

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

ПРАЦІ

Таврійського державного
агротехнологічного
університету



ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Випуск 23, том 1

Наукове фахове видання
Технічні науки



Запоріжжя – 2023 р.

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 1
Issue 23, volume 1**

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

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1

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. 1. 219 с.

ISSN 2220-8674

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

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

Реферативні бази: Crossref, Google Scholar, 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, доц. (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

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

**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 1****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 (наказ 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: 10.31388/2078-0877-2023-23-1

COMPUTER SCIENCES

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

FOOD TECHNOLOGIES

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

**PROCEEDINGS OF TAVRIA STATE
AGROTECHNOLOGICAL UNIVERSITY****Issue 23, volume 1****Founder**

Dmytro Motornyi 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 Motornyi 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, Zhukovskyy Str.
<https://oj.tsatu.edu.ua>
DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1



ЗМІСТ / CONTENTS

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

- Панченко А. І., Волошина А. А., Мітков В. Б., Волошин А. А.** Вплив конструктивних особливостей планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки 6
Panchenko A., Voloshina A., Mitkov V., Voloshin A. Influence of design features of planetary hydromotors on changing dynamic characteristics of hydraulic drives of mechatronic systems of self-propelled vehicles
- Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ялпачик В. Ф.** Розробка експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора молока 27
Kiurchev S., Samoichuk K., Yalpachyk V. Development of the experimental sample of the pulsation milk homogenizer
- Mikulionok I.** Classification and analysis of polymer and rubber waste shredder designs 41
Мікульонюк І. Класифікація та аналіз конструкцій різальних подрібнювачів полімерних і гумових відходів
- Zhuravel D.** Determination of linear dimensions of boxes and thirds of individual castor varieties 63
Журавель Д. Встановлення лінійних розмірів коробочок і третинок окремих сортів ріцини
- Самойчук К. О., Ломейко О. П., Ковальов О. О., Червоткіна О. О.** Зниження енергетичних витрат диспергування за рахунок явища ежекції 77
Samoichuk K., Lomeiko A., Kovalyov A., Chervotkina A. Reduction of energy costs of dispersion due to the ejection phenomenon
- Гриценко О. П., Степаненко С. П.** Дослідження коефіцієнта корисної дії дискової борони від навантаження на сферичний диск 85
Gritsenko O., Stepanenko S. Investigation of the coefficient of the useful effect of a disk harrow from the load on spherical disc
- Юрченко О. Ю., Склабінський В. І., Гусак О. Г.** Вплив гідродинамічних та механічних чинників на формування гранул у грануляційній башті з використанням обертового вібраційного гранулятора 96
Yurchenko O., Sklabinskyi V., Gusak O. Influence of hydrodynamic and mechanical factors on the formation of granules in a granulation tower using a rotating vibrating granulator
- Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С.** Теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів 104
Skliar O., Skliar R., Komar A. Theoretical aspects of modeling of machine technology of organic waste disposal
- Дереза О. О., Водяницький І. О.** Вдосконалення конструкції вертикального ножового млина 116
Dereza O., Vodyanitskyi I. Improvement of the design of the vertical knife mill



Сушко С. Л., Чижиков І. О. Методика розрахунку параметрів пристрою на основі інжектора вентурі для фертигації плодкових насаджень 126
Sushko S., Chyzhykov I. Method for calculating device parameters based on venturi injector for fruit plant fertigation

Фучаджи Н. О., Ковальов О. О., Кузьмінська І. М., Червоткіна О. О. Дослідження апаратних схем переробки гречки 136
Fuchadzy N., Kovalev O., Kuzminska I., Chervotkina O. Research of vehicle charts of processing of buckwheat

Коробка С.В., Кригуль Р.Є., Бабич М.І., Стукалець І.Г., Сиротюк С.В., Болтянський Б.В. Опис виробничої геліосушарки з тепловим насосом 145
Korobka S., Babych M., Krygul R., Stukalets I., Syrotyuk S., Boltianskyi B. Description of the manufactured helio dryer with heat pump

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Кідалов В.В., Дяденчук А.Ф. Одержання та вивчення властивостей гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si 153
Kidalov V., Dyadenchuk A. Obtaining and studying the ZnO/SiC/porous-Si/Si heterostructure properties

Галько С. В., Мірошник О. О., Shchur Т., Markowska А. Моделювання автономної сонячної електростанції для дослідження режимів її роботи 164
Halko S., Miroshnik O., Syvenko M., Shchur T., Markowska A. Simulation of an autonomous solar power plant to study the modes of its operation

Попова І. О., Квітка С. О., Вовк О. Ю. Дослідження несиметричного режиму на роботу динамічного індуктивного навантаження 179
Popova I., Kvitka S., Vovk O. Investigation of an unbalanced mode in a distribution network with a dynamic inductive load

ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Priss O. P., Bulhakov P. O., Kolisnychenko T. O., Gazzavi-Rogozina L. V. Using protective coating for reduction of losses while storing asparagus 188
Прісс О., Булгаков П., Колісниченко Т., Газзаві-Рогозіна Л. Скорочення втрат при зберіганні спаржі зі захисним покриттям

Зарецька Д. К., Сердюк М. Є., Кривонос І. А., Бандура В. М. Заморожений напівфабрикат з додавання обліпихи, як сировина для продуктів функціонального призначення 199
Zaretska D., Serdyuk M., Kryvonos I., Bandura V. Frozen semi-finished product with the addition of sea buckthorn as a raw material for products with a functional purpose

Воробець М. М., Євлаш В. В., Кобаса І. М., Кондрачук І. В. Формування якості хліба пшеничного з добавкою «клітковина гречана» 207
Vorobets M., Evlash V., Kobasa I., Kondrachuk I. Formation of the quality of wheat bread with the addition of «buckwheat fiber»



ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-6-26**УДК** 621.225.001.4А. І. Панченко¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-1230-1463

А. А. Волошина¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-4052-2674

В. Б. Мітков¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3652-0687

А. А. Волошин², інженер¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*² *ВСП «Мелітопольський фаховий коледж ТДАТУ»*e-mail: voloshinaa2012@gmail.com, тел: +380975262603**ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ
ПЛАНЕТАРНИХ ГІДРОМОТОРІВ НА ЗМІНУ ДИНАМІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОПРИВОДІВ МЕХАТРОННИХ
СИСТЕМ САМОХІДНОЇ ТЕХНІКИ**

Анотація. Робота гідроприводів мехатронних систем самохідних машин супроводжується коливальними процесами, пов'язаними з технічною недосконалістю виконавчих механізмів гідроприводу. У зв'язку із цим питання стабілізації динамічних характеристик гідроприводів є актуальною проблемою. В результаті дослідження обґрунтовано вихідні дані та початкові умови, що дозволяють моделювати перехідні процеси, що відбуваються в гідроприводах мехатронних систем під час експлуатації самохідних машин. Розроблено структурно-функціональні схеми та математичний апарат, що дозволяють виявити динаміку зміни функціональних параметрів та вихідних характеристик гідроприводу з урахуванням конструктивних особливостей планетарних гідромоторів. Встановлено, що час розгону гідромотора № 2 на 12 % менше, ніж у гідромотора № 1, а коливання тиску і моменту при сталому русі менше на 34 % і 17 %, відповідно. Такі зміни обумовлені зменшенням зазору між зубами роторів та усунення коливань площі прохідного перерізу розподільної системи гідромотора № 2.

Ключові слова: перехідні процеси, динамічна модель, структурно-функціональна схема, функціональні параметри, вихідні характеристики.

Постановка проблеми. Гідравлічний привід набув широкого застосування на комунальних, дорожніх, сільськогосподарських, будівельних, лісозаготівельних та інших самохідних машинах. Останнім часом гідропривід використовується як привод робочого обладнання та механізми пересування самохідної техніки. Така робота гідроприводів супроводжується ударними навантаженнями та коливальними процесами в гідросистемах, пов'язаними як із



виникненням значних коливань тиску та витрати робочої рідини [1-3], так і наслідком технічної недосконалості виконавчих елементів гідроприводу. Коливальні процеси, що виникають у гідроприводі при розгоні та гальмуванні, негативно впливають на ресурс гідроприводу, знижують коефіцієнт використання установочної потужності приводу та продуктивність, зменшують надійність приводу та машини в цілому. Тому при проектуванні гідроприводів самохідних машин одним із важливих завдань є дослідження впливу елементів конструкції гідромашин на зміну динамічних характеристик гідроприводу при перехідних процесах.

Одним з основних елементів, що зумовлюють нерівномірність зміни вихідних характеристик гідроприводів, є гідромотори. В даний час у силових гідроприводах робочого обладнання та механізмів пересування самохідних машин широко застосовуються планетарні (орбітальні) гідромотори [4-7]. Одним з недоліків розглянутих гідромашин є нерівномірність їх вихідних характеристик, що виникає при перехідних процесах. Нерівномірність характеристик гідромоторів даного типу обумовлена похибкою виготовлення зубчастої поверхні їх роторів [8-10] і пульсацією потоку робочої рідини [11-13] у розподільних системах цих гідромашин.

У зв'язку з цим, питання дослідження впливу конструктивних особливостей планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів, з метою їх стабілізації, є актуальною проблемою, що вимагає невідкладного вирішення.

Аналіз останніх досліджень. Запропоновано напіваналітичний метод аналізу контактної взаємодії елементів [14], розроблено методи та моделі для дослідження напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії [15], отримано основні закономірності напружено-деформованого стану елементів [16]. Запропоновано метод визначення величини сили взаємодії між тілами, а також розподіл контактного тиску без обмеження форми початкового проміжку між тілами [17]. Запропонований підхід RANS з використанням скоригованої моделі турбулентності SST дозволяє визначити основні характеристики [18] та оптимальні геометричні параметри [19] вихрекамерних насосів, а також покращити їх вихідні характеристики [20]. Визначено характеристики раціонального регулювання складу бензоповітряної суміші [21], досліджено вплив в'язкості Бінгамівських рідин на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів [22], побудовано обчислювальну модель втрат у гідравлічному контурі з акцентом на втрати, що створюються стисливістю рідини [23], проведено експериментальні дослідження, що показують наявність коливань тиску [24], які не передбачені моделлю [23]. Розглянуто перебіг робочої рідини каналами



гідромашин [25], розроблено підхід до моделювання героторного насоса [26], що працює в умовах кавітації [27], обґрунтовано виникнення кавітації в зоні розподілу [28]. Моделювання процесів, що відбуваються в розподільних системах планетарних гідромашин, не проводилося.

Встановлено умови статичної рівноваги мобільного наземного роботизованого комплексу, що базуються на аналітичному співвідношенні у вигляді суми моментів гравітаційних сил [29], запропоновано спосіб активного контролю динамічного просторового позиціонування [30], визначено динамічну точність позиціонування [31], розроблено алгоритми на основі математичного моделювання процесів [32]. Побудовано чотири масові динамічні моделі, що складаються з рівнянь кінематичних зв'язків і рівняння динаміки [33], складено математичні моделі, що дозволяють досліджувати динаміку та коливальні процеси багатоелементних агрегатів [34], запропоновано вимірювальну систему динаміки та енергетики самохідних машин [35], створено параметричну модель динаміки консольного ротора [36], визначено характеристики окремих аеро- та гідростатичних несучих елементів [37], розглянуто можливість проведення гідродинамічних розрахунків [38] з використанням програмних пакетів CFD [39]. Динамічні процеси, які відбуваються у гідроприводах мехатронних систем самохідної техніки, не розглядалися.

Розглянуто універсальну модель мехатронної системи з гідравлічним приводом, обґрунтовано початкові умови моделювання [40], запропоновано математичну та фізичну моделі [41], що дозволяють моделювати процеси, що відбуваються в планетарних гідромоторах та їх елементах [8], розглянуто гідродинамічні моделі, що дозволяють досліджувати проточні частини героторного насоса на його вихідні характеристики [42], досліджено динаміку зміни вихідних характеристик мехатронної системи з серійним та модернізованим гідромоторами з урахуванням впливу похибки форми виготовлення елементів системи роторів [4] та площі прохідного перерізу розподільної системи [8, 11]. Динаміка зміни вихідних характеристик гідроприводів самохідної техніки з урахуванням конструктивних особливостей планетарних гідромашин за умов експлуатації самохідної техніки не досліджувалася.

Аналіз літературних джерел, пов'язаних із вирішенням поставленої проблеми – стабілізації вихідних параметрів гідроприводів, показує, що питанням, пов'язаним із впливом конструктивних особливостей планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки, не приділялося належної уваги. Тому, дана робота



присвячена вирішенням питань, пов'язаних із дослідженням впливу елементів конструкції планетарних гідромоторів на зміну динамічних характеристик гідроприводів на перехідних процесах під час експлуатації самохідної техніки.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Стабілізація вихідних характеристик гідроприводів мехатронних систем самохідної техніки шляхом моделювання перехідних процесів, що виникають у гідроприводах мехатронних систем під час експлуатації самохідної техніки.

Для моделювання зміни функціональних параметрів та вихідних характеристик гідроприводів самохідної техніки в експлуатаційних умовах необхідно вирішити наступні завдання:

- обґрунтувати вихідні дані, що дозволяють моделювати перехідні процеси, що відбуваються в гідроприводах при експлуатації самохідної техніки;
- розробити структурно-функціональну схему та математичний апарат динамічної моделі гідроприводу з урахуванням умов експлуатації самохідної техніки;
- дослідити вплив конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарного гідромотора на динаміку зміни функціональних параметрів та вихідних характеристик гідроприводу при експлуатації самохідної техніки.

Основна частина. Виконані раніше теоретичні та параметричні дослідження [43-48] показують, що розроблені математичні моделі дозволяють провести дослідження динаміки зміни вихідних характеристик мехатронної системи з планетарним гідромотором з метою прогнозування зміни їх вихідних характеристик. Дослідження проводилися на базі розробленої універсальної моделі мехатронної системи [40] з урахуванням конструктивних особливостей роторів планетарних гідромоторів [45], особливостей їх переміщення [44], а також конструктивних особливостей розподільних систем планетарного гідромотора [46-48].

Для моделювання зміни функціональних параметрів та вихідних характеристик гідроприводу в залежності від зміни геометричних параметрів витискувальних та розподільних систем планетарних гідромоторів, при описі насосної станції гідросистеми (насос, запобіжний клапан, робоча рідина) були прийняті наступні вихідні дані та початкові умови моделювання [49, 50]:

- *насос*: подача насоса дорівнює $Q_n(t) = 1770 \text{ см}^3/\text{с}$; кутова швидкість валу насоса дорівнює $\omega_n = 125 \text{ с}^{-1}$; параметр регулювання дорівнює $e = 1$; тиск у зливальній магістралі дорівнює $p_{cl} = 0$;
- *гідромотор*: робочий об'єм гідромотора дорівнює $V_{0zm} = 160 \text{ см}^3$; момент опору постійний та дорівнює $M_c = 365 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент інерції



- оберткових мас дорівнює $J = 3,6$ Н·м; об'ємний ККД гідромотора – $\eta_{об} = 0,95$; гідромеханічний ККД гідромотора – $\eta_{зм} = 0,9$ [8];
- *витискувальна система*: зазор (з урахуванням похибки форми профілю [4]) між зубами роторів складає $G = 0,055...0,21$ мм – для гідромотора № 1 та $G = 0,05...0,06$ мм – для гідромотора № 2; сумарна похибка форми виготовлення роторів гідромотора № 1 становить $E = 0,15$ мм, гідромотора № 2 – $E = 0,01$ мм;
 - *розподільна система*: площа прохідного перерізу розподільної системи гідромотора № 1 коливається у діапазоні
 - площа прохідного перерізу розподільної системи з кінематичною схемою 6/7 гідромотора № 1 коливається у діапазоні $A_{n.c} = 222...226$ мм² (при додатковому використанні трьох розвантажувальних вікон); для розподільної системи гідромотора № 2 площа прохідного перерізу постійна та дорівнює $A_{n.c} = 226$ мм² (при додатковому використанні двох розвантажувальних вікон) [46];
 - *запобіжний клапан*: жорсткість пружини дорівнює $C = 200$ кг/см; величина попереднього стиску пружини $x_0 = 0,125$ см; позитивне перекриття щілини складає $x_z = 0,53$ см;
 - *робоча рідина*: показник політропи дорівнює $K = 12$; параметри робочої рідини, що залежать від типу масла та робочої температури гідравлічної системи складають $A = 12,62$ і $B = 1740$; вміст нерозчиненого повітря у робочій рідині у відносних одиницях дорівнює $m_0 = 0,925$.

Нерівномірність подачі насоса $Q_n(t)$ та зміна навантаження на робочому органі (вираженого моментом опору $M_c(t)$) можна представити залежностями [40]:

$$\begin{cases} Q_p(t) = Q_\omega \cdot \sin \omega(t) + Q_\omega \cdot \sin \omega(t - \tau), \\ M_c(t) = M_{kp}(t) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + M_\omega \cdot \sin \omega(t). \end{cases} \quad (1)$$

Моделювання зміни функціональних параметрів (тиску $p(t)$, витрати $Q_{зм}(t)$ через гідромотор і витрати $Q_{кл}(t)$ через запобіжний клапан) в умовах експлуатації при розгоні гідроприводу самохідної техніки здійснювалося згідно з залежностями:

$$\begin{cases} p(t) = f(M_{kp}(t)), \\ Q_{зм}(t) = \mu \cdot \sum_{i=1}^z \left[\left(\frac{\pi}{z_2} - \Delta \right) - |\beta_i - \alpha_i(t)| \right] \cdot \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2} \cdot \sqrt{\frac{2p(t)}{\rho}}, \\ Q_{кл}(t) = \mu \cdot \pi \cdot d_{pl} \cdot x(t) \cdot \sqrt{\frac{2p(t)}{\rho}}, \end{cases} \quad (2)$$

де μ і ρ – коефіцієнт витрати та щільність робочої рідини; z_2 , α_i , β_i , Δ і R_1 , R_2 – кінематичні, кутові та габаритні параметри [8, 11] рухомого та нерухомого розподільників планетарного гідромотора; p_{pl} і $x(t)$ – геометричні параметри клапана.

Моделювання зміни вихідних характеристик (крутного моменту $M_{кр}(t)$ та частоти обертання $n(t)$ на валу гідромотора) при розгоні гідроприводу в умовах експлуатації самохідної техніки здійснювалося згідно залежностей

$$\begin{cases} M_{кр}(t) = 2 \left(e \pm \frac{G_m}{2} \right) \cdot p(t) \cdot b \cdot (z_1 + 1) \cdot h_i, \\ n(t) = f(Q_{зм}(t)), \end{cases} \quad (3)$$

де e , b , z_1 і h_i – кінематичні параметри роторів планетарного гідромотора [4].

Моделювання робочих процесів, що відбуваються у мехатронній системі з гідравлічним приводом, виконувалося для двох планетарних гідромоторів за допомогою системи динамічного моделювання VisSim. Для цього розроблено структурно-функціональні схеми динамічної моделі мехатронної системи з планетарним гідромотором (рис. 1-3) з урахуванням конструктивних особливостей його витискувальної (рис. 2) [49] та розподільної (рис. 3) [50] систем. Блок 1 дозволяє задати вихідні дані для моделювання робочих процесів, що відбуваються у витискувальній та розподільній системах планетарного гідромотора, працюючого у складі мехатронної системи (рис. 1).

Структурно-функціональна схема динамічної моделі мехатронної системи з планетарним гідромотором з урахуванням конструктивних особливостей його витискувальної системи представлена блоками 2-6 (рис. 2) [49].

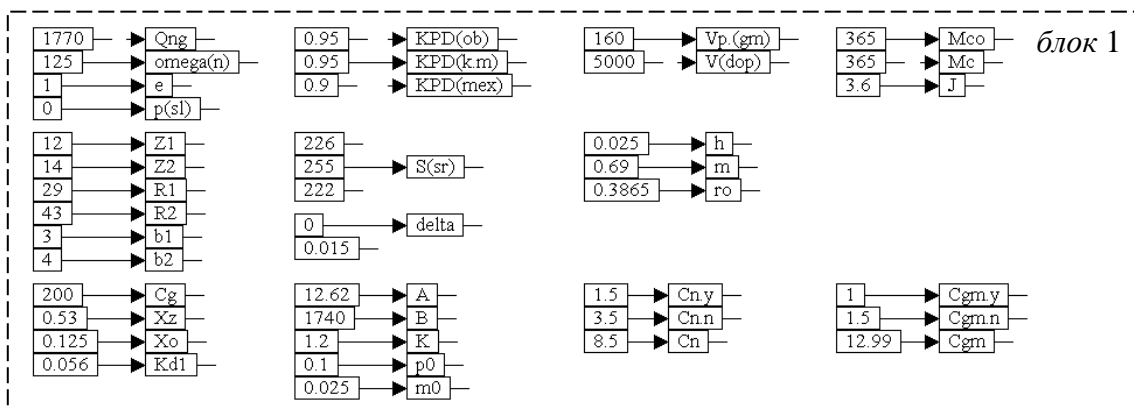


Рис. 1. Вихідні дані для моделювання перехідних процесів, які відбуваються у мехатронній системі з планетарним гідромотором

Зміна механічного ККД з урахуванням конструктивних

особливостей витискувальної системи (діаметрального зазору G та похибки форми виготовлення роторів E) планетарних гідромоторів № 1 і № 2 описано блоком 2 (рис. 2).

Зміну крутного моменту в залежності від зміни механічного ККД описано блоком 3 (рис. 2).

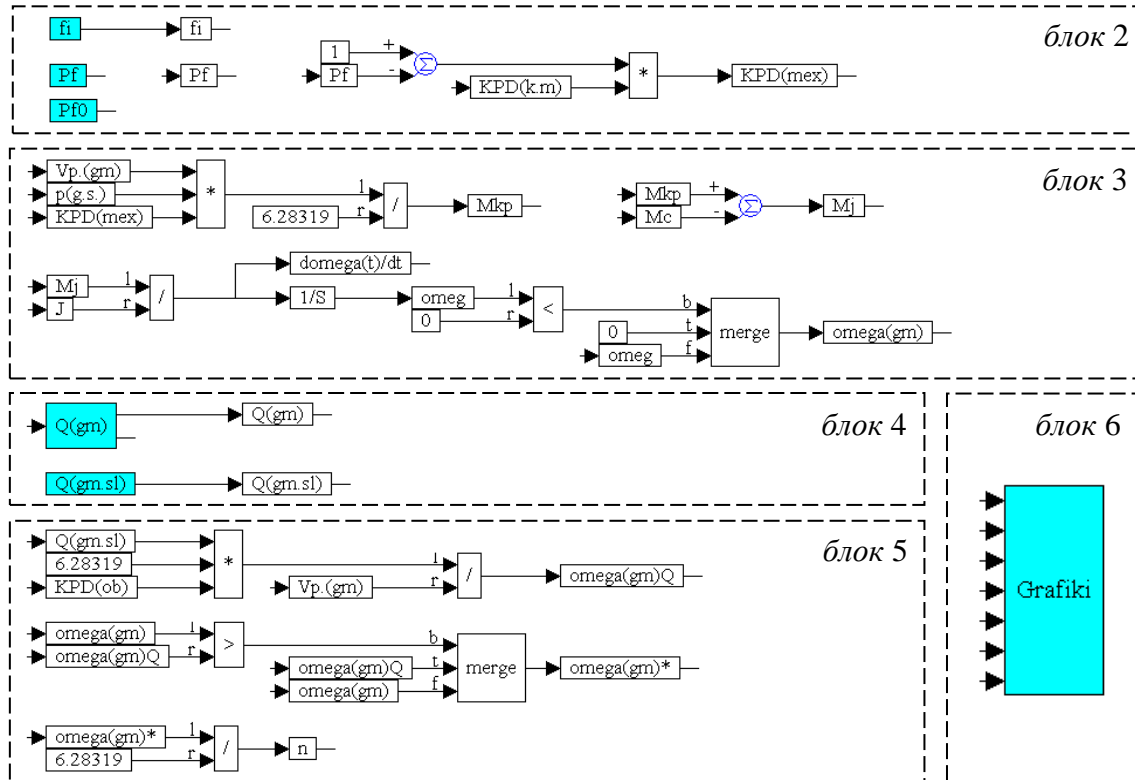


Рис. 2. Структурно-функціональна схема динамічної моделі мехатронної системи з планетарним гідромотором з урахуванням конструктивних особливостей витискувальної системи

Зміна витрати робочої рідини, що підводиться до гідромоторів та геометричної витрати з урахуванням конструктивних особливостей витискувальної системи представлена блоком 4.

Зміна частоти обертання валу гідромоторів описано блоком 5 (рис. 2).

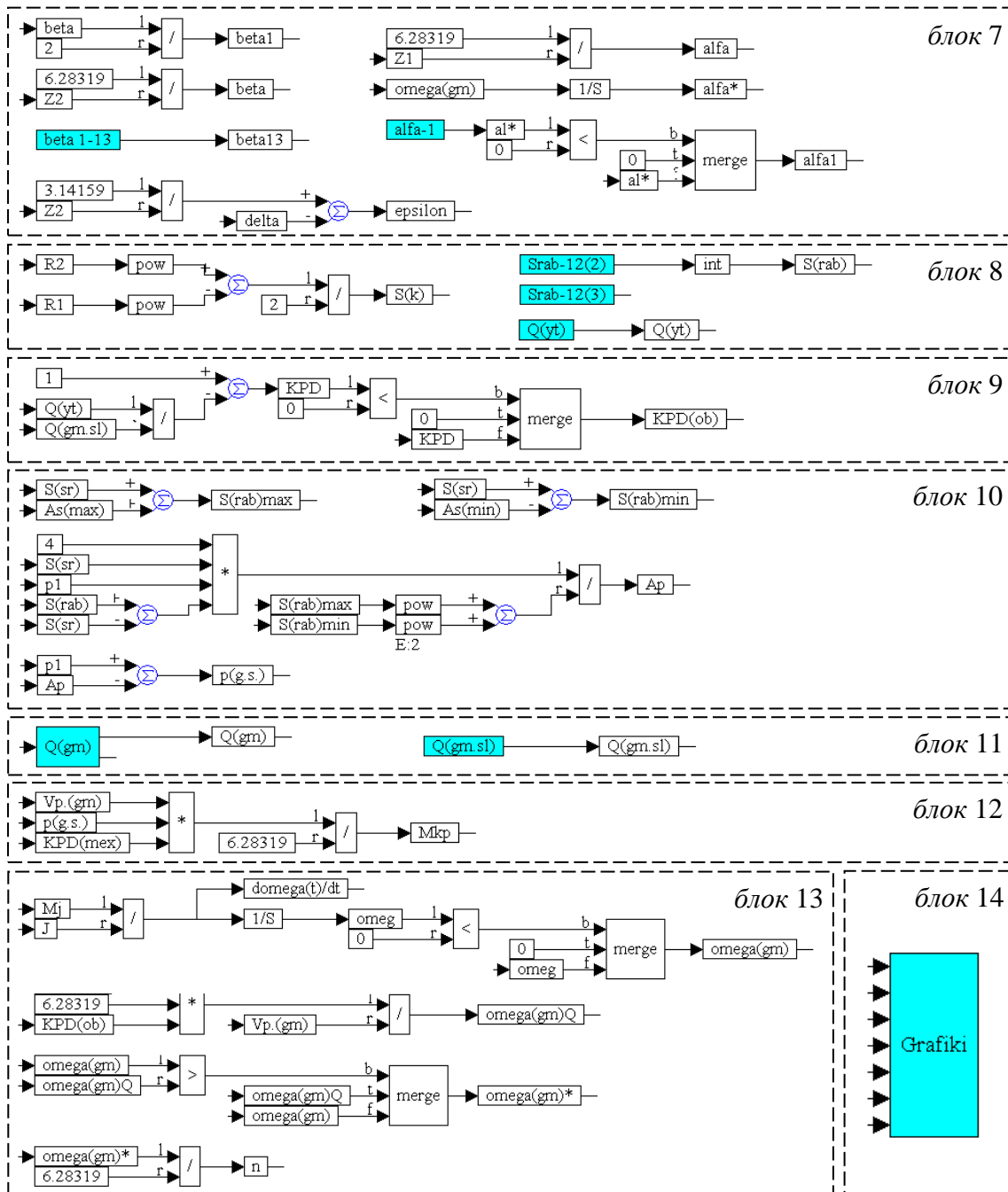
Блок 6 дозволяє вивести на екран графічні залежності вихідних характеристик планетарних гідромоторів № 1 і № 2, в поточний момент часу.

Структурно-функціональна схема динамічної моделі мехатронної системи з планетарним гідромотором з урахуванням конструктивних особливостей його розподільної системи представлена блоками 7-14 (рис. 3) [50].

Блок 7 дозволяє визначити кутове розташування вікон рухомого та нерухомого розподільників (рис. 3).

Зміна площі прохідного перетину розподільної системи

планетарних гідромоторів представлена блоком 8 (рис.3).



Зміна об'ємних втрат з урахуванням конструктивних особливостей розподільної системи представлена блоком 9 (рис. 3).

Зміна тиску в мехатронній системі з урахуванням зміни площі прохідного перетину системи розподілу робочої рідини представлена блоком 10 (рис. 3).

Зміни витрати робочої рідини з урахуванням конструктивних

особливостей розподільної системи представлена блоком 11 (рис. 3).

Зміна крутного моменту представлена блоком 12, а зміна частоти обертання валу гідромотора – блоком 13 (рис. 3).

Блок 14 (рис. 3) дозволяє вивести на екран графічні залежності вихідних характеристик планетарного гідромотора з урахуванням конструктивних особливостей розподільної системи за різних умов експлуатації мехатронної системи та в будь-який момент часу.

Розроблена структурно-функціональна схема динамічної моделі гідроприводу з урахуванням умов експлуатації самохідної техніки (рис. 4) дозволяє моделювати перехідні процеси, що відбуваються в гідроприводах в умовах експлуатації самохідної техніки, залежно від конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарного гідромотора.

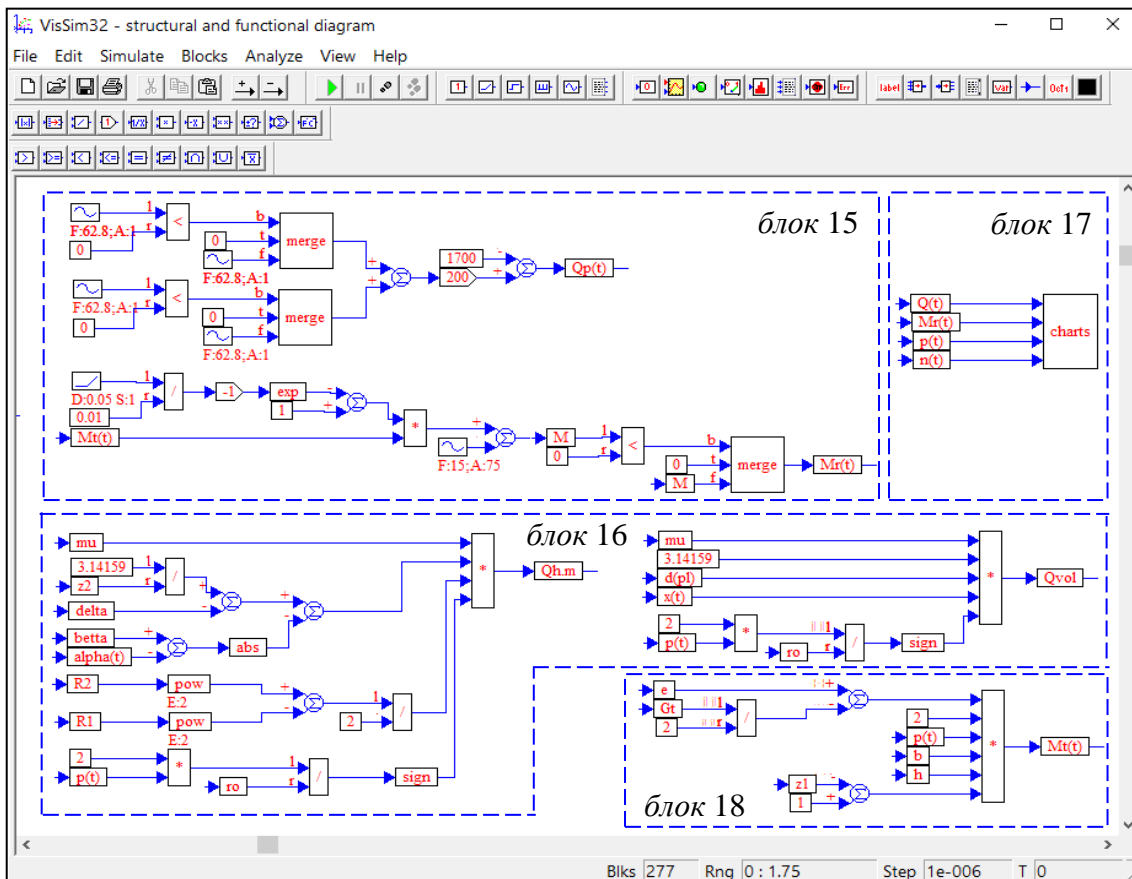


Рис. 4. Структурно-функціональна схема динамічної моделі гідроприводу мехатронної системи самохідної техніки в умовах експлуатації

Моделювання нерівномірності подачі насоса та зміни навантаження на робочому органі, описане залежностями (1), здійснювалося блоком 15 (рис. 4). Залежності (2), реалізовані в блоці 16, дозволяють моделювати зміну витрати робочої рідини через гідромотор та запобіжний клапан з урахуванням конструктивних



особливостей розподільної системи гідромотора. Зміна крутного моменту в залежності від зазору між зубами роторів, що визначається залежностями (3) реалізується блоком 17. Блок 18 здійснює графічну візуалізацію процесу моделювання в кожний момент часу.

Проведеними дослідженнями встановлено [49, 50], що зміна величини діаметрального зазору між роторами планетарного гідромотору майже не впливає на характер зміни тиску та витрати робочої рідини, а зміна площі прохідного перерізу майже не впливає на характер зміни крутного моменту та частоти обертання валу гідромотора, як в гідромоторі № 1, так і в гідромоторі № 2.

Результати моделювання представлені відповідними залежностями:

- зміни функціональних параметрів гідроприводу з урахуванням конструктивних особливостей розподільної системи планетарного гідромотора (рис. 5);
- зміни вихідних характеристик гідроприводу з урахуванням конструктивних особливостей витискувальної системи планетарного гідромотора (рис. 6);
- зміни функціональних параметрів гідроприводу з урахуванням конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарного гідромотора в умовах експлуатації мехатронної системи (рис. 7);
- зміни вихідних характеристик гідроприводу в експлуатаційних умовах з урахуванням конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарного гідромотора (рис. 8).

Аналіз зміни тиску в нагнітальній магістралі мехатронної системи та витрати робочої рідини через гідромотор та запобіжний клапан з урахуванням конструктивних особливостей розподільної системи планетарного гідромотора показує (рис. 5), що незначні коливання площі прохідного перетину розподільної системи гідромотора № 1 ($A_{n.c} = 222...226 \text{ мм}^2$) викликають значні пульсації тиску до 10%, витрати робочої рідини до 3% (рис. 5, а). При цьому, усунення коливань площі прохідного перетину розподільної системи гідромотора № 2 ($A_{n.c} = 226 \text{ мм}^2$) дозволяє стабілізувати значення тиску та витрати робочої рідини на всьому протязі досліджень процесу розгону (рис. 5, б).

Аналіз зміни крутного моменту та частоти обертання валу гідромотора з урахуванням конструктивних особливостей витискувальної системи планетарного гідромотора показує (рис. 6), що коливання діаметрального зазору ($G = 0,055...0,21 \text{ мм}$) у витискувальній системі гідромотора № 1 викликають значні пульсації крутного моменту, які складають 18...34% (рис. 6, а). При цьому,

стабілізація діаметрального зазору ($G = 0,05...0,06$ мм) у витискувальній системі гідромотора № 2 дозволяє усунути пульсації крутного моменту на всьому протязі дослідження процесу розгону (рис. 6, б). Встановлено, що величина діаметрального зазору у витискувальній системі не впливає на характер зміни частоти обертання валу як гідромотора № 1 так і гідромотора № 2.

