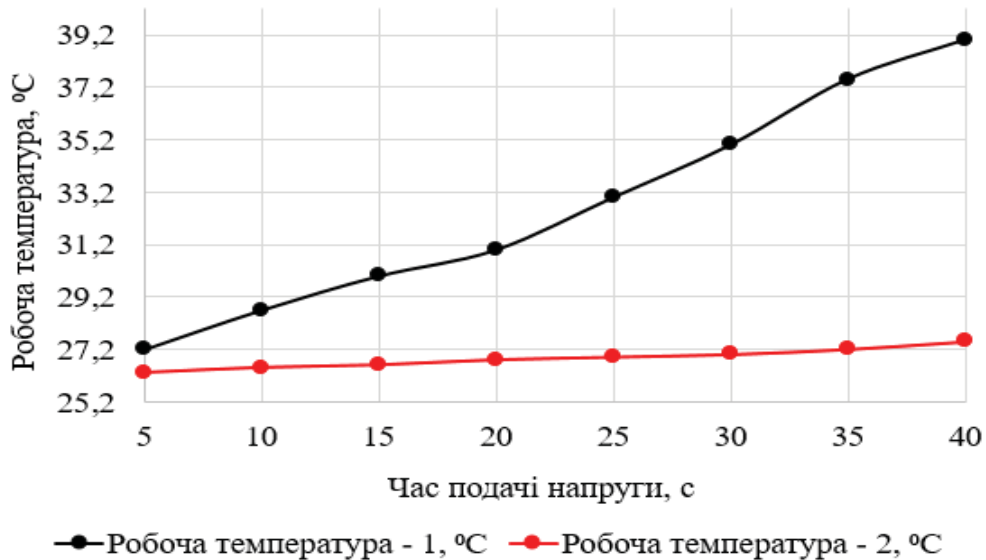


Рис. 6. Графік підйому температури за двох дослідів

Порівняльний аналіз двох дослідів з рисунку 6 показав, що робоча обмотка електротехнологічного пристрою майже не змінює робочої температури за умови відсутності перевантаження. З іншого боку, у разі короткого замикання, робоча температура збільшується. Цим самим, відбувається нагрів обмоток. У випадку використання тепловізора є можливість не лише визначити температуру кожної з обмоток, а і візуально бачити їх.

Висновки. В результаті проведення досліджень з виявлення обмотки з коротким замиканням в роторі генератора визначено, що одним із простих та ефективних способів є спосіб визначення температури котушки тепловізором. Ефективність такого методу пошуку несправності підтверджується одразу кількома факторами:

- гарантованістю результату;
- економією часу на ремонт внаслідок заміни лише однієї котушки замість кількох;
- економія на матеріали та обладнання (в даному випадку провід для перемотування обмотки);
- менша кількість відходів, що зменшує згубний вплив на навколишнє середовище.

Тому, одним із найбільш ефективних способів для домашніх або лабораторних умов пошуку місця пошкодження обмотки статора або ротора електроенергетичного обладнання є спосіб використання тепловізора.

*Список використаних джерел*

1. Юрченко О., Лівенко Т., Матвеев О., Беркут Р. & Бугайов В. Технологія ремонту електродвигунів різного призначення. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13(2). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/433> (дата звернення 03.09.2023).
2. Guven Y., & Atis S. Implementation of an embedded system for real-time detection of rotor bar failures in induction motors. *ISA transactions*. 2018. Vol. 81. P. 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.08.004>.
3. Wang Z. M., Yang J., Li H., Zhen D., Gu F. & Ball, A. Improved cyclostationary analysis method based on TKEO and its application on the faults diagnosis of induction motors. *ISA transactions*. 2021. Vol. 10. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.10.026>.
4. Bazan G. H., Goedtel A., Scalassara P. R., Endo W., Nunes E. A., Takase V. T., Guedes J. J. & Gentil, M. G. An Embedded System for Stator Short-Circuit Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Using Information Theory and Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2022. Vol. 52. P. 6582-6592. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3149851>.
5. Burriel-Valencia J., Puche-Panadero R., Martínez-Román J., Sapena-Bano A., Riera-Guasp M. & Pineda-Sánchez M. Multi-Band Frequency Window for Time-Frequency Fault Diagnosis of Induction Machines. *Energies*. 2019. <https://doi.org/10.3390/en12173361>.
6. Berzoy A., Mohammed O. A. & Restrepo J. Analysis of the Impact of Stator Interturn Short-Circuit Faults on Induction Machines Driven by Direct Torque Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. Vol. 33. P. 1463-1474. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2827170>.
7. Surya G. N., Khan Z. J., Ballal M. S. & Suryawanshi H. M. A Simplified Frequency-Domain Detection of Stator Turn Fault in Squirrel-Cage Induction Motors Using an Observer Coil Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. Vol. 64. P. 1495-1506. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611585>.
8. Dehghan H., Haghjoo F. & Cruz S. M. A Flux-Based Differential Technique for Turn-to-Turn Fault Detection and Defective Region Identification in Line-Connected and Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. Vol. 33. P. 1876-1885. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2837389>.
9. Hmida M. A. & Braham A. ARM based RSWPT implementation for embedded condition monitoring of induction motor. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016. P.1464-1469. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7794066>.



10. Yurchenko O., Radchuk O., Barsukova H., Savchenko-Pererva M., Ivchenko O., Kolodnenko V. & Fesenko D. Determining a model of the blade in a wind turbine for regions with low wind speeds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2(8 (122)). P. 44–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277896>.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.

O. Yurchenko¹, H. Barsukova¹, A. Chepizhnyy¹, H. Tymoshenko¹, V. Zubko¹
¹**Sumy National Agrarian University**

SEARCH FOR THE LOCATION OF DAMAGE TO THE ELECTRICAL EQUIPMENT WINDING DUE TO A CHANGE IN THE WORKING TEMPERATURE

Summary

For the conditions of modern mechanical engineering and, at the same time, high-quality repair of machines and equipment, methods of implementing the quality strategy are of primary importance. As a result of correct and rational actions in the direction of fault finding, it is possible to comply with the proper conditions and requirements for maintenance and repair of equipment. The process of operation of energy equipment is based on the action of magnetic fields. Coils, which are structural elements of such equipment, are usually one of the reasons for failure of a generator, electric motor, etc. Depending on which winding is damaged, the operation of the installation will differ. For example, the starting or working winding of the stator of an electric motor is damaged. As a result of a clearly predicted method of finding the place of a short circuit, it is possible to determine which coil is damaged. The method of finding damage to the windings of electrical power equipment presented in this article using a thermal imager gives a clear idea of how to quickly and safely find a non-working coil. High-quality equipment repair is based on guaranteed clear identification of malfunctions. A comparative analysis of the two experiments from Figure 8 showed that the working winding of the electrotechnological device almost does not change the working temperature in the absence of overload. On the other hand, in the event of a short circuit, the operating temperature increases. By this, the windings are heated. In the case of using a thermal imager, it is possible not only to determine the temperature of each of the windings, but also to visually see them. Therefore, the presented method provides repair quality and economic effect. As a result of conducting research on the detection of a winding with a short circuit in the rotor of the generator, it was determined that one of the simple and effective methods is the method of determining the temperature of the coil with a thermal imager. The effectiveness of this method of finding a fault is confirmed by several factors at once. Therefore, one of the most effective ways for home or laboratory conditions to find the place of damage to the stator winding or rotor of electric power equipment is the method of using a thermal imager.

Keywords: thermal imager, heating temperature, winding, coil, stator, rotor, generator, electric motor.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-177-185

УДК 621.313.13: 631.37

І. О. Попова¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0001-5429-8269

С. В. Чаусов¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0003-3811-9077

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного,*e-mail: iryana.popova@tsatu.edu.ua, тел: +380983765519

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНОГО РІШЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ЯКОСТІ ФІЛЬТРА ЛІНІЙНИХ НЕСИМЕТРИЧНИХ НАПРУГ

Анотація. В роботі зроблений аналіз причин виникнення несиметричних режимів у мережі 0,38/0,22 кВ до яких приєднано електрообладнання сільських господарств, виявлені наслідки для роботи динамічного електрообладнання при несиметрії напруг мережі. Виявлено, що умовах експлуатації електроспоживачів несиметричний режим є звичайним робочим режимом сільських мереж 0,38/0,22 кВ. Обґрунтовано надійність діагностування несиметрії трифазної напруги за допомогою фільтрів симетричних складових, які розподіляються на фільтрові датчики напруги: прямої, зворотної і нульової послідовностей, в яких параметри складових елементів фільтрів напруги визначаються таким чином, щоб виділити ту, чи іншу симетричну складову напруги. Зроблено порівняння між фільтрами, що складаються з резистивно-конденсаторних кіл та схемним рішенням пристрою, що досліджується в роботі. Досліджено можливість використання схемного рішення пристрою, яке складається з двох лінійних індуктивних котушок без феромагнітних осердь з однаковими параметрами (активним опором та індуктивністю) і конденсатора в якості фільтру симетричних складових лінійних напруг прямої і зворотної послідовностей. Для розрахунку несиметричного режиму трифазних кіл застосовано спеціальний метод розрахунку – метод симетричних складових. Аналітичним розрахунком доведено, що досліджуване схемне рішення пристрою може бути використане в якості фільтру лінійних напруг зворотної послідовності: вольтметр, що включений у фазі «а» вимірює напругу зворотної послідовності, а вольтметр, включений у фазі «с» вимірює напругу прямої послідовності. Визначені співвідношення між активним і реактивним індуктивним опором індуктивної котушки і ємністю конденсатора у схемному рішенні пристрою.

Ключові слова: симетричні складові, фільтр лінійних напруг, параметри, активний опір, індуктивність, ємність, котушка, конденсатор.

Актуальність та постановка проблеми. Електричні розподільні мереж 0,38/0,22 кВ, до яких приєднано електрообладнання сільських господарств, мають значну протяжність низьковольтних мереж, характеризуються змішаним підключенням однофазних та трифазних



споживачів, доволі часто загальна потужність однофазних споживачів перевищує потужність трифазних і має місце недопустима несиметрія струмів та напруг. Тому реальних умовах експлуатації електроспоживачів України несиметричний режим є звичайним робочим режимом сільських мереж 0,38/0,22 кВ [1].

В умовах несиметрії напруги різкому погіршуються техніко-економічних характеристик пристроїв, включених у електромережу, погіршується експлуатаційна надійність і терміну роботи електродвигунів. Зростають додаткові втрати у лініях 0,38 кВ, розподільних і споживчих силових трансформаторах напруги: ці втрати складають 4% від всієї електроенергії, що споживає сільське господарство [2].

Дослідження [3-4] показали, що відхилення напруги у сільських споживачів значно перевищують норми, що встановлені ГОСТ 13109-97. В господарствах, найбільш віддалених від джерел живлення, відхилення напруги знаходиться у допустимих межах тільки 54% часу, а нерівномірність навантаження фаз коливається в межах 16-22%.

Математичне очікування величини несиметрії напруг за даними [5] складає 7,3%, що значно перевищує вимоги ГОСТ 13109-97 Напруга прямої послідовності складає 89% від номінальної, що на 3,5% нижче мінімально допустимої на затискачах електродвигунів за умовами їх пуску у симетричному режимі.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором – є динамічним навантаження, з точки зору електротехніки, є найчастіше вживаним в якості приводу виробничих машин у промисловому, сільському виробництві і побуті. Незважаючи на те, що асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АД) доволі надійний в роботі, причин виходу з ладу трифазної обмотки статора АД багато, до них відносяться: струмові перевантаження обмотки статора збоку виникнення неприпустимої несиметрії напруги фаз мережі (до 50 %) або з причини обриву фазного проводу виходить з ладу до 45% статорних обмоток АД та інші [6].

Питанням якості електричної енергії в останні роки в Україні приділяється значна увага, оскільки недотримання норм якості електричної енергії призводить до погіршення електромагнітної сумісності електричних мереж електропостачання та споживачів (АД) електроенергії. Показники якості нормуються міжнародним стандартом 13109-97.

При дотриманні стандарту досягається безпечність електроспоживання, ресурсо- та енергозбереження, зниження витрат



на паливо, зменшується навантаження на обладнання, що використовується при генеруванні додаткових невиробничих потужностей [7].

Найбільш простими пристроями надійного діагностування несиметричних режимів трифазної напруги є фільтри симетричних складових, які розділяються на фільтрові датчики напруги: прямої, зворотної і нульової послідовностей, параметри складових елементів фільтрів напруги визначаються таким чином, щоб виділити ту, чи іншу симетричну складову напруги [8].

Мета досліджень – теоретично дослідити використання схемного рішення в якості фільтру симетричної складової прямої і зворотної послідовності і визначити співвідношення параметрів в ньому.

Основні матеріали дослідження. Під терміном «фільтр» в електротехніці розуміють спеціальний пристрій, або схемне рішення, за допомогою якого можна виділити або подавити із складної системи компонентів якісь визначені частини з її складу.

Фільтри симетричних складових призначені для вилучення конкретних складових векторів напруги (струму) з трифазної несиметричної системи напруги мережі: наприклад, симетричну складову прямої зворотної або нульової послідовностей [6].

При порушенні симетричного режиму трифазної системи, наприклад в наслідок несиметричних коротких замикань, в повних фазних напругах споживачів, наряду з напругою прямої послідовності, з'являються складові напруги зворотної та нульової послідовностей. Симетрична складова напруги зворотної послідовності викликає в динамічному навантаженні, тобто асинхронному трифазному двигуні, виникнення зворотного обертового магнітного поля, що викликає гальмівний момент. Зростають сили повних фазних струмів у динамічному навантаженні, збільшуються втрати активної потужності у фазах двигуна, збільшується швидкість зносу ізоляції цих обмоток і, як слідство, зменшується експлуатаційний ресурс навантаження.

Для запобігання виходу з ладу динамічних навантажень використовують захисні пристрої, датчиком несиметрії напруги в яких, як правило, використовують фільтри симетричних складових. Це діє можливість виконати захист, що буде реагувати на появу даних симетричних складових напруг [9].

Найбільшого розповсюдження досягли фільтри, що складаються з резистивно-конденсаторних кіл в наслідок простоти використання, підбору параметрів у схемі і невеликої ціни. Але головним недоліком



таких фільтрів є те, що разі використання для захисту динамічного індуктивного навантаження, в електричному колі може виникнути резонансне явище струму, яке само по собі супроводжується значним збільшенням струмів у фаз навантаження. Тому доцільно розробляти інші схемні рішення, які можна застосовувати в якості фільтру напруг симетричних складових при несиметрії напруг мережі [6].

Якщо у трифазній системі є пристрої, опори фаз яких залежать від послідовності чергування фаз струмів (трифазні асинхронні або синхронні двигуни та генератори або хоча б один з таких пристроїв, потужність якого порівняна з потужністю всієї трифазної системи), то для розрахунку несиметричного режиму таких трифазних кіл застосовують спеціальний метод розрахунку – метод симетричних складових, який по своїй суті є різновидом методу накладання [10].

Дослідимо можливість використання схемного рішення пристрою (рисунок 1а), яке складається з двох лінійних індуктивних котушок без феромагнітних осердь з однаковими параметрами (активним опором та індуктивністю) і конденсатора в якості фільтру напруги прямої і зворотної послідовностей.

При несиметричній системі лінійних напруг кола, напруги у фазах a і c визначаються (згідно позначень рисунку 1б і комплексами фазних провідностей Y_a, Y_b, Y_c) за рівняннями

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{ab} \cdot Y_b + \dot{U}_{ac} \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{ca} \cdot Y_a + \dot{U}_{cb} \cdot Y_b}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (2)$$

де $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{cb}, \dot{U}_{ca}$ – комплекси лінійних несиметричних напруг на затискачах схемного рішення, B ;

Y_a, Y_b, Y_c – комплекси повних провідностей фаз схемного рішення (рис.1б), См.

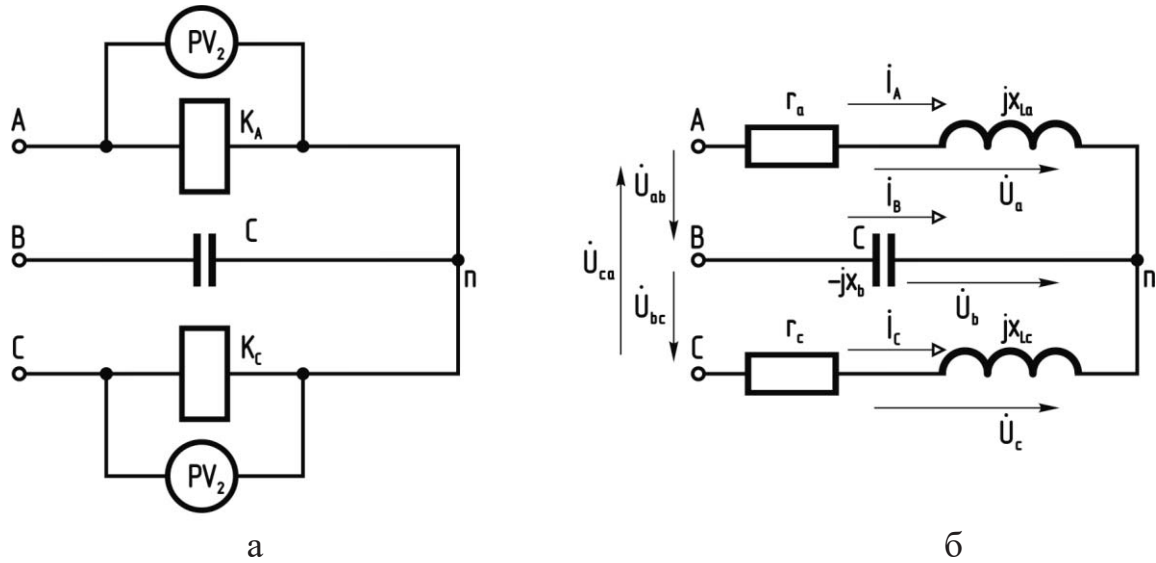


Рис. 1. Принципова (а) і розрахункова (б) схеми пристрою

Схемне рішення пристрою (рис. 1) з'єднано зіркою, тому лінійні напруги при з'єднанні зіркою не містять складової напруги нульової послідовності. Тоді представимо лінійні напруги схемного рішення пристрою через симетричні складові несиметричної лінійної напруги прямої і зворотної послідовностей

$$\begin{cases} \dot{U}_{ab} = \dot{U}_{ab1} + \dot{U}_{ab2} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_{bc} = a^2 \cdot \dot{U}_{ab1} + a \cdot \dot{U}_{ab2} = a^2 \cdot \dot{U}_1 + a \cdot \dot{U}_2; \\ \dot{U}_{ca} = a \cdot \dot{U}_{ab1} + a^2 \cdot \dot{U}_{ab2} = a \cdot \dot{U}_1 + a^2 \cdot \dot{U}_2, \end{cases} \quad (3)$$

де a – оператор трифазної системи, $a = e^{j120^\circ}$.

Підставимо симетричні складові прямої і зворотної послідовностей лінійних напруг з системи рівнянь (3) у (1) та (2). Визначимо фазні напруги фаз «а» та «в» з рівняння (1) через лінійні напруги (3) схемного рішення пристрою

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_1 \cdot (Y_b - a \cdot Y_c) + \dot{U}_2 \cdot (Y_b - a^2 \cdot Y_c)}{Y_a + Y_b + Y_c}; \quad (4)$$

$$\dot{U}_c = \frac{\dot{U}_1 \cdot (a \cdot Y_a - a^2 \cdot Y_b) + \dot{U}_2 \cdot (a^2 \cdot Y_a - a \cdot Y_b)}{Y_a + Y_b + Y_c}. \quad (5)$$

Якщо прийняти $(Y_b - a \cdot Y_c) = 0$, то комплекс фазної напруги \dot{U}_a з виразу (4) буде дорівнювати

$$\dot{U}_a = \dot{U}_2 \cdot \frac{(Y_b - a^2 \cdot Y_c)}{Y_a + Y_b + Y_c}; \quad (6)$$

Якщо прийняти $(a^2 \cdot Y_a - a \cdot Y_b) = 0$, то комплекс фазної напруги \dot{U}_c з виразу (5) буде рівний



$$\dot{U}_c = \dot{U}_1 \cdot \frac{(a \cdot Y_a - a^2 \cdot Y_b)}{Y_a + Y_b + Y_c}. \quad (7)$$

Таким чином, напруга фази «а» схемного рішення пристрою (рис. 1), згідно рівняння (6) містить тільки симетричну складову зворотної послідовності, що відповідає показам вольтметра V2 (рис.1а), а напруга фази «с» містить тільки симетричну складову прямої послідовності, що відповідає показам вольтметра V1, якщо співвідношення провідностей наступне

$$(Y_b - a \cdot Y_c) = 0; Y_c = \frac{Y_b}{a} = a^2 \cdot Y_b; \quad (8)$$

$$(a^2 \cdot Y_a - a \cdot Y_b) = 0; Y_a = \frac{Y_b}{a} = a^2 \cdot Y_b. \quad (9)$$

Визначимо співвідношення параметрів у схемному рішенні пристрою (рис. 1б) для використання в якості фільтру лінійної напруги прямої і зворотної послідовності.

Умовою фільтру лінійних напруг прямої і зворотної послідовностей є співвідношення комплексів повних провідностей індуктивних котушок і конденсатора, включених у фази схемного рішення пристрою (рис.1б)

$$Y_a = Y_c = a^2 \cdot Y_b. \quad (10)$$

Приймемо, що конденсатор ідеальний, тобто активний опір його дорівнює нулю, тоді комплекс повної провідності фази «в», в якій включений ідеальний конденсатор, буде дорівнювати

$$Y_b = j\omega C, \quad (11)$$

де ω – кругова частота електричного кола, рад/с;

C – ємність конденсатора, Ф;

j – уявне число, $j = \sqrt{-1}$.

Тоді співвідношення між комплексами фазних провідностей індуктивних котушок та ідеального конденсатора, тобто параметрами схемного рішення пристрою: активним опором і індуктивністю котушок і ємністю конденсатора, буде наступним, згідно співвідношення (10)

$$Y_a = Y_c = a^2 \cdot Y_b = a^2 \cdot j\omega C = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot j\omega C = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j\omega C - j\frac{\omega C}{2} = g - b_L, \quad (12)$$

де g – активна провідність індуктивної котушки, См;

b_L – індуктивна реактивна провідність котушки, См;

b_C – ємнісна реактивна провідність конденсатора, См;

Співвідношення активної провідності котушки до ємнісної провідності ідеального конденсатора знаходяться з рівняння



$$g = \frac{r_a}{z^2} = \frac{\sqrt{3} \cdot \omega C}{2}, \quad (13)$$

де z^2 – квадрат повного опору індуктивної котушки, якщо квадрат повного опору визначити за рівнянням

$$z^2 = r^2 + (\omega L)^2. \quad (14)$$

В той час, як реактивна провідність індуктивності до ємнісної провідності конденсатора співвідносяться як

$$b_L = \frac{\omega L}{z^2} = \frac{\omega C}{2}. \quad (15)$$

Для визначення співвідношення величини активного опору котушки по відношенню до ємності конденсатора (12), з використанням значення кругової частоти мережі та комплексу повного опору котушки, використаємо наступні рівняння

$$r = \frac{z^2 \cdot \sqrt{3} \cdot \omega C}{2}. \quad (16)$$

Для визначення величини індуктивного опору котушки по відношенню до ємності конденсатора (12), з використанням значення кругової частоти мережі та комплексу повного опору котушки, використаємо наступні рівняння

$$\omega L = \frac{z^2 \cdot \omega C}{2}. \quad (17)$$

При цьому співвідношення активного і реактивного опорів індуктивної котушки у схемному рішенні [4, 5]

$$\frac{r}{\omega L} = \sqrt{3}.$$

Висновок. Проведений аналіз схемного рішення пристрою доводить, що його можна використовувати в якості фільтру лінійної напруги прямої і зворотної послідовностей за умови підбору параметрів котушок і конденсатора. Це дозволить використовувати його в пристроях захисту від несиметрії напруги мережі, щоб зменшити швидкість зносу ізоляції статорних обмоток і подовжити термін експлуатації асинхронних двигунів.

Список використаних джерел

1. Вовк О. Ю., Квітка С. О., Дідур В. В. Вплив відхилення живлячої напруги на ресурс ізоляції асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. № 9(1). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-25>.