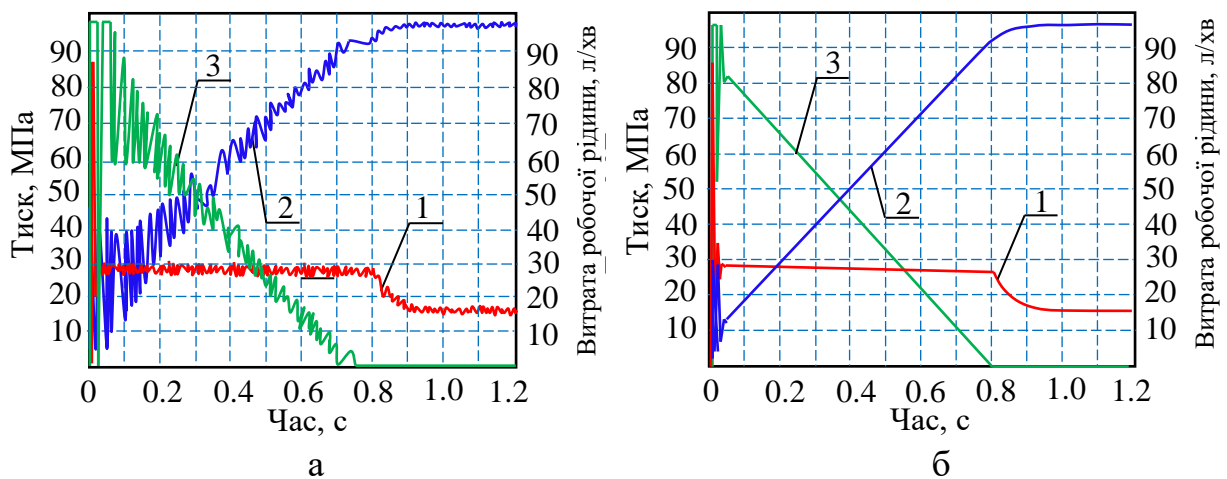


Рис. 5. Зміни функціональних параметрів гідроприводу під час розгону: а – гідромотор № 1; б – гідромотор № 2;
1 – тиск у гідравлічній системі; 2 – витрата через гідромотор;
3 – витрати через запобіжний клапан

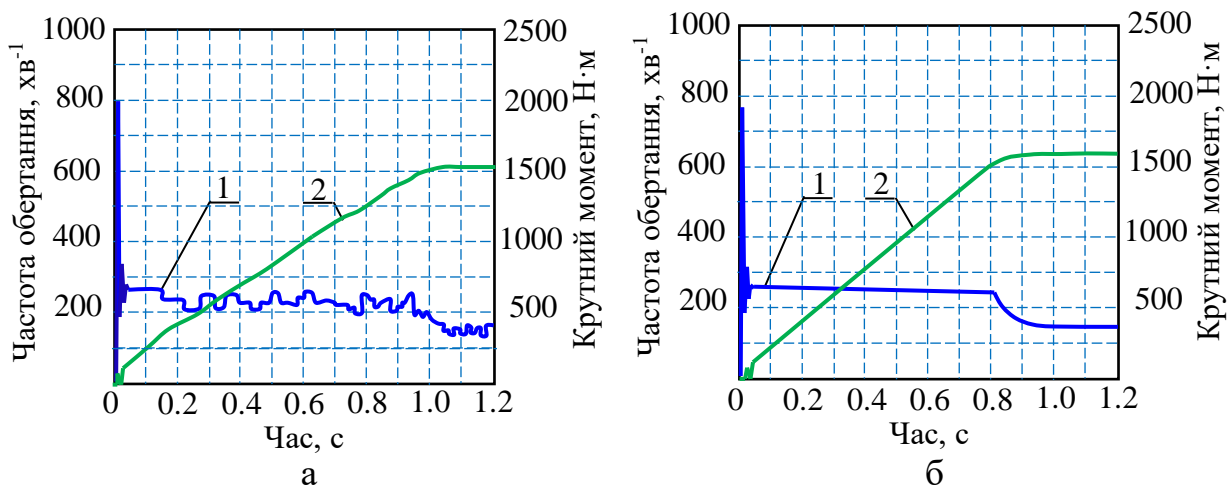


Рис. 6. Зміна вихідних характеристик гідроприводу під час розгону:
а – гідромотор № 1; б – гідромотор № 2;
1 – крутний момент на валу гідромотора; 2 – частоти обертання валу гідромотора

Аналіз представлених залежностей, що характеризують зміни тиску та витрати робочої рідини в мехатронній системі (рис. 7), а також зміни крутного моменту і частоти обертання на валу гідромотора (рис. 8) показує, що досліджуваний момент розгону



гідроприводу в умовах експлуатації самохідної техніки можна розділити на три етапи: страгування валу гідромотора, безпосередньо розгін і рух, що встановився.

Тривалість першого етапу страгування валу гідромотора для обох гідромоторів дорівнює 0...0.02 (рис. 7 – криві 1). Період другого етапу – безпосереднього розгону становить 0.02...0.85 с – для гідромотора №1 та 0.02...0.75 с – для гідромотора №2. Відповідно, третій етап – сталий рух для гідромотора №1 починається з 0.85 с, а для гідромотора №2 - з 0.75 с, що на 12% менше.

Аналіз залежності зміни тиску в гідросистемі показує, що на першому етапі спостерігається великий стрибок тиску 90 МПа для гідромотора №1 (рис. 7, а – крива 1) та 85 МПа – для гідромотора №2 (рис. 7, б – крива 1). Необхідно відзначити, що стрибки тиску більш ніж у 5 разів перевищують своє номінальне значення.

На другому етапі тиск у гідросистемі різко знижується та стабілізується на значенні від 29 МПа до 27 МПа, перевищуючи в 1.8 рази своє номінальне значення. Причому тиск у гідромоторі №1 має незначні пульсації з амплітудою 3...4МПа, викликані коливаннями площі прохідного перерізу його розподільної системи та пульсаціями подачі насоса (рис. 7, а – крива 1). У гідромоторі №2 пульсації тиску практично відсутні (рис. 7, б – крива 1).

Аналіз залежності зміни тиску на третьому етапі показує, що тиск у гідросистемі знижується, досягаючи свого номінального значення. Однак, на ділянці, що розглядається, спостерігаються значні коливання тиску, викликані пульсацією подачі насоса і коливаннями моменту опору з амплітудою 15 МПа – для гідромотора №1 та 10 МПа – для гідромотора №2, що на 34% менше, чим для гідромотора № 1.

Аналіз залежності зміни витрати робочої рідини через гідромотор з урахуванням конструктивних особливостей його розподільної системи показує, що на першому і другому етапах витрата рівномірно зростає для обох гідромоторів (рис. 7 – криві 2). Слід зазначити, що для гідромотора №1, у даний період спостерігаються значні пульсації витрати, викликані недосконалістю конструкції його розподільної системи та пульсацією подачі насоса, амплітуди яких становлять 20...30 л/хв (рис. 7, а – крива 2). Для гідромотора №2 на першому та другому етапах пульсація витрати відсутня (рис. 7, б – крива 2). Для обох гідромоторів третій етап характеризується незначними пульсаціями витрати до 3 л/хв для гідромотора №1 та до 2 л/хв – для гідромотора №2, спричиненими пульсацією подачі насоса.

Аналіз залежності зміни витрати через запобіжний клапан (рис. 7 – криві 3) показує, що для обох гідромоторів на першому етапі витрата має своє максимальне значення 98 л/хв [40], так як клапан повністю відкритий.

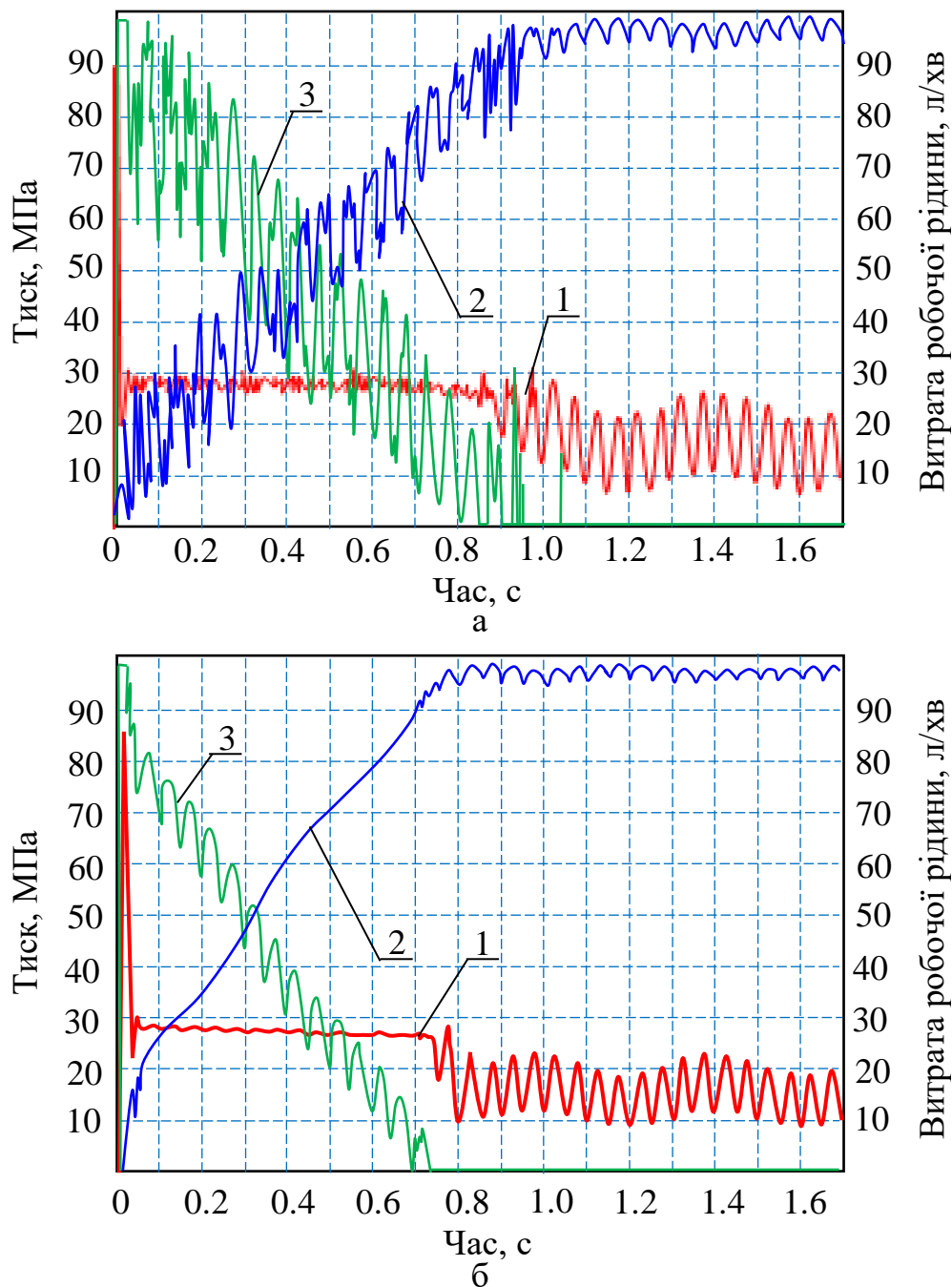


Рис. 7. Зміни функціональних параметрів гідроприводу в умовах експлуатації під час розгону: а – гідромотор № 1; б – гідромотор № 2; 1 – тиск у гідравлічній системі; 2 – витрата через гідромотор; 3 – витрати через запобіжний клапан

Другий етап обох гідромоторів характеризується рівномірним зниженням витрати до нуля, що означає повне закриття клапана. Цей період характеризується значними пульсаціями витрати, викликаними пульсацією подачі насоса – для гідромотора №1 амплітуда яких становить до 30 л/хв, а гідромотора №2 – до 10 л/хв, що у 3 рази менше, чим для гідромотора № 1. На третьому етапі витрата через

запобіжний клапан відсутня.

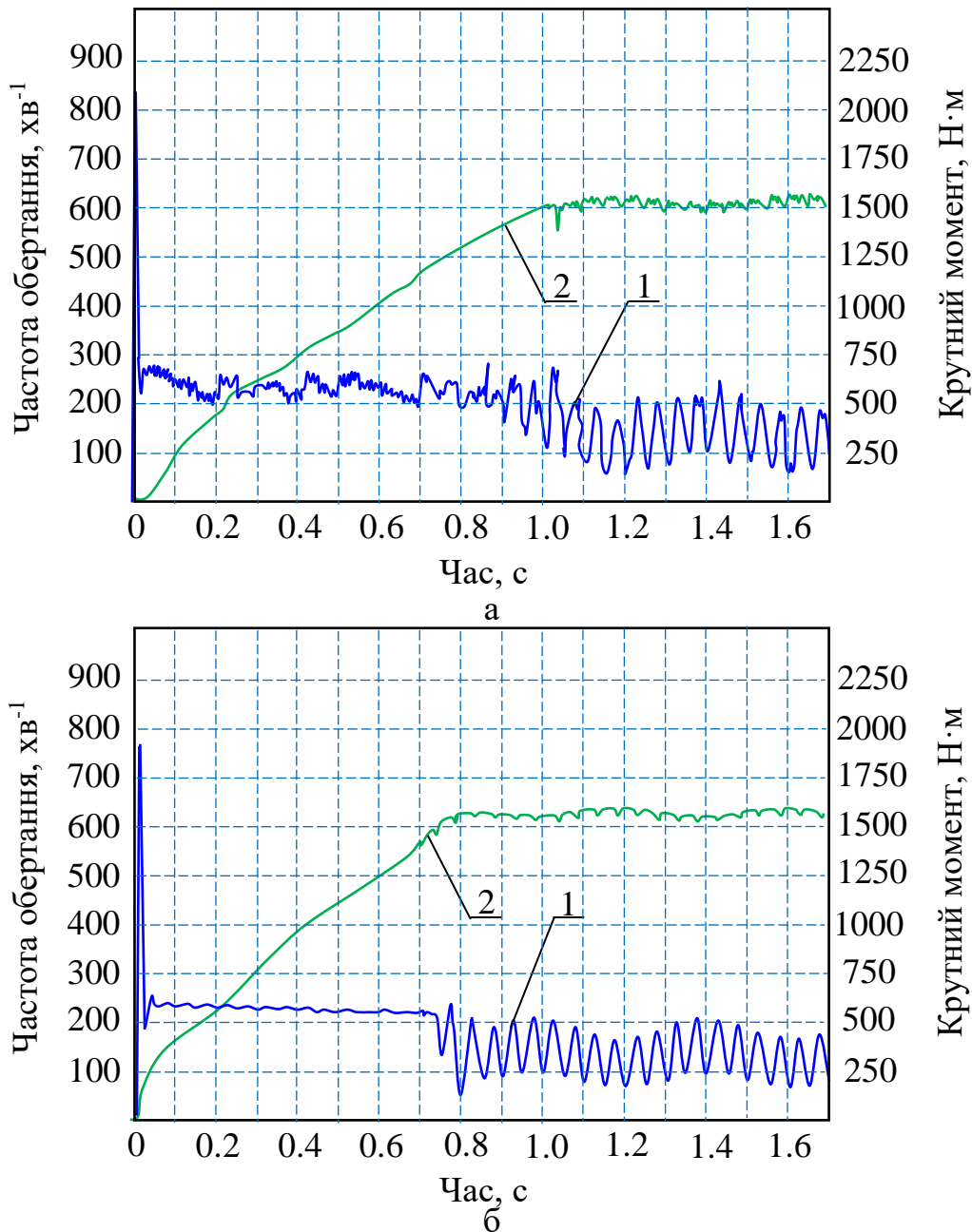


Рис. 8. Зміна вихідних характеристик гідроприводу в умовах експлуатації під час розгону: а – гідромотор № 1; б – гідромотор № 2; 1 – крутний момент на валу гідромотора; 2 – частоти обертання валу гідромотора

Аналіз результатів досліджень зміни крутного моменту залежно від зазору між зубами роторів планетарного гідромотора показує, що для обох гідромоторів на першому етапі спостерігається досить великий стрибок до 2100 Н·м – для гідромотора №1 і 1900 Н·м – для гідромотора №2 (рис. 8 – криві 1). Необхідно відзначити, що такий стрибок більш ніж у 5 разів перевищує номінальне значення крутного



моменту.

На другому етапі для обох гідромоторів спостерігається різке зниження значення крутного моменту до 640...620 Н·м, перевищуючи в 1.8 разу своє номінальне значення. На цій ділянці крутний момент гідромотора №1 має значні пульсації з амплітудою 140...150 Н·м, викликані наявністю надмірного зазору між зубами роторів (рис. 8, а – крива 1). Коливання крутного моменту на валу гідромотора №2 на даній ділянці практично відсутні (рис. 8, б – крива 1).

Третій етап характеризується значними коливаннями крутного моменту, викликаними коливаннями моменту опору з амплітудою 300 Н·м – для гідромотора №1 і 250 Н·м – для гідромотора №2, що на 17% менше, чим для гідромотора № 1.

Аналіз змін частоти обертання вала гідромотора з урахуванням конструктивних особливостей його розподільної системи показує, що для обох гідромоторів на першому та другому етапах значення частот обертання зростають, що зумовлене поступовим закриттям запобіжного клапана (рис. 8 – криві 2).

На третьому етапі значення частоти обертання досягнувши свого номінального значення 600 хв^{-1} [40] стабілізується. Однак, при цьому присутні незначні пульсації, спричинені пульсацією подачі насоса та синусоїдальні збурення, спричинені коливаннями моменту опорів.

Виконані дослідження показали, що вплив конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарних гідромоторів істотно впливають на зміну динамічних характеристик гідроприводів самохідної техніки, забезпечуючи їх стабілізацію. Такі зміни обумовлені зменшенням зазору між зубцями роторів та усуненням коливань площі прохідного перерізу розподільної системи гідромотора № 2.

Висновки. В результаті проведених досліджень обґрунтовано вихідні дані та початкові умови, що дозволяють моделювати перехідні процеси, що відбуваються у гідроприводах при експлуатації самохідної техніки.

Розроблено структурно-функціональні схеми та математичний апарат, що дозволяють дослідити зміни динамічних характеристик гідроприводу самохідної техніки з урахуванням умов її експлуатації, а також конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарного гідромотора.

Визначено зміни стабільності динамічних характеристик гідроприводів самохідної техніки під впливом конструктивних особливостей витискувальної та розподільної систем планетарних гідромоторів. Встановлено, що час розгону гідромотора № 2 на 12% менше, ніж у гідромотора № 1, при цьому при сталому русі коливання тиску і крутного моменту гідромотора № 2 менше на 34% і 17%,



відповідно у порівнянні з вихідними характеристиками гідромотора № 1. Такі зміни обумовлені зменшенням зазору між зубами роторів витискувальної системи та усуненням коливань площі прохідного перерізу розподільної системи гідромотора № 2.

Список використаних джерел

1. Kim S.-Y., Nam Y.-J., Park M.-K. Design of port plate in gerotor pump for reduction of pressure pulsation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2006. 20(10). P. 1626–1637. <https://doi.org/10.1007/BF02916266>.
2. Sung H.-J., Min H.-K., Nam Y.-J., Park M.-K. Design and experimental verification of a port plate in a gerotor pump to reduce pressure pulsation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. 32. P. 671–678. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0114-4>.
3. Hsieh C. F. Flow characteristics of gerotor pumps with novel variable clearance designs. *Journal of Fluids Engineering*. 2015. 137(4). no 041107. <https://doi.org/10.1115/1.4029274>.
4. Panchenko A., Voloshina A., Titova O., Panchenko I., Zasiadko A. The Study of Dynamic Processes of Mechatronic Systems with Planetary Hydraulic Motors. *Advanced Manufacturing Processes II, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 704-713. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_68.
5. Hsieh C.F., Hwang Y.W. Geometric design for a gerotor pump with high area efficiency. *Journal Mechanical Design*. 2007. 129(12). P. 1269–1277. <https://doi.org/10.1115/1.2779887>.
6. Hsieh C.F. Fluid and dynamics analyses of a gerotor pump using various span angle Designs. *Journal Mechanical Design*. 2012. 134(12). No 121003. <https://doi.org/10.1115/1.4007703>.
7. Liu H., Lee J.-C., Yoon A., Kim S.-T. Profile design and numerical calculation of instantaneous flow rate of a gerotor pump. *Journal of Applied Mathematics and Physic*. 2015. 3(1). P.92–97. <https://doi.org/10.4236/jamp.2015.31013>.
8. Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Panchenko I. Changes in the dynamics of the output characteristics of mechatronic systems with planetary hydraulic motors. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol.1741. no 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012045>.
9. Vecchiato D., Demenego A., Argyris J., Litvin F.L. Geometry of a cycloidal pump. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2001. Vol. 190. P. 2309–2330. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(00\)00236-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(00)00236-X).
10. Demenego A., Vecchiato D., Litvin F.L., Nervegna, N., Mancó S. Design and simulation of meshing of a cycloidal pump. *Mechanism and Machine Theory*. 2002. Vol. 37 (3). P. 311–332.



[https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(01\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00074-X).

11. 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. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 2. P. 146-155. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_15.

12. Choi T. H., Kim M. S., Lee G. S., and others. Design of rotor for internal gear pump using cycloid and circular-arc curves. *Journal Mechanical Design*. 2012. Vol. 134(1). No 011005. <https://doi.org/10.1115/1.4004423>.

13. O'Shea C. Hydraulic Flow Ripple Cancellation Using the Primary Flow Source. *Symposium on Fluid Power and Motion Control*. 2016. FPMC2016-1783. <https://doi.org/10.1115/FPMC2016-1783>.

14. Tkachuk M. M., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Saverska M., Hrechka I. A semi-analytical method for analys of contact interaction between structural elements along aligned surfaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 1/7 (103). P. 16-25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193985>.

15. Tkachuk M. M., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Hrechka I., Ishchenko O., Domina N. Investigation of multiple contact interaction of elements of shearing dies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/7(100). P. 6–15. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/174086/175737> (дата звернення 11.08.2023).

16. Atroshenko O., Tkachuk M., Ustinenko O., Bondarenko O., Diomina N. A numerical analysis of non-linear contact tasks for the system of plates with a bolted connection and a clearance in the fixture. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 1/7(79). P. 24–29. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/60087> (дата звернення 01.08.2023).

17. Tkachuk M. A numerical method for axisymmetric adhesive contact based on Kalker's variational principle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/7(93). P. 34–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.132076>.

18. 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://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-50491-5_9 (дата звернення 14.08.2023).

19. 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>.

20. 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>.

21. Korohodskyi V., Kryshchyna S., Miga, V., Rogovyi A., Polivyanchuk and others. 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). P. 39–52. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/200766> (дата звернення 21.07.2023).

22. 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>.

23. 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>.

24. 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>.

25. Velez E. Study Cavitation Gerotor Motors. Using Computer Simulatio. *XV International Scientific Conference: Renewable Energies and Innovative Technologies*. 2016. P. 64–66.

26. Marcu I., Pop I. Interconnection Possibilities for the Working Volumes of the Alternating Hydraulic Motors. *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, Special issue: Transactions on Mechanics*. 2004. P. 365–370.

27. Buono D., Schiano di Cola F.D., Senatore A., Frosina E., Buccilli G., Harrison J. Modelling approach on a Gerotor pump working in cavitation conditions. *Energy Procedia*. 2016. Vol. 101. P. 701–709. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.089>.

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

29. Strutynsky V., Hurzhi A., Kozlov L. Determination of static equilibrium conditions of mobile terrestrial complex with lever-type manipulator. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2019. T. 5. P. 79–86.



<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/7>.

30. Strutinsky V., Demyanenko A. The development of mechatronic active control system of tool spatial position of parallel kinematics machine tool. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2016. Vol. 54(3). P. 757–768. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.3.757>.

31. Strutynskiy S. Defining the dynamic accuracy of positioning of spatial drive systems through consistent analysis of processes of different range of performance. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. T. 3. P. 64–73. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/13>.

32. Strutynskiy S., Nochnichenko I. Design of parallel link mobile robot manipulator mechanisms based on function-oriented element base. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 4/7(100). P. 54–64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174613>.

33. Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk V., Antoshchenkov R. Investigations of the Dynamics of a Four-Element Machine-and-Tractor Aggregate. *Acta Technologica Agriculturae*. 2019. Vol. 22(4). P. 146–151. <https://doi.org/10.2478/ata-2019-0026>.

34. Galych I., Antoshchenkov R., Antoshchenkov V., Lukjanov I., Diundik S., Kis O. Estimating the dynamics of a machine-tractor assembly considering the effect of the supporting surface profile. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 1/7(109). P. 51–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225117>.

35. Dzyuba O., Dzyuba A., Polyakov A., Volokh V., Antoshchenkov R., Mykhailov A. Studying the influence of structural-mode parameters on energy efficiency of the plough PLN-3-35. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 3/1(99). P. 55–65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169903>.

36. Tkachuk M. M., Grabovskiy A., Tkachuk M. A., Zarubina A., Lipeyko A. Analysis of elastic supports and rotor flexibility for dynamics of a cantilever impeller. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. № 1741(1). No 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012043>.

37. Heisel U., Strytinsky S., Sidorco V., Filatov Yu., Storchac M. Development of controllable spherical fluid friction hinges for exact spatial mechanisms. *German Academic Society for Production Engineering*. 2011. Vol. 1. P. 62–71. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-010-0291-9>.

38. Rezvaya K., Krupa E., Shudryk A., Drankovskiy V., Makarov V. Solving the hydrodynamical tasks using CFD programs. *3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*. 2018. Vol. 1. No 8308004. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559548>.

39. Gentner Ch., Sallaberger M., Widmer Ch., Braun O., Staubli T. Numerical and experimental analysis of instability phenomena in pump turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2012. Vol. 15(3). No 0320422. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/3/032042>.



40. Panchenko A., Voloshina A., Kiurchev S., and others. Development of the universal model of mechatronic system with a hydraulic drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 4/7(94). P. 51–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139577>.
41. 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. T. 1021. No 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012037>.
42. 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>.
43. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А. Надійність конструкції роторів планетарного гідромотора. *Праці ТДАТУ*. 2020. Вип. 20, т. 2. С. 23–35. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-2-23-35>.
44. 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>.
45. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А., Нестеренко К. В. Вплив конструктивних особливостей системи роторів планетарного гідромотору на зміну його вихідних характеристик. *Праці ТДАТУ*. 2021. Вип. 21, т. 4. С. 61–77. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-2-61-77>.
46. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Волошин А. А. Вплив конструктивних особливостей розподільної системи планетарного гідромотору на зміну його функціональних параметрів. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-1>.
47. 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>.
48. Панченко А. І., Волошина А. А., Панченко І. А., Пастушенко С. І. Обґрунтування розташування вікон розподільних систем планетарних гідромашин. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 4. С. 3–20. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-4-3-20>.
49. 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>.

50. Панченко А. І., Волошина А. А., Мітков В. Б., Панченко І. А., Нестеренко К. В. Динаміка зміни вихідних характеристик мехатронних систем з планетарними гідромоторами. *Праці ТДАТУ*. 2021. Вип. 21, т. 2. С. 3–20. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-2021-21-2-3-20>.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2023 р.

A. Panchenko¹, A. Voloshina¹, V. Mitkov¹, A. Voloshin²

¹**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

²**Melitopol Vocational College of TSATU**

INFLUENCE OF DESIGN FEATURES OF PLANETARY HYDROMOTORS ON CHANGING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC DRIVES OF MECHATRONIC SYSTEMS OF SELF-PROPELLED VEHICLES

Summary

The work of mechatronic systems with a hydraulic drive of active working bodies of self-propelled machines is accompanied by oscillatory processes associated with the technical imperfection of the actuators of the hydraulic drive, which causes significant fluctuations in pressure and flow of the working fluid. One of the main elements that cause uneven changes in the output characteristics of hydraulic drives are hydraulic motors. The uneven output characteristics of planetary hydraulic motors are due to the manufacturing error of the toothed surface of their rotors and the pulsation of the working fluid flow in distribution systems. In this regard, the issues of studying the influence of the design features of planetary hydraulic motors on the change in the dynamic characteristics of hydraulic drives in order to stabilize them are an urgent problem. As a result of the research, the initial data and initial conditions are substantiated, which make it possible to simulate transient processes in hydraulic drives during the operation of self-propelled equipment. A structural-functional diagram of a dynamic model of a hydraulic drive has been developed, taking into account the operating conditions of self-propelled equipment, which makes it possible to simulate transient processes occurring in hydraulic drives of mechatronic systems under the operating conditions of self-propelled equipment, depending on the design features of the displacement and distribution systems of a planetary hydraulic motor. Changes in the stability of the dynamic characteristics of hydraulic drives are determined under the influence of the design features of the displacement and distribution system of planetary hydraulic motors under the conditions of operation of self-propelled vehicles. It has been established that the acceleration time of hydraulic motor No. 2 is 12% less than that of hydraulic motor No. 1, while at steady motion, pressure and torque fluctuations of hydraulic motor No. 2 are less by 34% and 17%, respectively, compared with the initial characteristics of hydraulic motor No. 1. Such changes are due to a decrease in the gap between the teeth of the displacement system rotors and the elimination of fluctuations in the flow area of the hydraulic motor distribution system No. 2.

Keywords: transient processes, dynamic model, structural-functional diagram, functional parameters, output characteristics.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-27-40

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

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

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

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА ПУЛЬСАЦІЙНОГО ГОМОГЕНІЗАТОРА МОЛОКА

Анотація. Однією з актуальних задач харчової промисловості є розробка високоефективних гомогенізаторів-диспергаторів рідких емульсій зі зниженими енерговитратами. Одним з перспективних напрямів вирішення цієї задачі є дослідження, розробка та впровадження пульсаційного гомогенізатора. Принцип дії такої машини – диспергування жирової фази при інтенсивному коливальному русі поршня за рахунок створення високих прискорень емульсії, які виникають в отворах поршня. Важливим етапом цього завдання є розробка експериментального зразка дослідного гомогенізатора. Тому мета даної статті – створення експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора, придатного для проведення експериментальних досліджень процесу пульсаційної гомогенізації молока. В статті наведені вимоги до розробленої установки, характеристики, необхідні розрахунки основних вузлів машини (технологічні, конструктивні та гідравлічні). Наведено фото розробленої установки та описаний принцип її дії. Розроблений експериментальний зразок необхідний дослідникам процесів гомогенізації та диспергування емульсій в харчовій, переробній, хімічній галузях промисловості а також сільському господарстві при проектуванні та будівництві машин відповідних галузей.

Ключові слова. гомогенізація, диспергування молока, емульсія, дисперсність, експериментальний зразок, пульсаційний гомогенізатор.

Постановка проблеми. Гомогенізація є широко використовуваною технологічною операцією в різних галузях промисловості, таких як сільське господарство, хімічна промисловість та виробництво харчових продуктів. В основному використовується для отримання дрібнодисперсних емульсій. Завдяки гомогенізації запобігає розшаруванню дисперсних фракцій (жир-вода) під час зберігання таких харчових продуктів, як вершки, питне молоко, ячні меланжі та суміші на їх основі. Також його використовують у виробництві комбінованого згущеного молока, сумішей для морозива, майонезу, маргарину, кетчупу і навіть корму для телят. [1, 2]. Показано, що процес гомогенізації частинок жиру до мікроскопічних



розмірів підвищує харчову цінність і покращує сенсорні та смакові властивості молока, а також зменшує втрати молочного жиру, цінного компонента молока [3]. Проте обладнання, яке зараз використовується для гомогенізації, має кілька суттєвих недоліків і не відповідає сучасним стандартам якості та енергоефективності. Наприклад, найбільш поширені клапанні гомогенізатори споживають до 8-9 кВт·год/т [4, 5]. За розрахунками, за умови зниження питомої енергоемності до 1,5-2 кВт·год/т, при обсягах виробництва молочної продукції в Україні – на рівні минулого року, лише економія електроенергії становитиме не менше 24 мільйона гривень.

Створення нових гомогенізаторів, а також створення теорій, що описують руйнування жирових кульок під час гомогенізації, є складним процесом, який вимагає створення експериментального прототипу. В даний час існує дефіцит інформації щодо етапів розробки дослідницьких установок гомогенізаторів. Хоча фотографії та схеми цих установок, які використовувалися в експериментах, можна знайти в літературі [6-8], автори зазначених робіт не надають детального опису покрокових процедур, пов'язаних зі створенням таких експериментальних установок.

Аналіз останніх досліджень. Одним із найбільш перспективних методів руйнування (диспергування) крапель жиру в молоці є інтенсивний вплив імпульсів на гідродинамічне середовище (емульсію). Прикладом конструкції, яка реалізує такий процес, є імпульсний гомогенізатор. В ньому емульсія утворюється завдяки зворотно-поступальному руху поршня [9, 10]. Зазвичай поршні мають форму пластин або дисків з отворами, закріплених на вертикальних штоках для здійснення зворотно-поступального руху. Рух ударного поршня вниз або вгору викликає рух дисперсної фази зі швидкістю $v_{р1}$, а молочка плазма (дисперсійне середовище) при цьому рухається навколо жирової частки в протилежному напрямку під дією сили інерції F_i . (рис. 1) [11, 12].

Модель подрібнення частинок жиру гідравлічною турбулентністю заснована на припущенні, що дисперсійне середовище захоплює рухомі частинки жиру і з урахуванням цього формується відносний рух середовища і частинок. Підкреслюється важлива роль прискорення частинок жиру [13, 14]. Основними характеристиками, які відіграють найважливішу роль при виборі типу гомогенізатора, є: продуктивність, ступінь дисперсності та енергоспоживання процесу. Тому рекомендовано за цими показниками провести порівняльну характеристику дослідного зразка пульсаційного гомогенізатора з найбільш перспективними типами гомогенізаторів (табл. 1.1) [15-17].

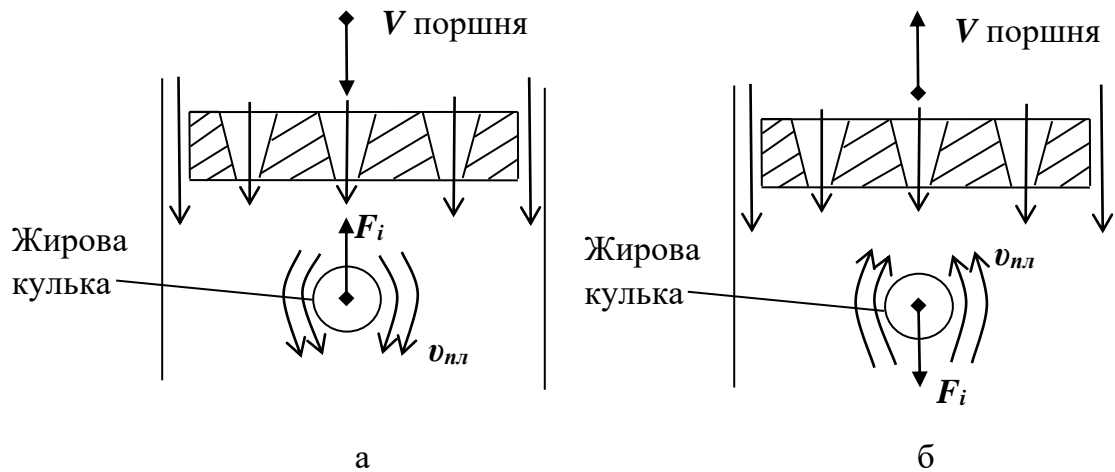


Рис. 1. Схема виникнення сил інерції при імпульсній гомогенізації при русі поршня-ударника: а – вниз; б – вверх.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика різних типів гомогенізаторів

Тип гомогенізатора	Продуктивність, т/год	Мінімальний діаметр часток після гомогенізації, мкм	Питомі енерговитрати, кВт·год/т
Клапанний А1-ОГ2М-2,5	2,5	0,75	7,2
Клапанний, Rannie R37 45.81	4,7	0,75	6,5
Сопловий, ОГВ	1	1,0	4,4
Ультразвуковий (магніострикційний)	0,3	0,8	13,3
Пульсаційний гомогенізатор	2,5	0,8	1,1

Порівняльна характеристика найбільш перспективних гомогенізаторів показує, що дослідний зразок пульсаційного гомогенізатора молока забезпечує ступінь дисперсності молочного жиру на рівні кращих гомогенізаторів і на стандартному рівні, а питомі витрати енергії нижчі в 6-8 разів [18].

Формування мети статті (постановка завдання). Мета даної статті – розробити експериментальний зразок пульсаційного гомогенізатора, який необхідний для проведення експериментальних досліджень процесу пульсаційної гомогенізації молока. Така методика необхідна науковцям та дослідникам для прогнозування перспективності та доцільності впровадження пульсаційного



гомогенізатора замість існуючих клапанних гомогенізаторів з питомими енерговитратами від 7 кВт·год/т готової продукції.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити вимоги до розробленої установки;
- привести необхідні розрахунки основних вузлів машини (технологічні, конструктивні та гідравлічні);
- розробити установку та описати конструкцію та принцип дії експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора..

Основна частина. При розробці експериментального зразка струминного гомогенізатора використовуються покупні (стандартні) вироби та знов розроблювальні (рама, ємність для молока та вершків, гомогенізований вузол, опора під манометр та насос). Для виготовлення знов розроблювальних виробів використовуються універсальне металообробне обладнання та верстати. Необхідність у використанні нестандартного обладнання та оснащення відсутня.

Для забезпечення зручності збирання, налагодження, регулювання та обслуговування установки, більшість частин виконані відкритими. Такий тип конструкції забезпечує легкий доступ до вузлів виробу, його регулювання й налагоджування.

Конструкція експериментального зразка струминного гомогенізатора досить легко збирається і є технологічною. Обов'язковою умовою перед використанням установки є перевірка щільності з'єднання трубопроводів за допомогою води при номінальному режимі роботи насосу. Підтікання не припустимі, тому, якщо виявляється факт невідповідності, то слід перевірити справність трубопроводів, фітингів і арматури та момент затягування хомутів.

При виготовленні експериментального зразка струминного гомогенізатора молока до матеріалів та покупних деталей висувалися наступні технічні вимоги [19]:

- деталі та вузли установки, що контактують з молоком та молочними продуктами (ємність для молока, ємність для вершків, гомогенізований вузол) виготовляються з високоякісної харчової корозійностійкої сталі (наприклад X18N9T, X18 N10T тощо);
- деталі та кріплення, що не контактують з продуктом (рама, опори, елементи кріплення) виготовляються з вуглецевої конструкційної сталі загального призначення (Ст.3, Ст.5, сталь 20, сталь 30 тощо);
- насос, який використовується в експериментальному зразку струминного гомогенізатора призначений для перекачування молочних продуктів, з проточною частиною із харчової бронзи і дозволяє забезпечувати необхідний тиск рідини;
- електродвигун в установці використовується одно- або трифазний асинхронний, загального призначення;



– гнучкий трубопровід виконується з ПВХ, призначеного для харчових продуктів;

– трубопроводи та гідравлічне обладнання високого тиску (рукав, вентиль, запірні арматура) виготовляються з легованої корозійної харчової сталі, латуні або міді.

Вихідними даними для розрахунку експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора є необхідний середній діаметр жирових кульок молока d_k , що регламентується технічним завданням ($d_k < 1$ мкм) і продуктивність гомогенізатора Q_z [20, 21].

Найбільш високий ступінь гомогенізації мають клапанні машини, середній діаметр жирових кульок після обробки в яких становить менше 0,8 мкм. Такого ступеня дисперсності достатньо для більшості технологічних процесів виробництва молока та молочних продуктів. Тому такий середній діаметр жирової кульки приймаємо за розрахункове. З метою заощадного використання сировини для досліджень, необхідно підтримувати продуктивність гомогенізатора на мінімальному рівні. Виходячи з технічного завдання обираємо $Q_z = 500$ кг/год ($1,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$).

Основними параметрами експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора, які необхідно визначити є: амплітуда та частота коливань поршня, геометричні параметри поршня та необхідна для роботи потужність. Для розробки методики розрахунку цих параметрів використані результати теоретичних досліджень пульсаційної гомогенізації, викладені в 1 томі цього звіту.

Згідно з результатами теоретичних досліджень пульсаційного гомогенізатора, для підвищення ефективності гомогенізації необхідно підвищувати частоту вібрації поршня. Тому для приводу експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора обираємо привід з частотою обертання 6000 об/хв (100 с^{-1}), яка розповсюджені та доступні в серійному виробництві.

Мінімальну амплітуду s коливань поршня експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора для диспергування жирової фази молока визначимо як [22]

$$s = \frac{K_o}{2\varphi} \left(\frac{K_z}{d_k \pi n} \right)^2, \quad (1)$$

де K_o – коефіцієнт перфорації поршня;

φ – коефіцієнт швидкості потоку в отворах поршня;

n – частота коливань поршня, с^{-1} ;

K_z – коефіцієнт гомогенізації, для зразка, що розробляється $K_z = 225$.

$$s = \frac{0,03}{2 \cdot 0,96} \left(\frac{100}{0,8 \cdot 3,14 \cdot 100} \right)^2 = 0,0024 \text{ м.}$$



Згідно з результатами теоретичних досліджень експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора, для підвищення ефективності гомогенізації необхідно підвищувати частоту вібрації поршня. Тому для приводу гомогенізатора необхідно обирати електродвигуни з найбільшою частотою обертання валу.

Аналітично встановлено підвищення ефективності пульсаційного гомогенізатора при використанні конічних отворів поршня з максимальним коефіцієнтом живого перетину поршня. При зменшенні малого діаметра конусного отвору d_o , підвищується вірогідність облітерації внутрішнього діаметра отворів поршня, що знижує працездатність гомогенізатора. Для зменшення облітерації мінімальне значення d_o приймаємо 2 мм.

Для конічних отворів з метою забезпечення міцності поршня, враховуючи необхідність зменшення його щільності і використання для виготовлення поршня харчових пластмас, мінімальна товщина поршня визначається залежно від діаметра отворів [23]

$$h_n \geq 6d_o, \quad (2)$$

$$h_n \geq 6 \cdot 2 = 12 \text{ мм.}$$

Більший діаметр конічних отворів поршня гомогенізатора визначаємо як

$$D_o = h_n \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} + d_o, \quad (3)$$

де $\theta=48-50^\circ$ – кут конусності, для якого коефіцієнт швидкості $\varphi_m=\max=0,96$.

$$D_o = 12 \cdot \operatorname{tg} \frac{50}{2} + 2 = 16 \text{ мм.}$$

Необхідний внутрішній діаметр поршня експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора визначимо за формулою

$$D = \sqrt{\frac{2KQ}{\pi sn}}. \quad (4)$$

Мінімальну кратність обробки за результатами аналітичних досліджень приймаємо $K=12$.

$$D = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 1,35 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,0024 \cdot 100}} = 0,065 \text{ м.}$$

Розрахункове значення кількості отворів поршня N

$$N = 0,9 \left(\frac{D}{D_o} \right)^2, \quad (5)$$

$$N = 0,9 \left(\frac{0,065}{0,016} \right)^2 = 14.$$



Розраховуємо коефіцієнт живого перетину поршня

$$K_o = \frac{Nd_o^2}{D^2}, \quad (6)$$

$$K_o = \frac{14 \cdot 2^2}{65^2} = 0,013.$$

Необхідну потужність електродвигуна приводу експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора визначимо за результатами аналітичних досліджень з урахуванням коефіцієнта корисної дії приводу η [24]

$$P_{\text{об}} = \frac{\pi^3 (1 - K_o) D^2 n^2 s^2}{\eta} \left(\pi n (0,32 h_n \rho_n + 0,1 C \rho_m s) + 0,11 \frac{\rho_m}{K_o} \right), \quad (7)$$

де C – коефіцієнт опору руху поршня.

$$P_{\text{об}} = \frac{3,14^3 (1 - 0,013) 0,065^2 100^2 0,0024^2}{0,7} \times \left(3,14 \cdot 100 (0,32 \cdot 0,012 \cdot 500 + 0,1 \cdot 12 \cdot 0,0024) + 0,11 \frac{1030}{0,013} \right) = 440 \text{ Вт}$$

Установка, що розробляється призначена для проведення експериментальних досліджень процесу гомогенізації, тобто необхідна частота коливання поршня повинна регулюватись в сторону збільшення від розрахункового параметра до 10000 об/хв.

Виходячи з розрахованих параметрів в якості приводу обираємо установку УШМ WD2400-150 номінальною потужністю 2,4 кВт та частотою обертання 11000 об/хв.

Насос подачі молока повинен забезпечувати тиск – до 2 атм. Та подачу – від 500 л/год. За цими параметрами підбираємо електронасос G20i95 (Gifto) з номінальною потужністю 500 Вт, номінальним тиском – до 5 атм. та подачею до 2000 л/год [25].

При розрахунковій подачі такий насос буде споживати

$$P_n = \frac{Q_n P_n}{\eta_n}, \quad (8)$$

де Q_n – подача насоса, м³/с;

P_n – тиск насоса, Па;

η_n – коефіцієнт корисної дії насоса.

$$P_n = \frac{1,35 \cdot 10^{-4} 500000}{0,65} = 90 \text{ Вт.}$$

Таким чином загальна максимальна споживана потужність експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора становить 2400+500=2900 Вт. Загальна розрахункова споживана потужність 440+90=530 Вт.



Питомі витрати енергії експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора при розрахунковому режимі роботи [26]

$$E_{num} = \frac{P}{Q_2}, \quad (9)$$

$$E_{num} = \frac{530}{500} = 1,1 \text{ Вт/кг},$$

або 1,1 кВт/т молока.

Вибір необхідного діаметрів трубопроводів машини залежить від значення витрат продукту, що транспортується та його виду. Максимальна швидкість руху рідини (емульсії) по трубах залежить від її в'язкості та повинна надавати ламінарний режим руху. Такий режим встановлюється при русі продукту зі швидкістю 0,5 – 1,5 м/с.

При перекачування молока діаметр трубопроводу, який з'єднує насос з форсунками d_m , м, розраховується за формулою

$$d_T \geq 2 \sqrt{\frac{Q}{3600 \cdot \rho_m \cdot \pi \cdot v_m}}, \quad (10)$$

$$d_T \geq 2 \sqrt{\frac{500}{3600 \cdot 1030 \cdot 3,14 \cdot 1,5}} = 0,011 \text{ м}.$$

Тобто внутрішні діаметри трубопроводів подачі знежиреного молока повинні бути більше 11 мм.

Підшипники ковзання кривошипного механізму обчислюють на питомий тиск

$$P = \frac{P_{\Pi}}{F} \leq [p], \quad (11)$$

де P – навантаження на підшипник, кг;
 F – площа опорної поверхні, м²;

$$P_{\Pi} = \frac{2M_{кр}}{d_6}; \quad (12)$$

$M_{кр} = \frac{P}{n}$ – крутний момент, Н·м;

d_6 – діаметр валу, м.

$$M_{кр} = \frac{2400}{100} = 24 \text{ Н·м},$$

$$P_{\Pi} = \frac{2 \cdot 24}{0,030} = 1600 \text{ Н},$$

$$P = \frac{1600}{0,007} = 0,2 \cdot 10^6 \leq 80 \cdot 10^6 \text{ Н/м}.$$

При розрахунку підшипників по обмеженню нагріву витримують співвідношення

$$P_{II}\nu = [P_{II}\nu], \quad (13)$$

$$\nu = \frac{\pi d_o n}{60}, \quad (14)$$

$$\nu = \frac{3,14 \cdot 0,04 \cdot 350}{60} = 0,732 \text{ м/с.}$$

$$205000 \cdot 0,732 = 0,15 \cdot 10^6.$$

Для бронзових підшипників $P_{II} = 80 \text{ кг/см}^2 = 8 \text{ МПа}$; $\nu = 3 \text{ м/с}$; $P_{II}\nu = 24 \text{ МПа/(м/с)}$. Тобто умова максимального нагріву витримується.

На рис. 2 представлений загальний вид експериментального зразка для пульсаційної гомогенізації молока.

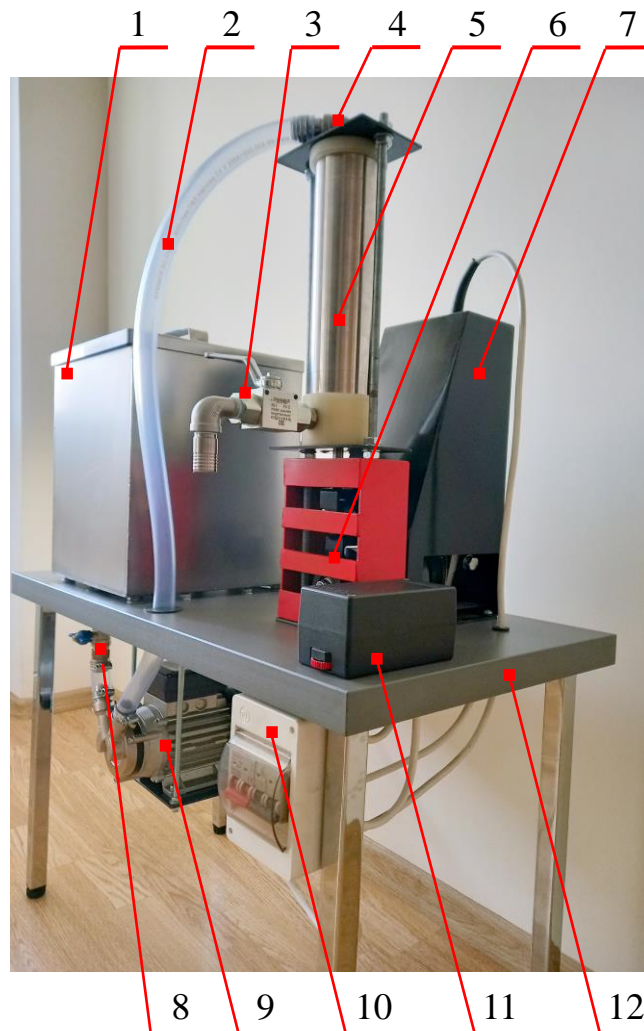


Рис. 2. Загальний вигляд експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора

1 – приймальна ємність; 2 – патрубок подачі продукту в камеру; 3 – випускний вентиль; 4 – перепускний вентиль; 5 – робоча камера; 6 – кривошипний механізм; 7 – електродвигун приводу обертання кривошипу; 8 – перепускний вентиль; 9 – насос; 10 – електричний вимикач; 11 – пульт керування; 12 – станина



Розроблена експериментальна установка пульсаційного гомогенізатора молока забезпечує зміну:

- подачу продукту в камеру гомогенізатора;
- частоти та амплітуди коливань поршня;
- виду, форми та матеріалу поршня;
- кількості, діаметра, розташування і форми отворів поршня.

Результати випробувань представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати лабораторних випробувань пульсаційного гомогенізатора

№ з/п	Найменування показників	Вимоги	Результати випробувань	Похибка вимірювань
1	Питомі енерговитрати	до 3,6 кВт·год/т	1,5 кВт·год/т	5%
2	Середній діаметр жирових кульок молока після гомогенізації	до 1 мкм	0,9 мкм	4%
3	Габаритні розміри (довжина x ширина x висота)	до 1200x1000x1600 мм	800x410x935 мм	2%
4	Маса	до 1200 кг	41 кг	3%
5	Продуктивність	0,5 – 5 т/год	0,8 т/год	5%

Розроблений експериментальний зразок необхідний дослідникам процесів гомогенізації та диспергування емульсій в харчовій, переробній, хімічній галузях промисловості а також сільському господарстві при проектуванні та будівництві машин відповідних галузей.

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблена експериментальна установка пульсаційного гомогенізатора молока, який необхідний для проведення досліджень процесу пульсаційної гомогенізації. Описані етапи створення установки. Приведено технічні вимоги до продукції, що купується і матеріалів, що використовуються в експериментальному зразку пульсаційного гомогенізатора.

Приведено основні розрахунки експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора. Для установки з продуктивністю 500 кг/год. згідно розрахунку в якості приводу було обрано установку УШМ WD2400-150 номінальною потужністю 2,4 кВт та частотою



обертання 11000 об/хв. Загальна максимальна споживана потужність експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора становить 2900 Вт.

Наведені результати лабораторних випробувань пульсаційного гомогенізатора. Питомі витрати енергії експериментального зразка пульсаційного гомогенізатора при розрахунковому режимі роботи становлять 1,5 кВт/т. молока. Середній діаметр жирових кульок молока після гомогенізації – 0,9 мкм. Продуктивність – до 800 кг/год. Розроблений експериментальний зразок необхідний дослідникам процесів гомогенізації та диспергування емульсій в харчовій, переробній, хімічній галузях промисловості а також сільському господарстві при проектуванні та будівництві машин відповідних галузей.

Список використаних джерел

1. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Івженко А. О., Левченко Л. В. Аналіз конструкцій гомогенізаторів молочної промисловості. *Праці ТДАТУ*. 2016. Вип. 16, т. 1. С. 9–15.

2. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Левченко Л. В. Аналітичні дослідження енерговитрат пульсаційного гомогенізатора молока. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2016. Вип. 1(23). С. 170–181.

3. Дейниченко Г. В., Самойчук К. О., Левченко Л. В. Ефективність гомогенізації молока у пульсаційному гомогенізаторі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 1(84). С. 116–121.

4. Кюрчев С. В., Самойчук К. О., Ломейко О. П. Методика розрахунку експериментального зразка струминного гомогенізатора молока. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-1>.

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

6. Кравців Р. І., Кравців В. І., Островський Я. Ю. Молоко і молочні продукти: Львів: ЛА Піраміда, 2001. 310 с.

7. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом, 2007. 264 с.

8. Паляничка Н. О., Антонова Г. В. Експериментальні дослідження впливу основних факторів на ступінь гомогенізації в імпульсному гомогенізаторі. *Праці ТДАТУ*. 2016. Вип. 16, т. 1. С. 21–28.



9. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв: підручник / К. О. Самойчук, В. С. Бойко, В. О. Олексієнко [та ін.]. Київ: ПрофКнига, 2020. 428с.

10. Самойчук К. О., Паляничка Н. П., Верхоланцева В. О., Левченко Л. В. Методика розрахунку потужності пульсаційного гомогенізатора молока. *Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences: Conference proceedings: international research and practice conference*, 27–28 грудzień 2017 р. Lublin: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2017. С. 176–179.

11. Hakansson A., Fuchs L., Innings F., Revstedt J., Trägårdh C., Bergenståhl B. Velocity measurements of turbulent two-phase flow in a high-pressure homogenizer model. *Chem. Eng. Commun.* 2013. Vol. 200. P. 93–114. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.691921>

12. Yong A., Islam M., Hasan N. The Effect of pH and High-Pressure Homogenization on Droplet Size. *Sigma J. Eng. Nat. Sci.* 2017. Vol. 35. P. 1–22. <https://doi.org/10.26776/IJEMM.02.04.2017.05>

13. Wang X., Wang Y., Li F., Li L., Ge X., Zhang S., Qiu T. Scale-up of microreactor: Effects of hydrodynamic diameter on liquid–liquid flow and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.* 2020. Vol. 226. No 115838. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115838>

14. Valencia Flores D., Hernández Herrero M., Guamis B., Ferragut V. Comparing the Effects of Ultra-High-Pressure Homogenization and Conventional Thermal Treatments on the Microbiological, Phys, and Chem Quality of Almond Beverages. *J. Food Sci.* 2013. Vol. 78. P. 199–205. https://doi.org/10.1111/1750_3841.12029

15. Acharyaa S., Mishrab V., Patelc J. Enhancing the mixing process of two miscible fluids: A review. *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2341. No 030025 <https://doi.org/10.1063/5.0051818>

16. Thomas S., Ameel T., Guilkey J. Mixing kinematics of moderate Reynolds number flows in a T-channel. *Phys. Fluids*. 2010. Vol. 22. No 031601. <https://doi.org/10.1063/1.3283063>

17. 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.

18. Rayner M., Dejmek P. Engineering Aspects of Emulsification and Homogenization in the Food Industry; CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2015. 322 p. <https://doi.org/10.1201/b18436>.

19. Morales J., Watts A., McConville J. Mechanical particle-size reduction techniques. *AAPS Adv. Pharm. Sci.* 2016. Vol. 22. P. 165–213. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42609-9_4.

20. Монтаж експлуатація і ремонт машин та обладнання переробних підприємств. Навчальний посібник: Практикум / В. Ф.



Ялпачик, О. П. Ломейко, В. Г. Циб [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 235с

21. Розрахунки обладнання харчових виробництв: навч. посібник / В. Ф. Ялпачик, С. Ф. Буденко, Ф. Ю. Ялпачик [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2014. 264 с.

22. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: Лабораторний практикум / В. Ф. Ялпачик, Н. П. Загорко, Н. О. Паляничка [та ін.]. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2017. 274 с.

23. Di Marzo L., Cree P., Barbano D. M. Prediction of fat globule particle size in homogenized milk using Fourier transform mid-infrared spectra. *Journal of Dairy Science*. 2016. Vol. 99(11). P. 8549–8560. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11284>

24. Dhankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4(5). P. 1–8. <https://doi.org/10.9790/3021-04540108>

25. Huppertz T. Homogenization of Milk Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, 2011. P. 761–764. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00226-0>

26. Ciron C., Gee V., Kelly A., Auty M. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts. *Int. Dairy J.* 2010. Vol. 20. P. 314–320. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.018>

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.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2023 р.



S. Kiurchev¹, K. Samoichuk¹, V. Yalpachyk¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF THE PULSATION MILK HOMOGENIZER

Summary

One of the urgent tasks of the food industry is the development of highly efficient homogenizers-dispersers of liquid emulsions with reduced energy consumption. One of the promising directions for solving this problem is the research, development and implementation of a pulsating homogenizer. The principle of operation of such a machine is the dispersion of the fat phase during intensive oscillatory movement of the piston due to the creation of high emulsion accelerations that occur in the piston holes. An important stage of this task is the development of an experimental sample of the experimental homogenizer. Therefore, the purpose of this article is to create an experimental sample of a pulsating homogenizer suitable for conducting experimental studies of the pulsating homogenization process of milk. Experimental studies are the most responsible stage, capable of predicting the prospects and expediency of introducing a pulsating homogenizer instead of existing valve homogenizers with a specific energy consumption of 7 kWh/t of finished product. The article provides the requirements for the developed installation, characteristics, necessary calculations of the main components of the machine (technological, structural and hydraulic). A photo of the developed installation and the principle of its operation are described. The main calculations of the experimental sample of the pulsating homogenizer are presented. For an installation with a productivity of 500 kg/h. according to the calculation, the USHM WD2400-150 unit with a nominal power of 2.4 kW and a rotation frequency of 11,000 rpm was chosen as the drive. The total maximum power consumption of the experimental sample of the pulsating homogenizer is 2900 W. The developed experimental sample is necessary for researchers of the processes of homogenization and dispersion of emulsions in the food, processing, and chemical industries, as well as in agriculture during the design and construction of machines in the relevant industries.

Keywords: homogenization, dispersion of milk, emulsion, dispersion, experimental sample, pulsating homogenizer.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-41-62

UDC 678.023.2:621.9.02

I. Mikulionok¹, Dr. Eng. Sc., Prof. ORCID 0000-0001-8268-7229¹National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

e-mail: i.mikulionok@kpi.ua, phone: +380667486565

CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF POLYMER AND RUBBER WASTE SHREDDER DESIGNS

Summary. An extended classification of cutting shredders for the destruction of various household and industrial polymer and rubber wastes has been developed: large-sized, shapes, sheets and films.

The designs of cutting shredders are analyzed depending on the principle of transformation of the processed waste, the type of the action of the cutting tool on the material being processed in time, the technological operation of cutting, the number of grinding stages, the type of the working body movement, the degree of universality of waste processing, the shape of the rotor (rotors), the location of the rotor axis (axes rotors) in space, the shape of the moving cutting elements of rotary shredders, the temperature of waste processing, as well as the degree of mobility of the shredder.

An analysis of the current state and prospects for the use of cutting shredders of polymer and rubber waste suggests that shredders of this type remain the main type of equipment for the destruction of polymer-containing waste for the purpose of their further processing by physical methods. The main efforts are aimed at the creation of universal shredders capable of processing waste of various sizes from various polymers, as well as the most devoid of the disadvantages of traditional cutting shredders, primarily high noise level and relatively low durability of cutting elements.

Keywords: polymer waste, rubber waste, recycling, shredding, cutting shredders.

Formulation of the problem. The wide use of products with the use of polymers and rubber in industry and everyday life causes the problem of disposal of polymer and rubber waste. This is due to both the desire to ensure environmental protection and the saving of valuable chemical raw materials [1–3].

One of the preparatory stages for the utilization of polymer and rubber waste is their destruction (crushing and grinding) in order to transform large-sized waste into powder and crumbs, suitable for further physical and chemical processing [4, 5].

Given the peculiarities of the physical and mechanical properties of polymers and rubbers, primarily their high plasticity and elasticity, such methods of destruction as cutting, abrasion, tearing by compression with simultaneous shear, tearing by compression with simultaneous shear and abrasion are usually used to shred polymer and rubber waste and much less



often – a blow [6].

One of the most common methods of destruction of these materials due to its versatility, as well as the possibility of obtaining a product of the required size and shape, is cutting.

Formulation of the aim of work. The purpose of the work is a critical analysis of the structural and technological design of the destruction of polymer and rubber waste using cutting shredders.

The main part. The analysis of the structural and technological design of cutting shredders of polymer and rubber waste makes it possible to propose their classification in accordance with Fig. 1.

According to the nature of the action of the cutting tool on the processed material in time, there are shredders of continuous and intermittent (periodic, cyclic) action.

Shredders of continuous action are characterized by higher productivity, but shredders of intermittent action are more versatile, as they allow processing waste of various sizes.

According to the technological operation of destruction, there are shredders with the implementation of cutting, sawing, milling, planing, grinding, abrasion, drilling, as well as shear destruction of processed waste.

Cutting is the process of dividing the blank into parts without the formation of chips using scissors (usually alligator or guillotine).

An interesting design of the shredder for cutting PET bottles into large fragments before their final grinding is proposed in the Patent No. CN213648285U. Mounted on one shaft, two groups of curved blades with the help of parasitic gears ensure the rotation of the gears of the specified groups in opposite directions, realizing the cutting of bottles, usually into ring fragments (Fig. 2).

Sawing is the process of dividing the processed material into parts with the formation of chips using saws (most often disc or band saws) – tools with many cutters, usually teeth, for sawing various materials, in particular polymers, plastics and rubber. There are also toothless saws, the cutting edge of which is made in the form of fixed abrasive powder or metal saws with free abrasive (mostly sand, corundum, steel balls, and iron oxide).

Milling is a mechanical processing by cutting the processed material, during which a rotating cutting tool (mill) makes a rotational movement, and the processed material is a translational one.

Among milling shredders, shredders have become the most widespread – single- and double-rotor shredders with a side working surface.

Single-rotor shredders are usually used for preliminary grinding of large-sized waste of various shapes – castings, pipes, rubber products. They are often equipped with a feeder (presser) for forced feeding of crushed raw materials to the working area.

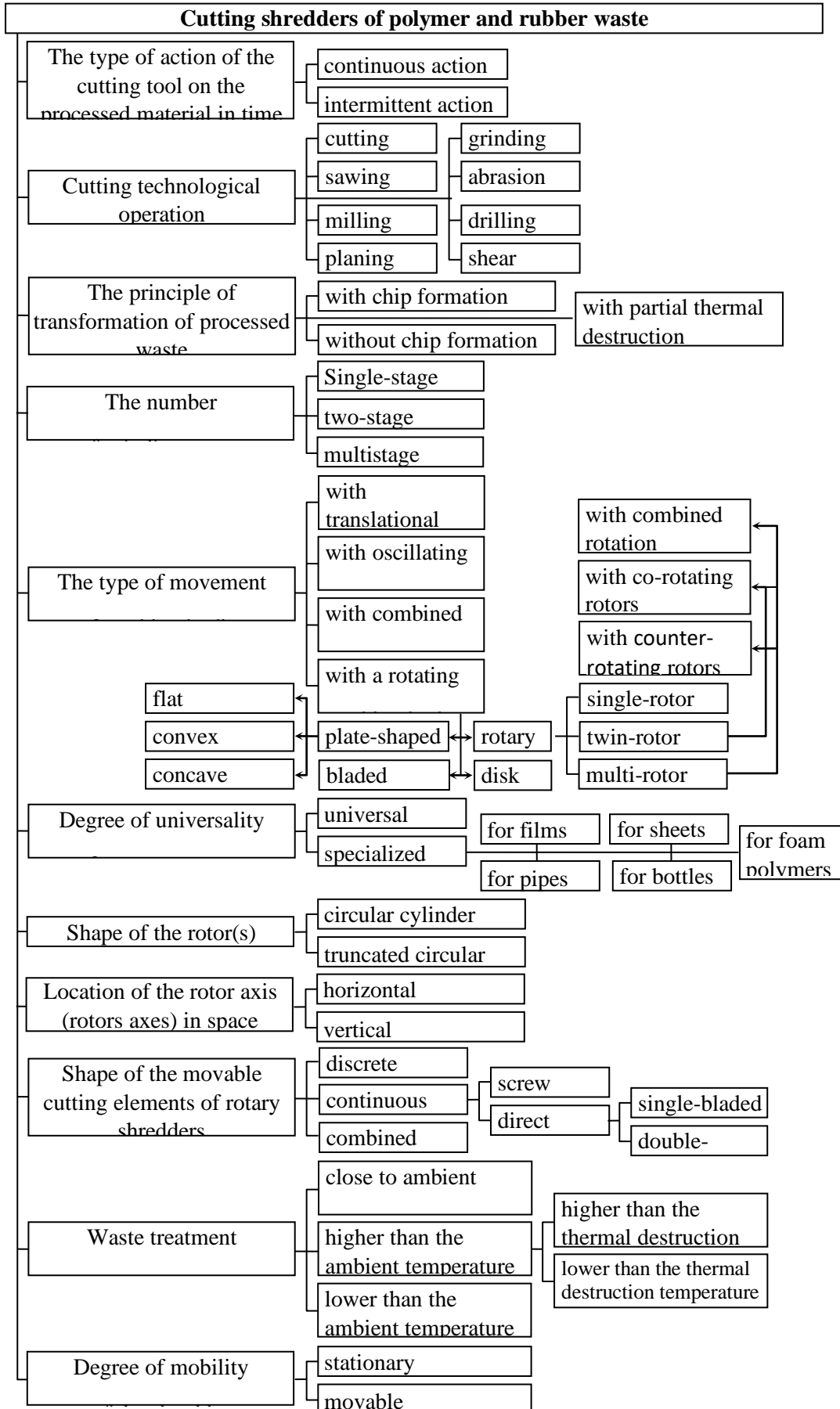


Fig. 1. Classification of cutting shredders for polymer and rubber waste

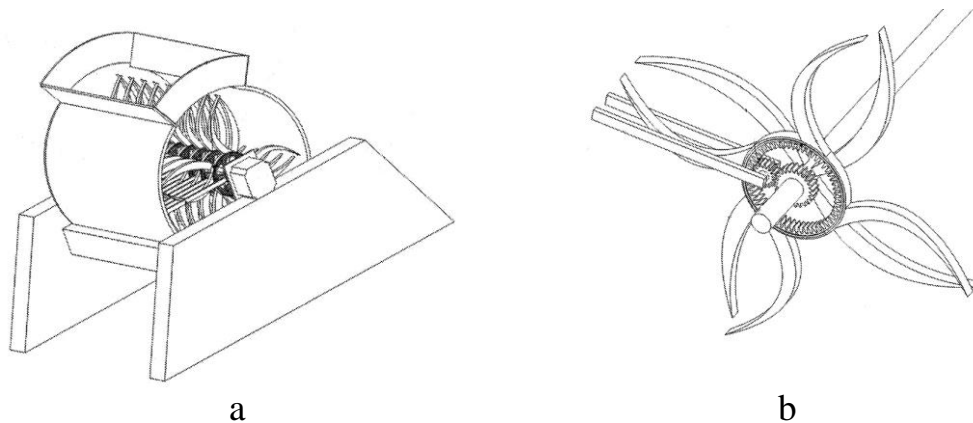


Fig. 2. Rotary shredder for cutting PET bottles (a) that pair of climbs to make the "knives" (b) (Patent No. CN213648285U)

Two-rotor shredders are more versatile, as they enable efficient shredding of such difficult-to-utilize waste as film, non-woven materials, polymer threads and tapes, etc.

A single-rotor shredder contains a rotor with spaced disc saws mounted on it, which pass through the grooves of two stationary comb knives (Patent No. EP0220100A2; Fig. 3). The design works at a slow rotor speed, which significantly reduces the level of noise and vibrations.

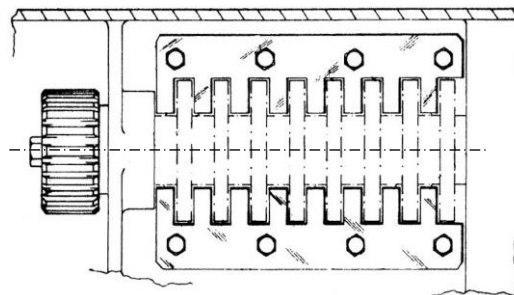


Fig. 3. Single-rotor shredder (Patent No. EP0220100A2)

In a similar shredder, the rotor is made with triangular ring protrusions and depressions, alternating with each other, and a fixed comb knife of the corresponding shape, while in the ring protrusions of the rotor, coots are made with removable triangular-shaped cutting teeth mounted on them, with the formation of a kind of circular saws with removable teeth on the rotor cutting teeth (Patent No. EP0419919A1). The specified shape of the rotor contributes to the additional crushing of processed waste by impact.

The twin-rotor shredder contains two parallel counter-rotating horizontal rotors (Patent Application Nos. WO2004/014559A1, US2005/242221A1). Each rotor of the shredder is made of a set of shaped disk cutters installed with a gap, while not only the disk cutters of another rotor, but also fixed knives in the form of ring sectors are inserted into the gaps between them (Fig. 4).

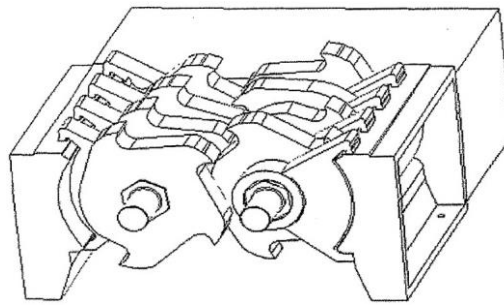


Fig. 4. Two-rotor shredder (Patent Application Nos. WO2004/014559A1, US2005/242221A1)

In Fig. 5 shows examples of common cutting discs for installation on the core (root) of the shredder rotor [7]. These or similar disks are fixed on the core both tightly to each other with the formation of a continuous-discrete structure of cutting elements, and with a gap relative to each other. At the same time, adjacent disks are installed without an angular offset relative to each other or with an angular offset with the arrangement of the corresponding teeth of the disks, for example, along helical lines (Fig. 6 [8]).

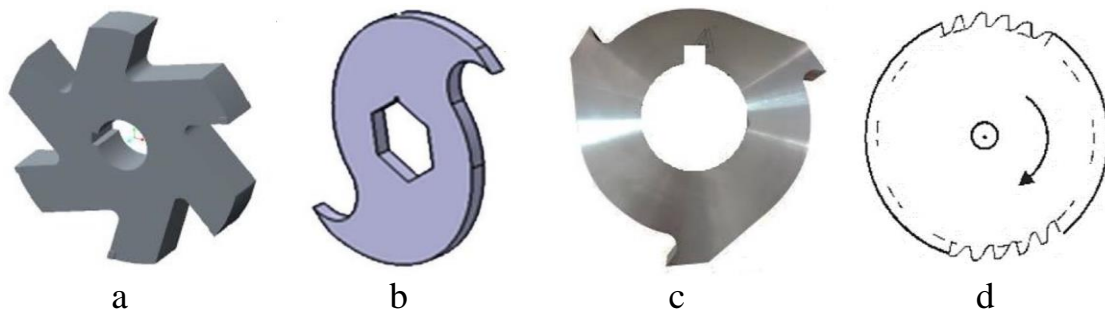


Fig. 5. Shredder blades: with six teeth (a), with two teeth (b), with three teeth (c), and saw-teeth-blade (d) [7]



Fig. 6. Blade with two teeth (a) and shredder rotor composed of such blades (b) [8]

Planing is the process of processing materials by cutting with chip removal, carried out with relative reciprocating movement of the cutting

tool or the processed material.

Grinding is a method of abrasive treatment of the surfaces of solid waste with a tool that has the appearance of a rotating body, the cutting elements of which are many abrasive grains.

Abrasion is a method of separating material particles from the surface of solid waste with the help of a tool (working body) or other particles of processed solid waste as a result of their shear movement in the plane of the processed surface.

Drilling is the process of creating holes in solid waste by cutting with a rotating cutting tool (drill). The corresponding method is described in particular in Patent No. RU2605128C2.

Shear destruction of processed waste is a process of breaking the waste material by applying shear stresses to it in the mass of a solid body (and not in the plane of the processed surface, as during abrasion) [9–12].

The combined sawing-cutting two-blade shredder contains two counter-rotating rotors with teeth in the form of short saws, as well as two rectilinear counter knives fixed on the body (Patent No. CN103521328A, CN203591859U; Fig. 7). The sawing process is carried out between the teeth of the rotors in the space between them, and the cutting process is carried out between the teeth and counter knives.

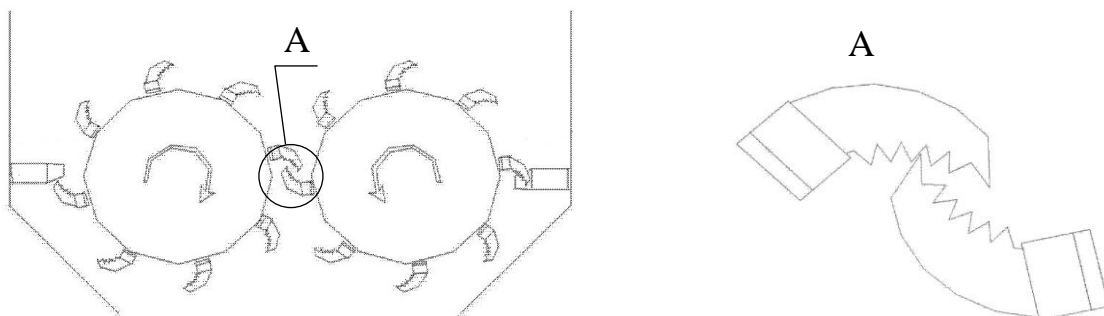


Fig. 7. Sawing and cutting two-bladed shredder (Patent No. CN103521328A, CN203591859U)

According to the principle of transformation of processed waste, there are cutting shredders of polymer and rubber waste, in which the destruction of waste is carried out with the formation of chips, without the formation of chips, as well as with partial thermal destruction of the waste material.

The formation of chips during the processing of polymer and rubber waste is realized by methods of their destruction, which are different from cutting.

With partial thermal destruction of the waste material (thermal cutting), gas-filled polymer waste is usually destroyed. Sometimes this method is also called cutting with a heated string (wire).