2. Маков Д. К., Поворознюк Н. І., Виноградов Ю. М., Услонцев А. Б. Підвищення точності вимірювання несиметрії трифазної напруги. *Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання*. 2010. № 21. С.111-116.

3. Pavlenko T., Shavkun V., Petrenko A. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 5/8(89). P. 22–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112109>.

4. Щерба А. А., Маков Д. К., Захарченко С. Н., Супруновська Н. І. Аналіз уравнень преобразования трехфазных напряжений при каскадном соединении фильтров симметричных составляющих. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2008. № 3(12). С. 8-15.

5. Стьопін Ю. О., Кушлик Р. В., Перова Н. П. Дослідження роботи Асинхронних двигунів при несиметрії напруг в усталених режимах. *Енергетика і автоматика*. 2014. № 3. С. 141-146.

6. Попова І. О. Визначення параметрів активно-ємнісного фільтра напруги зворотної послідовності. *Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: тези доп. І Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. пам'яті В. В. Овчарова*. Мелітополь, 2020. С. 18-19.

7. Pakkawe S., Nayamin V., Chaiyapon D., Thongchaisuratkrul G. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*. 2018. Vol. 26(3). P.98-103.

8. Benoît de Metz-Noblat. Analyse des réseaux triphasés en régime perturbé à l'aide des composantes symétriques [Electronic resource] / B. de Metz-Noblat. *Cahier Technique Schneider Electric*. Regime of access: <https://www.se.com/fr/fr/download/document/> (date of the application: 10.09.2023).

9. Kurashkin S., Popova I., Popryaduhin V.S., Kovalov O.V. Mathematical model of asynchronous motor diagnosis. *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions: Proceedings of the 6th International conference*. ORT Publishing. Stuttgart, Germany. 2019. P. 361-366

10. Попова І. О., Попрядухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Вип. 9, т. 1(41). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-41>.

Стаття надійшла до редакції 28.09.2023 р.



I. Popova¹, S. Chausov¹

¹Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

INVESTIGATION OF THE CIRCUIT SOLUTION OF A DEVICE FOR USING LINEAR UNBALANCED VOLTAGES AS A FILTER

Summary

The paper analyzes the causes of unbalanced modes in the 0.38/0.22 KV network to which electrical equipment of rural farms is connected, and reveals the consequences for the operation of dynamic electrical equipment with unbalanced network voltages. It is revealed that under the operating conditions of electric consumers, the unbalanced mode is the usual operating mode of rural networks of 0.38/0.22 KV. The reliability of diagnostics of three-phase voltage asymmetry is justified using symmetric component filters, which are distributed to filter voltage sensors: forward, reverse and zero sequences, in which the parameters of the constituent elements of voltage filters are determined in such a way as to distinguish one or another symmetric component of voltage. A comparison is made between filters consisting of resistive-capacitor circuits and the circuit solution of the device studied in this paper. The article examines the possibility of using a circuit solution of a device that consists of two linear inductive coils without ferromagnetic cores with the same parameters (active resistance and inductance) and a capacitor as a filter for symmetric components of linear voltages of the forward and reverse sequences. To calculate the asymmetric mode of three – phase circuits, a special calculation method is used-the symmetric component method. Since the circuit solution of the device is connected by a star, there is no zero-sequence voltage component in the device circuit. Analytical calculation proved that the studied circuit solution of the device can be used as a filter of linear voltages of the reverse sequence: a voltmeter included in Phase "A" measures the voltage of the reverse sequence, and a voltmeter included in Phase "C" measures the voltage of the direct sequence. The relations between the active and reactive inductive resistances of the inductive coil and the capacitance of the capacitor in the circuit solution of the device are determined.

Keywords: symmetric components, linear voltage filter, parameters, active resistance, inductance, capacitance, coil, capacitor.



ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-186-194**УДК 664.346:663.051**Т. О. Колісниченко¹, канд. техн. наук ORCID: 0000-0003-0560-9520О. П. Прісс¹, д-р. техн. наук. ORCID: 0000-0002-6395-4202Л. М. Кюрчева¹, канд. с-г. наук ORCID: 0000-0002-8225-3399К. А. Сефіханова², канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-7921-6108¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*² *Відокремлений підрозділ «Дніпровський факультет менеджменту і
бізнесу» Київського університету культури*e-mail: tetiana.kolisnychenko@tsatu.edu.ua, тел.: +380679128297**ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНОЛЕПТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ЯКОСТІ ЕМУЛЬСІЙНИХ СОУСІВ З ЙОДМІЩУЮЧИМИ
ДОБАВКАМИ**

Анотація. У статті розглядаються основні етапи, напрямки і доцільність використання йодвміщуючих добавок вакаме та комбу у виробництві емульсійних соусів. Проведено аналітично-експериментальні дослідження, з огляду на які з'ясована можливість ефективного використання водоростевої сировини в соусах емульсійного типу. Встановлено, що використання водоростевої сировини як йодовмісних добавок виявилось бажаним, оскільки водорості містять значну кількість органічного йоду легкозасвоюваних формах. Найпоширенішими джерелами є бурі морські водорості вакаме та комбу. Тому вважається, що додавання вищезазначених водоростей навіть у не великій кількості до складу емульсійних соусів не тільки не погіршить органолептичних показників, а і задовольнить добову потребу людини в йоді, оскільки це досить важливо і актуально в умовах йоддефіциту.

Проведений органолептичний аналіз емульсійних соусів, результат якого показав, що розроблені соуси мають смакові властивості, які є звичними для споживачів і позитивно впливатимуть на сприймання інноваційного продукту. Для оцінки якості соусів емульсійного типу було застосовано бальну систему оцінювання на основі та з урахуванням коефіцієнта важливості, що дозволило в значній мірі продемонструвати високу якість органолептичних показників одержаних соусів.

Ключові слова: водоростева сировина, йодовміщуючі добавки, вакаме, комбу, емульсійний соус, органолептичні показники.

Постановка проблеми. У зв'язку з постійним погіршенням стану навколишнього середовища, повномасштабних венних дій в Україні, наслідками від аварії на Чорнобильській АЕС та постійною загрозою



підриву Запорізької атомної електростанції, вплив шкідливих наслідків негативно позначаються на населенні нашої держави. Втім потрібно звернути увагу на території де найбільше зосереджено виробництво, відповідно, рівень забруднення навколишнього середовища в цих районах значно перевищує нормативні показники. В контексті вище зазначеного, недостатній рівень хімічних елементів і вітамінів в організмі людини внаслідок професійних, екологічних і кліматогеографічних факторів призводить до збільшення кількості онкологічних захворювань і захворювань щитовидної залози серед населення. Тому важливо вводити в раціон продукти, які мають підвищену біологічну цінність і мають лікувально-профілактичні функції.

Тенденція до вдосконалення продуктів харчування призвела до розвитку виробництва функціональних продуктів, здатних покращувати здоров'я людини та підвищувати опірність організму до захворювань завдяки наявності в їх складі біоактивних компонентів.

Аналіз останніх досліджень. Проте тенденції досліджень за останнє десятиліття показують, що проблема йоддефіциту стає серйозною в Україні, особливо в районах, які постраждали від Чорнобильської катастрофи. Це також пов'язано з недостатнім вмістом цього мікроелемента в навколишньому середовищі (Deinychenko et al., 2013). Цю проблему необхідно вирішувати, шляхом розроблення та впровадження нових видів харчових продуктів із заданими властивостями. Саме тому, використання йодомісних харчових добавок є одним з ефективних способів боротьби з йоддефіцитом (Dovga and Korolchuk, 2015)

За результатами моніторингу продукції закладів ресторанного господарства встановлено, що понад 70% страв і кулінарних виробів реалізуються з використанням соусів, які дозволяють сформувати нові споживчі властивості, підвищити харчову цінність. (Evlash et al., 2013). Варто відзначити, що морські водорості – це унікальна сировина, здатна в короткі терміни формувати велику біомасу, синтезувати хімічні сполуки і різноманітні біологічно активні речовини (Dovga and Korolchuk, 2015; Uchida et al., 2017; Anis and Hasan, 2017).

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою нашої роботи є дослідження впливу водоростей вакаме та комбу на емульсійні соуси, які характеризуються підвищеною харчовою та біологічно активною цінністю, за рахунок вмісту органічного йоду, та мають дуже значні органолептичні показники.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- обґрунтувати використання йодовміщуючих добавок, які б не



відображався на смакових показниках соусів;

– провести органолептичну оцінку якості розроблених емульсійних соусів.

Основна частина. За результатами моніторингу продукції ресторанного господарства встановлено, що більше 70% страв та кулінарної продукції реалізується з соусами, що дає змогу формувати нові споживчі ознаки та підвищувати харчову цінність. (Evlash et al., 2013). Варто відзначити, що морські водорості – це унікальна сировина, здатна в короткі терміни формувати велику біомасу, синтезувати хімічні сполуки і різноманітні біологічно активні речовини (Dovga and Korolchuk, 2015; Uchida et al., 2017; Anis and Hasan, 2017)

Давно відомо, що морські водорості накопичують різноманітні вітаміни, мікроелементи та макроелементи з морської води. Найбагатшими джерелами мікронутрієнтів є морські водорості: вакаме та комбу.

Крім поліпшення роботи щитовидної залози і діяльності мозку, йод також сприяє засвоєнню білка, засвоєнню фосфору, заліза і кальцію, активізує роботу ферментів, регулює ліпідний і пуриновий обмін, знижує в'язкість крові, має здатність знижувати вміст холестерину. Значно знижує ризик атеросклерозу, хвороб серця, інсульту та захворювань судин.

Введення в рецептуру водоростей надає продукту профілактичних і радіозахисних властивостей, збагачує його цінними харчовими інгредієнтами. Вживання продуктів, багатих морськими водоростями, особливо вакаме і комбу, сприяє виведенню токсинів, важких металів і радіонуклідів; нормалізує роботу центральної нервової системи; усуває дефіцит мінералів; знижує в'язкість крові і підвищує тонус судин; сприяє підтримці нормальної роботи щитовидної залози і покращує імунітет.

Нами було розроблено емульсійні соуси з підвищеною поживною цінністю за рахунок введення функціональних інгредієнтів вакаме та комбу, які містять у своєму складі велику кількість органічного йоду (7,9...9,2 мг йоду на 100 г висушених водоростей). Включення вакаме та комбу в харчовий раціон забезпечує організм необхідною кількістю йоду, підтримує загальний обмін речовин і знижує ймовірність захворювань щитовидної залози.

Для вивчення впливу добавок морських водоростей на смак було відібрано шість зразків, підготовлених у лабораторних умовах, до яких додано вакаме (масова частка водоростей у трьох зразках відповідно 5%, 10% та 15%) і комбу (останні три зразки з однаковими масовими частками) відповідно.

Готовий соус з вакаме має однорідну консистенцію з



вкрапленнями огірка, цибулі та вакаме, рівномірно розподіленими по всьому об'єму соусу, біло-жовтого кольору, має присмак маринованого огірка, не має сторонніх запахів та присмаків. У процесі збільшення масової частки вакаме було визначено, що додавання цієї водорості понад 17% викликає помітний неприємний запах у соусі.

Виготовлений емульсійний соус з комбу, має однорідну консистенцію з вкрапленнями морської водорості комбу та подрібненими шматочками маринованих огірків і ріпчастої цибулі, кремового кольору з жовтуватим відтінком, смак та колір – натуральні, чисті, без слідів гіркоти, відповідають виду сировини, що використовувалася.

Щоб визначити доцільність розробки емульсійних соусів, збагачених морськими водоростями, і їх соціальну ефективність, необхідно було застосувати метод кваліметрії. Це дозволило кількісно змінити якість взятої для дослідження продукції. Оцінка якості продукції за сенсорними критеріями якості (зовнішній вигляд, смак, запах, консистенція, колір) є одним з рекомендованих методів. Проводиться експертним методом, коли кожен сенсорний показник оцінюється за п'ятибальною шкалою: «відмінно» (5), «добре» (4), «задовільно» (3), «незадовільно» (2).

Експертна оцінка була проведена для розрахунку показників органолептичної оцінки зазначеного соусу, яка є основою формування споживчих властивостей приправ.

Для визначення необхідної кількості експертів використаний підхід, заснований на визначенні ступеня довіри і відносної похибки, за допомогою формули 1.

$$n = \frac{t_a^2}{\varepsilon^2}, \quad (1)$$

де n – обсяг вибіркової сукупності;

t_a – кількість середніх квадратичних відхилень, необхідна для того, щоб вірогідність попадання всередину ділянки була рівна a ;

ε – допустима відносна помилка, що задається гранично.

Для забезпечення ступеня надійності розрахунків з малим ризиком, довірча вірогідність становить 95 – 97%, що відповідає 2...3 нормальним розподілам. Нами визначена достатність 95% довірчої вірогідності при граничній відносній погрішності 0,5. Для таких умов t_a набуває значення 1,96. Згідно з формулою (1), n дорівнює 15,32.

Тож, для отримання достовірних результатів експертної оцінки необхідно провести опитування не менше 15 експертів.

За контрольний зразок нами було обрано вже добре відомий українському споживачу соус «Тартар» Результати експертного оцінювання представлені в (табл. 1).



Таблиця 1

Розрахунок показника органолептичної цінності соусу «Тартар»
методом експертних оцінок

Органолептичний показник	5 балів	4 балів	3 балів	2 балів
	Кількість експертів	Кількість експертів	Кількість експертів	Кількість експертів
Зовнішній вигляд	1	4	10	0
Смак	5	6	4	0
Колір	3	4	8	0
Консистенція	1	5	9	0
Аромат	4	5	6	0

Отримали наступні результати: зовнішній вигляд – 3,4 бала; консистенція – 3,46; смак – 4,07; аромат – 3,87; колір – 3,67.

У (табл. 2 та 3) наведені результати експертної оцінки емульсійних соусів з додаванням вакаме та комбу.

Таблиця 2

Розрахунок показників органолептичної цінності емульсійних соусів з
вакаме масовою часткою

Показник	5 балів	4 балів	3 балів	2 балів
	Кількість експертів	Кількість експертів	Кількість експертів	Кількість експертів
1	2	3	4	5
5%				
Смак	7	5	3	0
Аромат	5	5	5	0
Зовнішній вигляд	1	5	9	0
Колір	3	4	8	0
Консистенція	1	5	9	0
10%				
Смак	3	8	4	0
Аромат	4	5	6	0
Зовнішній вигляд	4	7	4	0
Колір	6	7	2	0
Консистенція	3	11	1	0
15%				
Смак	5	4	6	0
Аромат	7	5	3	0
Зовнішній вигляд	8	4	3	0
Колір	9	1	5	0
Консистенція	10	1	4	0



Таблиця 3

Розрахунок показників органолептичної цінності емульсійних соусів з комбу масовою часткою

Показник	5 балів	4 балів	3 балів	2 балів
	Кількість експертів	Кількість експертів	Кількість експертів	Кількість експертів
5%				
Смак	6	7	2	0
Аромат	3	9	3	0
Зовнішній вигляд	2	10	3	0
Колір	4	9	2	0
Консистенція	3	8	4	0
10%				
Смак	4	8	3	0
Аромат	9	3	3	0
Зовнішній вигляд	5	5	5	0
Колір	5	9	1	0
Консистенція	6	7	2	0
15%				
Смак	6	2	7	0
Аромат	6	4	5	
Зовнішній вигляд	8	4	3	
Колір	7	1	7	
Консистенція	8	2	5	

На основі формули 2 визначали середній бал досліджуваних зразків:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i, \quad (2)$$

де x_i – значення випадкової величини;

p_i – вірогідність появи випадкової величини.

Зразки емульсійних соусів з вакаме та комбу отримали середньозведені бали за органолептичними показниками, представленими в (табл. 4).

Загальні показники органолептичної цінності емульсійних соусів з йодвміщуючими добавками визначені на основі середнього арифметичного, де в чисельнику – сума балів, виставлених за органолептичними показниками, а в знаменнику – кількість цих показників (5). Відповідно, отримали наступні середні величини: для контрольного зразку соусу «Тартар» – 3,69; для емульсійного соусу з 5%-ю часткою вакаме – 3,78, з 10%-ю часткою вакаме – 4,04, з 15%-ю



часткою вакаме – 4,24; для емульсійних соусів з 5%-ю часткою комбу – 4,01, з 10%-ю часткою комбу – 4,13, з 15%-ю часткою комбу – 4,11.

Таблиця 4

Розрахунок середньозведених показників органолептичної цінності соусів «Тартар» з комбу та вакаме

Показник	Емульсійний соус					
	З вакаме			З комбу		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Зовнішній вигляд	3,47	4	4,33	3,93	4	4,33
Консистенція	3,47	4,13	4,4	4,13	3,73	4,07
Смак	4,27	3,93	3,93	3,93	4,4	3,93
Аромат	4	3,87	4,27	4,27	4,27	4
Колір	3,67	4,27	4,27	3,8	4,27	4,2

Висновки. Таким чином можна зазначити, що у ході експериментальних досліджень було встановлено, що введення водоростей в рецептуру соусу в кількості 5...15%. не погіршує органолептичні показники емульсійних соусів, значно підвищує загальний вміст мінеральних речовин та вітамінів у продукті, підвищує стійкість емульсії за рахунок стабілізуючої дії полісахаридів комбу та вакаме.

Промислове виробництво емульсійних соусів з додаванням йодовміщуючих добавок є досить рентабельним, що підтверджується розрахунками їх соціальної ефективності та конкурентоспроможності за органолептичними показниками якості.

Список використаних джерел

1. Анан'єва В. В., Белінська А. П., Кричківська Л. В., Петров С. О., Петрова І. А. Дослідження технологічних властивостей порошку шкірки винограду як функціонального інгредієнту майонезного соусу. *Technology audit and production reserves*. 2016. Vol. 6/3(32). P. 36–41. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86540>.
2. Галух Б. І., Паска М. З. & Драчук У. Р. Дослідження стійкості майонезних емульсій, виготовлених із використанням харчових волокон. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького-го*. 2014. Вип. 16(3(4)). С. 21–30.
3. Геліх А., Применко В., Василенко О., Приходько І. Дослідження показників якості та безпечності майонезу на основі конопляної олії. Ресторанний і готельний консалтинг. *Інновації*. 2021. Вип. 4(2). С. 345–360. <https://doi.org/10.31866/2616-7468.4.2.2021.249104>
4. Дейниченко Г. В., Колісниченко Т. О. & Листопад Т. С.



Розробка технології ягідних соусів з йодовмісними добавками з урахуванням їх впливу на органолептичні показники. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені СЗ Гжицького. Серія: Харчові технології*. 2018. Вип. 20(85). С. 107-113.

5. Куриленко Ю., Куракін О. Використання рослинної сировини у якості стабілізатора в технології функціональних майонезних соусів. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2023. Вип. 2(8). С. 40-46. [https://doi.org/10.32782/2708-4949.2\(8\).2023.6](https://doi.org/10.32782/2708-4949.2(8).2023.6).

6. Колісниченко Т. О. Розробка технологічної схеми виробництва емульсійних соусів із використанням морських водоростей «ХЛОРЕЛА». *Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: II міжнар. наук.-практ. інтернетконф., 23 листопада 2021 р. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 171.*

7. Головка М. П., Серік М. Л., Головка Т. М. & Бакіров М. П. Технологія соусів емульсійного типу із використанням йодованої харчової добавки. *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*. 2013. Вип. 44(2). С. 133-138.

8. Бакіров М. П., Полупан В. В., Золотухіна О. О., Афанасьєва Т. В. & Горбенко Г. О. Розробка соусів із використанням йодовмісної добавки. *ScienceRise*. 2018. Вип. 5. С. 31-35.

9. Бакіров П. О., Головка Т. М., Якубян С. & Япиджи С. Вплив добавки йодобілкової на фізико-хімічні показники соусів емульсійного типу. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 2(5). Р. 21-29.

10. Matsuk Yu. A., Pasichnyi V. M., Ishchenko N. V., Suprun E. M. The theoretical and applied aspects production of the meat and fish products. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2016. Vol. 18/2(68). Р. 171–173.

11. Deinychenko H. V., Voitsytska A. D., Kolisnychenko T. O. Doslidzhennia mikrobiolohichnykh pokaznykiv sousiv emulsiinykh iz vodorostevyumu dobavkamy. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv*. 2013. Vol. 23. Р. 165-175.

12. Evlash V. V., Nemirich O. V., Gavrish A. V., Maksimenko A. E. Tehnologichni vlastivostI garyachih sousiv z vikoristannyam sushenogo m'iasnogo napivfabrikatu. *Zdobutki, problemi ta perspektivi rozvitku gotelno-restorannogo ta turistichnogo biznesu: mater. II-yi vseuk. nauk.-prak. konf. Kyiv: NUHT, 2013. Р. 17–18.*

13. Uchida M., Kurushima H., Ishihara K., Murata Y., Touhata K., Ishida N., Araki T. Characterization of fermented seaweed sauce prepared from nori (*Pyropia yezoensis*). *Journal of bioscience and bioengineering*. 2017. Vol. 123(3). Р. 327–332.



14. Anis M., Hasan S. A. Algae as nutrition, medicine and cosmetic: the forgotten history, present status and future trends. *World J Pharm Pharm Sci.* 2017. Vol. 6(6). P. 1934–1959.

15. Melnikov K. [et al.]. Удосконалення технології соусів емульсійного типу за рахунок використання водоростевої сировини. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies.* 2017. Vol. 19(80). P. 74-79.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2023 р.

T. Kolisnychenko, O. Priss, L. Kiurcheva, K. Sefikhanova
Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

INVESTIGATION OF ORGANOLEPTIC QUALITY INDICATORS OF EMULSION SAUCES WITH IODINE REPLACEMENT ADDITIVES

Summary

The article considers the main stages, directions and feasibility of using iodine-containing wakame and kombu additives in the production of emulsion sauces. Analytical and experimental studies were conducted, on the basis of which the possibility of effective use of algal raw materials in emulsion-type sauces was studied. It has been established that it is advisable to use algae raw materials as an iodine-containing additive, since it contains a significant amount of organic iodine in an easily digestible form. The largest amount of it is found in brown seaweed wakame and kombu. Therefore, it is assumed that the addition of even a small amount of algae, that is, one that is not reflected on the organoleptic indicators, to the composition of the emulsion sauce, will allow to satisfy the daily need of a person for iodine, which is quite relevant in conditions of iodine deficiency. An organoleptic analysis was carried out, thanks to which it was established that the developed emulsion sauces are characterized by taste properties familiar to the consumer, which will positively influence the perception of the innovative product. A scoring system for evaluating the quality of sauces has been developed, taking into account the coefficient of importance. The implementation of this system made it possible to clearly demonstrate the high organoleptic quality indicators of the sauces obtained. It was established that the introduction of algae into the sauce recipe in concentrations of 5...15%. does not deteriorate the organoleptic indicators of emulsion sauces, increases the total content of minerals and vitamins in the product, the stability of the emulsion increases due to the stabilizing effect of wakame and kombu polysaccharides.

The material of article reflects the main factors of making combination products – emulsion sauce with algae. It is proved that algae belong to unique sources of macro- and micronutrients, proteins, minerals, vitamins, enzymes, phytohormones, alginic, pantothenic and folic acid, amino acids, polysaccharides. Besides, algae are unique raw material that capable of forming a large biomass in a short time. Emulsion sauces are a source of polyunsaturated fatty acids, because they contain vegetable fats, which improve its utilization in an emulsified state. In this elaboration, the role of algal additives is not limited to their benefits, they also have a technological effect.

Keywords: algae raw materials, iodine-containing additives, wakame, kombu, emulsion sauce, organoleptic indicators.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-195-205

УДК [663.874:637.344]:613.3

Л. В. Ткаченко¹, канд. техн. наук,

ORCID: 0000-0003-2731-1178

О. П. Вітряк², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6614-1928

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування
України² Державний торговельно-економічний університетe-mail: lubashev28@gmail.com, тел.: +380965577128

ТЕХНОЛОГІЯ КОКТЕЙЛІВ ПІДВИЩЕНОЇ БІОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ

Анотація. У статті проведено аналіз проблеми дефіциту білка та біологічно активних речовин у раціоні харчування, визначено необхідність створення напоїв з підвищеною біологічною цінністю, які мають оздоровчий ефект та позитивно впливають на стан здоров'я людини. Метою роботи було розроблення коктейлю підвищеної біологічної цінності з використанням молочної сироватки. Як перспективне джерело білка та біологічно активних речовин для розроблення коктейлів, запропоновано молочну сироватку, яка є побічним продуктом при виробництві сичужних та кисломолочних сирів. У молочну сироватку переходить майже половина вмісту сухих речовин молока, в тому числі до 30 % білкових та до 65 % мінеральних, ростових речовин і вітамінів вихідного продукту. Також розглянуто можливість використання у складі коктейлів соєвого молока, яке за низького рівня калорійності багате на легко засвоювані білки та амінокислоти та не має у своєму складі лактози. На заміну цукрового сиропу запропоновано використання фруктового наповнювача у вигляді пюре журавлини.