To implement thermal cutting, a heated string made of a material with



a high specific electrical resistance is usually used, for example, a nickel-chromium string with a diameter of 0.15–0.5 mm. When heated by an electric current passing through the string, the processed polymer material is heated to a temperature above the melting point (Patent Nos. UA65413U, UA77905U, CH692282A5). At the same time, the cutting speed depends on the diameter and temperature of the string, the type and structure of the waste material (in particular, the density and stiffness of the gas-filled polymer), as well as the relative speed of the string and the treated waste. At the end of the cutting process, the string self-cleans due to evaporation from its surface of the remains of the processed material.

According to the number of grinding stages, there are single-, two- and multi-stage shredders.

A single-stage two-rotor shredder with a vibrating screen located under the rotors makes it possible to separate crushed waste by size into two fractions (Patent No. CN214346760U).

The two-stage rotary shredder contains a casing with pairs of horizontal knife rotors, equipped with individual drives, placed one above the other in mutually perpendicular directions (Patent No. CN208962235U). In a similar shredder, the final grinding unit (second stage) contains not two, but three rotors located in one plane (Patent No. CN213996059U).

In a similar shredder, two sieves are placed under the first pair of rotors, while the upper fraction of the product obtained at the first stage is directed to additional grinding on the second pair of rotors, and the lower fraction is divided on the second sieve into two classes of the finished product (Patent No. CN213377063U).

In another similar shredder, one sieve is placed under the first pair of rotors, the upper fraction of the shredded waste from which is sent to the second pair of rotors for additional grinding, and the lower fraction is the finished product, to which the material crushed on the second pair of rotors is added (Patent No. CN214026625U).

In other two-stage rotary shredders, similar pairs of horizontal knife rotors are also located at different levels, but parallel to each other (Patent No. CN212498517U, CN213382420U, CN214491218U).

The two-stage rotary shredder contains a two-rotor pre-grinding unit and a single-rotor final grinding unit located one below the other (Patent No. CN213500266U).

The two-stage shredder contains a two-rotor unit for pre-grinding and a bladed unit for final grinding located one below the other (Patent No. CN213797577U).

The two-stage shredder contains a two-rotor pre-grinding unit and a final grinding unit located one below the other, made in the form of a vertical shaft with three cutting discs and three ring counter knives fixed

between them on the body, the diameter of which decreases from top to bottom (Patent No. CN213797577U).

In a two-stage shredder, the first stage of destruction is carried out periodically (cyclically) by cutting large-sized waste in several horizontal planes, and the second stage is carried out continuously in a two-rotor shredder, while the resulting product is divided by particle size on a sieve into two fractions (Patent No. CN214293973U; Fig. 8).

A multi-stage (three-stage) shredder is given in the Patent No. CN214111070U. The first two stages of waste destruction are implemented in two-rotor shredders located one below the other, and the third stage in a single-rotor shredder located below them.

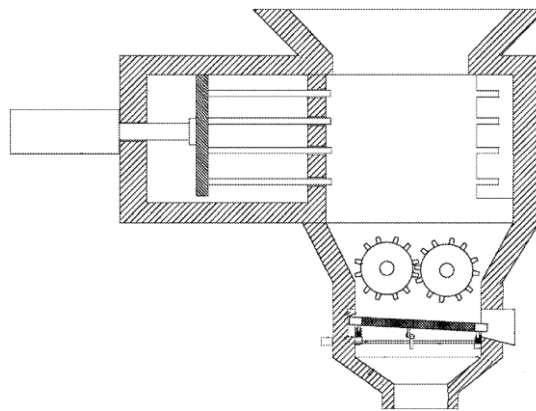


Fig. 8. Two-stage shredder according to Patent No. CN214293973U

A multi-stage (three-stage) shredder is given in the Patent No. CN213593388U. The first stage of waste destruction is implemented in a two-rotor shredder, the second stage is in the final grinding unit, made in the form of a vertical shaft placed in a conical sleeve with four cutting discs, the diameter of which decreases from top to bottom, and the third stage is in a four-rotor shredder.

According to the type of movement of working bodies, there are shredders with rotating working bodies (body), with translational and oscillating movement of the working body, as well as with combined movement of working bodies.

Cutting devices with rotary movement of cutting elements – rotary, plate, blade and disc shredders – have become the most widely used in polymer waste processing industries.

Rotary shredders – shredders with a knife rotor – are used to shred polymer waste of various shapes and sizes (primarily for shredding waste generated in the processes of plastics processing: showers, skimmers, film waste, scrap, etc.)

The scheme of a typical knife rotary shredder with a screw (worm) feeder is shown in Fig. 9.

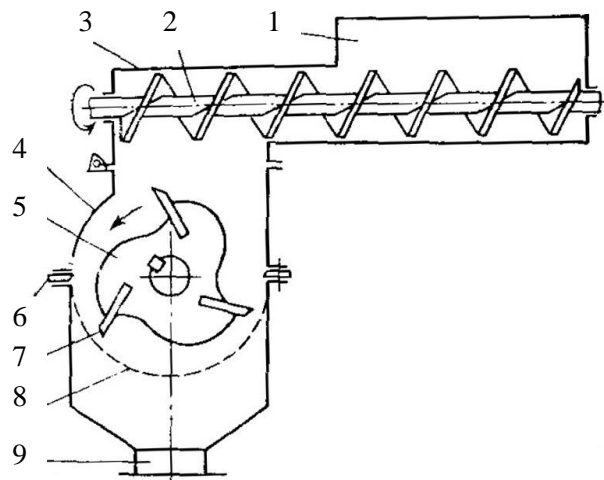


Fig. 9. Scheme of a knife rotary shredder with a screw feeder [13]:

- 1 – loading hopper; 2, 3 – screw and screw feeder housing;
4 – shredder housing; 5 – knife rotor; 6, 7 – fixed and movable knives;
8 – sieve; 9 – unloading branch pipe

The crushed material is loaded into the hopper 1, from which it is captured by the auger 2 located in the housing 3, and will be fed into the cylindrical housing 4, where the knife rotor 5 is installed. The material that has entered the housing is captured by the knife rotor and, falling into the space between with fixed 6 and movable 7 knives, it is chopped. Fragments of the material cut off by the knives are thrown onto the sieve 8 installed in the lower part of the housing 4. If their size is smaller than the size of the sieve cells, they pass through the cells into the discharge nozzle 9, from which the crushed material enters the receiving container or is fed to the reprocessing.

A significant disadvantage of high-speed rotary crushers is the high noise level, which reaches 115 dB. The main sources of noise are the collision of particles of crushed material with the body, knives and each other, as well as the presence of turbulent air flows. To reduce the noise level, sound insulation of the hopper and loading hole is used, which makes it possible to reduce the noise level to 90–95 dB. The use of massive housings and reduced rotation frequencies of the rotors reduces the noise level by another 10–15 dB, but this significantly complicates the design of the shredder [13].

The shape and size of the loading hopper are determined by the nature and dimensions of the source material. The shredder is fed manually or automatically. The area of the loading hole is determined by the size of the waste to be shredded and reaches 1.5 m². The capacity of the receiving hopper is usually chosen to be sufficient to ensure continuous operation of the shredder with periodic loading.

Inclined hoppers – chutes designed to receive long fragments of



rejected products are used for crushing waste from the production of pipes and profiles. To reduce the ejection of crushed material from the loading hopper, elastic curtains or metal doors are used.

The design of the rotor depends on the operating conditions. In the case of shredding film waste, hollow waste (thin materials, light conditions), welded and folded rotors are used, which are frames with knives attached to them. In crushers designed for crushing large waste, the rotor simultaneously plays the role of a flywheel. Therefore, it is made in the form of a solid cylinder. For particularly difficult working conditions when grinding dense massive waste, rotors are made in the form of special cutters.

The quality of grinding and the power consumption depend significantly on the design of the rotor and knives, especially the movable ones (located on the rotor).

The number of knives, their location and shape are chosen in such a way that at each moment of time only one moving knife is involved in cutting the material in contact with the stationary knife. The design of fastening the knives to the drum should ensure the transfer of dynamic loads from cutting directly to the body of the rotor, and not the device of fastening the knives.

The number of movable knives is usually from two to four, but designs with 27 movable knives are known. The number of fixed knives is usually two, although designs with 12 fixed knives are known. The profile of the knives depends on the properties of the crushed material. Taking into account the rapid wear of working edges, knives are made with several cutting edges (up to four) and rearranged as they wear [13].

The crushed material is discharged from the crusher chamber through a metal mesh with a cell size of 1–15 mm located in the lower part of the chamber.

The single-rotor shredder is equipped with two counter-rotating rolls for preliminary flattening of bulky hollow waste, such as bottles, cans or other containers (Patent No. FR2711552A1). At least one of the rolls is equipped with heaters to give the flattened waste the necessary flexibility before it is crushed.

A shredder with a similar principle of action is proposed in the Patent No. JP2007175851A.

The rotor of a single-rotor shredder is made in the form of a horizontally located regular right triangular prism with straight knives fixed on its side faces (Patent Application No. WO03/103839A1). The advantage of the design is high reliability and convenience of fixing the knives on the rotor. A rotor of a similar shape is also proposed in the Patent No. CN213533365U.

Among shredders with a rotating working body, in addition to single-

rotor shredders, two-rotor shredders are also used, which contain two mostly counter-rotating parallel rolls with longitudinal knives (often made in the form of flutes) and are usually used for shredding large-sized waste, for example, used pneumatic tires ([3], Patent No. KR102264246B1).

A two-rotor shredder with disk knives that are spaced apart from each other and partially fit into the gaps between the knives of the other rotor (Patent No. JP2003047872A). The rotor shafts are made flexible so that they adapt to the shape and width of the processed flat waste, for example, optical discs, plastic cards or sheets, etc.

A similar two-rotor shredder is equipped with a device for forcing waste into the space between the rotors, consisting of two endless chains with hooks (Patent Application No. DE102008012724A1; Fig. 10).

Multi-rotor shredders are less common. Thus, a multi-rotor planing shredder has been developed, which contains several vertical rotors of unidirectional rotation located in the same plane with disc saws fixed on each of them with gaps relative to each other, which partially pass through the gaps of the disc saws of neighboring rotors (or one rotor for extreme rotors). The design is intended for crushing compressed bales of packaging polymer materials, while the total width of the rotors exceeds the width of the bale being crushed (Patent No. GB2390043A).

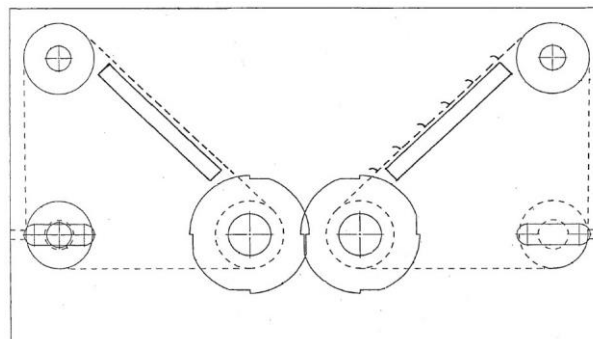


Fig. 10. Scheme of a two-rotor shredder with a device for forced feeding of waste (Patent Application No. DE102008012724A1)

Multi-rotor shredders also include a three-rotor shredder with fully engaged rotors [14–18], each of which is made in the form of a set of alternately installed disc saws of two diameters (Patent Application No. DE2526650A1). This grinder belongs to grinders with combined rotation of rotors, because the first two rotors are located in the horizontal plane (one next to the other) and rotate towards each other, and the second and third, which are located in the vertical plane (one above the other), rotate in the same direction. To increase the efficiency of waste destruction, the rotors rotate at different frequencies.

An interesting design of a multi-rotor shredder is proposed in the Patent No. US5102057A. Several conical rotors rotating in one direction

with discrete cutting teeth located along a helical line are installed in the shredder casing, while all rotors converge downward, forming a crushing zone among themselves (Fig. 11). During the rotation of the rotors, the processed waste is clamped between the rotors, gradually compressed into a compact body and cut.

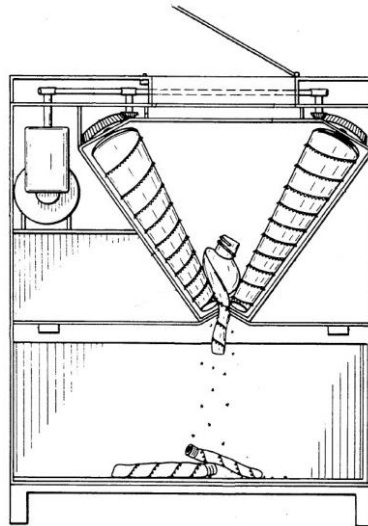


Fig. 11. Scheme of a multi-rotor shredder with automatic forced feeding of waste into the crushing zone (Patent No. US5102057A)

Also, among the grinders with a rotating working body, plate grinders are used, which usually contain a vertical cylindrical container and a horizontal plate placed near its bottom with radial knives mounted on it (Patent Application No. DE3009410A1).

To reduce shock loads on the moving knives of the disc grinder, they can be moved relative to the radius of the flat plate by a certain distance. Also, in order to increase the productivity and efficiency of the shredder, the capacity in the cross section is elliptical, in which two rotating plates are installed, the shafts of which are located on the larger axis of the ellipse (Patent No. RU2228843C2).

The plate shredder for processing PET bottles and other containers contains a convex plate in the form of a truncated circular cone (cutting elements are fixed on the outer surface of the shell), as well as a casing equipped with counter knives (Patent No. DE10113953C1).

The disc grinder contains at least one toothed disc in the form of a circular saw, mounted on a horizontal shaft, while the specified disc (or discs) is placed in a cylindrical casing, the inner surface of which is made with artificial roughness, for example, with longitudinal corrugations (Patent No. FR2732623A1). The processed material, which moves along the casing by the air flow, is somewhat delayed by the specified corrugations and at the same time is intensively cut by the teeth of the plate

(plates), after which the crushed material is removed from the shredder by the same air flow.

The blade rotary shredder is structurally similar to the blade mixer [19, 20], in contrast to which, instead of two tiers of mixing blades fixed on the vertical shaft, knife blades are installed, proposed in the Patent No. CN213797577U.

In similar shredders, four tiers of knife blades twisted lengthwise are fixed on the vertical shaft (Patent Nos. CN214077022U, CN214214410U).

The two-disc shredder contains a body with a vertical shaft located in it, with two cutting discs mounted on it, one of which is fixed on the shaft rigidly, and the second is fixed to the shaft freely, and the second is freely fixed through a parasitic gear, which ensures the rotation of the discs in opposite directions and the effective destruction of waste (Patent No. CN214136889U).

The shredder with oscillating movement of the working body is described in Patent Application No. DE19610567A1 (Fig. 12). Arc-shaped saws in the upper part are mounted on two parallel crankshafts, and the lower ones are in contact with stops (horizontal movement limiters). These saws form a curvilinear wedge working gap. After entering the specified gap, the processed material is cut by saws that perform an oscillating movement independent of other saws (by analogy with a jaw crusher with a complex cheek movement [21–23]).

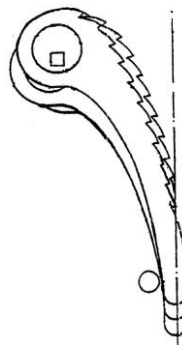


Fig. 12. Scheme of the working body of the shredder with oscillating working bodies: 1 – arc-shaped saw; 2 – stop (Patent Application No. DE19610567A1)

The shredder with the combined movement of the working bodies, intended for the destruction of PET bottles into narrow strips, is given in the Patent No. US4987829A and Patent Application No. WO91/04848A1. This shredder contains a vertically positioned closed chain with wedge-shaped teeth, which captures the bottles, pierces them with the teeth, flattens them in the gap between the chain and the vertical plate, and then feeds them into the gap between the multi-disc horizontally positioned rotor and said chain,

According to the degree of universality of waste processing, there are universal and specialized shredders.

Universal shredders are designed for processing polymer waste of various types: large-sized, film, sheet, profile, etc. They primarily include single-rotor shredders.

Shredders for shredding films, sheets, pipes, bottles, and foam polymers belong to specialized ones.

So-called "dicers" are often used to grind sheet polymer waste into parallelepiped-shaped particles of certain sizes. The size of the particles received on them can be adjusted by changing the number of knives installed on the rotor, the speed of rotation of the rotor and the speed of feeding raw materials.

A typical dicer (Fig. 13) contains a longitudinal cutting device with disc knives 1 and 4 and a knife drum 9 installed in a casing 8 on a drive shaft 10. The polymer sheet 2 to be crushed passes between the guides 3 and enters the longitudinal cutting device whose circular knives 1 and 4 cut the sheet longitudinally into strands. The upper knife 4 is fixed on a movable support equipped with a pressure spring 5. Next, the strands are fed to the traction rollers 6 and 14, which advance them to the stationary knife 13. The roller 6 is also equipped with a pressure spring 7. Upon reaching the stationary knife 13, the strands are cut in the transverse direction by the rotating knives 11 of the rotor 9. The shredded material is removed from the crusher through the unloading branch pipe 12 [13].

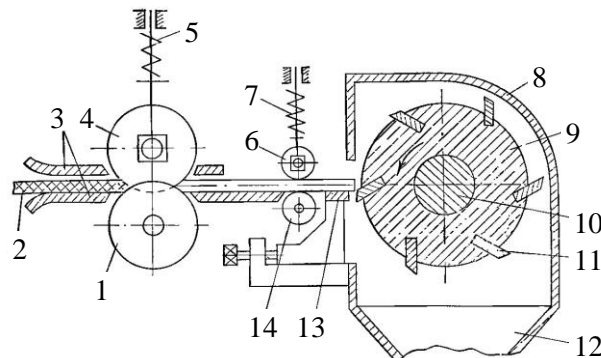


Fig. 13. Scheme of a shredder with disc knives and a rotating rotor for breaking sheet material into particles in the form of a parallelepiped of certain sizes [13]: 1, 4 – disc knives for longitudinal cutting of sheet waste; 2 – sheet waste; 3 – guide; 5, 7 – compression springs; 6, 14 – pulling rollers; 8 – casing; 9 – knife rotor; 10 – rotor shaft; 11 – rotor knives; 12 – unloading branch pipe; 13 – stationary knife

On dicers, sheets and strips up to 3 mm thick and 60–500 mm wide are usually crushed, while the size of the resulting granules in width and length can be 2–25 mm. With a productivity of 40–7500 kg/h, the power of the drive is 3–125 kW [13].

The design of a typical dicer is given in Patent No. US5143307A.

In Patent Nos. CH505650A, FR2062100A5 consider the design of a dicer with paired disk knives for longitudinal cutting of sheet, roll or film waste (Fig. 14). Further transverse cutting of the resulting strands or tapes is carried out using a roller with helical blades (teeth).

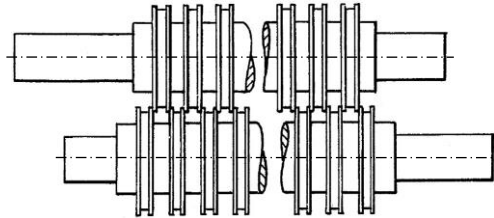


Fig. 14. Unit for longitudinal cutting of sheet, roll or film waste (Patent No. CH505650A, FR2062100A5)

In Patent No. JP2013252609A describes a dicer with disk knives for the preliminary longitudinal cutting of sheet, roll or film waste and the subsequent transverse cutting of the resulting strips by means of a roller with straight blades. Each rotor for preliminary longitudinal cutting contains disk knives fixed on the shaft in the form of truncated cones directed in the same direction, while the truncated cones of both rotors are turned in opposite directions, and the rotors themselves can have different diameters (Fig. 15).

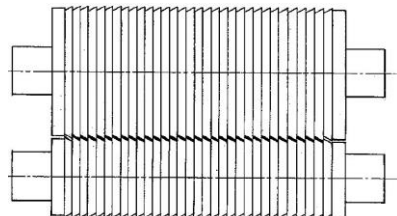


Fig. 15. Unit for longitudinal cutting of sheet, roll or film waste (Patent No. JP2013252609A)

A single-rotor shredder for shredding polymer film containing a horizontal rotor with continuous longitudinal knives is considered in Patent Application No. DE4231225A1, and a similar shredder for processing a wider class of polymer waste is in Patent No. US4871118A.

In a two-rotor shredder, continuous longitudinal knives are fixed on only one rotor, and during counter-rotation of the rotors with the same frequency, the knives enter the grooves of the second rotor, cutting the polymer waste passing between the rotors (Patent No. US5635224A).

In a two-rotor shredder for shredding polymer film, one of the rotors is designed as a pressure one, and the other as a working one (Patent Application No. DE2343728A1). The working rotor is made cylindrical with ring knives for longitudinal cutting of the polymer film, made with



two gaps, in which longitudinal knives are installed for transverse cutting of film strips formed with the help of ring knives.

A two-rotor shredder for crushing polymer bottles was developed and studied in [24].

A mechanical shredder for foam polymers is described in Patent No. CN201275825Y, and the two-rotor shredder for the destruction of polymer pipes – in Patent No. CN206899582U.

According to the shape of the rotors, there are shredders with rotors in the form of a circular cylinder (the most common) and a truncated circular cone.

A single-rotor shredder with a truncated circular cone rotor mounted in a conical casing, with cutting elements on the side surface of the rotor and the inner surface of the casing (Patent Application no. DE2736349A1).

According to the location of the rotor axis (rotor axes) in space, there are shredders with horizontal and vertical arrangement of rotors.

At the same time, in two-rotor shredders, the rotors with their horizontal arrangement can be located both in the horizontal and vertical planes (one next to the other (Patent No. CN209191073U) and one above the other (Patent No. CN210552394U), respectively). Much less often, the rotors with their horizontal arrangement are located one above the other and with a certain offset in the horizontal direction (Patent No. CN206899582U).

According to the shape of the movable cutting elements of rotary shredders, there are shredders with continuous (for the entire length of the rotor), discrete and combined cutting elements are distinguished, while continuous cutting elements (knives) can be straight and helical.

Rotary shredder with discrete cutting elements in the form of a threaded spike having the shape of a regular triangular or quadrangular pyramid (Patent Application no. DE102006002507A1).

A shredder rotor with discrete cutting elements in the form of removable pins fixed on the surface of a cylindrical rotor to form a set of equidistant V-shaped broken lines (Patent No. CN201755880U).

The rotor of the shredder for grinding polyethylene pipes contains discrete cutting elements in the form of wedges fixed on the surface of the cylindrical rotor with the formation of twelve equidistant U-shaped curved lines (Patent No. CN202683304U). A similar design of the rotor, but with cutting elements of a different shape, is given in the Patent No. CN202909796U.

On the cylindrical rotor of the shredder is placed a set of discrete elements of different shapes for both cutting and breaking polymer waste, which expands the technological capabilities of the shredder (Patent No. CN203972064U).

A rotary shredder with four straight single-bladed knives fixed on the

rotor is described in Patent No. RU2104867C1.

A rotary shredder with straight two-bladed V-shaped knives fixed on the rotor is considered in a. with. No. SU1747162A1. The specified shape of the knives not only increases the number of cutting surfaces, but also changes the direction of the speed of the fragments separated from the shredded material, which are thrown to the stationary knives, the body and the discharge grate. The disadvantage of the design is the complexity of the design of V-shaped knives.

Unlike straight knives, screw knives contribute to a more smooth (without sharp blows) destruction, which reduces the vibration of the equipment and its noise level during operation.

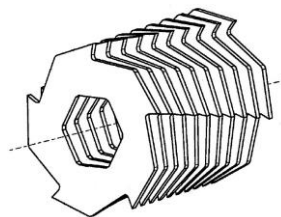
The shredder rotor is equipped with longitudinal knives, each of which consists of discrete cutting elements and has a V-shaped shape (Patent Application no. DE4231225A1). At the same time, the tops of the adjacent V-shaped knives are shifted from the center of the rotor in different directions.

The shredder rotor according to Patent Application No. US2006/086855A1 is equipped with combined cutting elements: chevron in the central part of the rotor and discrete rhombic protrusions located along helical lines (Fig. 16).



Fig. 16. Scheme of a rotor with combined cutting elements (Patent Application No. US2006/086855A1)

Also, rotors with combined cutting elements can include a rotor with a set of individual saws, angularly shifted relative to each other with the formation of continuously discrete teeth located along helical lines (Patent Application Nos. US2013/119171A1, US2013/119575A1; Fig. 17). This design ensures effective destruction of a wide range of polymer waste with low noise and vibration.



Fi. 17. Scheme of a rotor with combined cutting elements (Patent Application Nos. US2013/119171A1, US2013/119575A1)

A two-rotor shredder with counter-rotating rotors of a similar design is

proposed in Patent Application Nos. US2008/115647A1, US2008/265072A1. In each rotor, separate saws are made with three large cutting and tearing teeth, turned relative to each other by 120° (Fig. 18).

According to the waste treatment temperature, there are shredders with an operating temperature close to the ambient temperature, lower than the ambient temperature, and higher than the ambient temperature are distinguished, while in the latter case the temperature can be lower than the thermal destruction temperature and higher than it.

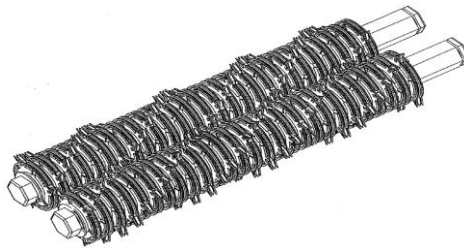


Fig. 18. Scheme of rotors with combined cutting elements (Patent Application Nos. US2008/115647A1, US2008/265072A1)

It has been experimentally proven that the minimum energy intensity of the process of destruction of elastomers, which are the basis of rubber-containing waste, takes place at low (approximately minus $70\text{--}80^\circ\text{C}$) and elevated ($100\text{--}120^\circ\text{C}$) temperatures, which is respectively realized during their cryogenic and shear destruction [9].

To ensure maintenance of the required surface temperature of the rotors of the two-rotor shredder and to prevent melting or thermal destruction of the shredded waste, the rotors are equipped with liquid cooling systems (Patent No. CN210552394U, CN210590081U). This system is similar to the cooling systems of rolls of rolling machines for processing rubber mixtures (rollers and calenders) [25–27].

Devices for cutting foam polymer waste using a hot string (the temperature of the string in this case is higher than the thermal destruction temperature of the processed polymer) is proposed in the Patent Nos. CH692282A5, UA77905U. At the same time, the current-conducting string is made of a material with a high specific electrical resistance and is connected to a source of electric current.

According to the degree of mobility, there are stationary and mobile (mobile) shredders.

Stationary shredders are easier to manufacture and operate, but mobile (mobile) shredders are distinguished by wider technological possibilities, as they can be quickly delivered to the place of waste processing. Mobile shredders are usually mounted on self-propelled or non-self-propelled (trailer) transport (mostly automobile) chassis (Patent Nos. US5395061A, US5601240A, Patent Application Nos. WO94/19106A1, WO94/25168A1,



WO96/33020A1, [3, 28]).

A mobile two-rotor shredder designed for shredding polymer waste in health care facilities, primarily hospitals and clinics (Patent Application No. WO2020/133135A1) is quite relevant. At the same time, the shredder is equipped with a device for washing the crushed material with water, which can be useful in the current unfavorable epidemiological situation [29, 30].

Mobile non-volatile polymer waste shredders equipped with solar batteries for powering drive electric motors have also been developed [31, 32].

Conclusions. The analysis of the current state and prospects for the use of cutting shredders for polymer and rubber waste makes it possible to assert that shredders of this type remain and will remain the main type of equipment for the destruction of polymer-containing waste for the purpose of their further processing by physical methods in the near future.

At the same time, the developers of new equipment will try to create universal cutting shredders capable of processing waste from various polymers and elastomers and of different sizes, as well as to maximally get rid of the disadvantages of the most common traditional rotary cutting shredders, primarily high noise level and relatively low resistance of cutting elements.

References

1. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження з твердими полімерними відходами. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 2. С. 52–73. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2021.05>.
2. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження з використаними ПЕТ-пляшками. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 4. С. 45–61. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2021.05>.
3. Мікульонок І. О. Стан та перспективи поводження з пневматичними шинами, що втратили свої споживчі властивості. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 3. С. 63–83. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2021.06>.
4. Recycling of plastic materials / La Mantia F. P. (ed). Toronto–Scarborough: ChemTec Publishing, 1993. 189 p.
5. Handbook of plastics recycling / La Mantia F. P. (ed). Shrewsbury UK: Rapra Technology, 2002. 441 p.
6. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>.
7. Wong J. H., Gan M. J. H., Chua B. L., Gakim M., Siambun N. J. Shredder machine for plastic recycling: A review paper. *Material and Energy Engineering for Sustainable Advancement (MEESA 2021)*: IOP



Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Article 012007. 10 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1217/1/012007>.

8. Pranoto H., Arifin Z., Carles H. Innovation Design and Development of PET Plastic Waste Processing Machines by Extruder Method. *International Journal of Advanced Technology in Mechanical, Mechatronics and Materials (IJATEC)*. 2020. № 3. P. 90–99. <https://doi.org/10.37869/ijatec.v1i3.32>.

9. Mikulionok I. O. Structural Implementation of the Process of Elasto-Deformation Shredding of Rubber-Containing Wastes (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016. Vol. 51, № 9–10. Зю 604–608. <https://doi.org/10.1007/s10556-016-0093-9>.

10. Акопян Е. Л., Кармилов А. Ю., Никольский В. Г., Хачатрян А. М., Ениколопян Н. С. Упругодеформационное измельчение термопластов. *Доклады АН СССР*. 1986. Т. 291, № 1. С. 133–136.

11. Трофимова Г. М., Новиков Д. Д., Компаниец Л. В., Мединцева Т. И., Ян Ю. Б., Прут Э. В. Влияние метода измельчения на структуру резиновой крошки. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2000. Т. 42, № 7. С. 1238–1245. – URL: http://polymsci.ru/static/Archive/2000/VMS_2000_T42_7/VMS_2000_T42_7_1238-1245.pdf (дата звернення 08.08.2023).

12. Ахметханов Р. М., Кадыров Р. Г., Минскер К. С. Вторичная переработка отходов поливинилхлорида с использованием метода упруго-деформационного диспергирования. *Пластические массы*. 2002. № 4. С. 45–46.

13. Торнер Р. В., Акутин М. С. Оборудование заводов по переработке пластмасс. Москва: Химия, 1986. 400 с.

14. Todd D. B. Improving incorporation of fillers in plastics. A special report. *Advances in Polymer Technology*. 2000. Т. 19, № 1. P. 54–64. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(20000117\)19:1<54::AID-ADV6>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(20000117)19:1<54::AID-ADV6>3.0.CO;2-%23).

15. Tadmor Z., Gogos C. G. Principles of polymer processing. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 961 p. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento1/material/Tadmor-Gogos.pdf> (дата звернення 29.07.2023).

16. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. <https://doi.org/10.3139/9781569905395>.

17. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N. D. Understanding rheology and technology of polymer extrusion. Dundas, ON, Canada: Polydynamics Inc., 2019. 337 p. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf (дата звернення 21.07.2023).

18. Agassant J.-F., Avenas P., Carreau P. J., Vergnes B., Vincent M. Polymer Processing: Principles and Modeling. 2nd ed. Munich: Carl



Hanser Verlag, 2017. 841 p.

19. Васильцов Э. А. Ушаков В. Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Ленинград: Машиностроение, 1979. 271 с.

20. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. Ленинград: Госхимиздат, 1963. 416 с.

21. Сапожников М. Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. Москва: Высшая школа, 1971. 382 с.

22. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. Москва: Химия, 1977. 368 с.

23. Андреев С. Е., Перов В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. 415 с.

24. Shaikh M. A., Kadam V. D., Jagtap D. S., Khadtare P. S., Kabugade S. S. Manufacturing of Shredder for used Plastic Bottle. *International Journal for Scientific Research & Development (IJSR)*. 2018. Vol. 6, № 3. P. 212–214. URL: https://www.researchgate.net/publication/335378000_Manufacturing_of_Shredder_for_used_Plastic_Bottle (дата звернення 11.08.2023).

25. Лукач Ю. Е., Рябинин Д. Д., Метлов Б. Н. Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей. Москва: Машиностроение, 1967. 296 с.

26. Mikulionok I. O. Rollers with Peripheral Heat-Supply Channels for Treatment of Plastics and Rubber Mixtures (a survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, № 5–6. P. 382–387. <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9760-2>.

27. Mikulionok I. O. Classification of Hollow Rollers of Roller Machines for the Treatment of Polymeric Materials and Rubber Compounds (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022. Vol. 58, № 5–6. P. 433–438. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01109-w>.

28. Vatskicheva M., Grigorova I. Chassis loading investigation of two-shaft shredder for construction waste management. *Recycling and Sustainable Development*. 2017. Vol. 10. P. 15–21. <https://doi.org/10.5937/ror1701015V>

29. Kulkarni B. N., Anantharama V. Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 743. No 140693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>.

30. Parashar N., Hait S. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: Protector or polluter? *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 759. No 144274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>.

31. Dubey D. N., Dable N. A., Kumare S. S., Gadpayle A. S.,



Padole H. R., Patankar M. G., Gajbhiye R. S. Development of Solar Powered Shredder Machine for Waste Management. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology (IJIRST)*. 2020. № 12. P. 874–879. URL: https://www.academia.edu/43433104/Waste_Management_by_Solar_Powered_Mechanical_Shredder_Machine (дата звернення 19.07.2023).

32. Waghmare M., Nasane D., Charpe J., Kushwaha K., Kose R., Thawkar S., Giripunje M. Development of Solar Powered Shredder Machine for Waste Management. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2022. Т. 10, № 2. P. 305–310. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40248>.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2023 р.

І. Мікульонок¹

¹ **Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ РІЗАЛЬНИХ ПОДРІБНЮВАЧІВ ПОЛІМЕРНИХ І ГУМОВИХ ВІДХОДІВ

Анотація

Метою досліджень було виконання критичного аналізу конструктивно-технологічного оформлення процесу полімерних і гумових відходів за допомогою різальних подрібнювачів.

Розроблено розширену класифікацію різальних подрібнювачів для руйнування різноманітних побутових і промислових полімерних і гумових відходів: об'ємних, погонних, листових і плівкових. Виконано критичний огляд найбільш характерних конструкцій різальних подрібнювачів, запропонованих науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу.

Конструкції проаналізовано залежно від принципу перетворення оброблюваних відходів, характеру дії різального інструмента на оброблюваний матеріал в часі, технологічної операції різання, кількості стадій подрібнення, типу руху робочого органа, ступеня універсальності оброблення відходів, форми ротора (роторів), розташування осі ротора (осей роторів) у просторі, форми рухомих різальних елементів роторних подрібнювачів, температури оброблення відходів, а також ступеня мобільності подрібнювача. Виконано критичний аналіз не лише класичних, а й інноваційних конструкцій подрібнювачів, наведених у патентних документах провідних країн світу.

Аналіз сучасного стану і перспектив використання різальних подрібнювачів полімерних і гумових відходів свідчить, що подрібнювачі цього типу залишаються й найближчому майбутньому залишатимуться основним видом обладнання для руйнування полімервмісних відходів з метою їх подальшого перероблення фізичними методами. Основні зусилля при цьому спрямовано на створення універсальних подрібнювачів, здатних переробляти відходи різного типорозміру з різних полімерів та еластомерів, а також максимально позбавлених недоліків традиційних різальних подрібнювачів, передусім високого рівня шуму та відносно низької стійкості різальних елементів.

Ключові слова: полімерні відходи, гумові відходи, вторинне перероблення, подрібнювання, різальні подрібнювачі.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-63-76

UDC 631.562:633.853.55

D. Zhuravel¹ d.t.s, professor

ORCID: 0000-0002-6100-895X

¹ *Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University*

e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua, тел.: +380968782453

DETERMINATION OF LINEAR DIMENSIONS OF BOXES AND THIRDS OF INDIVIDUAL CASTOR VARIETIES

Summary. The article is devoted to the study of geometric characteristics of heap of castor. The varieties of castor seeds studied were the following: Donska, Aphrodite, Olesya, Khortychanka, VNIIMK-165, Hybrid early, Khortytska 1, Khortytska 3, Khortytska 7. The aim of the article is to establish the linear sizes of bolls and thirds for individual varieties of castor bean in the context of their percentage. The length and thickness of castor bolls and the length, width and thickness of thirds of the corresponding castor bean varieties were determined as experimental data. After statistical data processing, the interval series of each geometric size of the components of the heap of castor were determined. The distribution characteristics of a randomly determined individual size were evaluated using characteristics of variation series, such as: sample arithmetic mean, variance, standard deviation, coefficient of variation, range of variation, asymmetry and excess. The significance of the obtained results lies, firstly, in establishing the law of normal distribution, which is suitable for calculating the percentage of the heap with a fixed geometric size, and secondly - in obtaining some estimates of practical interest.

Keywords: castor seeds, heap of castor, geometric characteristics, castor bolls, thirds.

Introduction. It is possible to increase the efficiency of the process of post-harvest processing of castor in each technological operation by using special machines in this technology with the mandatory consideration of the physical and mechanical properties of castor components. One of the important ones is the geometric dimensions of the castor seed pile components: pods and thirds. Such characteristics are required when determining the design parameters and technological modes of machines for separating castor seed heaps from impurities and in peeling machines that separate castor seeds from their heaps. Accordingly, establishing the geometric dimensions of the pods and thirds of the heap of castor seeds is an urgent problem today [1-3].