Ключові слова. сироватка молочна, білки сироваткові, соєве молоко, біологічна цінність, молочний коктейль, пюре журавлини.

Постановка проблеми. Однією з основних фізіологічних потреб людини є харчування. Саме від харчування залежить ріст і розвиток організму, його фізична і розумова працездатність і, нарешті, тривалість життя [1, 2]. Також харчування є одним із чинників, який пов'язує людину з навколишнім середовищем та сприяє, певним чином, здатності організму протидіяти впливу шкідливих факторів довкілля. Погіршення екологічної ситуації, соціальні й економічні зміни, порушення харчового раціону, сучасний ритм і спосіб життя привели до стійкої тенденції погіршення рівня здоров'я населення України. Одним із важливих принципів здорового харчування є надходження до організму з харчовими продуктами усіх поживних речовин, вітамінів та мінеральних солей у кількостях, необхідних для його нормальної життєдіяльності [3].



Концепція державної політики України в області здорового харчування населення країни передбачає поліпшення якості харчування за рахунок збільшення частки продуктів масового споживання, збагачених біологічно активними компонентами. Крім цього дана концепція передбачає залучення вторинної харчової сировини для виробництва продуктів з підвищеною біологічною цінністю [4].

З огляду на те, що напої, а зокрема коктейлі, користуються значним попитом у різних категорій населення від дітей до людей старшого віку, а також поживні речовини у напоях швидше засвоюються організмом людини, актуальним напрямком є розроблення коктейлів, які мають підвищену біологічну цінність за рахунок спеціально підібраних інгредієнтів. Важливим фактором також є те, що під час приготування коктейлів не відбувається втрат поживних речовин.

Молочна сироватка є одним з видів вторинної сировини, яка своїм складом є біологічно-цінною сировиною, що обумовлено високим вмістом в ній мікро- і макроелементів, органічних кислот, вітамінів, білків. Молочна сироватка є побічним продуктом при виробництві сичужних та кисломолочних сирів. В молочну сироватку переходять до 50% сухих речовин молока, які складаються з біологічно цінних сполук, легкозасвоюваних джерел білкових та ростових речовин, вітамінів [6].

Також перспективним є використання у складі коктейлів соєвого молока, яке за низького рівня калорійності багате на легко засвоювані білки та амінокислоти та не має у своєму складі лактози. Як смакову складову коктейлю та джерело вітамінів доцільним є використання фруктового наповнювача у вигляді пюре журавлини.

Аналіз останніх досліджень. За статистичними даними молочна промисловість України щорічно одержувала близько 2 млн. т молочної сироватки [5, 7]. Більше половини обсягу (59%) реалізується сільськогосподарським підприємствам як корм для худоби, більше 20% скидається в каналізацію і лише близько 25% переробляється на експортну продукцію.

На підставі балансу продукції, виробленої у 2018 році [8], доведено, що тільки при виробництві твердого та кисломолочного сиру можна отримати 2,11 млн. тонн сироватки, але лише 1,02 млн т сироватки переробляється традиційним способом для отримання сухої сироватки, що становить лише 48,3% від загальної кількості сироватки. Це означає, що ринок інгредієнтів втрачає близько 5,5–8,7 млн. тонн сироваткових білків. З огляду на це, раціональне використання молочної сироватки має передбачати її переробку для



виробництва нових видів харчових продуктів, які мають нові функціональні та технологічні властивості.

Молочна сироватка – це побічний продукт, який одержують при виробництві твердих та м'яких сирів, молочно-білкових концентратів, казеїну. У молочну сироватку переходить майже половина вмісту сухих речовин молока, в тому числі до 30 % білкових та до 65 % мінеральних, ростових речовин і вітамінів вихідного продукту. В цьому продукті є лактоза, білкові речовини, вітаміни (групи В, вітамін С, нікотинова кислота, холін, вітамін А, вітамін Е і біотин), амінокислоти, органічні кислоти, мікроелементи [6].

Традиційні способи розділення молока [11, 12], які базуються на біотехнології (закваски мікроорганізмів, ферменти) та використанні хімічних реагентів (кислоти, луги, солі) формують одержання трьох основних видів сироватки: сироватка після виробництва м'яких сирів, сироватка після виробництва твердих сирів, сироватка після виробництва казеїну. За своїм якісним складом ці види молочної сироватки відрізняються залежно від виду продукту, що при цьому виробляють.

Сироваткові білки містять унікальні амінокислоти, які беруть участь в процесі кровотворення і в синтезі білків печінки. У нативному вигляді молочної сироватки використовується для профілактичного лікування як тонізуючий засіб при перевтомі та виснаженні організму, а також при деяких шлунково-кишкових захворювання [9].

Найбільш поширеними видами продуктів, отриманих із молочної сироватки, є лактоза (молочний цукор), несолодка згущена сироватка, солодка згущена сироватка, суха сироватка, демінералізована суха сироватка, низьколактозна сироватка, концентрати сироваткового білка [10, 13]. Проте переробка молочної сироватки, незважаючи на значний прогрес і численні розробки в цій галузі, стримується багатьма причинами, зокрема високою вартістю обладнання та підвищеним рівнем енергозатрат.

Спектр використання молочної сироватки є досить широким. Авторами [14] доведено перспективи використання молочної сироватки для інтенсифікації біотехнологічних процесів, зокрема під час культивування хлібопекарських та спиртових дріжджів.

Завдяки високому вмісту мікроелементів та вітамінів молочна сироватка використовується у технології напоїв [15]. Доведена доцільність використання молочної сироватки для напоїв з пророщеними злаками [16], для слабоалкогольних напоїв [17], для створення напоїв оздоровчого призначення [18, 19]. Суху молочну сироватку запропоновано використовувати у складі коктейлів для дитячого харчування [20].



Встановлено, що напої на основі молочної сироватки крім збагачення біологічно активними речовинами здатні позитивно впливати на емоційний стан людини, пригнічуючи депресію та інші апатичні стани [21].

Одним із напрямків вирішення проблеми недостатньої кількості рослинного білка у продуктах харчування людини а особливо у напоях, є використання соєвого молока.

Соєве молоко - рослинне молоко, вироблене з соєвих бобів. Соєве молоко містить цінний соєвий білок (близько 35%), в якому містяться всі вісім незамінних амінокислот, а також мікроелементи. Соєве молоко має виняткові живильні властивості [21, 22]. В енергетичному співвідношенні цей продукт дуже близький до коров'ячого молока. Однак при низькій калорійності (всього 40 ккал на 100 г) соєве молоко багате легко засвоюваними білками: 3,8 г / 100 г проти 3,1 г / 100 г у коров'ячому. У соєвому молоці присутні всі амінокислоти, включаючи метіонін. Метіонін сприяє зниженню холестерину в крові, зменшенню відкладення жиру нейтрального в печінці та покращенню функцій печінки. Соєве молоко характеризується повною відсутністю лактози, за рахунок цього воно є прекрасним заміником коров'ячого молока.

Особливе місце серед дикоростучих ягід України належить журавлині [23]. Хімічний склад журавлини унікальний. Журавлина містить: вуглеводи до 4,8- 8,1% на 100 г м'якоті плодів, в т.ч. до 2,8% пектинових речовин, органічні кислоти (бензойну, лимонну, яблучну, щавлеву, хінну) до 3,5 %.

М'якоть ягід характеризується великим вмістом урсолової кислоти. По структурі та генетичним даним урсолова кислота близька до багатьох фізіологічно важливих гормонів, вона володіє мінералокортикоїдною дією та здатна затримувати розвиток асептичного запалення [24]. З вітамінів, окрім вітаміну С, тіаміну, рибофлавіну, нікотинової кислоти, присутні рутин (0,53-1,28 мг%), пантотенова кислота, піридоксин. У журавлині дуже багато флавоноїдів, що володіють потужною антиоксидантною дією, корисних в боротьбі з серцево-судинними захворюваннями, злякисними пухлинами, інфекціями. Ягоди журавлини містять поліфенольні з'єднання: антоціани, катехіни, фарбуючі і дубильні речовини. Антиоксидантні, особливо поліфенольні компоненти журавлини, інгібують зростання ракових і пухлинних клітин. Крім того, поліфенольні з'єднання обумовлюють фарбувальні властивості напівфабрикатів з журавлини, тобто є природними барвниками [25].

За результатами проведеного аналітичного огляду досліджень науковців, можна визначити, що у технології напоїв, а зокрема



коктейлів, доцільним буде використання молочної сироватки, соєвого молока і пюре з ягід журавлини.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою даної роботи було розроблення технології коктейлю підвищеної біологічної цінності за рахунок використання молочної сироватки, соєвого молока та пюре журавлини. Під час досліджень необхідно створити та дослідити модельні композиції на основі молочної виворотки з додаванням раціональної кількості соєвого молока та пюре журавлини. Провести органолептичну оцінку коктейлів з використанням розроблених модельних композицій та за критеріями оцінювання визначити кращу модельну композицію. Розрахувати та проаналізувати хімічний склад розробленого коктейлю порівняно з контрольним зразком.

Основна частина. Для проведення досліджень було використано продукти вітчизняних виробників: молоко пастеризоване 2,5 % мас. частки жиру; морозиво «Пломбір»; молочну сироватку після виробництва м'яких сирів; соєве молоко; пюре журавлини.

За контроль було обрано популярний молочний коктейль з морозивом, до складу якого входять: молоко, морозиво та яблучний сироп. За результатами досліджень було розроблено модельні композиції (табл. 1), в яких 50 % морозива та від 46 до 66 % молока було замінено на молочну сироватку та соєве молоко. Кількість внесеного соєвого молока складала від 7,5 до 11% від маси готового напою. Яблучний сироп було частково або повністю замінено на пюре з журавлини.

Таблиця 1

Модельні композиції молочного коктейлю з використанням молочної сироватки та додаванням соєвого молока і пюре з журавлини

№ з/п	Найменування складових коктейлю	Конт- роль	Модельні композиції				
			1	2	3	4	5
1.	Морозиво вершкове «Пломбір»	100	50	50	50	50	50
2.	Молоко пастеризоване, 2,5 % мас. частки жиру	150	100	90	80	75	70
3.	Сироп яблучний, 70 % СР	20	10	10	5	5	0
4.	Молочна сироватка	-	80	90	100	100	100
5.	Соєве молоко	-	20	20	20	25	30
6.	Пюре з журавлини	-	10	10	15	15	20
	Вихід, г	270	270	270	270	270	270



З метою визначення оптимального співвідношення інгредієнтів приготували дослідні зразки коктейлів з модельними композиціями на основі молочної сироватки з додаванням соєвого молока і пюре журавлини та провели їх органолептичну оцінку. Органолептична оцінка дослідних і контрольних зразків коктейлів проводилася за п'ятибальною системою відповідно до існуючих рекомендацій (26). Визначали органолептичні показники коктейлю, зокрема зовнішній вигляд, колір, консистенція, смак, запах. Для кожного органолептичного показника визначено коефіцієнт вагомості: зовнішній вигляд – 0,3, консистенція – 0,2, колір – 0,1, запах – 0,2, смак – 0,2. Результати органолептичної оцінки дослідних і контрольних зразків коктейлів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Органолептична оцінка модельних та контрольних зразків коктейлів з використанням молочної сироватки з додаванням соєвого молока і пюре журавлини

Найменування дослідів	Органолептичні оцінки					Середня органолептична оцінка
	Коефіцієнт вагомості					
	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	
	Зовнішній вигляд	Консистенція	Колір	Запах	Смак	
Молочний коктейль (контроль)	4,82	4,75	4,7	4,82	4,82	4,78
Модельна композиція №1	4,86	4,82	4,8	4,83	4,87	4,76
Модельна композиція №2	4,82	4,75	4,8	4,82	4,82	4,80
Модельна композиція №3	4,85	4,8	4,75	4,86	4,92	4,96
Модельна композиція №4	4,75	4,7	4,65	4,68	4,52	4,66
Модельна композиція №5	4,75	4,6	4,65	4,62	4,4	4,60

За результатами досліджень встановлено, що найкращими органолептичними показниками характеризувався дослідний зразок коктейлю №3, в якому 66 % молока було замінено молочною сироватку. Кількість молочної сироватки у цьому зразку становить 37% від маси готового коктейлю. Оптимальна кількість соєвого молока у коктейлі становить 7,4 % до маси готового напою.