Recent research and publications analysis. The most important and complex stage in the system of measures for the processing of castor seeds is its post-harvest processing operations, namely cleaning, drying and sorting of the bunch. Carrying out post-harvest processing of the pile



determines the yield and quality of the products that go to further processing [4].

During the cleaning operation, the heap is separated according to physical and mechanical properties (size, density, speed of drift, etc.). The heap includes castor pods, both whole and broken, a significant mass of plant parts: stems and leaves, as well as extraneous impurities, which is due to the condition of the agro background before harvesting the castor crop.

Accordingly, the task of the cleaning process is to separate impurities and thresh castor seed pods first into thirds, and then thresh the thirds with further separation of clean seeds.

However, compared to other technical and grain crops, castor has a complex of specific features: multi-component composition, uneven moisture content, high oiliness of the kernel, fragility of the shells, high clogging, the need to peel the elements of its bunch, etc. The consequence of such specific features of castor oil is the impossibility of effective application of the existing technology for its post-harvest processing [5].

Special equipment for cleaning operations is extremely limited. Accordingly, when using the existing technology, the specific features of castor oil are not taken into account. So, for example, during the operation of peeling castor beans, the high-oil core can be injured. The consequence of this is the oiling of the working elements of the cleaning machines (machines for peeling and separating) of the castor pile and directly oiling the pile itself. As a result of this, firstly, the entire process of post-harvest processing is disrupted, both the castor itself and the castor seeds cannot be completely separated on the existing cleaning machines, and secondly, the yield and quality of the valuable product – castor oil – subsequently decreases. oil in the technological process of castor seed processing.

As a rule, the existing studies of castor geometric characteristics in the world refer to regional features, which are difficult to apply to castor varieties grown in Ukraine. So, for example, in work [6] the geometric characteristics of castor seeds, which were grown in Nigeria, were studied. In work [7-10], the research concerned local castor varieties grown in Pakistan and castor variety DS-30 Variety. In works [11-13], the research concerned local seeds grown in Iran and bought on the market in Tehran. In addition, local climatic conditions, soil and seasonal features of cultivation will further influence the geometric dimensions of the castor pile [10-13]. Castor oil is a high-oil technical crop, the main product of its processing is castor oil, which is used in the chemical, electrical, medical, aviation, other industries and in the production of biofuel [14-24]. In some industries, castor oil is often an irreplaceable or difficult to replace product [25-30].

Purpose statement. Justification of the methodology and equipment for determining the linear dimensions of boxes and thirds of individual castor varieties.



Results and discussion. The parameters of the geometric characteristics of the components of the castor bean seed heap, which must be determined, are the following: the length and thickness of the castor bean bolls (Fig. 1) and the length, width and thickness of the castor bean trebles (Fig. 2).

When determining biometric characteristics, the following castor bean varieties were studied: Donskaya, Afrodita, Olesya, Khortichanka, VNIIMK-165, Early Hybrid, Khortitskaya 1, Khortitskaya 3, Khortitskaya 7.

For measurements, an electronic vernier caliper MIOL 15-241 with a scale length of 150 mm and a measurement accuracy of 0.01 mm was used (Fig. 3).

The research methodology was as follows:

1. From the total amount of castor bean of one variety, a castor bean boll was selected. Its length and thickness were measured with a caliper. The value was recorded. Then, they took another boll and repeated the same measurements. The total number was 100 measurements. Measurements were carried out for each castor bean variety.

2. Castor bean boll, divided into treble. For each third, the length, width and thickness were measured with a caliper. The total number of measurements was 100 for each castor bean variety.

3. To construct an interval series, the size of the interval was determined, the full scale of intervals was set, and the results of observations were grouped in accordance with it. To determine the optimal value of the interval h , at which the series would not be too cumbersome and, at the same time, would allow identifying the characteristic features of the random variable x , the Ster-Jess formula was used [9]:

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,322 \lg n}, \quad (1)$$

x_{\max}, x_{\min} – maximum and minimum options, respectively;

n - number of experiments.

At the beginning of the first interval, it is recommended to take a value equal to [9]:

$$a_1 = x_{\min} - \frac{h}{2}, \quad (2)$$

then [9]:

$$\begin{aligned} a_i &= a_{i-1} + h, \\ i &= 2, 3, 4 \dots \end{aligned} \quad (3)$$

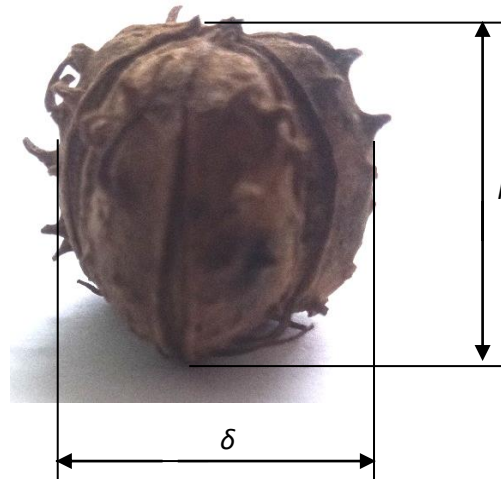


Fig1. General view of a boll of castor:
 l – is the length of the boll, δ - is the thickness of the boll

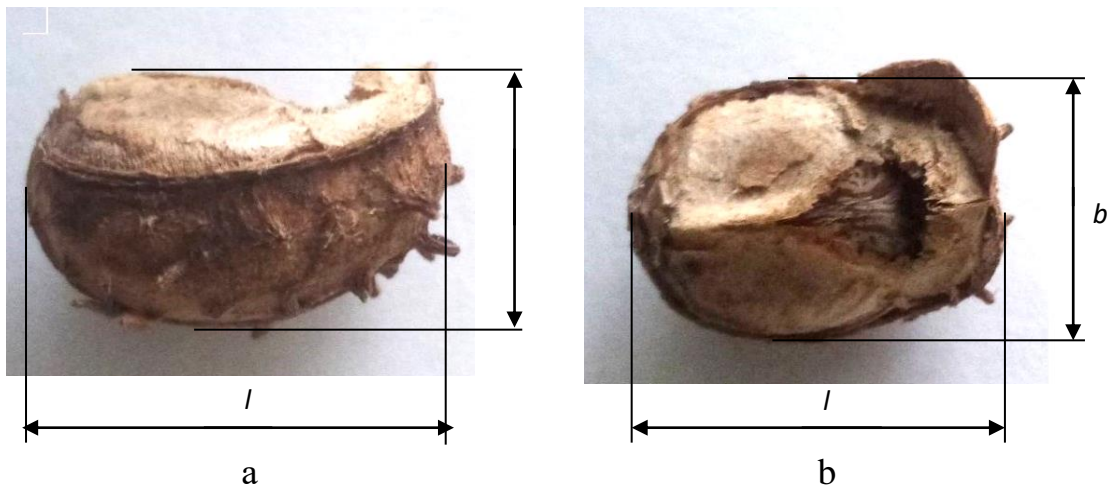


Fig 2. General view of a the third part of the castor bean boll:
a – top view; b – side view; l – length of the third; b – width of the third;
 δ is the thickness of the third

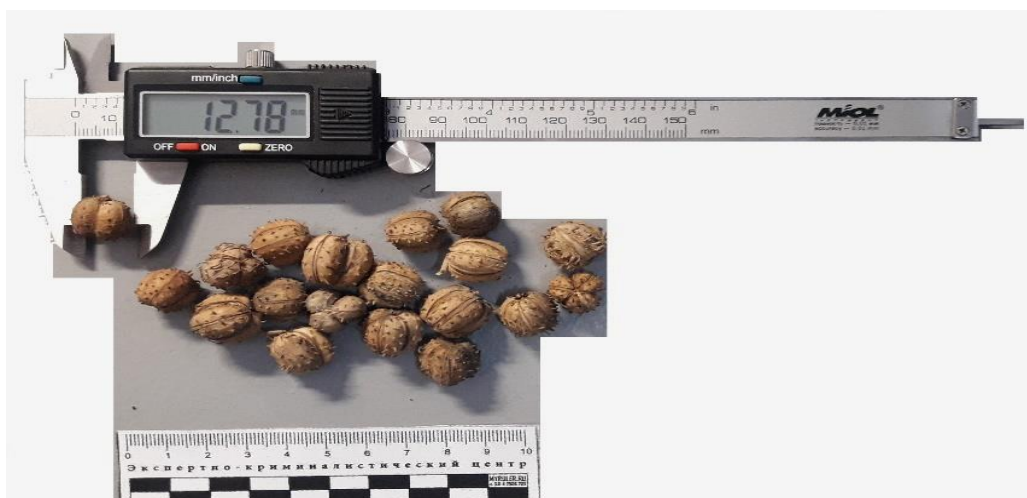


Fig 3. General view of the electronic support MIOL 15-241 when measuring the geometric parameters of the castor bean boll



The construction of the intervals was continued until the beginning of the next interval is equal to or greater than x_{\max} .

The distribution characteristics of the random variable x were estimated using the characteristics of the sample (characteristics of variation series), which at increasing n converge in probability to the corresponding characteristics x , and at a sufficiently large n can be approximately equal to them [10].

The main characteristics of variation series include: sample arithmetic mean - \bar{x} , corrected variance - S^{*2} , standard deviation - S^* , coefficient of variation - V , range of variation - R , asymmetry - A_s , excess - E_x .

The sample arithmetic mean \bar{x} was determined by the formula:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (3)$$

The dispersion S^{*2} was determined by the formula [9, 10]:

$$S^{*2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (4)$$

The standard deviation of S^* (empirical standard) was determined by the formula [9, 10]:

$$S^* = \sqrt{S^{*2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (5)$$

The coefficient of variation of standard deviation v was determined by the formula [9, 10]:

$$V = \frac{S^*}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

The range of variation R , was calculated by the formula [9, 10]:

$$R = \max x_i - \min x_i. \quad (7)$$

Asymmetry A_s was determined by the formula [9, 10]:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n \cdot S^{*3}}. \quad (8)$$

Excess E_x was determined by the formula [9, 10]:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{n \cdot S^{*4}} - 3. \quad (9)$$

The average values are generalized quantitative characteristics of a set of similar phenomena on a variable basis. The arithmetic mean characterizes the average value, close to which the possible values of a random variable are grouped. The variance is a measure of the scatter of these values relative to the mean. The standard deviation is a measure of



oscillation, but in contrast to the variance is an absolute value expressed in the same units as the variants. The coefficient of variation is a relative indicator of fluctuations.

The variational range (or width of the distribution) is unstable, an extremely random variable that serves to estimate the variation. Asymmetry and excess are indicators of the deviation of the distribution function $f(x)$ for x from the normal distribution law. If $A_s = 0$, then the curve for $f(x)$ is symmetric, for $A_s \neq 0$ - asymmetric. At $A_s > 0$ the right part of the distribution is longer than the left, $A_s < 0$ - vice versa. Excess characterizes the steepness of the distribution curve. If $E_x \neq 0$, then the vertex of the curve for $f(x)$ is either above (at $E_x > 0$) or below (at $E_x < 0$) the vertex of the normal distribution curve [11].

The linear dimensions of oilseeds are always subject to the law of normal distribution, which is determined taking into account the characteristics of variation series and based on the typical relationship [11]:

$$\Phi = \frac{1}{S^* \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{x-\bar{x}}{2 \cdot S^{*2}} \right)}. \quad (10)$$

When measuring the geometric characteristics of the boxes and thirds of castor seeds, it was found that the sizes of individual varieties have almost the same values. According to the above, in the process of research, the varieties of castor studied were divided into three groups: small, which corresponded to the varieties: Olesya, Khortychanka, Khortytska 7; medium - for varieties: VNIIMK-165, Hybrid early, Khortytska 1; large - for varieties Donska, Aphrodite, Khortytska 3.

As a result of the conducted researches variational series of distribution of castor bolls by: length (fig. 4), thickness (fig. 5), variational series of distribution of thirds by: length (fig. 6), width (fig. 7) and thickness are established (fig. 8).

Taking into account the experimental dependences (Figs. 1...5) and formulas (3... 9), the characteristics of variation series of bolls and thirds of castor varieties are determined (Table 1... 3). The calculated values of the parameters of the sample arithmetic mean of each variation series (Table 1... 3) must be taken into account in the technological processes and designs of machines when separating the castor bolls and peeling its thirds.

Centering of variation series obtained in the course of research (Fig. 1... 5) was carried out by determining the law of normal distribution of the series according to formula (10). To do this, it is necessary to take into account the results of the characteristics of the variation series of the geometric parameters of the components of the castor heap (Table 1... 3).

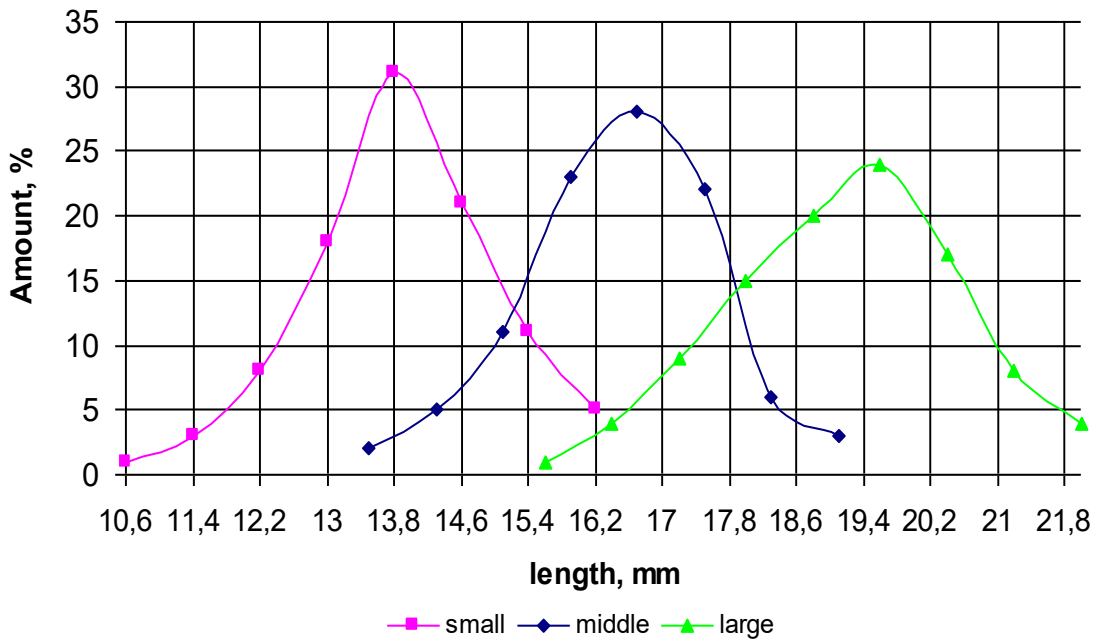


Fig 4. Variation series of distribution of castor bolls by length

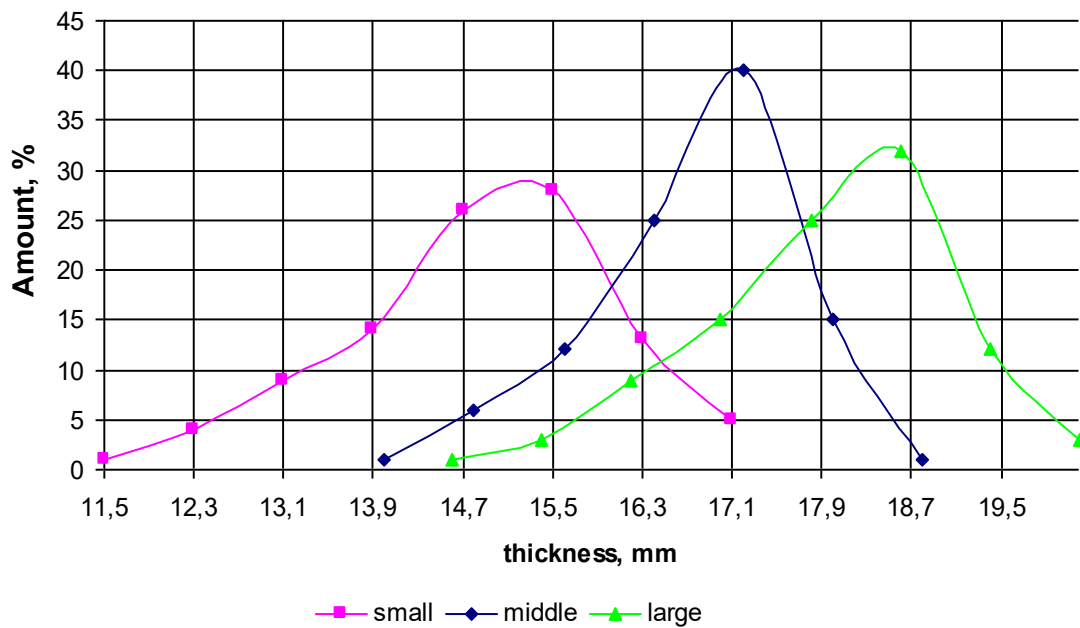


Fig 5. Variation series of distribution of castor bolls by thickness

Results of calculations of laws of normal distribution of variational series of distribution of bolls on length and width; and thirds of bolls in length, width and thickness for different varieties of castor are given in table. 4.

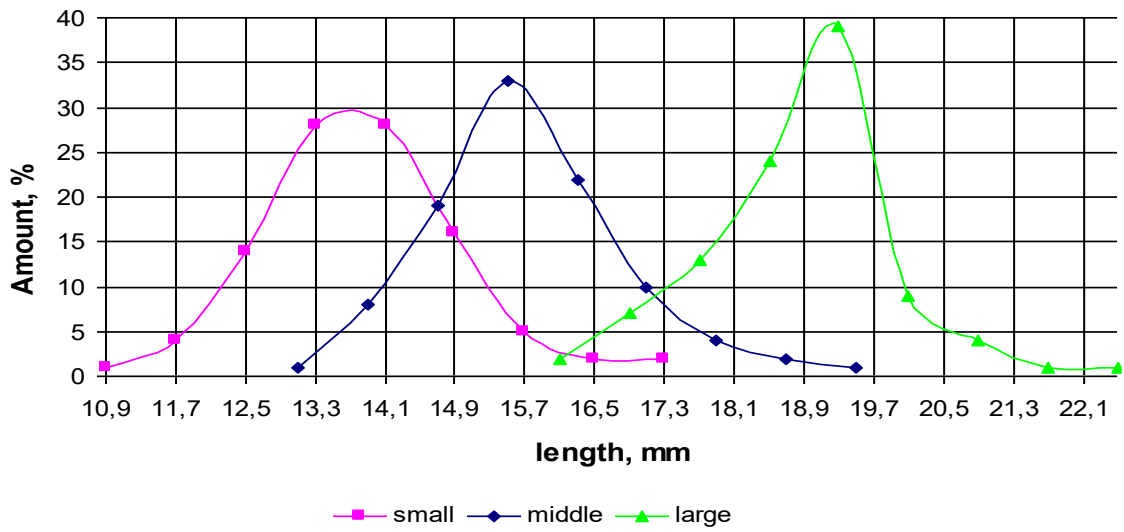


Fig 6. Variation series of distribution of castor thirds by length

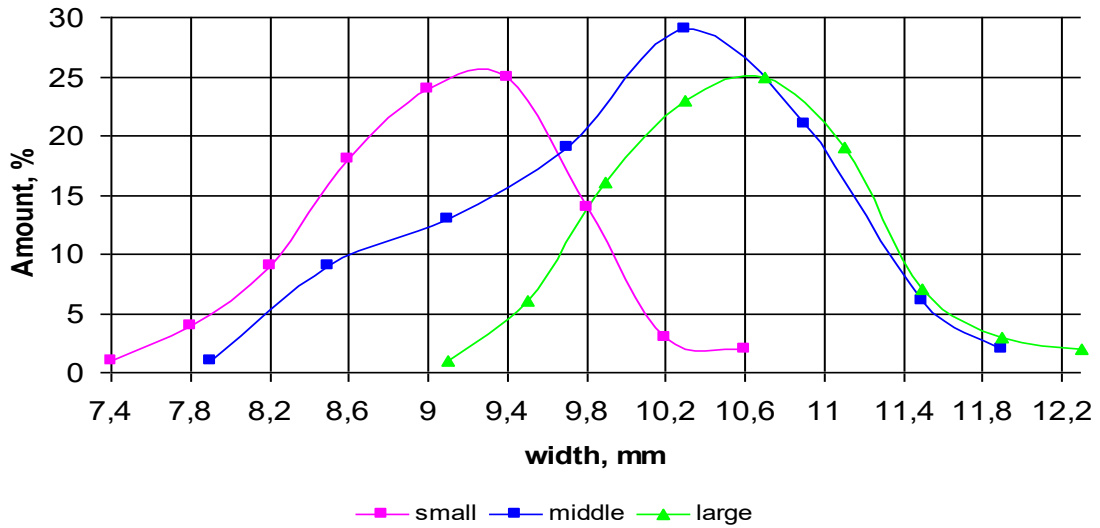


Fig 7. Variation series of distribution of castor thirds by width

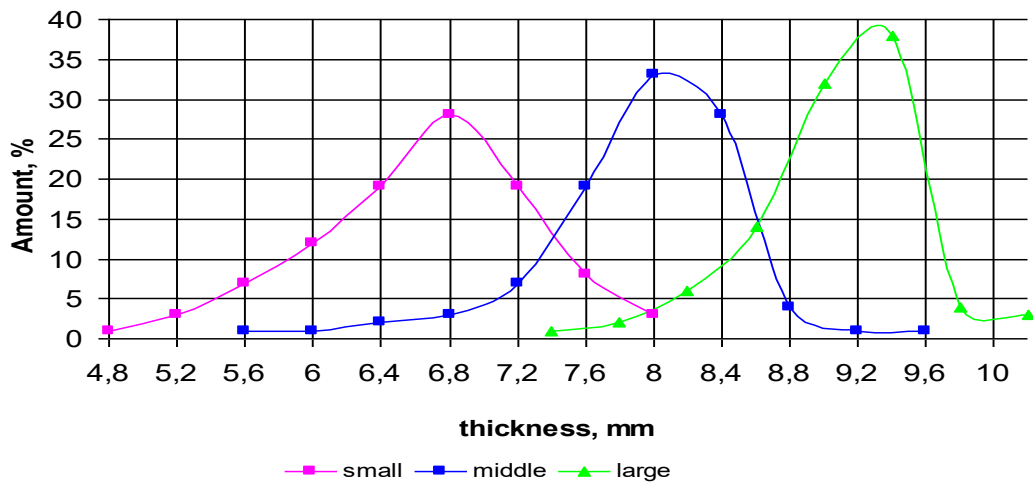


Fig 8. Variation series of distribution of castor thirds by thickness



Table 1

Characteristics of variation series for a group of small varieties of castor

Mathematical characteristics	Castor bolls		Thirds		
	By length	By width	By length	By width	By thickness
Selective arithmetic mean, \bar{x}	13,65	14,48	13,3	8,83	6,45
Dispersion, S^{*2}	1,56	1,54	1,38	0,39	0,44
The standard deviation, S^*	1,25	1,24	1,18	0,62	0,66
Coefficient of variation, V	9,15	8,58	8,83	7,03	10,27
Range of variation, R ,	5,67	5,35	6,31	3,24	3,71
Asymmetry, A_s	-0,07	-0,55	0,56	0,18	-0,45
Excess, E_x	-0,41	-0,16	1,39	-0,03	0,85

Table 2

Characteristics of the variation series for the group of medium varieties of castor

Mathematical characteristics	Castor bolls		Thirds		
	By length	By width	By length	By width	By thickness
Selective arithmetic mean, \bar{x}	16,27	16,36	15,27	9,55	7,76
Dispersion, S^{*2}	1,66	0,78	1,17	0,92	0,44
The standard deviation, S^*	1,29	0,88	1,08	0,96	0,66
Coefficient of variation, V	7,92	5,4	7,09	10,03	0,49
Range of variation, R ,	5,8	4,1	6	4,4	3,7
Asymmetry, A_s	-0,066	-0,82	0,69	0,09	-0,46
Excess, E_x	-0,45	0,52	1,93	-0,6	0,89



Table 3

Characteristics of the variation series for a group of large varieties of castor

Mathematical characteristics	Castor bolls		Thirds		
	By length	By width	By length	By width	By thickness
Selective arithmetic mean, \bar{x}	18,78	17,44	18,38	10,39	8,84
Dispersion, S^{*2}	1,82	1,3	1,14	0,5	0,26
The standard deviation, S^*	1,35	1,14	1,07	0,71	0,51
Range of variation, V	7,19	6,54	5,81	6,83	5,76
Range of variation, R ,	6	5,0	6	3,5	3,1
Asymmetry, A_s	-0,067	-0,64	0,25	0,2	-0,56
Excess, E_x	-0,5	-0,009	1,71	-0,33	1,72

Table 4

Laws of normal distribution of variational series of distribution: bolls in length and width; thirds of bolls in length, width and thickness for different groups (varieties) of castor seeds

Biometric characteristics of castor bolls and thirds		
Castor bolls by length		
Small varieties of castor	Medium varieties of castor	Large varieties of castor
$\Phi = 0,32 \cdot e^{\left(\frac{x-13,65}{3,12}\right)}$	$\Phi = 0,31 \cdot e^{\left(\frac{x-16,27}{3,32}\right)}$	$\Phi = 0,296 \cdot e^{\left(\frac{x-18,78}{3,64}\right)}$
Castor bolls by width		
Small varieties of castor	Medium varieties of castor	Large varieties of castor
$\Phi = 0,323 \cdot e^{\left(\frac{x-14,48}{3,08}\right)}$	$\Phi = 0,454 \cdot e^{\left(\frac{x-16,36}{1,56}\right)}$	$\Phi = 0,35 \cdot e^{\left(\frac{x-17,44}{2,6}\right)}$
Thirds by length		
Small varieties of castor	Medium varieties of castor	Large varieties of castor
$\Phi = 0,338 \cdot e^{\left(\frac{x-13,3}{2,76}\right)}$	$\Phi = 0,37 \cdot e^{\left(\frac{x-15,27}{2,34}\right)}$	$\Phi = 0,373 \cdot e^{\left(\frac{x-18,38}{2,28}\right)}$
Thirds by width		
Small varieties of castor	Medium varieties of castor	Large varieties of castor



$\Phi = 0,644 \cdot e^{\left(\frac{x-8,83}{0,78}\right)}$	$\Phi = 0,416 \cdot e^{\left(\frac{x-9,55}{1,84}\right)}$	$\Phi = 0,562 \cdot e^{(10,39-x)}$
Thirds by thickness		
Small varieties of castor	Medium varieties of castor	Large varieties of castor
$\Phi = 0,605 \cdot e^{\left(\frac{x-6,45}{0,88}\right)}$	$\Phi = 0,605 \cdot e^{\left(\frac{x-7,76}{0,88}\right)}$	$\Phi = 0,783 \cdot e^{\left(\frac{x-8,84}{0,52}\right)}$

Conclusions. As a result of the studies of the geometric characteristics of the components of the castor pile, it was established:

1. The geometrical dimensions of a bunch of castor beans depend on the type of castor and vary in a fairly wide range: according to the length of the pods: 10.55 - 22.5 mm, according to the width of the pods: 11.5 - 20.2 mm, according to the length of the thirds: 10.86 - 22.5 mm, width of thirds: 7.36 - 12.3 mm, thickness of thirds: 4.8 - 10.2 mm. The percentage ratio for the size of the castor pile is determined by its varietal characteristics.

2. To increase the efficiency of the separation of pods and peeling of its thirds, depending on the group of castor varieties, the following geometric dimensions are established: pod length: small - 13.65 mm, medium - 16.27 mm; large - 18.78 mm; box width: small - 14.48 mm, medium - 16.36 mm; large - 17.44 mm; length of the third: small - 13.3 mm, medium - 15.27 mm; large - 18.38 mm; width of third: small - 8.83 mm; medium - 9.55 mm; large - 10.39 mm; third thickness: small - 6.45 mm, medium - 7.76 mm; large - 8.84 mm. The specified parameters must be taken into account in the relevant technological processes of castor oil processing and machine designs.

3. For each variation series of the distribution of components of the castor pile, taking into account the corresponding group of castor varieties, centering is ensured by establishing the law of normal distribution of the corresponding variation series.

References

1. Malajowicz J., Kusmirek S. Characteristics and possibilities of industrial use of castor oil. *Przemysl Chemiczny*. 2016. Vol. 95(9). No 1756-1760.
2. Hadiyanto H., Yuliandaru I., Hapsari R. Production of Biodiesel from Mixed Waste Cooking and Castor Oil. *INMATEC: Web of Conferences*. 2018. Vol.156. P. 1-4.
3. Conejero M. A., César A. D. S., Batista A. P. The organizational arrangement of castor bean family farmers promoted by the Brazilian Biodiesel Program: a competitiveness analysis. *Energy Policy*. 2017. Vol.110. P.461-470.



4. Nikitchin D. I., Gridnev E. K., Cherepuhin V. D. Intensive technology of growing sunflower and castor oil plants. Kiev, 1990. 175 p.
5. Shaforostov V. D., Tyurin A. A. Advanced container technology for post-harvest treatment of castor bean. *Sci. those. bul.* 2007. Vol. 2 (137). P. 124-137.
6. Danbaba N., Dauda S. M., Anounye J. C. Some technological properties of castor seeds (*Recinuscommunis*) of importance in the design of its processing operations. *Academic Research International.* 2012. Vol. 2(3). P. 239-245.
7. Panhwar T., Mahesar S. A., Mahesar A. W. [et al.]. Characteristics and Composition of a High Oil Yielding Castor Variety from Pakistan. *Journal of Oleo Science.* 2016. Vol. 65(6). P. 471-476.
8. Gharibzahedi S., Mousavi S., Ghahderijani M. A survey on moisture-dependent physical properties of castor seed (*Ricinus communis* L.). *Australian journal of Croup science.* 2011. Vol. 5(1). P. 1-7.
9. Agisheva D. K., Zotova S. A., Matveev T. A., Svetlichnaya V. B. *Mathematical Statistics: A Study Guide.* Volgograd: VPI (branch) VolgSTU, 2010. 159 p.
10. Volkovets A. I. [et al.]. *Probability theory and mathematical statistics.* Workshop for students of all specialties of full-time education, Minsk: BSUIR, 2016. 72 p.
11. Barkovskiy V. V., Barkovska N. V., Lopatin O. K. *Probability theory and Mathematical Statistics: Textbook 5th Ed.* Kiev: Center for Educational Literature, 2010. 424 p.
12. Бондар А. М. Використання біологічної оливи для сільськогосподарської техніки. *Механізація та електрифікація сільського господарства.* 2019. Вип. № 10(109). С. 125-131.
13. Gritsaenko G., Gritsaenko I., Bondar A.. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture. *Modern Development Paths of Agricultural Production.* 2019. P. 29-40.
14. Samoichuk K., Viunyk O., Milko D., Bondar A. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences.* 2020. Vol. 14. P.142-148.
15. Milko D., Samoichuk K., Postol Yu. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. № 1/12(103). P. 24-29.
16. Milko D., Sclyar O., Sclyar R., Pedchenko G. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH - Agricultural Engineering.* 2020. Vol. 60(1). P. 269-274.
17. Samoichuk K., Palyanichka N., Oleksienko V., Petrychenko S. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer.



Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 2020. Vol. 14. P. 633-640.

18. Бондар А. М. Покращення та оцінка якісних показників відпрацьованих автотракторних олив для сільськогосподарської техніки. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 1. С. 15. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-1-6>.

19. Бондар А. М. Прогнозування ресурсу трибосистем при використанні сумішевих олив. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 1. С. 19. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-1-10>.

20. Бондар А. М., Дашивець Г. І., Паніна В. В. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. С. 13. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-16>.

21. Zhuravel D. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. С. 18. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-5>.

22. Kuznetsov, M., Lysenko, O., Chebanov, A. Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 6(8 (114)). P. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.

23. Бондар А. М., Дашивець Г. І., Паніна В. В. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 2. С. 13. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-2-2>.

24. Samoichuk, K., Petrychenko, S., Bondar, A. et al. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.

25. Karłan, M., Klimek, K., Maj, G., Bondar, A. et al. Method of Evaluation of Materials Wear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 3416. <https://doi.org/10.3390/en15093416>.

26. Верещага О. Л. Аналіз способів отримання олійних матеріалів із насіння рицини. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конф. (м. Мелітополь, 2-27 листопада 2020 р.)*. Мелітополь, 2020. С. 77-82.

27. Nadikto V., Chebanov A., Verechaga O. Improving the efficiency of pressing the male of castor seeds in the screw press. *Norwegian Journal of development of the international Science*. 2021. Vol. 59(1). P. 48-53. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-59-1-48-53>.

28. Дідур В. В., Журавель Д. П., Шокарев О. М., В'юнник О. В., Комар А. С. Аналіз технологій отримання олії з олійних культур. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 3. С. 10. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-3-18>.



29. Журавель Д. П. Дослідження аеродинамічних властивостей компонентів насіння рицини. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ДБТУ, 2021. С. 411-413.

Стаття надійшла до редакції 24.08.2023 р.

Д. Журавель
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

ВСТАНОВЛЕННЯ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ КОРОБОЧОК І ТРЕТИНОК ОКРЕМИХ СОРТІВ РИЦИНИ

Анотація

Робота присвячена обґрунтуванню лінійних розмірів коробочок і третинок окремих сортів рицини у розрізі їх відсоткової кількості. В якості експериментальних даних було визначено довжину і товщину коробочок рицини та довжину, ширину і товщину третинок відповідних сортів рицини. Після статистичної обробки даних, визначено інтервальні ряди кожного геометричного розміру компонентів вороху рицини. Відповідно задачею процесу очищення є відділення домішок та обмолот коробочок насіння рицини спочатку на третинки, а потім обмолот третинок із подальшим відділенням чистого насіння. Однак, у порівнянні з іншими технічними і зерновими культурами, рицина має комплекс специфічних особливостей: багатоконпонентність її складу, нерівномірність по вологості, висока олійність ядра, крихкість оболонки, велика засміченість, необхідність луцнення елементів її вороху тощо. Наслідком таких специфічних особливостей рицини є неможливість ефективного застосування існуючої техніки для її післязбиральної обробки. Спеціальної техніки при проведенні операцій очищення вкрай обмежено. Відповідно, при використанні існуючої техніки не враховуються специфічні особливості рицини. Так, наприклад, під час операції луцнення третинок рицини може травмуватися високоолійне ядро. Наслідком цього є заоліювання робочих елементів очищувальних машин (машин для луцнення і розділення) вороху рицини та безпосередньо заоліювання самого вороху. В результаті цього, по-перше, порушується весь процес післязбиральної обробки, як самої рицини так і насіння рицини не може бути повністю відділено на існуючих очищувальних машинах, а по-друге, в подальшому відбувається зниження виходу і якості цінного продукту – касторової олії в технологічному процесі переробки насіння рицини. Характеристики розподілу випадково визначеного окремого розміру оцінювали за допомогою характеристик варіаційних рядів, таких як: вибіркова середня арифметична, дисперсія, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації, розмах варіації, асиметрія та ексцес. Значимість отриманих результатів полягає, по-перше, у встановленні закону нормального розподілення, що придатний для розрахунків відвідної відсоткової кількості вороху зі встановленим геометричним розміром, а по-друге – в отриманні деяких оцінок, що мають практичний інтерес. Це стосується вибору з урахуванням отриманих геометричних характеристик вороху рицини, конструкцій робочих органів сільськогосподарських машин, що забезпечують виконання операцій розділення коробочок і луцнення третинок вороху в технологічному процесі післязбиральної обробки рицини.

Ключові слова: лінійні розміри, геометричні характеристики, ворох рицини, фільтрація, касторова олія, варіаційний ряд, коробочки, третинки.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-77-84

УДК 637.134

К. О. Самойчук¹, д-р техн. наук

ORCID 0000-0002-3423-3510

О. П. Ломейко¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0001-7407-545X

О. О. Ковальов¹, канд. техн. наук

ORCID 0000-0002-4974-5201

О. О. Червоткіна¹, асистент

ORCID 0000-0002-6814-0566

*Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

e-mail: oleksandr_kovalov@tsatu.edu.ua, тел. +380963205531

ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ДИСПЕРГУВАННЯ ЗА РАХУНОК ЯВИЩА ЕЖЕКЦІЇ

Анотація. В статті проведений аналіз пристроїв аналогу та прототипу корисної моделі, результати якого свідчать про конструктивні особливості, з врахуванням яких технічно неможливим є забезпечення ежекції. Оскільки головним чинником диспергування є створення максимальної різниці між швидкостями знежиреного молока та вершків для забезпечення ефективного диспергування в цих конструкціях необхідно використовувати примусову подачу жирової фази, що призводить до збільшення енерговитрат процесу. Запропоновано корисну модель, в якій шляхом модернізації конструктивних елементів корпусної частини та виконання конфузору з різьбовою частиною та ущільнювачами можливо забезпечити 15–20% зниження енергетичних витрат диспергування.