Збільшення кількості соєвого молока у складі дослідних зразків №4 і №5 до 9,3 та 11 %, відповідно, призводить до зниження органолептичної оцінки. Дослідженнями також визначено, що заміна яблучного цукрового сиропу у складі коктейлю на пюре журавлини в кількості 75% позитивно впливає на смакові властивості та колір напою. Кількість пюре журавлини у складі коктейлю становить 5,5 % від загальної маси напою. Відповідно до результатів дослідження консистенція коктейлю є стабільною. Коктейль за модельною композицією №3 має приємний збалансований смак, приємний після смак і ніжно-рожевий колір, його було названо «Журавинка».

Отже, за результатами досліджень встановлено раціональну кількість компонентів від загальної маси коктейля «Журавинка», яка становить: молочної сироватки 37%, соєвого молока 7,4 %, пюре журавлини 5,5 %.

На основі проведених досліджень проведено порівняльний аналіз хімічного складу та розраховано відсоток забезпечення добової потреби у нутрієнтах контрольного коктейлю та розробленого коктейлю «Журавинка», який наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Хімічний склад молочного коктейлю «Журавинка» порівняно з контрольним

Найменування нутрієнтів	Коктейль (контроль)	Забезпечення добової потреби, %	Коктейль «Журавинка»	Забезпечення добової потреби, %	
Білки, г	2,31	5,01	2,86	5,69	
Жири, г	6,38	10,96	5,32	9,14	
Вуглеводи, г	25,10	5,61	10,0	4,30	
Клітковина, г	-	-	0,35	1,75	
Органічні кислоти, г	0,07	0,01	0,44	0,60	
Мінеральні речовини, мг	Na	35,0	2,66	44,0	3,36
	K	108	4,30	145	5,81
	Ca	97,6	9,77	117	11,7
	Mg	12,3	3,08	16,1	4,06
	P	71,4	8,92	76,8	11,2
	Se	0,70	1,12	0,93	1,52
	Zn	0,14	1,15	0,22	1,78
Вітаміни, мкг	A	40,6	4,48	46,1	5,08
	E	0,14	0,95	0,25	1,71
	B ₁	0,02	1,65	0,03	2,18
	B ₂	0,13	7	0,16	8,67
	B ₁₂	0,14	4,66	0,26	8,46
	PP	0,07	2,63	0,11	2,85
Енергетична цінність, ккал	167	23,7	109	24,2	



Аналіз даних табл. 3 показує, що кількість білка зросла з 2,31 г до 2,86 г, отже збільшилась на 19,2%, кількість вітаміну С збільшилась на 100%, так як у контролі вітамін С відсутній. Покращився мінеральний склад коктейлю за рахунок збільшення вмісту кальцію – на 16,6%, магнію – на 23,6%, калію – на 25,5%, фосфору – на 7,03%, селену – на 24,7%, цинку – на 36,4%. Значно підвищився у коктейлі «Журавлинка» вміст вітамінів групи В: від 33,3 до 46,1 %, вітаміну Е – на 44 %. За рахунок зменшення кількості вуглеводів та жирів енергетична цінність розробленого коктейлю знизилася на 34,7 %. Але за рахунок збільшення у складі коктейлю «Журавлинка» кількості вітамінів та мінеральних речовин можна стверджувати, що біологічна цінність розробленого напою значно підвищена порівняно з контролем.

Висновки. За результатами проведених досліджень було розроблено коктейль з підвищеною біологічною активністю «Журавлинка» з використанням молочної сироватки та додаванням соєвого молока та пюре з журавлини.

Розроблено та досліджено модельні композиції на основі молочної сироватки з додаванням раціональної кількості соєвого молока та пюре журавлини. Проведено органолептичну оцінку розроблених модельних композицій коктейлів та встановлено, що найкращими органолептичними показниками характеризувався дослідний зразок коктейлю №3, який одержав назву «Журавлинка». Визначено раціональну кількість компонентів від загальної маси коктейля, яка становить: молочної сироватки 37%, соєвого молока 7,4 %, пюре журавлини 5,5 %. Встановлено, що у розробленому коктейлі «Журавлинка» підвищено кількість білка, харчових волокон, мікроелементів, вітамінів, при цьому енергетична цінність розробленого напою зменшилась на 65 %.

Отже, коктейль «Журавлинка» має підвищену біологічну цінність за рахунок використання раціональних кількостей молочної сироватки, соєвого молока, пюре журавлини та є перспективним для запровадження у закладах ресторанного господарства.

Список використаних джерел

1. Рекомендації щодо здорового харчування дорослих. Затверджено МОЗ України від 08.12.2017 р. URL: http://moz.gov.ua/uploads/ckeditor/документи/01122017_Basic_Recomm_endations-1.pdf (дата звернення 01.10.2018).

2. Технологія харчових продуктів функціонального призначення: монографія / А. А. Мазаракі, М. І. Пересічний, М. Ф. Кравченко та ін.; за ред. д-ра тех. наук, проф. М. І. Пересічного. 2-ге вид., перероб. та доп. Київ: Київський національний торг.-екон. ун-т, 2012. 116 с.



3. Корзун В. Н., Козярин І. П., Парац А. М. Проблема мікроелементів у харчуванні населення України та шляхи їх вирішення. *Проблеми харчування*. 2007. № 1. С. 5-11.
4. Акмен В. О., Сорокіна С. В., Летута Т. М. Мікронутрієнти, як необхідний аспект формування здоров'я людини. *Science without borders : mater. of the XII Intern. Scien. and pract. Conf. March 30-April 7, 2016*. Vol. 17. P. 95-96.
5. Вінтоняк В. Українська молочна індустрія. *Молочний бізнес-2018*: матер. XI Всеукр. конф. з міжнар.участю. Київ, 15 листопада 2018 р. URL: <https://infagro.com.ua/ua/molochniy-biznes-2018/> (дата звернення 01.09.2023).
6. Sychevskiy M., Romanchuk I., Minorova A. Milk whey processing: prospects in Ukraine. *Food science and technology*. 2019. Vol. 13, is. 4. P. 58-68. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1557>.
7. Украинская сыворотка пользуется мировым спросом. URL: <http://agroportal.ua/> (дата звернення 06.09.2023).
8. Підсумки року молочної галузі від аналітика Асоціації виробників молока Яни Музиченко. URL : <https://agroonline.com.ua/uk/public/blog/3195/details/> (дата звернення 05.09.2023).
9. Smithers, G.W. Whey-ing up the option – yesterday, today and tomorrow. *Int. Dairy Journal*. 2015. Vol. 48. P. 2-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.01.011>.
10. Królczyk J. B, Dawidziuk T, Janiszewska-Turak E, Sołowiej B. Use of whey and whey preparations in the food industry. *Pol. J. Food Nutr. Sci*. 2016. Vol. 66(3). P. 157-165. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>.
11. Гондар О. П, Романчук І. О. Зміна мінерального складу сухої молочної сироватки за різних методів оброблення. *Зб. наук. пр. Вінницький нац. аграр. універ.* 2015. Т. 1(89). С. 94-99.
12. Мирончук В. Г., Змієвський Ю. Г. Мембранні процеси в технології комплексної переробки молочної сироватки. Київ: НУХТ. 2013. 152 с.
13. Smithers, G.W. Whey and whey proteins – from “gutter-to-gold”. *Int. Dairy Journal*. 2008. Vol. 18(7). P. 695-704. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>.
14. Ткаченко Л. В., Вітряк О. П. Перспективи використання молочної сироватки для інтенсифікації біотехнологічних процесів. *Сборник научных трудов SWorld*. 2013. Т. 8(3). С. 51-55.
15. Плотнікова Р. В., Нікітенко К. О. Перспективи використання молочної сироватки у технології напоїв. *Food Additives. Healthy Man and Human Patient Diet : proceedings of IX International scientific and*



practical internet conference. Prague, Oktan-Print, 2020. P. 271-272. <https://doi.org/10.46489/FAHM-01>.

16. Грек О. В., Красуля О. О. Напої на основі молочної сироватки з пророщеними злаками. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2011. Вип. 27. С. 366-370.

17. Сорокіна С. В., Колесник В. В., Полупан В. В., Акмен В. О. & Penkina N. M. Використання нетрадиційної сировини під час виробництва слабоалкогольних напоїв. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 5. С. 90-97. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.12>.

18. Назаренко Ю. В., Яценко С. Ю. Особливості використання молочної сироватки та ретентату, отримання високоякісних напоїв оздоровчого харчування. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2016. Вип. 2(24). С. 127-141.

19. Smithers, G.W. Whey and whey proteins – from “gutter-to-gold”. *Int.Dairy Journal*. 2008. Vol. 18(7). P. 695-704. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2008.03.008>.

20. Данілова К. О., Ткаченко Л. В., Вітряк О. П. Технологія коктейлів для дитячого харчування з використанням молочної сироватки та пюре айви. *Продовольчі ресурси*. 2017. № 8. С. 58-63.

21. Erickson D. *Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization*. Academic Press and AOCS Press. 2015. P. 130. URL: <https://www.elsevier.com/books/practical-handbook-of-soybeanprocessing-and-utilization/erickson/978-0-935315-63-9> (дата звернення 2.10.2018).

22. Hossen M. M, Uddin M. N., Islam Khan M. S., Islam S. M. H., Hasanuzzaman M., Bithi U. H., Abu Tareq M., Hassan M. N., Sayeed A., Robbani R. B., Mitra K. Nutritional and *in vitro* antioxidant activity analyses of formulated soymilk dessert. *Heliyon*. 2022. Vol. 25/8(10). e 11267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11267>.

23. Сарычева З. А. Дикорастущие лекарственные и пищевые растения Украины. Киев: Фитон, 2005. 147 с.

24. Використання пюре з журавлини та камеді геллану при створенні нової технології білково-збивного крему / В. І. Оболкіна, І. І. Сивній, І. О. Крапивницька, Н. О. Олексієнко. *Хлібний та кондитерський бізнес*. 2019. № 7. С. 30-31.

25. Застосування пюре з журавлини для подовження терміну придатності кондитерських виробів / В. Оболкіна, І. Сивній, І. Крапивницька, Н. Олексієнко, О. Дзигар, С. Коршун. *Продовольча індустрія АПК*. 2016. № 4. С. 26– 28.

26. Ткаченко О. Б., Каменева Н. В., Тіглова О. О. Основи сенсорного аналізу харчових продуктів. Одеса: Олді плюс, 2020. 304 с.



Стаття надійшла до редакції 23.10.2023 р.

L. Tkachenko¹, O. Vitriak²

¹National university of life and environmental sciences of Ukraine

²State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

TECHNOLOGY OF COCKTAILS OF INCREASED BIOLOGICAL VALUE USING MILK WHEY

Summary

The article analyzes the problem of the deficiency of protein and biologically active substances in the diet, determines the need to create drinks with reased biological value, which have a health-improving effect and positively affect the state of human health. Whey was selected as a source of protein and biologically active substances for the development of cocktails. Whey is a by-product in the production of rennet and sour-milk cheeses.

It is known that half of the content of milk solids, including up to 30% of protein and up to 65% of minerals and vitamins, passes into whey. The possibility of using soymilk as part of cocktails, which contains valuable soy protein (about 35%), which includes all eight essential amino acids, as well as trace elements, is considered. Soymilk is low in calories and does not contain lactose. Instead of sugar syrup, it is suggested to use a fruit filler in the form of cranberry puree.

Cranberries contain carbohydrates, including pectin substances, organic acids, flavonoids, polyphenol compounds, which determine the antioxidant properties of this raw material.

The purpose of this work was to develop a cocktail technology of increased biological value due to the use of milk whey, soymilk and cranberry puree.

Model compositions based on milk curd with the addition of a rational amount of soymilk and cranberry puree were created and researched. An organoleptic evaluation of the cocktails was carried out in comparison with the control sample. According to the evaluation criteria (appearance, consistency, color, smell, taste), the best model composition was determined. The cocktail was named «Cranberry». The number of components in the developed cocktail is: whey 37%, soy milk 7.4%, cranberry puree 5.5% of the total weight of the drink. The chemical composition of the developed cocktail was calculated and compared with the control in terms of meeting daily needs. It was established that the amount of protein, dietary fiber, trace elements, and vitamins in the developed cocktail «Cranberry» was significantly increased. The energy value of the developed drink decreased by 65%. Therefore, the received cocktail «Cranberry» has an increased biological value and is promising for use in restaurants.

Keywords: whey, whey proteins, soy milk, biological value, milk cocktail, cranberry puree.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-206-216

УДК [613.2.038+001.5+130.2](540)

Т. В. Семко¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0002-1951-5384

О. В. Пахомська¹, асистент

ORCID 0000-0003-3573-9422

¹ Вінницький торговельно-економічний інститут ДТЕУe-mail: olana1980@ukr.net, тел. +380987878853

АЮРВЕДА - СУЧАСНА СИСТЕМА ОЗДОРОВЛЕННЯ ОРГАНІЗМУ ЛЮДИНИ

Анотація. У статті представлено короткий огляд основних аюрведичних знань про здоровий спосіб життя, досягнення щастя і довголіття — найдавнішої системи оздоровлення, оригінальних і чітких принципів профілактики, діагностики й лікування хвороб. З позиції Аюрведи дано нове розуміння здоров'я людини як єдності тілесної, душевної та духовної складових, із досягненням якої відновлюється істинна гармонія між людиною та навколишнім світом, що і є основою здоров'я. Сучасні дослідження вчених підтверджують справедливість і дієвість аюрведичних уявлень про механізми регуляції функцій організму людини засобами раціональної індивідуальної дієти, траволікування, використання йоги, масажів і неодмінної присутності в нашому житті високого духовного змісту.

Ключові слова. Аюверда, здоровий спосіб життя, дослідження, харчування, доші, Вата, Пітта, Капха.

Постановка проблеми. Сьогодні в Україні науковці спрямовують свої дослідження на розроблення та впровадження сучасних технологій в приготуванні страв для оздоровлення організму людини.

За статистикою, близько 75% сучасного населення страждають на захворювання, так чи інакше пов'язані з неправильним харчуванням.

У сучасній дієтології передбачено кілька видів харчування, що відрізняються між собою певними принципами.

Фахівці поділяють всі види харчування на чотири основні категорії:

1. Традиційне – сприяє підтримці коректного функціонування організму. Підходить для здорових людей.

2. Профілактичне чи лікувальне – призначене для усунення існуючих недуг, попередження розвитку нових захворювань та полегшення хворобливих станів.

3. Спеціалізоване – передбачено для людей окремих категорій (вагітних, людей пенсійного віку, професійних спортсменів).



4. Нетрадиційне – специфічні раціони та дієти, розроблені з урахуванням релігійних, філософських та інших переконань людей (1, 29).

В даний час існує велика різноманітність нетрадиційних видів харчування, кожен з яких має свої особливості:

- піраміда (всеїдність) – один із найпопулярніших типів харчування, при якому можна їсти будь-які продукти, але у певному співвідношенні;
- роздільне харчування – ґрунтується на вживанні сумісних між собою продуктів;
- дробове харчування – припускає прийом їжі настільки часто, наскільки цього вимагає організм;
- вегетаріанство – харчування, у якому віддається перевагу вживанню продуктів рослинного походження;
- аюрведичне харчування – методика, заснована на старовинній філософії, в якій враховуються смак, якість та сумісність продуктів;
- макробіотика – строга дієта, принцип якої полягає у дотриманні правил підбору, приготування продуктів та особливостям їх вживання (10, 24).

Аналіз останніх досліджень. Окремі аспекти аюрведичного харчування, його основні принципи та цілі висвітлювалися у працях Українець А. І., Сімахіна Г. О., Раздобурдин Я. Н., Торсунов О. Г. та інші.

Загалом аналіз сучасних досліджень показав, що тематику аюрведи, основні принципи, цілі та впровадження у закладах ресторанного господарства висвітлено надзвичайно мало.

Формулювання цілей статті. Дослідити основні концептуальні засади аюрведичного харчування, його роль та місце в загальній системі оздоровлення людини.

Основна частина. Сьогодні у світі широко набуває популярності продукти нового покоління та принципи харчування. До одного з таких принципів відноситься одна з найдавніших систем фізичного та духовного оздоровлення Аюрведа (санскр. Айю - життя та Веда - знання, або наука). Відомий сучасний психолог А. Левшинов називає Аюрведу не лише найвеличнішим пам'ятником філософсько-літературної думки, а й першоджерелом світової культури (5,18).

Основні принципи харчування по аюрведі. Сучасні принципи здорового способу життя базуються на 2 постулатах. Перший з них говорить, що організм - це комплексна система, у якій кожний елемент впливає на інші. У питаннях здоров'я фізична активність, харчування, сон, ментальний стан є однаково важливими. Другий нагадує, що хвороби краще попередити, ніж лікувати. Позаяк,



важливо достатньо рухатися, не забувати про вітаміни, стежити за станом свого організму і регулярно проходити чекапи (3, 19).

Ці принципи - не нові. Народна індійська медицина практикувала цей підхід ще 5 тисячоліть тому. “Досконале здоров’я опирається на ідеальну загальну рівновагу. Усе, що ми їмо, говоримо, думаємо, бачимо та відчуваємо, впливає на рівновагу”, - пише Діпак Чопра, американський лікар та популяризатор аюрведи.

Не дарма першою в його списку є саме їжа, адже це один з основних елементів здорового способу життя. Причому східна медицина вважає важливим не тільки вибір продуктів, а й те, як саме ми їх їмо (11, 26).

Прийоми їжі. Аюрведа рекомендує харчуватися 3 рази на добу, причому найбільш ситний прийом їжі залишити на обід. Щоб зрозуміти сенс цих правил, слід дізнатися більше про процес травлення. Давня індійська філософія говорить, що він триває близько 6 годин і проходить через 3 стадії.

У перший час людина відчуває себе ситою та спокійною. Потім, коли продукти засвоюються та насичують клітини організму, вона стає більш енергійною. У наступні години повертається легкість і знов прокидається апетит. За правильне проходження цих етапів відповідає агні - так званий “вогонь травлення”, а з наукової точки зору - шлунковий сік і комплекс ферментів, які є найбільш активним якраз посеред дня (13, 21).

Перекушуючи у проміжках між сніданком, обідом та вечерею, збивається агні, тим самим позбавляється можливість повноцінно пройти 3 основних етапи засвоєння їжі. Що відбувається з погано перетравленою їжею? Аюрведа вважає, що вона стає амою - токсичною речовиною, яка є причиною багатьох захворювань.

Сучасна наука не використовує саме ці терміни, але погоджується з такими висновками. Вчені з Італії, Іспанії та США довели, що саме режим харчування не частіше 3 разів на добу знижує запалення в організмі, підвищує стресостійкість, а також допомагає уникнути ожиріння та діабету 2 типу (12, 22).

Шість смаків. Коли аюрведа говорить про збалансоване, здорове харчування, вона має на увазі не підрахунок калорій, білків, жирів та вуглеводів. Мова йде про наявність у кожному прийомі їжі шість смаків: солодкого, кислого, гіркого, солоного, гострого та в’яжучого.

Вважається, що кожний з них дарує особливу енергію та наділяє нас силою. Здавалося б, поєднати всі смаки в одній тарілці неможливо.

Однак, прагнути різноманіття важливо, а додати недостаючи смаки можна менш очевидними та більш здоровими способами (4).



Кожен смак в Аюрведі також формується парою з п'яти елементів махабхут, це:

- Солодкий смак формують земля і вода;
- Кислий смак – земля і вогонь;
- Солоний смак формують елементи вода і вогонь;
- Гострий смак – вогонь і вітер (повітря);
- Гіркий смак формують елементи вітер (повітря) і ефір;
- Терпкий смак – земля і вітер (повітря) (7,14).

Таким чином, сполучною ланкою доши та смаку є п'ять елементів Аюрведи. У фундаментальному трактаті по Аюрведі «Чарака Самхіті» описано вплив смаку на дошу Вата, Пітта або Капха.

Характеристика основних шести смаків Аюрведи представлено у табл. 1.

Таблиця 1.

Характеристика основних шести смаків Аюрведи

Назва смаку	Дія на організм людини	Продукти, що містять смаки
Солодкий	дає енергію та заземлює	Фрукти, горіхи, молочні продукти, крупи і навіть м'ясо
Кислий	сприяє травленню	Цитрусові, кисломолочні та ферментовані продукти.
Солоний	регулює водно-сольовий баланс	Важливо обирати сіль без добавок E535 і E536.
Гострий	містить антиоксиданти, а також покращує процес травлення	Цибуля, імбир, чорний перець, лавровий лист, базилік, тощо.
Гіркий	чинить цілющий вплив на організм та володіє протизапальним ефектом	Куркума, кмин, часник і темна зелень
В'язучий	виводить надлишок рідини, а також позитивно впливає на процес травлення, оскільки продукти з цієї групи містять велику кількість клітковини	Овочі та деякі фрукти (груші, сливи, яблука), бобові, гриби, фундук і пекан.

Три доші. Доша є базовим поняттям в аюрведичній медицині. Саме приналежність до тієї чи іншої доші визначає схему харчування. Вважається, що кожна людина складається з 5 елементів: води, землі, вогню, повітря та ефіру. Однак пропорції цих елементів у кожній людині є індивідуальними. Хтось отримав більше вогню, тож його доша - пітта. Хтось - води та землі, у такому випадку домінує капха. А хтось - ефіру та повітря, що означає першість доші вата (25).

Основні доші та їх зв'язок з природою представлено на рис. 1.



Рис. 1. Основні доші та їх зв'язок з природою

Пропорції основних елементів закладаються ще при формуванні ембріону. Але неправильний режим дня, відсутність фізичних навантажень або погане харчування здатні порушити початкове співвідношення доші викликати дисбаланс в організмі. Слід відмітити, що аюрведа не ділить продукти на корисні та шкідливі. Вона переконана: що є ліками для одного, може стати отрутою для іншого. Позаяк, необхідно скласти свій раціон, опираючись на домінуючу дошу (2, 17).

Як її визначають? Достатньо помітити у себе основні ознаки однієї з 3 дош. Наприклад, вати худорляві, мають суху шкіру та холодні руки. Для них характерними є легка хода, висока емоційність та неспокійний сон. Капхи легко набирають зайву вагу, сплять міцно і довго. Вони повільні, незворушні та дружелюбні (7, 21).

Пітті швидко набирають вагу і так само швидко худнуть, важко переносять спеку. Можуть бути впертими та категоричними, але не



бояться складнощів, мають вольовий характер. Якщо ці ознаки виражені у вас не дуже явно, можна пройти спеціальні тести: ваш тип може бути на перетині 2, або й усіх 3, дош.

Вата. Для збереження балансу струнким, тонким ватам необхідно споживати теплі, насичені жирами продукти. У меню додають у нього якомога більше обробленої їжі.

Фрукти (стигли): яблуко, банан, манго, диня, слива, грейпфрут, лимон, лайм, апельсин, ківі, ананас.

Овочі (краще надавати перевагу вареним): буряк, морква, капуста, гарбуз, спаржа, перець чилі.

Бобові: зелена квасоля, горох, нут і сочевиця.

Крупи: асортимент є не таким великим - ватам підходять кіноа, рис, пшениця, амарант.

Приправи: доступні будь-які.

Напої: трав'яні чаї з лавандою, шипшиною, м'ятою, шавлією. У стоп-листі напої з ожиною, гібікусом та кульбабою (6, 23).

Капха. Неспішні капхи, навпаки, потребують легких страв.

Фрути та ягоди: груша, хурма, яблуко, гранат, вишня і журавлина. Слід бути обережними з полуницею та їсти її в обмежених кількостях.

Овочі: брюссельська, білокачанна та цвітна капусти, буряк, морква, кукурудза, баклажан, картопля, помідор, артишок, ріпа.

Бобові: будь-які.