Ключові слова: центральний канал, струминний гомогенізатор, вершки, енергетичні витрати, молоко, диспергування, ежекція

Постановка проблеми. Зважаючи на те, що енергетичні витрати на здійснення диспергування молочних емульсій складають в залежності від технології від 25 до 40% загальних енерговитрат в технологіях переробки молочних продуктів, подальше зниження яких являє актуальну проблему харчової та переробної галузі України [1]. Сутністю гомогенізації (диспергування жирових кульок молочної емульсії) є зменшення середнього діаметра жирових кульок та забезпечення їх рівномірного розподілу в об'ємі знежиреного молока. Гомогенізація належить до нормативних процесів та використовується в якості обов'язкової операції для забезпечення смакових, поживних та товарних характеристик молочних продуктів. Однак конструкції клапанних диспергаторів, які до цього часу мають найбільше розповсюдження серед технологічного обладнання молокопереробної галузі відрізняються високими значеннями енергетичних витрат, що перевищують 7 кВт·год/т переробленого продукту [2,3]. Чисельні



спроби фахівців галузі та науковців забезпечити підвищення енергоефективності проведення гомогенізації дозволили висунути низку гіпотез відносно процесів та механізмів, що призводять до зменшення середнього діаметра жирових кульок [1]. Однак жодна з них не здатна використовуватись в якості загальної теорії процесу, оскільки кожна з гіпотез містить протиріччя, що пояснюється парадоксами гідродинаміки [3].

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом провідними науковцями було розроблено конструкції, впровадження яких може забезпечити (за умови отримання продукту з середнім діаметром жирових кульок, що знаходиться на рівні вимог технологічної документації) зниження енергетичних витрат процесу в 2-3 рази (протитечійно-струминний гомогенізатор молока, міні міксери П-подібної та Т-подібної форми) [4]. Однак суттєвого зниження енергетичних витрат диспергування можливо досягти за умови реалізації в конструкціях максимальної різниці швидкостей подачі знежиреного молока та вершків (гіпотеза д.т.н., професора Кирила Самойчука) [5].

Більшість з таких конструкцій ґрунтується на принципі роздільної подачі дисперсійної та дисперсної фаз продукту, що забезпечує зниження енерговитрат гомогенізації більш ніж на 50% [5]. Однією з таких конструкцій є розроблений на базі кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачика (ОПХВ) ТДАТУ струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків. В ньому знежирене молоко під високим тиском надходить до місця найбільшого звуження камери гомогенізації, де до нього по каналах малого діаметру додається необхідна кількість вершків, визначена з рівняння матеріального балансу. Енергетичні витрати такого диспергатора складають близько 0,90-0,95 кВт·год/т переробленого молока, при цьому середній діаметр жирових кульок після обробки в ньому знаходиться на рівні 0,80-0,85 мкм [5]. Суттєвим недоліком пристроїв такого типу є низький рівень надійності, пов'язаний із швидкою облітерацією внутрішніх поверхонь каналів, що використовуються для подачі вершків та мають оптимальні значення діаметру в межах 0,60-0,80 мм.

Подальший розвиток наукових основ диспергування дозволив розробити конструкцію струминно-щілинного диспергатора молока. Принцип його дії полягає в тому, що попередньо знежирене молоко з високою швидкістю рухається до місця найбільшого звуження конфузору. В цій зоні (ділянці між торцями конфузору та дифузору) крізь кільцеву щілину, шириною 0,60-0,80 мм подається необхідна кількість вершків [6]. Результати проведених аналітичних досліджень, підтверджені при проведенні експериментів свідчать, що енергетичні



витрати такого гомогенізатора не перевищують 0,80 кВт·год/т переробленого продукту, а значення середнього діаметра жирових кульок знаходяться в межах 0,80-0,85 мкм [6].

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою даної статті є дослідження можливості подальшого зниження енергетичних витрат диспергування в струминно-щілинному гомогенізаторі молока. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- проведення аналізу аналогу та прототипу конструкції;
- розробка та обґрунтування корисної моделі струминно-щілинного гомогенізатора молока, використання якого прогнозовано дозволить забезпечити енергетичні витрати процесу диспергування.

Основна частина. При проведенні патентних досліджень в якості аналогу було обрано конструкцію, яка складається з корпусу з центральним каналом, в місці його найбільшого звуження розташовані канали для ежектування дисперсної фази. При цьому корпусна частина пристрою складається з конфузору та дифузору, а щілинні канали утворюються між малими діаметрами конфузору та дифузору [7]. При роботі пристрою забезпечується подача знежиреного молока під тиском та його спрямування до малого діаметра конфузору, де спостерігається зниження значень робочого тиску та забезпечується підвищення швидкості руху дисперсійної фази. В зоні, що оточує потік знежиреного молока в місці його виходу з малого діаметра конфузору створюється ділянка зниженого тиску, завдяки чому забезпечується ежектування з камери крізь щілинні канали необхідної кількості вершків [3,8]. При роботі пристрою в місці надходження тонкого кільцевого шару дисперсної фази до потоку дисперсійного середовища між жировими кульками та плазмою молока створюються високі значення різниці швидкостей [9]. Це, у відповідності до критерію Вебера створює передумови для ефективної гомогенізації.

Недоліком описаного вище пристрою є високі значення енерговитрат процесу, що пояснюється високими витратами енергії, потрібними для приводу насоса подачі вершків. Особливості конструктивного виконання конфузору та дифузору виключає створення в зоні щілинних каналів необхідних передумов для виникнення явища ежекції [8]. Тобто, незважаючи на декларацію авторів щодо ежекції вершків крізь щілинні канали з ємності, під час роботи пристрою необхідна подача вершків під тиском, що обумовлює підвищення енергетичних витрат на диспергування [7].

В якості прототипу було обрано конструкцію [10] гомогенізатора, який містить корпус з центральним каналом, що виконаний з розташованих один до одного малими діаметрами конфузора та



дифузора, простір між торцевими поверхнями яких утворює кільцеву щілинний канал, крізь який відбувається ежектування вершків. Одна з частин корпусу має можливість осьового переміщення, на зовнішній торцевій поверхні малого діаметра виконана фаска, а встановлений додатковий пружний елемент притискає рухому частину корпусу до іншої. Знежирене молоко, що під тиском подається до камери надходить до звуження, що утворюється торцевими поверхнями конфузору та дифузору, в цій зоні спостерігається підвищення швидкості потоку та зниження тиску. Необхідна кількість вершків примусово подається до камери, діючий на фаску тиск обумовлює виникнення осьової сили, яка забезпечує зсув конфузору з патрубком по відношенню до опори, що обумовлює утворення в просторі між конфузуром та дифузуром кільцевого щілинного зазору для подачі вершків. Оскільки вершки подаються у вигляді тонкого кільцевого шару, між ними та потоком знежиреного молока виникає висока різниця між швидкостями дисперсійної та дисперсної фаз продукту, що створює необхідні гідродинамічні умови для диспергування жирової фази молочної емульсії [1,4].

Конструктивні особливості пристрою передбачають здійснення впливу тиску на фаску, завдяки чому забезпечується зсув відносно опори та корпусу конфузору з патрубком та утворення щілинного кільцевого зазору [10]. Це обумовлює необхідність створення високих значень тиску насосу подачі жирової фази, значна частина яких буде забезпечувати необхідний тиск на фаску для утворення кільцевого щілинного зазору. Необхідною умовою ефективного здійснення диспергування є створення максимальної різниці між швидкостями руху знежиреного молока та вершків, для чого жирова фаза має надходити у вигляді тонкого кільцевого шару крізь вузький зазор кільцевої щілини [11]. Таким чином, конструктивні особливості прототипу свідчать про високі енергетичні витрати для приводу насосу подачі вершків, що складають найбільшу частину енергетичних витрат на диспергування в конструкціях подібного типу [6,7,10].

В основу корисної моделі покладено задачу удосконалення струминного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків, шляхом модернізації конструктивних елементів корпусу і виконання корпусної частини конфузора з різьбовою частиною та ущільнювачами, що призведе до зниження енергетичних витрат процесу гомогенізації. Поставлена задача вирішується тим, що в струминному гомогенізаторі молока з роздільною подачею вершків(рис.1), що містить корпус з центральним каналом, виконаний з конфузора, який встановлено з можливістю осьового переміщення і патрубка між якими утворений щілинний канал для ежектування

вершків, згідно запропонованої корисної моделі, внутрішня поверхня патрубку та зовнішня частина конфузора виконанні конусними таким чином, що між ними утворюється конусний канал, який звужується в напрямку руху вершків.

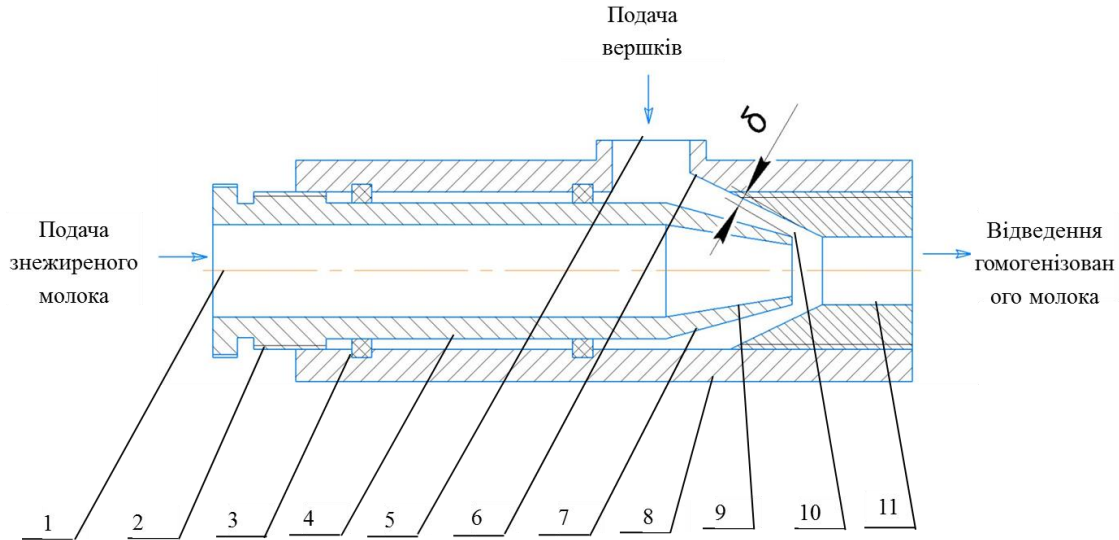


Рис. 1. Струминно-щілинний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: 1–центральный канал; 2–різьбова частина; 3–ущільнювачі; 4–конфузор; 5–патрубок; 6–внутрішня поверхня патрубку подачі вершків; 7–конфузор; 8–корпус; 9–конусний канал; 10–щілинний канал; 11–дифузор

Запропонована конструкція корисної моделі струминно-щілинного гомогенізатора молока, наведеної на рис.1 працює таким чином. Попередньо знежирене молоко під тиском подається до конфузору 4, що встановлений в корпусі 8 гомогенізуючого вузлу та містить центральний канал, минаючи який молоко прямує до конусного каналу конфузору 9. Визначена в залежності від жирності вихідного продукту кількість вершків ежектується крізь патрубок подачі та надходить до ділянки, сформованої зовнішньою частиною конфузору 7 та внутрішньою поверхнею патрубку подачі вершків 6, між якими формується щілинний канал 10. За таких умов жирові кульки, що потрапляють до нього мають мінімально можливу швидкість, в той час як швидкість потоку знежиреного молока перевищує 60 м/с. При таких умовах в зоні щілинного каналу створюється максимальна різниця між швидкостями знежиреного молока та вершків, що забезпечує створення гідродинамічних умов, за яких будуть досягатись необхідні для ефективного руйнування жирових кульок значення критерію Вебера. Зона, що формується між зовнішньою частиною конфузору та внутрішньою поверхнею патрубку подачі вершків утворюють зазор, позначений на рис.1 як δ . Величина цього зазору, що обумовлює подачу необхідної кількості



вершків встановлюється за рахунок обертання різьбової частини конфузору 2 відносно корпусу пристрою. За довжиною конфузору його бічні поверхні до патрубку подачі вершків з метою забезпечення герметичності обладнанні ущільнювачами 3. Нормалізоване за жирністю та гомогенізоване молоко після проходження щілинного каналу прямує до розширення дифузору 11, звідки забезпечується його відведення до технологічної ємності для накопичення.

Необхідні гідродинамічні умови, що виключають примусову подачу вершків та забезпечують всмоктування необхідної кількості вершків в запропонованій конструкції досягаються шляхом виконання зовнішньої частини конфузору та внутрішньої поверхні патрубка таким чином, що між ними формується конусний канал. За рахунок ежекції забезпечується зниження енергетичних витрат на примусову подачу вершків, значення яких для приводу насоса подачі жирової фази складає згідно до результатів аналітичних розрахунків складає до 20% загальних витрат диспергування для конструкцій такого типу [12].

Крім цього, запропоновані удосконалення дозволяють поєднувати проведення диспергування жирової фази молочної емульсії та нормалізацію в одному циклі роботи запропонованого гомогенізатора. Необхідні для забезпечення високого ступеня дисперсності молочної емульсії значення зазору δ , що утворюється в області між конусним каналом конфузору та внутрішньою поверхнею патрубка подачі вершків. Величина щілинного каналу, а відтак і кількість вершків, які всмоктуються через патрубок подачі вершків регулюється за допомогою обертання різьбової частини конфузору в корпусі пристрою. Така конструкція дозволяє забезпечити ежекцію визначеного об'єму вершків, що буде залежати від жирності вершків, знежиреного молока та готового продукту. Також пропонується корисна модель дозволяє полегшити проведення технічного обслуговування зовнішніх поверхонь конусної ділянки конфузору (що є схильними до облітерації), що в свою чергу підвищить надійність запропонованої конструкції [4,13].

Висновки. В рамках досліджень, спрямованих на подальше зниження енергетичних витрат диспергування при збереженні або підвищенні якості готового продукту було проаналізовано конструкції струминних гомогенізаторів молока з роздільною подачею вершків. Обидві з розглянутих конструкцій конструктивно не здатні забезпечити ежекцію вершків, що обумовлює підвищення енергетичних витрат для забезпечення подачі жирової фази на 15–20%.

Завдяки запропонованій сукупності конструктивних ознак при встановленні конфузору з конусним каналом, що має можливість



осьового переміщення та формує з внутрішньою поверхнею патрубку щілинний канал, можливо забезпечити ежекцію вершків, що забезпечить суттєве зниження енергетичних витрат процесу гомогенізації. Конструкція дозволяє забезпечити регулювання ежекції необхідної кількості вершків, яка потрібна для отримання продукту заданої жирності при поєднанні в одному циклі обробки операцій гомогенізації та нормалізації продукту за жирністю.

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*. 2011. P. 761–764.
2. 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.
3. Liao Y. X., Lucas D. A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 2009. T. 64. P. 3389–3406.
4. Нужин Е. В., Гладушняк А. К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография. Одесса: Печатный дом, 2007. 264 с.
5. Самойчук К. О. Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій: автореф. дис ... док. техн. наук: 05.18.12. Харків, 2018. 44 с.
6. Ковальов О. О. Обґрунтування параметрів струминно-щілинного гомогенізатора молока з роздільною подачею вершків : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2021. 20 с.
7. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. № 106522 Україна: МКИ⁷ А 01 J 11/16. № u201511244; заявл. 16.11.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.
8. Tartar. L. The General Theory of Homogenization. *Lecture Notes*. 2009. 470 p.
9. Dhankhar, P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4(5). P. 1-8.
10. Струминний гомогенізатор молока з роздільною подачею вершків: пат. № 119871 Україна: МКИ⁷ А 01 J 11/16. № u201704300; заявл. 03.05.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19.



11. Walstra P, Wouters J. T. M. and Geurts T. J. Homogenization. *Dairy Science and Technology*. Second Edn. Taylor & Francis Group, LLC. Boca Raton London New York, 2006. 279 p.

12. Vladislavljevic, G., Al Nuamani, R., Nabavi, S. Microfluidic production of multiple emulsions. *Micromachines*. 2017. T. 8. P. 75.

13. Ward K., Fan Z. H. Mixing in Microfluidic Devices and Enhancement Methods. *J. Micromech. Microeng.* 2015. Vol. 25(9). P. 94001–94017.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023 р.

K. Samoichuk¹, A. Lomeiko¹, A. Kovalyov¹, A. Chervotkina¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

REDUCTION OF ENERGY COSTS OF DISPERSION DUE TO THE EJECTION PHENOMENON

Summary

The results of leading research aimed at increasing the energy efficiency of the dispersion process allowed determining the difference in speed of skimmed milk and cream as the main factor of dispersion. This principle was implemented taking into account the hypothesis of the dominant role in the process of the destruction of fat globules of the difference between the speeds of skimmed milk and cream in the two designs. Designs developed on the basis of this hypothesis provide a reduction in energy consumption in the manufacture of products with technologically determined values of the average diameter of fat balls.

In the article, an analysis of analogue devices and a prototype of a useful model is carried out, the results of which testify to the design features of the considered devices, taking into account which it is technically impossible to ensure ejection. Since the main factor of dispersion is the creation of the maximum difference between the velocities of skimmed milk and cream, in order to ensure effective dispersion in these structures, it is necessary to use the forced supply of the fat phase, which leads to an increase in the energy consumption of the process.

A useful model is proposed, in which, by modernizing the structural elements of the body part and performing the confuser with a threaded part and seals, it is possible to ensure a 15-20% reduction in the energy costs of dispersion. The necessary hydrodynamic conditions that exclude the forced supply of cream and ensure the suction of the required amount of cream in the proposed design are achieved by making the outer part of the confuser and the inner surface of the nozzle in such a way that a conical channel is formed between them. The proposed useful model allows simultaneous homogenization and fat normalization of the product, while regulating the ejection of the required amount of cream. The design features of the proposed useful model make it easier to service the surfaces of the homogenizer prone to obliteration, which increases the reliability of the equipment.

Keywords: central channel, jet homogenizer, cream, energy costs, milk, dispersion, ejection.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-85-95

УДК 631.313.6

О. П. Гриценко¹, наук. співр.

ORCID: 0009-0005-1315-3676

С. П. Степаненко¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-8331-4632

*Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва**Національна академія аграрних наук України*e-mail: stepanenko_s@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ДИСКОВОЇ БОРОНИ ВІД НАВАНТАЖЕННЯ НА СФЕРИЧНИЙ ДИСК

Анотація. Дискові борони з рядним розташуванням сферичних дисків на індивідуальній осі знаходять широке застосування в ресурсозберігаючих технологіях підготовки ґрунту під посів. Робочі органи дискових борін, диски - не забиваються рослинними рештками та ґрунтом.

Одним з якісних показників роботи дискової борони, як вказують відомі вчені в галузі обробітку ґрунту є коефіцієнт корисної дії. Встановлено, що тяговий опір дискової борони залежить, як від конструкційних так і технологічних параметрів сферичного диска та швидкості руху МТА. Проведеними дослідженнями обґрунтовано, що експлуатаційна вага дискової борони визначається залежно від кількості сферичних дисків та необхідного навантаження для забезпечення раціональної глибини обробітку ґрунту. В ході теоретичних досліджень встановлено, що коефіцієнт корисної дії дискової борони не залежить від конструкційних та технологічних параметрів роботи сферичного диска. Розроблені математичні моделі, які встановлюють взаємозв'язок між конструкційними та технологічними параметрами роботи сферичного диска та доводять, що збільшення коефіцієнта корисної дії дискової борони досягається за рахунок збільшення витрат на роботу сферичного диска і зниженням навантаження на сферичний диск, яке пропорційне зниженню експлуатаційної ваги технічного засобу.

Ключові слова. Борона, машинно-тракторний агрегат, тяговий опір, діаметр сферичного диска, експлуатаційна вага.

Постановка проблеми. Багатьма проведеними дослідженнями встановлено взаємозв'язок між тяговим опором дискової борони від конструкційних та технологічних параметрів сферичного диска та швидкості руху машинно-тракторного агрегату (МТА) [1-7]. Відомі також дослідження, щодо впливу експлуатаційної ваги дискової борони залежно від кількості дисків та деякого навантаження для забезпечення зазначеної глибини обробітку ґрунту. Попередній огляд наукових досліджень з даного напрямку свідчить, що на даний час відсутня узагальнююча розрахункова залежність для визначення



коефіцієнта корисної дії дискової борони з паралельним розташуванням сферичних дисків, тому визначення даної взаємозалежності є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Науковими дослідженнями, які проводилися вітчизняними та закордонними вченими [3-7, 10, 13, 16-21] на протязі багатьох років, були обґрунтовані елементи методики, щодо вибору та комплектування тягових агрегатів на базі сучасних тракторів. У ресурсозберігаючих технологіях підготовки ґрунту під посів зернових після просапних культур знаходять широке застосування дискові борони з рядною установкою сферичних дисків на індивідуальній стійці. Якість обробітку ґрунту такими знаряддями відповідає вихідним вимогам до ґрунтообробних машин, серед яких повне підрізання рослин, подрібнення грудок ґрунту до необхідного розміру фракції. Залежно від числа паралельно встановлених рядів на рамі розрізняють: дворядні, трирядні та чотирирядні дискові борони. Дворядні і трирядні дискові борони використовують для обробітку ґрунту після цукрових буряків і багаторічних трав, чотирирядні - для обробки ґрунту після великостеблових просапних культур (кукурудза і соняшник).

Встановлено, що дворядне розташування сферичних дисків через велику відстань між сусідніми дисками у ряді створює необроблені смуги в міждисковому просторі [4-16]. При проведенні передпосівної культивуації для посіву зернових за два проходи ці дискові знаряддя забезпечують подрібнення ґрунту відповідно до вимог ДСТУ.

Чотирирядні дискові борони забезпечують якісну обробку великостеблових просапних культур. За два проходи дискової борони ступінь подрібнення пожнивних решток великостеблових просапних культур становить понад 50%, що відповідає вимогам. Для виконання технологічної операції робочою машиною потрібні певні витрати механічної енергії. Частка корисних витрат енергії оцінюється коефіцієнтом корисної дії. Значення цього коефіцієнта варіює в інтервалі від 0,2 до 0,8 [17]. Огляд літературних джерел [4, 6] свідчить, що на даний час відсутня узагальнююча розрахункова формула для визначення коефіцієнта корисної дії дискової борони з паралельним розташуванням сферичних дисків.

Відомо, що тяговий опір дискової борони описується раціональною формулою В.П. Горячкина для плуга [8]. Величина тягового опору стосовно дискової борони із загальним числом дисків n , кожен з яких встановлений на індивідуальній осі, має вигляд:

$$R = f \cdot G + k \cdot a \cdot b \cdot n + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot n \cdot v^2 \quad (1)$$

де R – тяговий опір дискової борони, кН;

f – коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту тертя;

G – експлуатаційна вага машини, кН;



- a – глибина обробки, м;
 b – ширина захоплення сферичного диска, м;
 n – загальна кількість дисків, шт.;
 k – коефіцієнт опору на перекочування дискової борони по стерні;
 ε – коефіцієнт, який характеризує витрати енергії на відкидання скиби ґрунту, $\text{кН} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$;
 v – швидкість руху машинно-тракторного агрегату, м/с.

Величина тягового опору дискової борони, як відомо [4, 7], включає витрати енергії на перекочування та витрати на технологічний процес обробітку ґрунту, кришення та відкидання ґрунту із зовнішньої поверхні сферичного диска.

Науковими дослідженнями [4, 7] встановлено, що ширина захоплення одиничного сферичного диска визначається за відомою залежністю:

$$b = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot \sqrt{a \cdot [D \cdot \cos \beta - a]} \quad (2)$$

де α – кут встановлення сферичного диска до напрямку руху агрегату, град.;

β – кут нахилу сферичного диска до вертикальної площини, град.;

D – діаметр сферичного диска, м.

Від значення кута встановлення сферичного диска до напрямку руху агрегату залежить глибина обробки. Отже з урахуванням залежності (2) тяговий опір дискової борони набуде наступного вигляду:

$$R = f \cdot G + 2 \cdot a \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot [k + \varepsilon \cdot v^2] \cdot \sqrt{a \cdot [D \cdot \cos \beta - a]} \quad (3)$$

Формулювання мети статті. Визначити чинники, що впливають на коефіцієнт корисної дії дискової борони з встановленням диска на індивідуальній осі.

Основна частина. Одним з найважливіших параметрів роботи дискової борони є навантаження на сферичний диск, величина якого визначає здатність диска підтримувати встановлену глибину обробки для різних технологічних операцій. Значення даного параметра визначає деяку частку ваги дискової борони, яка припадає на сферичний диск під час виконання технологічної операції. Навантаження на сферичний диск, визначимо, як:

$$P = G/n \quad (4)$$

де P – навантаження на диск, кН.

З аналізу літературних джерел [6, 20], а також з виробничого досвіду [6] параметра навантаження на сферичний диск дискових борін свідчить, що за ширини захвату борони до 3 м включно навантаження на диск не перевищує 0,6 - 0,7 кН, а при ширині захвату борони до 8 м досягає майже 1,4 – 1,5 кН [3, 7]. Аналіз конструкцій



закордонних дискових борін свідчить, що навантаження на диск не перевищує 0,7 - 0,8 кН [3, 7].

Збільшення навантаження на сферичний диск можна досягти за рахунок встановлення додаткових вантажів на раму. Експлуатаційна вага дискової борони виходячи з необхідного навантаження на сферичний диск визначається залежністю:

$$G = P \cdot n \quad (5)$$

Тяговий опір дискової борони з урахуванням залежності (5) запишемо у вигляді:

$$R = f \cdot P \cdot n + 2 \cdot a \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot [k + \varepsilon \cdot v^2] \cdot \sqrt{a \cdot [D \cdot \cos \beta - a]} \quad (6)$$

Коефіцієнт корисної дії дискової борони, як відомо [11, 20], становить деяку частку корисної роботи від загальної роботи на виконання технологічної операції обробітку ґрунту. Багатьма науковими та виробничими дослідженнями [11, 20] встановлено, що для дискових борін «шкідливими» витратами є: експлуатаційна вага борони, яка прямопропорційно залежить від витрат матеріалу на її виготовлення. Корисна робота здійснюється сферичним диском борони у процесі підрізання, кришення та відкидання «скиби» ґрунту.

Зрозуміло, що збільшення маси конструкції дискової борони відповідно збільшує і величину питомих витрат на її перекочування. Слід відмітити, що позитивною рисою дискових борін від інших ґрунтообробних знарядь в процесі їх експлуатації є те, що вага технічного засобу корисно витрачається на створення навантаження на сферичний диск. Величина даного навантаження під час руху агрегату забезпечує дотримання раціональної глибини обробітку ґрунту, а чисельні значення навантаження залежать від кута встановлення сферичного диска до напрямку руху МТА.

Значення коефіцієнта корисної дії дискової борони можна записати залежністю:

$$\mu = \frac{R_T}{R} \quad (8)$$

де R_T – сила тяги борони за раціональних умов виконання технологічної операції обробітку ґрунту, кН.

За аналогією з коефіцієнтом корисної дії, що використовується для ґрунтообробних знарядь за В.П. Горячкиним [7] для дискової борони величина даного коефіцієнта запишиться залежністю:

$$\mu = \frac{2 \cdot a \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot [k + \varepsilon \cdot v^2] \cdot \sqrt{[D \cdot a \cdot \cos \beta - a^2]}}{f \cdot P \cdot n + 2 \cdot a \cdot n \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \cdot [k + \varepsilon \cdot v^2] \cdot \sqrt{[D \cdot a \cdot \cos \beta - a^2]}} \quad (9)$$

На рис. 1 представлено залежність коефіцієнта корисної дії (9) від навантаження на сферичний диск.

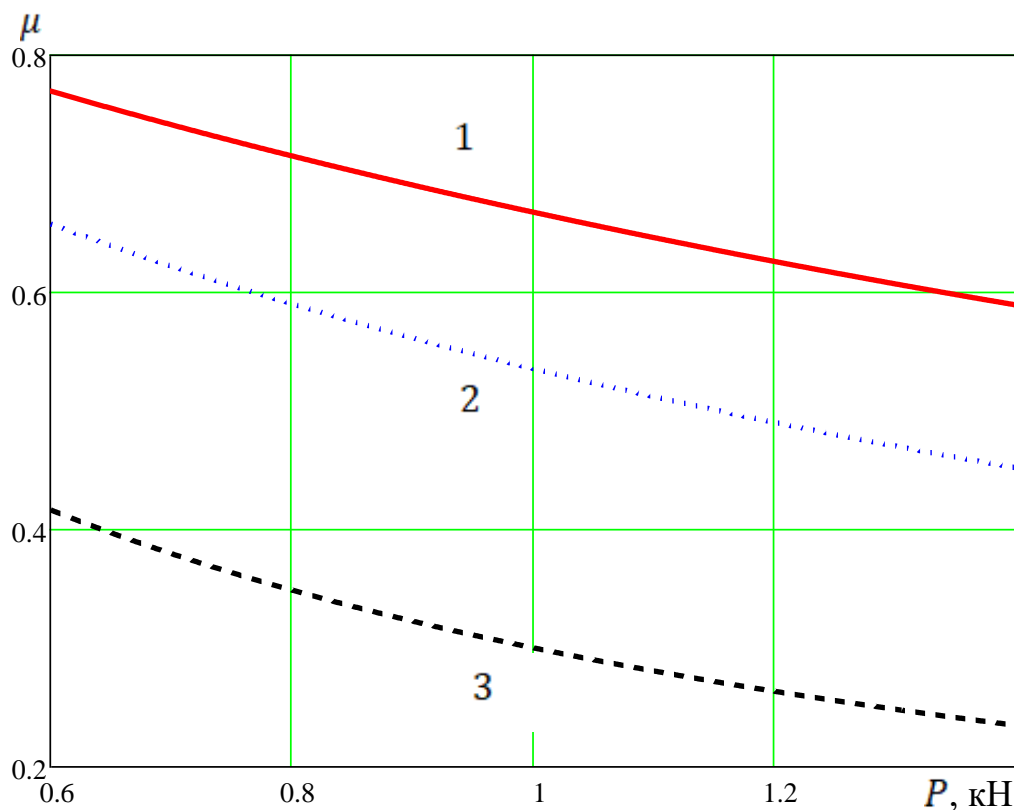


Рис. 1. Залежність коефіцієнта корисної дії від навантаження на сферичний диск; 1 – глибина обробітку 0,15 м; 2 – глибина обробітку 0,10 м; 3 – глибина обробітку 0,05 м

Для побудови графічних залежностей (рис. 1), було запропоновано наступні вихідні дані: коефіцієнт опору на перекочування дискової борони по стерні - 0,2-0,25; кут встановлення сферичного диска до напрямку руху МТА - 20°; кут нахилу диска до вертикальної площини - 0°; питомий тяговий опір ґрунту 40 кПа; витрати енергії на відкидання скиби ґрунту $0,4 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$; швидкість руху агрегату - 3,5 м/с; кількість дисків - 16.

Аналіз графічних залежностей свідчить, що зі збільшенням навантаження на сферичний диск збільшується експлуатаційна вага дискової борони, за умов сталої (раціональної) глибини обробітку ґрунту знижується коефіцієнт корисної дії технічного засобу, що обумовлено зростанням необхідної сили на переміщення технічного засобу по поверхні поля. За умов сталих значень навантаження на сферичний диск та значень експлуатаційної ваги технічного засобу і відповідного збільшення глибини обробітку ґрунту від 0,05 до 0,15 м збільшуються корисні витрати енергії, що зумовлює збільшення коефіцієнта корисної дії дискової борони.

Залежність коефіцієнта корисної дії дискової борони від глибини обробітку ґрунту представлена на (рис. 2).

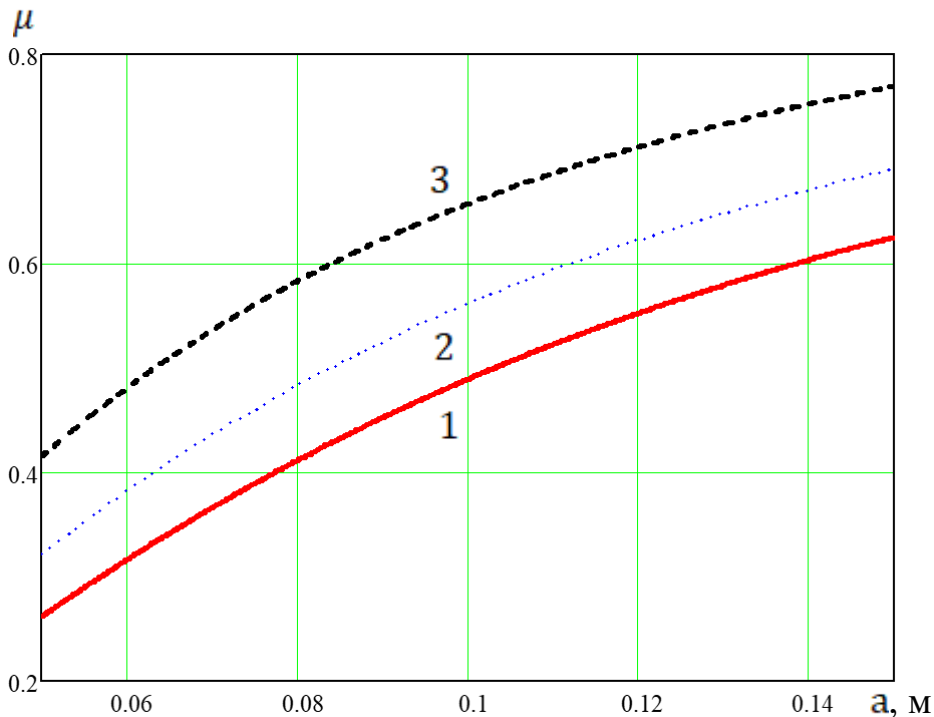


Рис. 2. Залежність коефіцієнта корисної дії дискової борони від глибини обробітку ґрунту: 1 – навантаження на сферичний диск 1,2 кН; 2 – навантаження на сферичний диск 0,9 кН; 3 – навантаження на сферичний диск 0,6 кН

Початкові дані для отримання графічних залежностей (рис. 2) коефіцієнта корисної дії дискової борони від глибини обробітку ґрунту взяті з попередніх аналітичних досліджень [2, 3]: коефіцієнт опору на перекочування дискової борони по стерні - 0,2-0,25; кут встановлення сферичного диска до напрямку руху МТА - 20° ; кут нахилу диска до вертикальної площини - 0° ; питомий тяговий опір ґрунту 40 кПа; витрати енергії на відкидання скиби ґрунту $0,4 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$; швидкість руху агрегату - 3,5 м/с; кількість дисків - 16.

Аналіз отриманих графічних залежностей свідчить, що за умов збільшення глибини обробітку ґрунту та відповідних констант значень навантаження на сферичний диск, зростає сила на підрізання, кришення та відкидання скиби ґрунту від сферичного диска, що безумовно призводить до зростання коефіцієнта корисної дії роботи дискової борони зі сферичними дисками. За умов зменшення навантаження на сферичний диск від 1,2 до 0,6 кН відповідно знижуються і витрати енергії на перекочування, що збільшує коефіцієнт корисної дії дискової борони.

Залежність коефіцієнта корисної дії дискової борони від питомого тягового опору ґрунту за різних значень навантаження на диск наведена на (рис. 3), а також залежність коефіцієнта корисної дії

дискової борони від глибини обробітку ґрунту за різних значень питомого тягового опору (рис. 4).

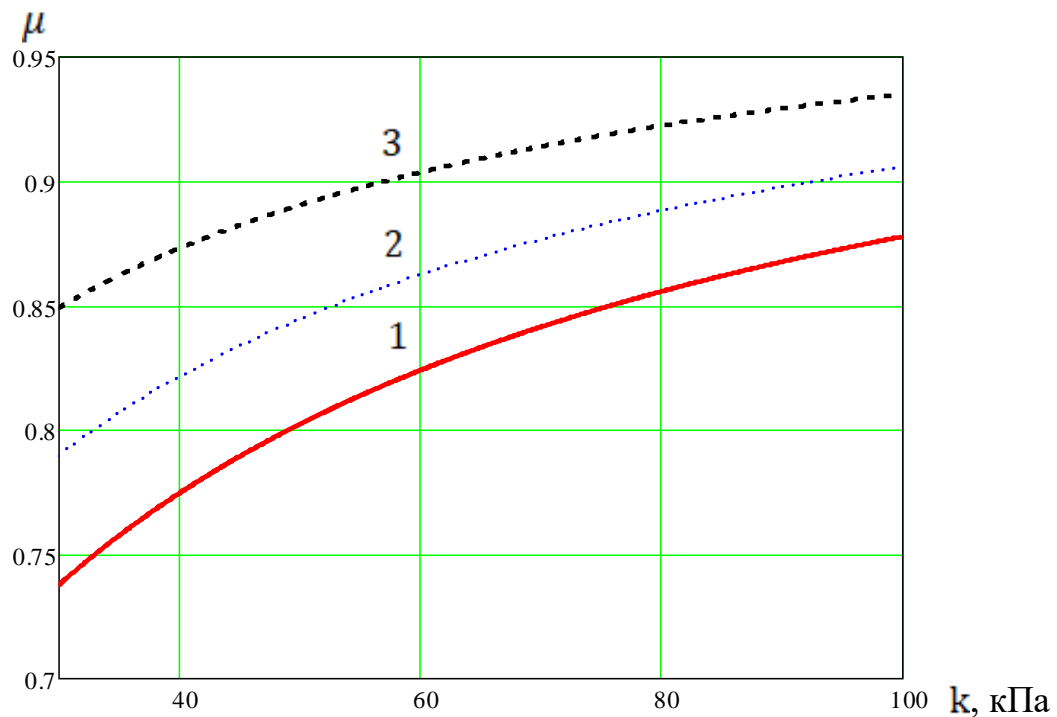


Рис. 3. Залежність коефіцієнта корисної дії від питомого тягового опору ґрунту: 1 – навантаження на сферичний диск 1,2 кН; 2 – навантаження на сферичний диск 0,9 кН; 3 – навантаження на сферичний диск 0,6 кН

Встановлено, що за сталих значень питомого тягового опору ґрунту залишається незмінною величина тягового опору. Зменшення навантаження на сферичний диск з 1,2 до 0,6 кН призводить до пропорційного зменшення експлуатаційної ваги та зниження собівартості виготовлення дискових борін.