Крупи: гречка, вівсяні висівки, кукурудзяна, просо, полента, кускус і рис.

Приправи: обмежень немає, та не варто захоплюватися сіллю.

Напої: чаї з ромашкою, ароматним жасмином, мелісою, пекучою кропивою, гібікусом, м'ятою і лавандою (5, 20).

Основні продукти аювердичного харчування представлено на рис. 2.

Пітта. Вогняним піттам підійдуть прохолодні (але не холодні), в'яжучі продукти.

Фрукти (не кислі): яблуко, груша, інжир, манго, диня, кавун.

Овочі: обмежень практично немає - буряк, морква, цукіні, пастернак, брюссельська, цвітна і білокачанна капусти, селера, редис, гриби.

Крупи: амарант, ячмінь, кускус, полба, кіноа, рис і пшениця.

Приправи: кориця, коріандр, кмин, шафран, кріп, куркума, м'ята, фенхель. А ось від пекучих спецій на кшталт часнику, імбиру та перцю краще відмовитися.

Напої: чаї з дерев'яним, м'ятою, кульбабою, фенхелем, лемонграссом, малиною, полуницею та ожиною (8, 27).



Рис. 2. Основні продукти аювердичного харчування

Аналітичне дослідження інформаційних джерел та сайтів державних структур дає змогу поділити ринок аюрведи в Україні на виробництво аювердичної продукції та послуги.

В Києві нараховується декілька аювердичних центрів, такі як «РАСАЯНА» (центр ведичної медицини), Київський Центр Аювердичної Медицини, центр альтернативної медицини «Аюрведа 192». Центр аюрведи та панчакарми в Україні має свої філії не лише в Києві, а й в Одесі, Хмельницькому та Ужгороді. Так, наприклад, Центр здоров'я «Аюрведа-192» пропонує автентичну аюрведу з дотриманням усіх старовинних законів цієї стародавньої науки. Лікувальні програми розраховані мінімум на два тижні. Аювердичні пакети включають позбавлення від стресу, очищення й омолодження, зниження ваги, антивікову програму.

Аювердичні клініки, які відкриваються в Україні – організовані на кшталт лікарні з особливим режимом і невеликим ступенем свободи.

На сьогоднішній день існує безліч аювердичних магазинів, які пропонують ліки, масла, спеції, чаї та трав'яні напої, косметичні засоби, такі як шампунь, крем для обличчя, мило та харчові продукти. Вони відкриті в багатьох містах України (Київ, Львів, Харків, Одеса, Дніпро та ін.), але в більшості представлені як Інтернет-магазини, які доставляють продукцію в будь-яку точку нашої країни (9, 16).

В Україні відкриваються аювердичні салони. Основний напрям їхньої діяльності – програми очищення й омолодження організму з використанням масажу, лікарських трав і рекомендацій із харчування.

Доцільно виділити такі чинники зростання ринку аювердичних послуг в Україні:



- підвищення обізнаності щодо ефективності й унікальності аюрведичних програм, підтримка з боку українського уряду;
- маркетингові заходи;
- зростання науково-дослідної діяльності;
- розчарування алопатією, що має супутні побічні ефекти;
- зростаючий сектор електронної комерції;
- зростання поширеності та захворюваності на хронічні недуги, такі як алергія, кардіологія та ревматичні розлади;
- мінімальні побічні ефекти;
- зміна способу життя;
- зростаюча урбанізація;
- запуск нових інноваційних продуктів (12, 28).

Висновки. Аюрведе – це сучасна система оздоровлення організму людини, що поєднує психічну та тілесну концепцію єдиного організму.

Сучасні дослідження вчених підтверджують справедливість і дієвість аюрведичних уявлень про механізми регуляції функцій організму людини засобами раціональної індивідуальної дієти, траволікування, використання йоги, масажів і неодмінної присутності в нашому житті високого духовного змісту.

Перспективним напрямком подальших досліджень є детальне вивчення функціональної медицини або медицина анти старіння, як нового медичного напрямку у світі, що спрямований на профілактику захворювань, збереження здоров'я, подовження тривалості життя й активного творчого довголіття.

Список використаних джерел

1. Сімахіна Г. О. Харчування як основна складова системи оздоровлення: точки зору Аюрведи і вітчизняної нутриціології / Г. О. Сімахіна, Н. В. Науменко. *Наукові праці НУХТ*. 2016. Т. 22, № 6. С. 117–125.
2. Українець А. І. та ін. Аюрведичні знання як унікальна цілісна система оздоровлення і лікування хвороб. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. Т. 22, №2. С. 117-123.
3. Дмитрієва А. В. Аюрведа. Вступ до ведичної медицини. Київ.: НВП Поліграф-Сервіс, 2015. 128 с.
4. Іщенко Т. І., Терешкевич В. В. Актуальність упровадження аюрведичних послуг на підприємствах гостинності. *Інтернаука*. 2018. № 3. С. 16–19.
5. Пиріг С. В., Голікова Т. П. Перспективи застосування аюрведи у вітчизняній індустрії гостинності. *Молодий вчений*. 2017. № 2. С. 303–306.



6. Сучасні тенденції, детермінанти та перспективи розвитку медичного та лікувально-оздоровчого spa- та wellness-туризму в світі / О.М. Мочульська та ін. *Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України*. 2019. № 3(81). С. 56–61.

7. Фролова Н. Е., Неміріч О. В., Силка І. М. Технологія аюрведичних харчових продуктів: конспект лекцій для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 181 «Харчові технології» освітньо-професійної програми «Технології аюрведичних харчових продуктів» денної форми навчання. Київ: НУХТ, 2019. 249 с.

8. Боде М. Аюрведа в ХХІ столітті: логіка, практика та етика. *Медичний плюралізм у сучасній Індії*. Нью-Делі: Orient Blackswan, 2012. С. 59-76.

9. Наливайко С. І. Індорійські таємниці України. Київ: Либідь, 2004. 219 с.

10. Карпенко П. О., Мельничук Н. О., Фус С. В. Лікувальне харчування та шляхи щодо його удосконалення. *Проблеми старення и долголетия*. 2011. Т. 20, № 2. С. 159–165.

11. Репресас Х. 7 жизненных путей к здоровью, благополучию и долголетию / пер. с англ. Київ: Изд. дом «Амадей», 2002. 270 с.

12. Гігієна харчування з основами нутриціології: підручник / В. І. Ципріян та ін. Київ: Здоров'я, 2007. 572 с.

13. Гулий І. С. Основи валеології : валеологічні аспекти харчування: підручник / І. С. Гулий, Г. О. Сімахіна, А. І. Українець. Київ: НУХТ, 2003. 336 с.

14. Повна ілюстрована книга з йоги / Свами Вішнудевананда; пер. з англ. 5-те вид., стереотипне. Київ: Здоров'я, 2010. 192 с.

15. Гонський Я. І. Біохімія людини: підручник / Я. І. Гонський, Т. П. Максимчук, М. І. Калинський. Тернопіль: Укрмедкнига, 2002. 744 с.

16. Annual Report on Tourism Statistics (2012–2018). Department of Tourism, Government of India. 2023. P. 12.

17. Export value of ayurvedic and herbal products from India from FY 2015 to FY 2019. URL: <https://www.statista.com/statistics/652418/export-value-of-ayurvedic-and-herbal-products-india/> (дата звернення 06.09.2023).

18. Development of technology of ayurvedic culinary products with natural plant components / N. Frolova at al. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 6/3(44). P. 48–54.

19. Syal K. The Concept of Diet in Ayurveda and Its Implications for the Modern World. *Ayurvedic Science of Food and Nutrition*. 2013. P. 25-38. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9628-1_3.



20. Bode M. Ayurveda in the Twenty-First Century: logic, practice and ethics. *Medical pluralism in contemporary India*. New Delhi : Orient Blackswan, 2012. P. 59–76.
21. Sarkar P., Lohith K., Dhumal C., Traditional and ayurvedic foods of Indian origin. *Journal of Ethnic Foods*. 2015. № 3. P. 97–109.
22. Gail Vance Civile, B. Thomas Carr Sensory Evaluation Techniques. 5th Edition. Published by CRC Press, 2016. P. 136. URL: <https://www.routledge.com/Sensory-Evaluation-Techniques/Civille-Carr/p/book/9781482216905> (дата звернення 06.09.2023).
23. Aguilar-Toalá J.E. et al. Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 75. P. 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.009>
24. Chernov N., Kapustyan A. Immunological properties of the bacterial origin compounds. *Food science and technology*. 2016. Vol. 10(3). P. 19-28. <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v10i3.175>.
25. Wolf A. J., Underhill D. M. Peptidoglycan recognition by the innate immune system. *Nat Rev Immunol*. 2018. Vol. 18(4). P. 243-254. <http://dx.doi.org/10.1038/nri.2017.136>. Epub 2018 Jan 2.
26. Irazoki O., Hernandez S.B. and Cava F. Peptidoglycan Muropeptides: Release, Perception, and Functions as Signaling Molecules *Front. Microbiol.* 2019. Vol. 10. P. 500. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2019.00500>.
27. Traub S., Von S. Aulock, Hartung T., Hermann C. MDP and other muropeptides – direct and synergistic effects on the immune system. *J. Endotoxin Res.* 2006. № 12. P. 69-85. <http://dx.doi.org/10.1179/096805106X89044>.
28. MDP Up-Regulates the Gene Expression of Type I Interferons in Human Aortic Endothelial Cells / Qingshan Lv. et al. *Molecules*. 2012. Vol. 17. P. 3599-3608. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules17043599>.
29. Matsui K., Ikeda R. Peptidoglycan in combination with muramyl dipeptide synergistically induces an interleukin-10-dependent T helper 2-dominant immune response. *Microbiol Immunol*. 2014. Vol. 58. P. 260-265. <http://dx.doi.org/10.1111/1348-0421.12139>.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2023 р.

T. Semko¹, O. Pahomska¹

¹ Vinnytsia Institute of Trade and Economics

AYURVEDA MODERN HEALTH SYSTEM HUMAN ORGANISM

Summary

The article provides an overview of basic Ayurvedic knowledge about a healthy lifestyle, achieving happiness and longevity — the oldest system of health improvement, original and clear principles of disease prevention, diagnosis and



treatment. Ayurveda, which is one of the world's oldest systems of physical. From the standpoint of Ayurveda, a new understanding of human health is given as a unity of physical, mental and spiritual components, with the achievement of which true harmony between a person and the surrounding world is restored, which is the basis of health. The main difference between Ayurvedic approaches to the problem of human health and domestic ones is that the basis of understanding the state of health and diseases, the conditions of active old age and longevity in Ayurveda is the concept of a single organism, inseparable mental and physical, a separate organ and the whole organism. One of the important aspects of Ayurveda is the acceptance of a deep connection between man and the environment. According to the teaching, the change of seasons and climatic conditions, change of prevailing winds, temperature and amount of precipitation have a particularly noticeable effect on human health. The balance of elements in the environment affects the balance of doshas in the body.

And in the context of this topic, this concept is expressed in Ayurvedic teaching regarding the self-regulation of the body with food products that correspond to the three doshas (three constitutional types); the need to adapt the nutrition structure to changes in the environment (season, climate, weather conditions); concepts of ojas and sattvic food; the need to eat food that brings harmony to the body and provides it with prana - vital energy.

Ayurveda is a modern system of healing the human body, which affects the mental and physical concept of a single disease.

Modern studies of scientists confirm the validity and effectiveness of Ayurvedic ideas about the mechanisms of regulation of the functions of the human body by means of a rational individual diet, herbalism, the use of yoga, massages and the indispensable presence in our lives of a high spiritual content.

Key words: ayurveda, healthy lifestyle, research, nutrition, doshas, Vata, Pitta, Kapha.

ПРАЦІ
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 23, том 2

Заснований у 1998 р
Виходить три рази на рік

Свідоцтво про державну реєстрацію
Друкованого засобу масової інформації
Міністерство юстиції
КВ 24285-14125 ПР від 27.12.2019 р.

Відповідальний за випуск – д.т.н., професор Панченко А. І.

Підписано до друку 01.11.2023 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум.-друк. арк. 15 Наклад 100.
ТОВ «Науково-виробнича компанія «Інтер-М»
Свідоцтво 33 № 26 від 23.06.2008 р.
69014, Україна, м. Запоріжжя, вул. Колерова,5