Слід зауважити, що зі зниженням експлуатаційної ваги дискової борони за незмінних величин витрат на підрізання, кришення та відкидання скиби ґрунту буде спостерігатися і збільшенням коефіцієнта корисної дії.

Аналіз графічних залежностей наведених на (рис. 3, рис. 4) свідчить, що за сталих значень навантаження на сферичний диск і незмінній експлуатаційній вазі дискової борони за умов збільшення питомого опору ґрунту зростає величина тягового опору, що веде за собою збільшення коефіцієнта корисної дії дискової борони зі сферичними дисками.

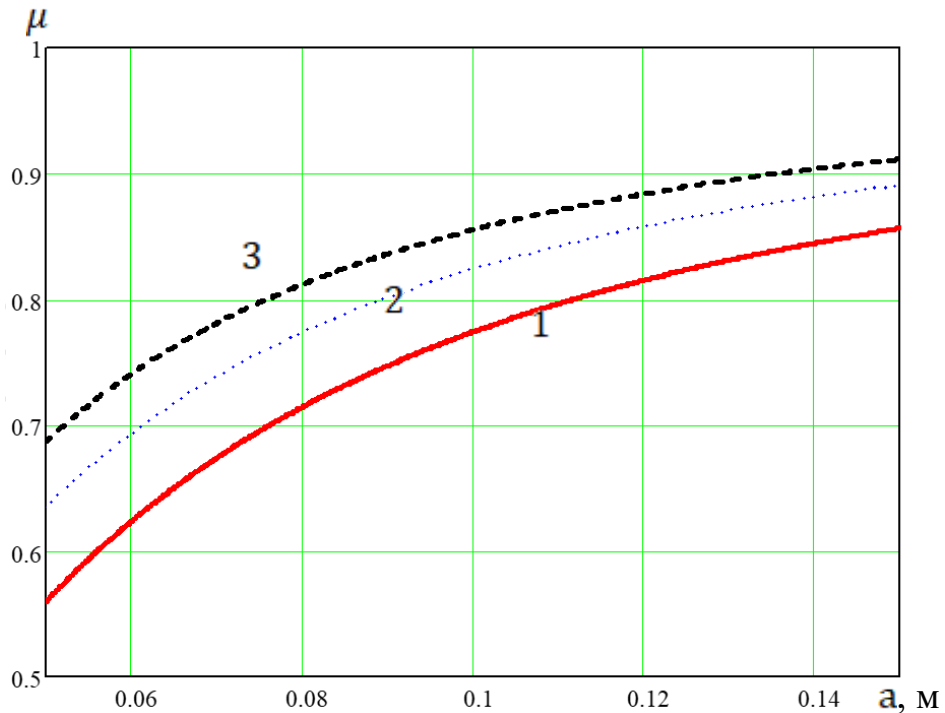


Рис. 4. Залежність коефіцієнта корисної дії дискової борони від глибини обробітку ґрунту: 1 – питомий тяговий опір ґрунту 40 кПа; 2 – питомий тяговий опір ґрунту 60 кПа; 3 – питомий тяговий опір ґрунту 80 кПа; ($P = 1,2$ кН)

Висновки.

1. Тяговий опір дискової борони залежить, як від конструкційних так і технологічних параметрів сферичного диска та швидкості руху МТА.

2. Експлуатаційна вага дискової борони визначається залежно від кількості сферичних дисків та необхідного навантаження для забезпечення раціональної глибини обробітку ґрунту.

3. Коефіцієнт корисної дії дискової борони не залежить від конструкційних та технологічних параметрів роботи сферичного диска.

4. Збільшення коефіцієнта корисної дії дискової борони досягається за рахунок збільшення витрат на роботу сферичного диска і зниженням навантаження на сферичний диск, яке пропорційне зниженню експлуатаційної ваги технічного засобу.

Список використаних джерел

1. Гриценко О. П. Деякі аспекти підвищення ефективності дискових борін. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2005. Вип. № 93. С. 260–263.

2. Гриценко О. П. Теоретичні дослідження стійкості руху асиметричної дискової борони. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2009. Вип. № 93. С. 89–100.



3. Гуков Я. С. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.20.01. Глеваха, 1998. 32 с
4. Гуков Я. С. Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України. Київ: Нора-Принт, 1999. 280 с.
5. Асиметрична дискова борона: пат. 99016 Україна: МПК А01В 21/08. № а 2010 13465; заявлено 12.11.2010; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
6. Зубець М. та ін. Актуальні проблеми технічної політики в аграрному секторі України. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2005. 77 с.
7. Адамчук В. В. та ін. Теорія стійкого руху дискової борони. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2021. Вип. 14(113). С. 10-22. <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-1>.
8. Горячкин В. П. Общий курс земледельческих машин и орудий. Москва: Типолит. Рихтер, 1904. 157 с.
9. Дискове ґрунтообробне знаряддя: пат. №90803 Україна: МПК А01В5/00. №а200812975; заявлено 25.02.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.
10. Bulgakov V., Pascuzzi S., Ivanovs S. & Volskyi V. Experimental investigations in draft resistance of spherical working tool of disk harrow. *Engineering Rural Device*. 2019. Vol. 18. P. 144–152. <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N171>
11. Nadykto V., Arak M., Olt J. Theoretical research into the frictional slipping of wheel-type undercarriage taking into account the limitation of their impact on the soil. *Agronomy Research*. 2015. Vol.13. P. 148–157. https://agronomy.emu.ee/wpcontent/uploads/2015/05/13_1_18_B5.pdf#abstract-3344 (дата звернення 14.08.2023).
12. Bulgakov V., Pascuzzi S., Nadykto V., Ivanovs S. A mathematical model of the plane-parallel movement of an asymmetric machine-and-tractor aggregate. *Agriculture*. 2018. № 8(10). P. 151. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100151>.
13. Лінник М. К., Вольський В. А., Коцюбанський Р. В. До питання щодо прийнятого напрямку різання ґрунту сферичним диском. *Інноваційне забезпечення виробництва органічної продукції в АПК*: зб. тез доповідей VII-ї міжнар. наук. конф. (04-07 червня 2019 року). Київ, 2019. С. 124-127.
14. Вольський В. А. Результати досліджень щодо уточнення процесу різання ґрунту сферичним дисковим робочим органом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2019. Вип. 9 (108). С. 30-36.



15. Вольський В. А. Математична модель для визначення кута різання при взаємодії сферично-дискового робочого органа з ґрунтом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2011. Вип. 95. С. 80–91.

16. Sheichenko V., Volskyi V., Kotsiubanskyi R., Dnes V., Shevchuk M., Bilovod O., Drozhchana O. Design of a roll crusher for sunflower stems and substantiation of the rational modes of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 6/1(114). P. 28–37. <https://doi:10.15587/1729-4061.2021.244903>

17. Bulgakov V., Aboltins A., Beloiev H., Nadykto V., Kyurchev V., Adamchuk V. & Kaminskiy V. Experimental investigation of plow-chopping unit. *Agriculture (Switzerland)*. 2021. № 11(1). P. 1–14. <https://doi:10.3390/agriculture11010030>

18. Nadykto V., Ivanov S. & Kistechok O. Investigation of the draft-and-power, and agrotechnical indicators of the work of a ploughing aggregate, created according to the scheme ‘push-pull’. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 62. P. 136–139.

19. Bohatyrov D. V., Salo V. M., Leshchenko S. M., Machok Yu. V. Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu shvydkosti rukhu kotkapodribniuvacha na yakist podribnennia roslynnykh reshtok kukurudzy. *Silskohospodarski mashyny*. 2015. Vol. 31. P. 10–17.

20. Бойко А. І., Свірець М. О., Шмат С. І., Ножнов М. М. Нові конструкції ґрунтообробних та посівних машин. Київ, 2003. 203 с.

21. Bulgakov V., Olt J., Kuvachov V. et al. A theoretical and experimental study of the traction properties of agricultural gantry systems. *Agraarteadus: Journal of Agricultural Science*. 2020. № XXXI (1). P. 10–16.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2023 р.

O. Gritsenko¹, S. Stepanenko¹

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

INVESTIGATION OF THE COEFFICIENT OF THE USEFUL EFFECT OF A DISK HARROW FROM THE LOAD ON SPHERICAL DISC

Summary.

Disc harrows with a row arrangement of spherical discs on an individual axis are widely used in resource-saving technologies for soil preparation for sowing. The working bodies of disc harrows, discs - are not clogged with plant residues and soil.

One of the quality indicators of the disk harrow's work, as indicated by well-known scientists in the field of soil cultivation, is the efficiency factor. It was



established that the traction resistance of the disc harrow depends on both the structural and technological parameters of the spherical disc and the speed of the MTA.

The conducted studies substantiated that the operational weight of a disc harrow is determined depending on the number of spherical discs and the required load to ensure a rational depth of soil cultivation. In the course of theoretical studies, it was established that the efficiency of the disk harrow does not depend on the design and technological parameters of the spherical disk.

Mathematical models have been developed that establish the relationship between the structural and technological parameters of the spherical disk and prove that the increase in the efficiency of the disk harrow is achieved by increasing the costs of the spherical disk and reducing the load on the spherical disk, which is proportional to the decrease in the operating weight of the technical tool. It was established that at constant values of the specific traction resistance of the soil, the value of the traction resistance remains unchanged. Reducing the load on the spherical disk from 1.2 to 0.6 kN leads to a proportional decrease in operating weight and a decrease in the cost of manufacturing disk harrows. It should be noted that with a decrease in the operational weight of the disc harrow, at unchanged values of costs for cutting, crushing and discarding the soil sliver, an increase in the efficiency factor will be observed. The analysis of graphical dependencies shows that at constant values of the load on the spherical disk and the unchanged operating weight of the disk harrow, under the conditions of an increase in the specific resistance of the soil, the amount of traction resistance increases, which leads to an increase in the efficiency of the disk harrow with spherical disks.

Keywords: Harrow, machine-tractor unit, traction resistance, spherical disk diameter, operating weight, efficiency factor, operational weight, costs, soil tillage depth.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-96-103

УДК 66.099.2

О. Ю. Юрченко¹, аспірант,

ORCID: 0000-0002-3047-6654

В. І. Склабінський¹, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0001-9388-5861

О. Г. Гусак¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-4372-5776

¹ Сумський державний університетe-mail: aleksyurchenko110917@gmail.com, тел.: +380966106782

ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ФОРМУВАННЯ ГРАНУЛ У ГРАНУЛЯЦІЙНІЙ БАШТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЕРТОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРАНУЛЯТОРА

Анотація. Виробництво продукції а належному рівні вимагає від обладнання відповідного рівня контролю та якості. Для забезпечення необхідної якості продукції використовуються різноманітні речовини, на які багата хімічна промисловість та які можуть не лише впливати на якість та структуру нових речовин, які і змінювати власний агрегатний стан. Мінеральні добрива, що на сьогоднішній день є досить розповсюдженими та важливими у процесі сільськогосподарського та промислового виробництва, утворюються в результаті грануляції. В даній статті проведено теоретичний аналіз математичних рівнянь, що описують основні процеси по витіканню струменя плаву з перфорованого кошика гранулятора з подальшим диспергуванням на каплі під дією внутрішніх збурень у струмені рідини та розглянуто і проаналізовано математичні рівняння, що описують подальший рух гранул від гранулятора до нижньої частини грануляційної башти. В результаті, на основі такого аналізу виявлено чисельні фактори, що впливають на процеси утворення гранул у грануляційній башті виробництва мінеральних добрив. Розроблено рекомендації щодо необхідності враховувати перелічені фактори при гідродинамічних розрахунках процесів, що протікають як у кошику гранулятора, так при руху гранул у робочому просторі грануляційної башти.

Ключові слова: грануляція, струмінь, краплі, тиск, щільність, обертання, частота.

Постановка проблеми. При розрахунках нового грануляційного обладнання, при розробці рекомендацій по встановленню технологічних режимів використання такого обладнання у грануляційних баштах велике значення має вірний вибір геометричних розмірів як самого гранулятора, або грануляторів, якщо їх декілька у разі великого навантаження по плаву та великої площі пересічного перетину башти, так і типу гранулятора [1].

У сучасних грануляційних баштах виробництв мінеральних



добри найбільше поширення набули вібраційні гранулятори статичного типу та обертові вібраційні гранулятори ОВГ з різною формою кошика, що залежить і від технологічних режимів роботи грануляційної башти. Поширення вібраційних грануляторів пояснюється гарним монодисперсним складом гранульованого продукту, що відповідає сучасним вимогам на ринку мінеральних добрив [2].

Основою високоякісної роботи таки ОВГ є процес розпорошування струменів плаву, які витікають із отворів кошика та поділяються на краплі, грануляційний склад яких повинен бути якомога ближче до монодисперсного [3]. У подальшому ці краплі взаємодіють з холодним потоком повітря, що призводить до їхньої кристалізації, охолодження. На цьому етапі велике значення має вірна організація гідродинаміки повітряного потоку, який впливає як на процеси теплообміну між гранулами та повітрям, так і на швидкість руху гранул та на напрямок цього руху.

Аналіз останніх досліджень. Гранулятори ОВГ було створено на кафедрі хімічної інженерії Сумського державного університету та успішно впроваджено на багатьох вітчизняних та закордонних підприємствах у виробництвах аміачної селітри та карбаміду. Основою роботи ОВГ є диспергування розчину на краплі монодисперсного складу за допомогою накладання на струмінь плаву вимушених коливань. Цей метод також впроваджений і у вібраційних відцентрових розпилювачах, що обертаються. У ОВГ вимушені збурення струменів плаву створюються за допомогою розповсюдження у плаві регулярних змінних імпульсів тиску. Наприклад, як це пояснюється на рис.1, джерелом таких імпульсів у ОВГ може бути диск-випромінювач у вигляді мембрани, що коливається. На який подається механічна вібрація [4].

У роботі [5] представлено теоретичні дослідження з використанням накопичених у процесі промислового впровадження вібраційних грануляторів, що обертаються. За рахунок показаних рівнянь руху рідини у стаціонарному режимі в циліндричній системі координат, що використовуються для вирішення рівнянь так званої «теорії струменів», що лежать в основі теоретичного опису руху рідини у струмені. Наведені розрахунки представляють актуальність для аналізу роботи вібраційних грануляторів у промислових умовах з метою оцінки грануляційного складу продукту, що, у свою чергу, підвищує надійність і стабільність роботи всієї промислової установки з виробництва мінеральних добрив. Представлена у роботі [6] методика проведення фізичних експериментів по процесу диспергування рідини (золя), що дозволяє оцінити вплив гідродинамічних і конструктивних параметрів обладнання на фізико-

механічні властивості одержуваних гранул.

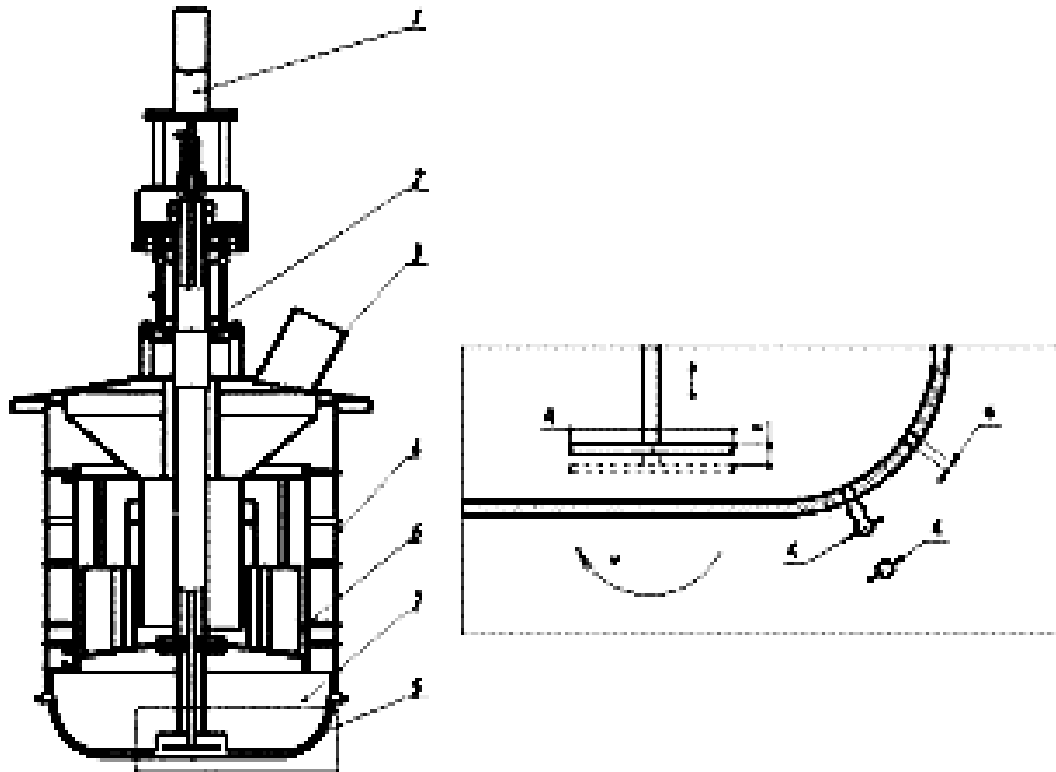


Рис. 1. Конструкція ОВГ: 1 – вібраційний пристрій; 2 – підшипники; 3 – патрубок для входу плаву; 4 – корпус; 5 – перфорована корзина; 6 – розподільник; 7 – додаткові лопатки

З використанням рівняння руху гранул у повітряному потоці, у роботі [7] розроблено програму автоматичного регулювання швидкості обертання гранулятора, виходячи зі зміни навантажень по плаву. Крім того, встановлено, що за рахунок зміни швидкості обертання гранулятора є можливість впливу на розміри факелу розпилу.

Але тільки гарна робота ОВГ може не дати потрібного якісного продукту, якщо гранулятор не буде гармонійно працювати з грануляційною баштою.

Гранулятор є важливою ланкою технологічного процесу. На стадії поділу потоку плаву на струмені, диспергування струменів на краплі, з урахуванням вимог досягнення якомога кращого монодисперсного складу гранул, і формується основа від якої потім залежить і отримання якісного продукту.

Формування мети статті. Метою даного дослідження є визначення впливу гідродинамічних і механічних чинників на формування гранул у грануляційній башті із використанням обертового вібраційного гранулятора. У зв'язку із цим висувуються такі задачі дослідження на основі залежностей.



Основна частина. Для розробки методики розрахунку потрібних чинників для ефективної роботи ОВГ у грануляційній башті, а саме технологічних та геометричних параметрів та умов, я яких працює кошик гранулятора, було проведено ряд теоретичних досліджень впливу гідродинамічних параметрів потоку плаву рідини, що витікає із отворів грануляційного кошика, з урахуванням симетричного відповідно осі цих струменів характеру такого руху [8].

$$\begin{cases} u_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial (r \cdot v_r)}{r} \right) \right] \\ u_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r}) \right] \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Було отримано рішення [6] системи рівнянь (1) у вигляді:

$$u_r = \frac{1}{48} \frac{z(-24A_1 r^5 v - 8vz^2 A_2 + 64vz^2 A_1 r^3 + 3A_1^2 r^7 z^3 - 12A_1 r^4 z^3 A_2 - 8A_1 r^3 z^3 A_3)}{vr^2} \quad (2)$$

$$u_z = A_1 r^2 z^2 - \frac{1}{6} \frac{3z^4 A_1^2 \rho r_s^4 + 6p_0 - 12z A_1 \rho v r_s^2 - 8\rho v A_1 z^3 - 6p_1}{z^2 r_s^2 \rho A_1} \quad (3)$$

де коефіцієнти A_1 , A_2 , A_3 у свою чергу залежать від геометрії отворів у корзини та початкових гідродинамічних чинників струменя, що витікає та фізичних властивостей плаву.

Складність та громіздкість цих математичних виразів не дозволяє приводити їх повністю у даній статті. Але для вияву геометричних та гідродинамічних параметрів, що впливають на формування крапель які витікають з отворів кошика ОВГ, і не потрібно розглядати ці математичні рівняння у вигляді точного математичного рішення системи рівнянь, але у такому громіздкому вигляді. Для цього достатньо просто розглянути лише рівняння (3) яке стосується значень величини радіальної складової швидкості рідини у струменю плаву. Саме зростання величини цієї швидкості до критичного значення, коли збурення у струмені буде руйнувати дію поверхневих сил струменя, і приводити до руйнації струменя на краплі.

Таким чином, для подібного аналізу можливо переписати складне рішення [9] у вигляді загальної функціональної залежності від геометричних та гідродинамічних параметрів для виявлення чинників, які повинно враховувати при розрахунках технологічних параметрів нового обладнання. Тоді представим коефіцієнти A_1 , A_2 , A_3 у наступному вигляді:

$$A_1 = f_1(\rho, r_s, v, v_{z0}, p_0, p_1), \quad (4)$$

$$A_2 = f_2(r_s, A_1, \rho, A_3, v, p_1, p_0), \quad (5)$$

$$A_3 = f_3(A_1, \rho, r_s, v, p_1, p_0), \quad (6)$$



де ρ – щільність плаву; r_s – радіус струменя, який у свою чергу залежить від діаметру отвору у кошику гранулятора з якого витікає струмінь; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості плаву; v_{z0} – швидкість струменя плаву у отворі кошика гранулятора яка у свою чергу залежить від навантаження по плаву у цілому на гранулятор, від кількості отворів у кошику та їх розмірів; p_0 , та p_1 – тиск у навколишньому середовищі та початковий тиск у струмені у отворі кошика (початковий тиск може мати змінне значення у часі).

Але тільки гарна робота ОВГ може не дати повністю потрібного якісного продукту, якщо гранулятор не буде гармонійно працювати з грануляційною баштою.

Для розробки методики розрахунку потрібних умов для ефективної роботи усього комплексу обладнання грануляційної башти було проведено ряд теоретичних досліджень впливу гідродинамічного впливу потоку повітря на рух гранул у башті після виходу їх із ОВГ. В основу було покладено рівняння руху гранули з урахуванням симетричного відповідно осі гранулятора (бо у башті може бути встановлено декілька грануляторів і кожен гранулятор буде формувати свій факел розпилу) характеру такого руху [10]. Тому можна розглядати у подальшому рух краплі, а потім і гранули у площині, яка проходить через вісь гранулятора, що обертається.

$$\begin{cases} \frac{d}{d\tau} W_x(\tau) = - \frac{\xi S \rho_{vozd} (W_x(\tau) + V_x)^2}{2 m} \\ \frac{d}{d\tau} W_y(\tau) = g - \frac{\xi S \rho_{vozd} (W_y(\tau) + V_y)^2}{2 m} \end{cases} \quad (7)$$

де x – горизонтально вісь; y – вертикальна вісь, яка направлена у низ; τ – час; $W(\tau)$ – швидкість руху краплі у тому чи іншому напрямку; ξ – коефіцієнт опору краплі (гранули); S – площа миделевого перетину, яка залежить від діаметру гранули; ρ_{vozd} – щільність повітря; V – швидкість повітря у грануляційній башті, яка залежить від пересічних розмірів грануляційної башти, від витрат повітря через башту; m – маса краплі (гранули), яка залежить від розміру гранул та їх фізичних властивостей.

Якщо розглядати залежність (7) та взаємозв'язок між параметрами, що входять до системи цих рівнянь, то можна побачити, що рішення цих рівнянь, а саме значення горизонтальної та вертикальної складових швидкості руху гранули у свою чергу зворотно впливають, на чисельне значення коефіцієнту супротиву. Це пояснюється тим, що коефіцієнт опору залежить від чисел Рейнольдса, який залежить від значень швидкості, а також, з огляду на значну різницю величин швидкості крапель у горизонтальному та вертикальному напрямках, має у часі перемінне значення. Також, як горизонтальна швидкість так і вертикальна швидкості мають

перемінне значення у часі. І тому ці складні взаємозв'язки ускладнюють рішення поставлених задач визначення горизонтальної та вертикальної швидкості у часі з наступним розрахунком траєкторій руху гранул, визначенням діаметра факелу розпилу, а також видачою вихідних даних для термодинамічних розрахунків процесів, що протікають між потоком повітря та гранулами. А ці гідродинамічні та термодинамічні параметри є визначальними для організації процесу кристалізації гранул.

Рівняння (7), з урахуванням всіх зазначених залежностей було вирішено та ці рівняння використано для розрахунків траєкторій руху гранул від кошика гранулятора, що обертається, до нижньої частини башти, де гранули вже відводяться за її межі. На рисунку 2 показано приклад таких розрахунків.

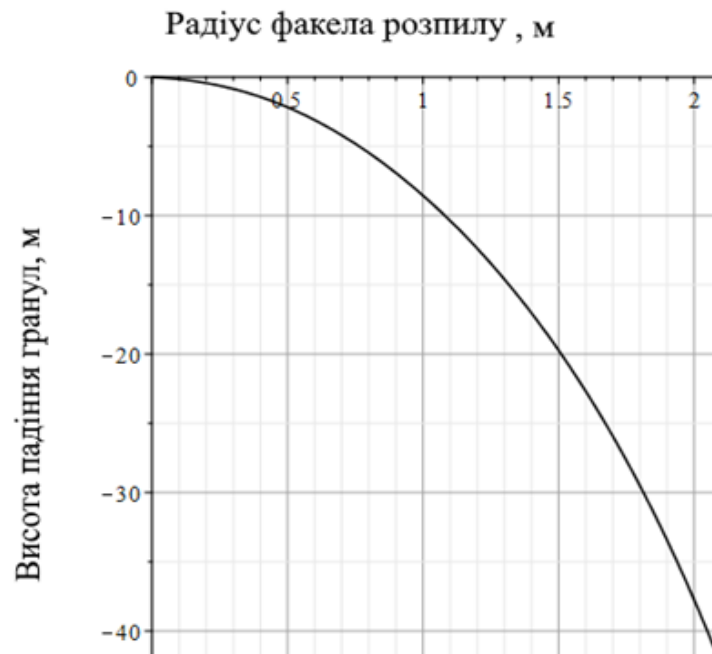


Рис. 2. Результати розрахунку траєкторії руху гранули карбаміду у грануляційній башті висотою падіння гранул 42 м.

Для розрахунків, що використані у показаному прикладі, враховані реальні умови роботи грануляційної башти виробництва карбаміду. Подальше впровадження промислових зразків ОВГ показало дієвість такого підходу.

Навантаження по плаву 130 т/годину, витрата повітря становить 130000 м³/годину, діаметр кошика ОВГ 500 мм. Вибрано випадок коли гранулятор не обертається та кутова швидкість дорівнюється 0. У цьому випадку витікання струменів плаву відбувається під дією стовпа плаву, який знаходиться у грануляторі. Та вказана на графіку траєкторія для такого випадку характерна для гранул, що утворилися з крапель, які витікають з середньої частини кошика гранулятора під кутом 45 градусів до горизонтальної площини.



Висновки. Було проведено теоретичний аналіз математичних рівнянь, що описують такі основні процеси як витікання струменя плаву з перфорованого кошика гранулятора з подальшим диспергуванням на каплі під дією внутрішніх збурень у струмені рідини. Також розглянуто та проаналізовано математичні рівняння, що описують подальший рух гранул від гранулятора до нижньої частини грануляційної башти. На основі такого аналізу було виявлено чисельні фактори, які перелічено вище, впливають на процеси утворення гранул у грануляційній башті виробництва мінеральних добрив. Розроблено рекомендації щодо необхідності враховувати перелічені фактори при гідродинамічних розрахунках процесів, що протікають як у кошику гранулятора, так при руху гранул у робочому просторі грануляційної башти. Ці рекомендації було використано для розробки метода розрахунку траєкторій руху гранул для використання у реальних промислових умовах з метою рівномірного розподілу гранул по перетину башти, що забезпечує однакові умови контактування гранул з повітрям, що охолоджує гранули та впливає на якість гранульованого продукту.

Список використаних джерел

1. Склабінський В. І., Кононенко Н. П., Скиданенко М. С. Ефективність промислового впровадження модернізованого вібраційного гранулятора, що обертається, плава в агрегатах отримання аміачної селітри. *Хімічна промисловість України*. 2012. № 3(110). С. 73-76
2. Склабінський В. І., Артюхов А. Є., Скиданенко М. С. Експериментальне дослідження впливу температури та концентрації розчину на якість монодисперсних гранул. *Наукові праці ОНАХТ. Серія: Технічні науки*, 2012. Вип. 4, т. 2. С. 127-129.
3. Скиданенко М. С., Склабінський В. І., Кононенко Н. П. Дослідження процесу закінчення струменя рідини з отвору перфорованої оболонки прилера. *Вісник НТУ ХПІ. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2014. № 26(1069). С. 186-192.
4. Скиданенко М. С., Склабінський В. І. Розповсюдження коливань тиску у зоні формування крапель віброгранулятор. *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте: Междунар. науч.-практ. ИНТЕРНЕТ-конф.*, 18 – 19 июня 2013 г. Одесса, 2013. С. 28-36.
5. Yurchenko O., Ostroha R., Sklabinskyi V., Gusak O., Bocko J. Formation of Liquid Droplets at the Prilling Bucket Outlet Under Free Oscillations of the Liquid Jet. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_18
6. Sklabinskyi V., Liaposhchenko O., Pitel' J., Pavlenko I. [et al.]. Experimental Studies and Condition Monitoring of Auxiliary Processes in the Production of Al₂O₃ by Sol-Gel Technology. *Processes*. 2022. Vol. 10.



P. 2090. <https://doi.org/10.3390/pr10102090>.

7. Yurchenko O., Sklabinskyi V., Ochowiak M., Ostroha R., Gusak O. Rational choice of a basket for the rotational vibropriller. *Journal of Engineering Sciences*. 2022. Vol. 9(1). F16-F20. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).f3).

8. Левич В. Г. Фізико-хімічна гідродинаміка. Москва: Физматиз, 1959. 700 с.

9. Скиданенко М. С., Склабінський В. І. Аналіз гідродинаміки стаціонарного витікання струменя. *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. 2013. № 1. С. 79–85.

10. Холин Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылителей жидкости. Москва: Машиностроение, 1977. 182 с.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.

O. Yurchenko¹, V. Sklabinskyi¹, O. Gusak¹
¹Sumy State University

INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC AND MECHANICAL FACTORS ON THE FORMATION OF GRANULES IN A GRANULATION TOWER USING A ROTATING VIBRATING GRANULATOR

Summary

The production of products at the proper level requires the appropriate level of control and quality from the equipment. To ensure the required quality of products, various substances are used, which the chemical industry is rich in and which can not only affect the quality and structure of new substances, but also change their own aggregate state. Mineral fertilizers, which today are quite widespread and important in the process of agricultural and industrial production, are formed as a result of granulation. In this article, a theoretical analysis of the mathematical equations describing the main processes of the outflow of the liquid jet from the perforated basket of the granulator with subsequent dispersion into droplets under the action of internal disturbances in the liquid jet was carried out, and the mathematical equations describing the further movement of the granules from the granulator to the lower part were considered and analyzed. granulation tower. As a result, on the basis of such an analysis, numerous factors affecting the processes of granule formation in the granulation tower of mineral fertilizer production were identified. Recommendations have been developed regarding the need to take into account the listed factors during hydrodynamic calculations of the processes occurring both in the granulator basket and during the movement of granules in the working space of the granulation tower. But only good work of mashine may not give a completely required high-quality product, if the granulator does not work harmoniously with the granulation tower. For the calculations used in the example shown, the real operating conditions of the granulation tower for the production of urea are taken into account. Further implementation of industrial samples of mashine showed the effectiveness of such an approach. These recommendations were used to develop a method of calculating the trajectories of the granules for use in real industrial conditions with the aim of uniform distribution of granules across the cross-section of the tower, which ensures the same conditions of contact of granules with air, which cools the granules and affects the quality of the granulated product.

Keywords: granulation, jet, drops, pressure, density, rotation, frequency.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-104-115

УДК 662.767.2

О. Г. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Р. В. Скляр¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

А. С. Комар, інженер

ORCID: 0000-0001-7037-8402

¹ Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua, тел.: +380679168580

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ МАШИННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ

Анотація. В статті розглянуті теоретичні аспекти моделювання машинної технології утилізації органічних відходів. Для опису такої системи у вигляді інформаційної моделі було використано структурно-параметричну схему функціонування технології. Метод проектування технологій та засобів, що мають найбільшу ефективність у заданих умовах, заснований на математичній моделі або ієрархії моделей, що адекватно описує проєктований процес та дозволяє за допомогою сучасних обчислювальних засобів поєднати процеси постановки та вирішення задачі. Для цього запропоновано модель, основним показником якості якої, прийнято кількість азоту в одній тонні готового органічного добрива щодо вмісту азоту у вихідному гною та посліді. В роботі для вирішення задачі визначення динаміки збереженості азоту використано логіко-лінгвістичний метод формалізації моделей нечітких багатовимірних систем. Огляд методів та моделей для формування та вибору технологій і комплексів технічних засобів, дозволив обґрунтувати метод проектування технологій утилізації гною та посліду.

Ключові слова: гній, послід, математична модель, метод, проектування, тварина, технологічний процес, добриво.

Постановка проблеми. Розробка методу проектування технологій утилізації гною та посліду є складною багатоплановою задачею [1, 2].

При формуванні та виборі технологій утилізації гною [3-6] найбільш ефективно виходити з умови біологічного обороту поживних речовин, який полягає в отриманні екскрементів від тварин, нормалізації їх складу, що забезпечує активізацію мікрофлори ґрунту та харчування сільськогосподарських рослин, при активному впливі на систему зовнішніх впливів. Зовнішніми впливами є господарські умови, технології, що застосовуються, які складаються з процесів та операцій, а також технічні засоби для виконання операцій.

Аналіз останніх досліджень. Питаннями прийняття рішень на основі математичних моделей присвячена численна література,



зокрема роботи вчених А. Г. Аганбегяна, А. М. Бондаренко, Є. С. Вентцель, А. М. Валге, Л. В. Канторовича, Р. О. Трибрата, Г. С. Поспелова, П. М. Павленко, Н. П. Федоренко та ін. [7-10].

Незважаючи на спільність розв'язуваної задачі, розроблені математичні моделі оптимізації складу, структури та використання засобів технічної оснащеності сільського господарства мають низку суттєвих відмінностей.

Усі математичні моделі можна умовно розділити на аналітичні та статистичні [11, 12]. У першому випадку основні кількісні показники процесів (технологічних операцій) пов'язуються аналітичними залежностями. Система цих рівнянь і є аналітичною моделлю. Під час розробки статистичних моделей (імітаційні моделі, модель Монте-Карло) виходять із того, що виробничим діям природньо властивий елемент випадковості, що вони не є детермінованими, а підпорядковуються законам розподілу випадкових величин (статистичні моделі дозволяють досліджувати систему будь-якого типу) [13]. Можливість урахування нелінійності, динаміки, імовірнісної природи деяких явищ дозволяє зробити статистичну модель адекватної дійсності і, досліджуючи її, здійснювати так званий натурний експеримент у прискореному масштабі часу [14-16].

Формулювання мети статті. Обґрунтувати метод проектування технологій утилізації гною та посліду за допомогою огляду методів та моделей для формування та вибору технологій і комплексів технічних засобів.

Основна частина. Для формування будь-якої технології необхідно прийняти наступні передумови [17, 18]:

- на всіх етапах впливу як предмет праці виступає один і той ж продукт – екскременти тварин, фізико-механічні, мікробіологічні, агрохімічні та санітарно-гігієнічні властивості яких змінюються цілеспрямовано у бік необхідних ґрунтом кінцевих показників;
- початковий стан предмета праці – екскрементів для всіх видів органічних добрив має той самий вектор стану, який визначається спеціалізацією підприємства та системою видалення екскрементів;
- вид добрива, одержуваного у процесі переробки екскрементів, визначається агрохімічними, фізико-механічними, санітарно-гігієнічними та іншими вимогами рослин, ґрунтової мікрофлори, а також екологічними вимогами довкілля.

Вихідний гній, послід під впливом операцій, технологічних процесів та технічних засобів, поєднання яких обумовлено технологією, перетворюються на органічні добрива та очищену рідину (при використанні технологій глибокої переробки) відповідно до фаз їх перетворень [19, 20].

Для опису такої системи у вигляді інформаційної моделі [21]

може бути використано структурно-параметричну схему функціонування технології, представлену на рис. 1.

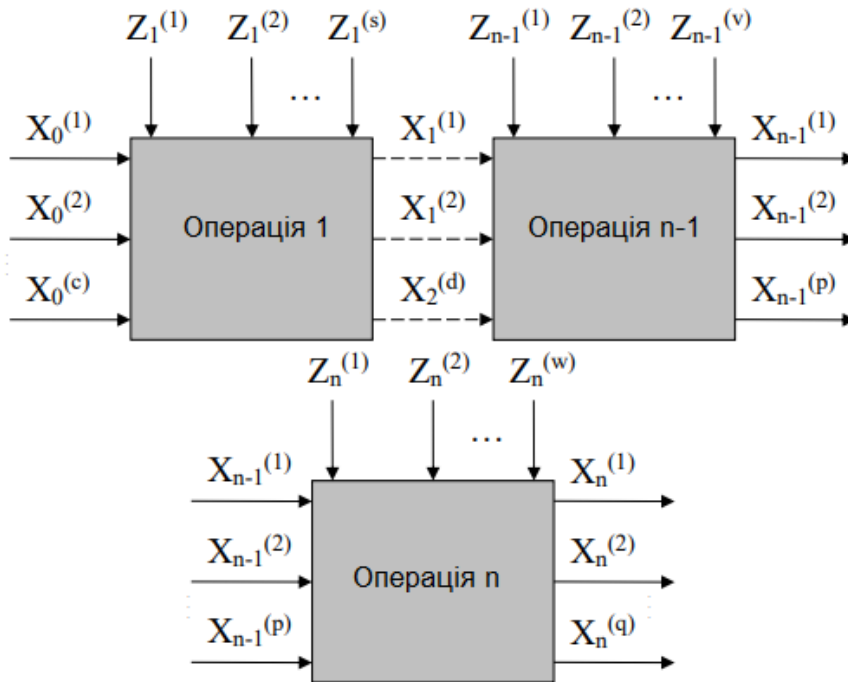


Рис. 1. Структурна схема багатовимірнього багатоланкового технологічного процесу

Допустимо досліджуваний процес складається з n багатовимірних операцій. На вході процесу діють випадкові величини X_0 , а вихід першого процесу має випадкові величини X_1 , які є входами для іншого процесу і так далі. Вихід всього технологічного процесу характеризується випадковими величинами X_n [21].

На якість готових органічних добрив та одержуваної очищеної рідини впливають як параметри вихідного матеріалу, так і параметри технічних засобів [22]. На кожній операції діють випадкові фактори Z_1, Z_2 тощо.

Щільності ймовірності всіх випадкових величин та їх спільних розподілів передбачаються нормальними.

Математичне очікування будь-якого з виходів визначається на підставі багатопараметричного рівняння

$$\begin{aligned}
 M \{ X_1^{(i)}, \dots, X_{n-1}^{(l)}; Z_1^{(h)}, \dots, Z_n^{(v)} \} = \\
 = A + \sum_{i=1}^c a_i x_0^i + \dots + \sum_{l=1}^p f_l x_{n-1}^{(l)} + \sum_{h=1}^s d_h z_1^{(h)} + \dots \\
 + \sum_{v=1}^w \varphi_v z_n^{(v)}
 \end{aligned}$$



Коефіцієнти рівнянь мають бути визначені на підставі моделювання на ПЕОМ з математичних моделей [21, 23].

Вихід системи визначає векторна функція X_n , яка включає економічні, техніко-економічні та екологічні показники ефективності функціонування системи.

Модель багаторівневого процесу технологічного проектування з пороговими відборами рішень на кожному рівні характеризується високою ефективністю, тому що користувач на кожному етапі проектування має можливість відібрати кілька варіантів найближчих до найкращого варіанту. На останній стадії проектування вибирається один остаточний варіант, який, на думку користувача, ґрунтуючись на його кваліфікації та компетентності, відповідає критерію якості.

Процес проектування включає наступні, послідовно здійснені етапи [23]:

1. Обстеження господарства, для якого обирається технологія.
2. Збір та класифікація вихідних даних про виробничі умови.
3. Порівняння вихідних даних з обмеженнями застосування технології, що містяться в блоці баз даних ПЕОМ.
4. Формування технології утилізації гною, посліду та її варіантів з обліком умов господарства.
5. Прийняття рішення про можливість вибору технології із заданими вихідними параметрами для умов даного господарства.

Алгоритми вибору раціональних варіантів технологічних процесів складені у формі імплікацій.

Наукова основа формування технологій – метод проектування технологій та засобів, що мають найбільшу ефективність у заданих умовах, заснований на математичній моделі або ієрархії моделей, що адекватно описує проєктований процес та дозволяє за допомогою сучасних обчислювальних засобів поєднати процеси постановки та вирішення задачі.

Для вибору ефективних технологій утилізації гною і посліду застосовуються методи, яких на сьогоднішній день безліч і які мають лише модельні приклади [21, 23].

При формалізованому описі системи утилізації гною, посліду з отриманням органічних добрив виходили з того, що задача дослідження технологій може бути представлена як двоточкова, що формується наступним чином: необхідно перевести систему з деякого початкового стану X_0 в кінцевий стан X_m за часовий інтервал T при впливах на вектор керування. Модель отримання органічних добрив у загальному вигляді представлена рис. 2.

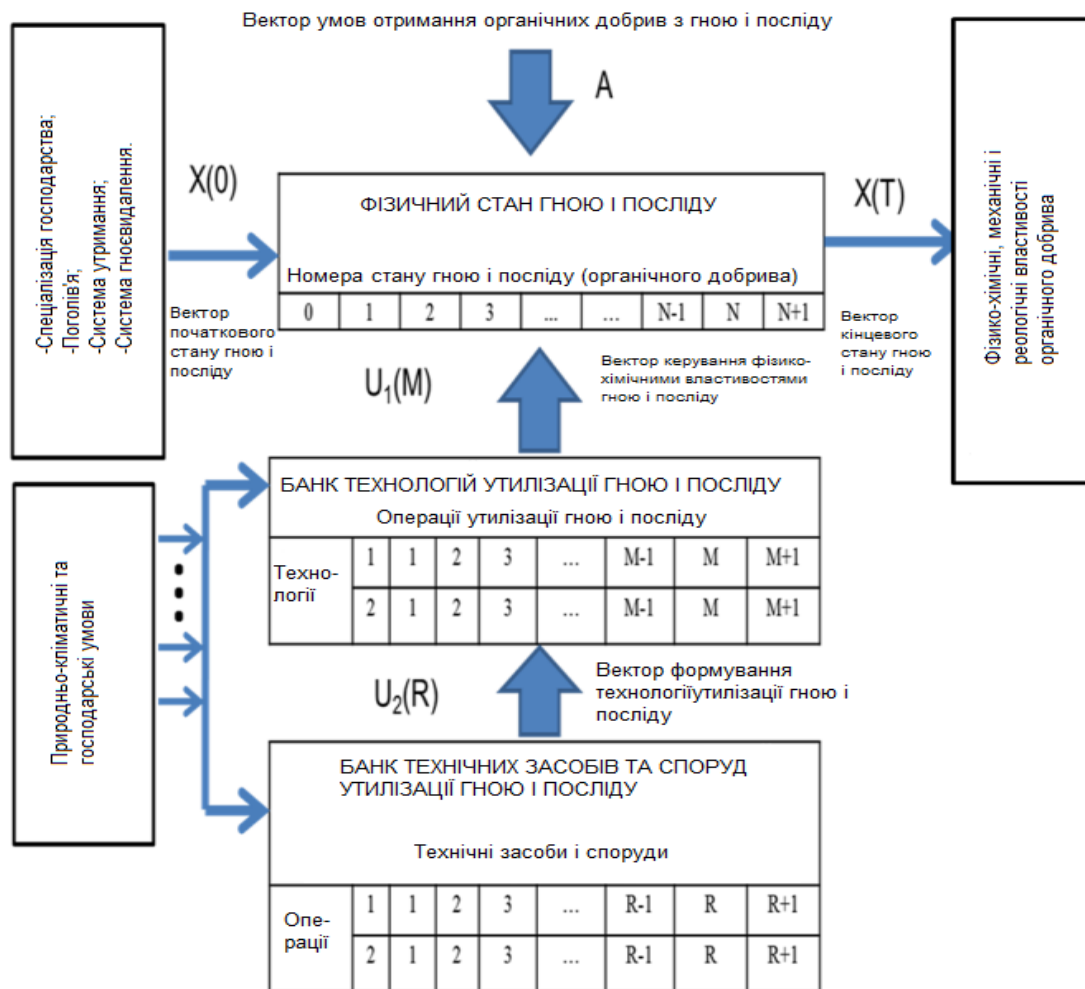


Рис. 2. Модель отримання органічних добрив у загальному вигляді

Для формування технології прийнято такі передумови [23, 24]:

- при утилізації гною та посліду на всіх її етапах як предмет праці виступає той самий продукт – гній, послід, фізико-хімічні властивості якого змінюються цілеспрямовано у бік необхідного кінцевого показника;

- початковий стан гною, посліду X_0 для всіх видів органічних добрив має один і той же вектор стану, який визначається його станом на момент виходу з приміщення для утримання тварин;

- вид одержуваного органічного добрива внаслідок використання технологій визначається вектором кінцевого показника фізико-хімічних властивостей, отриманого з гною, посліду, органічного добрива в стані X_T .

Вектор стану гною, послід розвивається як у просторі визначальних його координат, так і в часовому інтервалі, обумовленому біохімічними процесами, що відбуваються при утилізації. Як основні складові вектору стану системи прийнято фізико-хімічні показники при зміні станів вектору з x_i в x_{i+1} .



Система переходить зі стану x_i до стану x_{i+j} під впливом керування $U_1(i,j)$, де i - номер технології, j - номер операції у технології.

Вектор керування U_1 складається з безлічі технологій M , якими визначається як вид органічного добрива, так і основні його показники в кінці тимчасового інтервалу та завершальної операції N , вектору X_T .

Кожна з технологій складається з безлічі операцій, для виконання яких використовуються різні технічні засоби (множини U_2). Складом технічних засобів визначається обрана технологія утилізації гною, посліду та вид органічного добрива.

Реальні виробничі процеси протікають у конкретних умовах, обумовлених впливом безлічі факторів, основними з яких є фактори, що впливають на протікання біохімічних процесів у перероблюваному гною, посліді та готових органічних добривах [6, 20, 25]. У запропонованій моделі вектор умов отримання органічних добрив з гною, посліду A впливає на вектор стану гною, посліду X . Вектор умов складається з безлічі детермінованих і випадкових складових. Характер їх впливу значною мірою залежить від умов конкретного виробництва та системи утримання тварин.

У загальному вигляді математична модель утилізації гною, посліду та отримання органічних добрив може бути записана у вигляді співвідношення

$$X_T = A_M X_0 + F_1 [U_1 = F_2(U_2)A],$$

де F_1, F_2 - вектор керування станом гною, посліду;

U_1 - технологія як вектор керування станом гною, посліду;

U_2 - технічні засоби як вектор керування станом гною, посліду;

A - вектор умов отримання органічних добрив із гною, посліду;

X_0 - початкове значення вектору стану гною, посліду;

X_T - кінцеве значення вектору стану гною, посліду;

T - тимчасовий інтервал утилізації гною, посліду;

A_M - матриця вектору постійних або змінних значень факторів, що впливають на умови отримання органічних добрив, представлена виразом

$$A_M = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{vmatrix}$$

Складовими векторів моделі є показники, прийняті для оцінки технологій утилізації гною, посліду та окремих операцій. Об'єкт керування X ($Q, W_n, W_{добр}, K_n, K_{добр}, f_{обр}, f_{вн}, Z_{пит.}^k, Z_{пит.}^e$) характеризується поточним станом гною, посліду (органічних добрив) та містить такі складові:



Q – маса гною, посліду, т;

W_n – вологість гною, посліду, відс.;

$W_{добр}$ – вологість органічного добрива, відс.;

K_n – вміст поживних речовин у вихідному гною, посліді, відс.;

$K_{добр}$ – вміст поживних речовин у готовому органічному добриві, відс.

$f_{обр}$ – втрати азоту у процесі обробки гною, посліду, у частках одиниці;

$f_{вн}$ – втрати азоту при внесенні органічних добрив, у частках одиниці;

$Z_{пит.}^k$ – питомі капітальні витрати на 1 т вироблених та внесених органічних добрив, грн./т.

$Z_{пит.}^e$ – питомі експлуатаційні витрати на 1 т вироблених та внесених органічних добрив, грн./т.

Таким чином, процес утилізації гною та посліду є складною багатопараметричною системою, модель функціонування якої має багатоступінчасту структуру, що включає моделі окремих процесів і явищ та їх взаємозв'язків, і враховує умови отримання органічних добрив [6, 20, 25].

Вектор умов отримання органічних добрив із гною та посліду характеризує поєднання факторів, що впливають на якість одержуваних органічних добрив. У запропонованій моделі основним показником якості прийнято кількість азоту в одній тонні готового органічного добрива щодо вмісту азоту N у вихідному гною, посліді. Інші показники якості органічних добрив, такі як відсутність патогенної мікрофлори, гранулометричний склад тощо, виступають як обмеження.

Фактори, що впливають на збереження азоту в процесі утилізації гною та посліду [25], показані у вигляді інформаційної моделі, представленій на рис. 3:

Q_N^1 – кількість N доведеної до рослини;

Q_N – кількість N у свіжому гною (посліді);

W – вологість гною, посліду;

C/N – співвідношення вуглецю до азоту у вихідному гною/посліді;

$T_{тех}$ – інтенсивність технології (час переробки, температурний режим, кількість технологічних операцій);

$T_{вн}$ – технологія внесення (кількість технологічних операцій, час від моменту розподілу добрив до закладення в ґрунт);

q – якість виконання технологічних операцій;

N_a – природно-кліматичні умови.

Поєднання факторів, що впливають, повинно забезпечувати:

$Q_N^1 \rightarrow \max.$

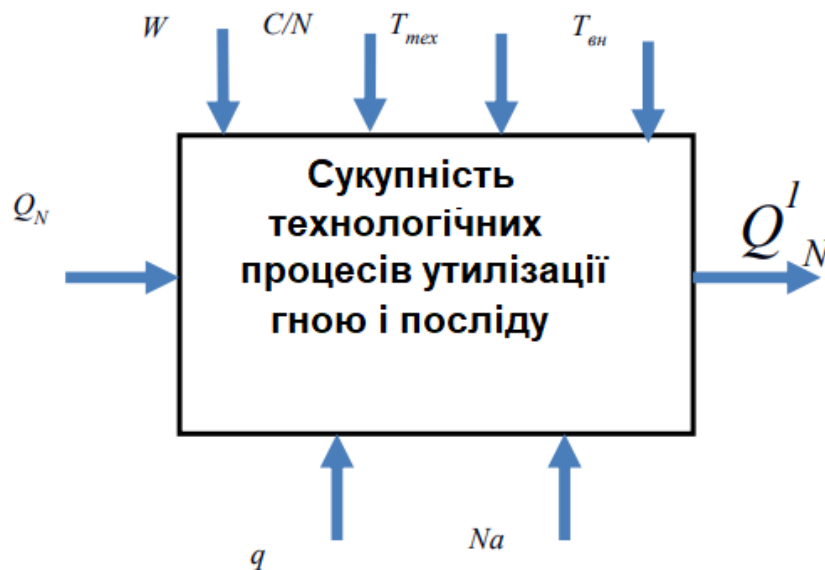


Рис. 3. Інформаційна модель впливу факторів на збереження азоту

При цьому на всі фактори, крім N_a , можна впливати, тобто, керувати.

До цього часу комплексних досліджень з визначення залежності динаміки збереженості азоту від перерахованих вище факторів та їх поєднання не проводилося. Основною причиною цього була складність і висока вартість проведення експериментальних досліджень, відсутність методів формалізації та кількісного подання якісних інформаційних компонентів, та, крім того, складність та апріорна невизначеність процесів, явищ та взаємодій, що протікають у процесі утилізації гною та посліду.

Для вирішення задачі визначення динаміки збереженості азоту в даній роботі запропоновано логіко-лінгвістичний метод формалізації моделей нечітких багатовимірних систем [23].

Огляд методів та моделей для формування та вибору технологій і комплексів технічних засобів, дозволив обґрунтувати метод проєктування технологій утилізації гною та посліду, що представлено на рис. 4.

На першому етапі проводиться науковий аналіз та формалізований опис системи, що розкриває особливості алгоритму її функціонування та характер взаємодії вхідних та вихідних показників.

Другий етап передбачає розробку математичної моделі. Для великих багатопараметричних систем це, як правило, комплекс математичних моделей різного виду, що забезпечують моделювання процесів системи в цілому та окремих її складових, а також взаємозв'язку між ними.

На третьому етапі обґрунтовуються критерії оцінки, які враховують усі основні показники об'єкта.



Рис. 4. Основні блоки методу проєктування технологій утилізації гною та посліду

Четвертим етапом є збір та обробка інформації про умови функціонування системи. У разі це побудова моделей оцінювання збереженості азоту залежно від діючих чинників.

П'ятий етап, що передбачає формування технологій та комплексів технічних засобів у діалоговому режимі. При цьому алгоритмічному та програмному забезпеченню відводяться функції оперативного розрахунку елементів системи з урахуванням розроблених математичних моделей.

На наступних етапах проєктування здійснюється аналіз результатів проєктування та перевірки адекватності математичних моделей.

Висновки. Огляд методів та моделей для формування та вибору технологій та комплексів технічних засобів, дозволив обґрунтувати метод проєктування технологій утилізації гною та посліду.

*Список використаних джерел.*

1. Groenestein C. M., Valli L., PiñeiroNoguera C., Menzi H., Bonazzi G., Döhler H., Van der Hoek K., Aarnink A. J. A., Oenema O., Kozlova N., Kuczynski T., Klimont Z., Montalvo Bermejo G. Livestock housing. Options for Ammonia Mitigation Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh, 2014. P. 14-25.
2. Optimized Gravitational Settling of Hog Manure Solids: *Engineering and Design Study*, DGH Engineering Ltd. 12 Aviation Boulevard, St. Andrews, Manitoba R1A 3N5 October, 2013.
3. Singh P., Gamal El-Din M., Bromley D., Ikehata K. Alum settling and filtration treatment of liquid swine manure *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2006. Vol. 49(5). P. 1487–1494.
4. Smet E., Debruyne J., Deckx J., Deboosere S. Manure treatment according to the Trevi concept. *Forum for Applied Biotechnology*. September, 2003.
5. Jakubowski T. Analysis of waste processing technologies by composting method. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 118–122.*
6. Skliar A., Skliar R. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. 2014. Vol. 16(2). P. 183–188.
7. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ: НАУ, 2017. 392 с.
8. Трибрат Р. О. Моделювання технологічних процесів у тваринництві: метод. рекомендації до самостійного вивчення дисципліни. Миколаїв: МНАУ, 2016. 47 с.
9. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Study results of mass and nutrient loss in technologies of different composting rate: case of bedding poultry manure. *Engineering for rural development Proceedings*. 2016. P. 851–857.
10. Wiegers K. E. *Software Requirements*. 2-nd edition. Redmond: Microsoft Press, 2008. 516 p.
11. Томашевський В. М. Моделювання систем: підруч. для студ. ВНЗ/ за заг. ред. М. З. Згуровського. Київ: Видавнича група ВНЗ, 2008. 352 с.
12. Кігель В. Р. Математичні методи ринкової економіки. Київ: Кондор, 2008. 212 с.
13. Скляр Р. В. Основні принципи побудови та аналіз математичних моделей технологічних процесів. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матер. Міжнар. наук.-практ. конф.. Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 263–266.*



14. Григоренко С. М. Моделювання та оптимізація річного обороту стада великої рогатої худоби. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-13>.
15. Болтянський Б. В. Моделювання та оптимізація раціону годування дійних корів у зимовий період. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-5>.
16. 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>.
17. Комар А. Definition of priority tasks for agricultural development. *Multidisciplinary research: Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference*. Bilbao, Spain, 2020. P. 431–433.
18. Болтянський Б. В. Модель функціонування бази технічного сервісу обладнання тваринницьких підприємств. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 3. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-12>.
19. Болтянський Б. В. [та ін.]. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник. Київ: Кондор, 2020. 410 с.
20. Skliar O. Directions of increasing the efficiency of energy use in livestock. *Current issues of science and education: Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference*. Rome, 2021. P. 171–176.
21. 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.
22. Boltianskyi B., Boltianska L., Dereza S., Grigorenko S., Syrotyuk S., Jakubowski T. The Process of operation of a mobile straw spreading unit with a rotating finger body-experimental research. *Processes*. 2021. Vol. 9(7). P. 1144.
23. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Комар А. С. Огляд методів дослідження та оптимізації машинних технологій утилізації відходів тваринництва. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-2-9>.
24. Shokarev O., Komar A. State and problems of implementation of innovations in the field of animal husbandry. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-2-5>.
25. Скляр О. Г., Скляр Р. В. Біоконверсні технології прискореної переробки відходів тваринництва в екологічно безпечні добрива. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-3>.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2023 р.



O. Skliar¹, R. Skliar¹, A. Komar¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

THEORETICAL ASPECTS OF MODELING OF MACHINE TECHNOLOGY OF ORGANIC WASTE DISPOSAL

Summary

The article deals with the theoretical aspects of modeling the mechanical technology of organic waste disposal. To describe such a system in the form of an information model, a structural-parametric diagram of the functioning of the technology was used. The model of the multi-level process of technological design with threshold selection of solutions at each level is characterized by high efficiency, because the user at each stage of the design has the opportunity to select several options closest to the best option. At the last stage of design, one final option is selected, which, according to the user, based on his qualifications and competence, meets the quality criterion. The method of designing technologies and tools that have the greatest efficiency in given conditions is based on a mathematical model or a hierarchy of models that adequately describes the designed process and allows using modern computing tools to combine the processes of setting and solving the problem. For this, a model was proposed, the main quality indicator of which is the amount of nitrogen in one ton of finished organic fertilizer in relation to the nitrogen content in the original manure and litter. Until now, comprehensive studies on the dependence of the dynamics of nitrogen conservation on the factors listed above and their combination have not been conducted. The main reason for this was the complexity and high cost of conducting experimental research, the lack of methods of formalization and quantitative presentation of qualitative information components, and, in addition, the complexity and a priori uncertainty of processes, phenomena and interactions occurring in the process of utilization of manure and litter. In the paper, the logico-linguistic method of formalizing models of fuzzy multidimensional systems was used to solve the problem of determining the dynamics of nitrogen conservation. The review of methods and models for the formation and selection of technologies and complexes of technical means allowed to substantiate the method of designing technologies for the utilization of manure and droppings.

Keywords: manure, droppings, mathematical model, method, design, animal, technological process, fertilizer.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-116-125

УДК 621.927:[67.05+67.02]

О. О. Дереза¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2652-9853

І. О. Водяницький¹, аспірант

¹Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

e-mail: olena.dereza@tsatu.edu.ua, тел.: +380975784218

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРТИКАЛЬНОГО НОЖОВОГО МЛИНА

Анотація. У статті представлено дослідження, спрямоване на визначення впливу обраних особливостей конструкції ножового млина на ефективність подрібнення. Запропоновано вдосконалення конструкції вертикального ножового млина для отримання високодисперсного діоксиду кремнію. Спеціальну добавку – нанодисперсний кремнезем (діоксиду кремнію) використовують, щоб поліпшити сипкість, зменшити схильність порошоків до спікання, перетворити речовину на зручну для дозування «суху рідину», стабілізувати в'язкість, підвищити міцність тощо.

Можливість ефективного подрібнення певних видів матеріалів, які мають волокнисту структуру, вимагає вдосконалення конструкції ножового млина. Встановлення спеціального відбійника розв'язує проблему скидання зайвого тиску, який створюється через забивання фільтра. Для розв'язання проблеми інтенсивності помелу запропоновано встановити спеціальний завихрювач для створення більш інтенсивного потоку повітря і покращення якості помелу.

Ключові слова. подрібнення, діоксид кремнію, гумовий герметик, помел, відбійник, завихрювач.

Постановка проблеми. Подрібнення – процес зменшення розмірів сировини для одержання зерен розміром 5 мм і менше під дією зовнішніх механічних зусиль [1]. Такий вид руйнування виконують, як правило, у млинах.

Процес подрібнення характеризується ступенем дроблення. На практиці застосовують такі методи руйнування: для дроблення – роздавлювання, розколювання, стирання, удар та їх поєднання, а для подрібнення, крім того, злом і зріз. Вибір того чи іншого методу залежить від розміру грудок і зерен, міцності, вологості, схильності до збільшення (злипання) грудок і зерен та інших властивостей і характеристик подрібнюваного матеріалу.

Вибір млинів залежить від властивостей і характеристик матеріалу, продуктивності, ступеня подрібнення зерен готового продукту. У ножових млинах матеріал піддається рубильній й



різальній дії ножів ротора й статора. Подрібнений продукт розвантажується крізь перфоровану решітку. Основна перевага – можливість ефективного подрібнення еластичних матеріалів (гумо- й полімервмісних відходів тощо). Ступінь подрібнення 10-50, але подрібнення потребує значних витрат енергії.

Існує велика кількість досліджень з подрібнення різних матеріалів, однак на сьогодні відсутній комплексний підхід до обґрунтування впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів процесу подрібнення на показники якості помелу.

На сучасному етапі розвитку є ряд недоліків, характерних для даного виду технологічного устаткування. Найбільш вагомими, безумовно, є висока енергоємність процесу, знос робочих поверхонь, низька довговічність та відносно висока вартість окремих елементів конструкції. Багато уваги приділено дослідженням барабанним, вібраційним, жорновим, планетарним і іншим видам млинів. Недостатньо уваги приділено ножовим млинам, тому є актуальним дослідити і вдосконалити конструкцію ножового млина задля зменшення енерговитрат.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз конструкцій дробарок і млинів для руйнування шматкових і сипких матеріалів свідчить про наявність їх численних типорозмірів.

У роботах дослідників [2-4] виконано критичний огляд найбільш характерних конструкцій дробарок і млинів, запропонованих науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Незважаючи на високі характеристики традиційних дробарок і млинів, їх конструкції постійно вдосконалюються, що за час застосування валкових подрібнювачів сприяло створенню їх численних типорозмірів.

Дроблення міцних і крихких матеріалів доцільно здійснювати роздавлюванням і зломом, а міцних і в'язких – роздавлюванням, різанням і стиранням. Велике дроблення м'яких і крихких матеріалів переважно виконувати розколюванням, середнє і дрібне – ударом.

Для покращення роботи барабанних млинів [5-7] запропоновано модернізації конструкцій і зроблено порівняльне дослідження нової та традиційної конструкцій молоткового млину.

Витрата енергії при тонкому подрібненні теоретично повинна бути в 3-4 рази більшою, ніж при здрібненні. Однак, як показує практика, фактична витрата енергії більше в 15-20 разів. Тому слід винаходити шляхи зниження енерговитрат на здрібнення. Це досягається використанням певних конструктивних або технологічних рішень в залежності від типу та конструкції млина. Введенням поверхнево-активних речовин (ПАР) та спеціальних добавок також можливо підвищити продуктивність млинів.



Важливим є спосіб введення ПАР. Найкращий ефект показує введення ПАР не у вихідний матеріал до подрібнення, а безпосередньо в млин у вигляді розсіяного розчину ПАР. При цьому ПАР швидко та рівномірно розподіляється по всій масі матеріалу [3].

Обґрунтований вибір або вдосконалення конструкції існуючого подрібнювача, найбільш доцільного для ефективного руйнування певного шматкового або сипкого матеріалу, є актуальним. Аналіз роботи ножових млинів майже не розглядається, але можливість ефективного подрібнення певних видів матеріалів, які мають волокнисту структуру, вимагає вдосконалення конструкції цих млинів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Вдосконалення конструкції вертикального ножового млина для поліпшення сипкості, зменшення схильності порошків до спікання, перетворення речовини на зручну для дозування «сухої рідини», підвищення міцності, зменшення енергоємності.

Основна частина. Подрібнення широко використовується в переробній і харчовій промисловості для одержання сировини або напівфабрикату з частинами такого розміру, який дозволяє значно полегшити або прискорити теплову обробку, переміщення, транспортування, дозування та інші процеси обробки. Подрібнення сировини або харчових продуктів проходить шляхом роздавлювання, протирання, різання та ударної дії. Переважно подрібнення проводиться під дією комбінації тих чи інших способів. Так, подрібнення твердих матеріалів проводять роздавлюванням та ударом, а в'язких – роздавлюванням та протиранням. Під час подрібнення майже завжди одночасно сполучаються кілька методів, які супроводжують один одного.

Ножові млини відносяться до швидкохідних млинів із закріпленими розмельними тілами (ножами), за рахунок яких і відбувається подрібнення. При зменшенні розмірів часток матеріалу міцність частинок помелу підвищується, тому з підвищенням ступеня подрібнення зростає витрата енергії на подрібнення, тому саме цьому питанню приділяється багато уваги.

Ножові млини – це машини, середнього та мілкового подрібнення. Призначені для здрібнення матеріалів середньої міцності, полімерних та рослинних матеріалів з розміром часток до 50 мм. Мінімальний розмір часток після подрібнення становить 0,5 мм. Вихідний матеріал через завантажувальний патрубок 2 потрапляє під дію рухомих та нерухомих ножів, подрібнюється та після досягнення певного розміру часток видаляється через решітку 6. Розмір часток кінцевого продукту залежить від розміру отворів в решітці. Основні переваги ножових млинів: можливість здрібнення матеріалів, які мають волокнисту



структуру. Низька продуктивність та незначна ступінь подрібнення є основними недоліками млинів даної конструкції [8, 13, 14].

Щоб поліпшити сипкість, зменшити схильність порошоків до спікання, перетворити речовину на зручну для дозування «суху рідину», стабілізувати в'язкість, підвищити міцність, тощо використовують спеціальну добавку – нанодисперсний кремнезем (діоксиду кремнію).

Для отримання такого високодисперсного діоксиду кремнію було запропоновано конструкцію вертикального ножового млина (рис. 1). Такий млин має чашу 4 з об'ємом у 100 літрів. У низу цієї чаші розташований спеціальний ніж 5, який на високих оборотах розбиватиме агломерати аморфного кремнезему.

Перша версія цього млина складалась з чаші з кришкою та ножів, підшипникового вузла, приводу, рами для кріплення електродвигуна й станини для розміщення всієї конструкції млина. Проектна розрахункова швидкість обертання ножів мала складати приблизно 20000 об/хв.

Із розрахунків привод такого млина мав би складатись з клинопасової передачі на 2 паси із передаточним числом 1:4 та двигуна потужністю 3 кВт на 3000 об/хв. На валу двигуна було встановлено клинопасовий шків діаметром 355 мм. Двигун кріпиться на рамі та за потреби натягу паса регулюється гайками. За допомогою частотного перетворювача двигун досягав частоти обертання до 5000 об/хв.

Підшипниковий вузол встановлювався на дні чаші і на його валу на одному кінці стояв шків клинопасової передачі діаметром 90 мм. Інший кінець вала розміщувався в чаші. Від потрапляння матеріалу до підшипникового вузла захищав 20-мм шар повстяної набивки, закривався вузол кришкою, у яку встановлювались два сальники, які встановлені обернено, і потім на вал ставились два ножі – основний і додатковий та притискалися гайкою. Вал обертався у двох шарикових радіальних підшипниках 61905.

Чаша виготовлена із нержавіючої сталі товщиною 3 мм, а донце з листа 6 мм. Угорі для більшої жорсткості чаша посилена ободом із профільної труби 20x20. Внутрішній діаметр чаші 430 мм. Загальна висота чаші 700 мм. Ця чаша жорстко закріплювалась на рамі болтом. Кришка чаші має просту конфігурацію та закривалась через звичайні завіси. На ободі чаші проклеєно гумовий герметик. Перемелений матеріал із чаші видаляється шляхом його видувки стиснутим повітрям.

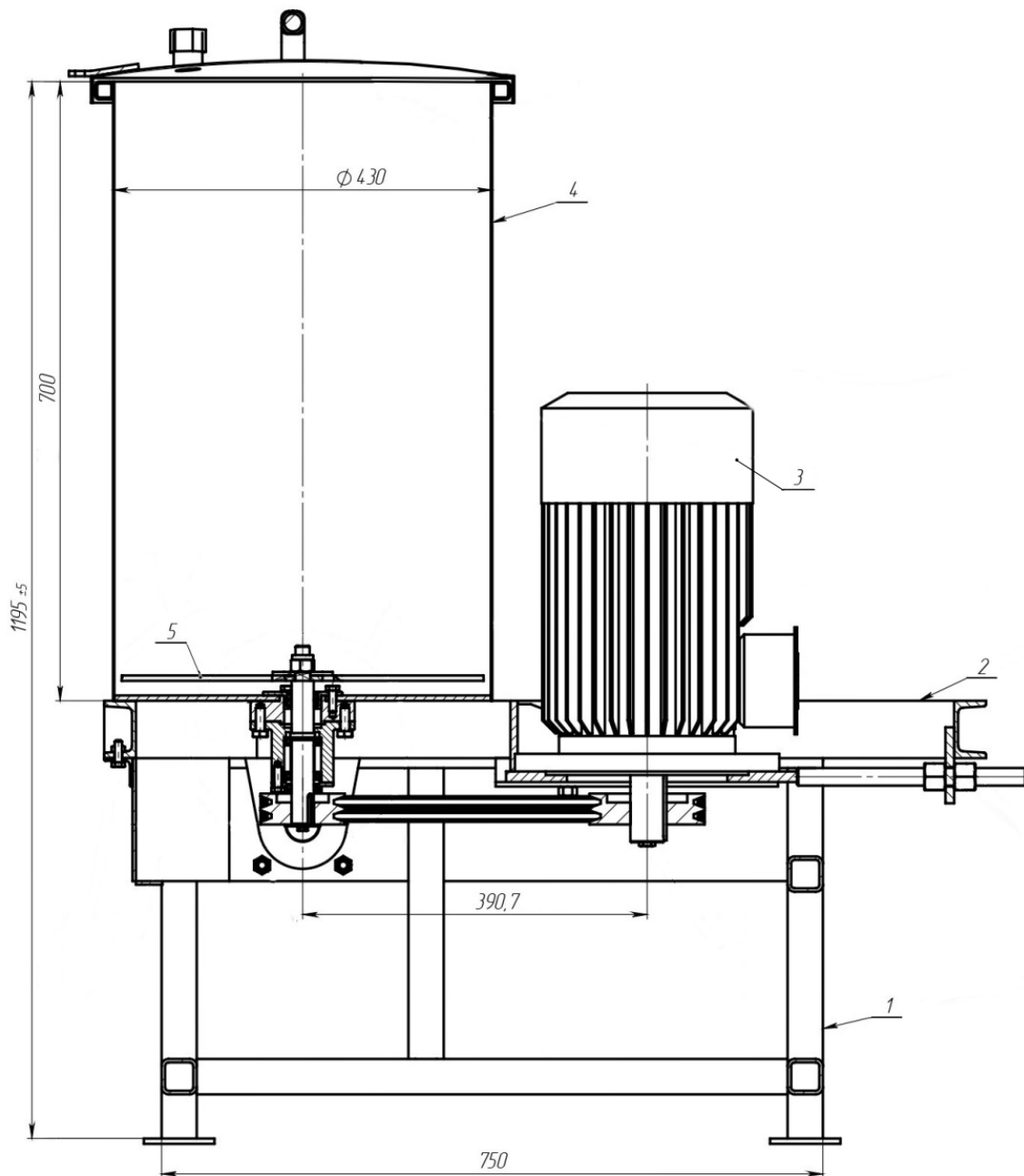


Рис. 1. Загальний вигляд вертикального ножового млина:
1 – станина; 2 – рама; 3 – привод; 4 – чаша; 5 – ніж

Сама рама має змогу перекидатись, будучи встановленою через піввісь та підшипниковий вузол UCF 207 на станині 1 (рис. 1), для проведення технічного обслуговування чаші. На цю ж раму встановлюється захисний кожух. У робочому положенні рама жорстко у двох місцях закріплюється до станини болтами. Станина жорстко кріпиться до підлоги.

Перші випробування млина показали, що потужності привода недостатньо для того, щоб розмелювати заповнену на 30% чашу матеріалом. Привід ледве розкручувався. Без перерахунків та зміни

передачі було прийнято рішення замінити мотор на більш потужний із потужністю 5 кВт. За таких параметрів ножі в заповненій чаші на 30% обертались із швидкістю 3000 об/хв. Частотний перетворювач вже не використовувався.

Були виконані перерахунки та виявлено, що оптимальна потужність двигуна повинна бути 11 кВт. Передаточне число клинопасової передачі повинно бути 1:1,4. При цьому швидкість обертання ножів тепер складатиме не більше 5000 об/хв.

Були виконані наступні зміни у конструкції:

1. Замінений двигун на інший із потужністю 11 кВт і частотою обертання 3000 об/хв.
2. Замінені шківні клинопасової передачі для забезпечення передаточного числа 1:1,4. На валу двигуна встановлено шків діаметром 125 мм.
3. Замінені паси на паси іншої довжини.
4. На кришці чаші встановили фільтр повітря 1 та зі зворотного боку пристрій уловлення матеріалу 2 (рис. 2).

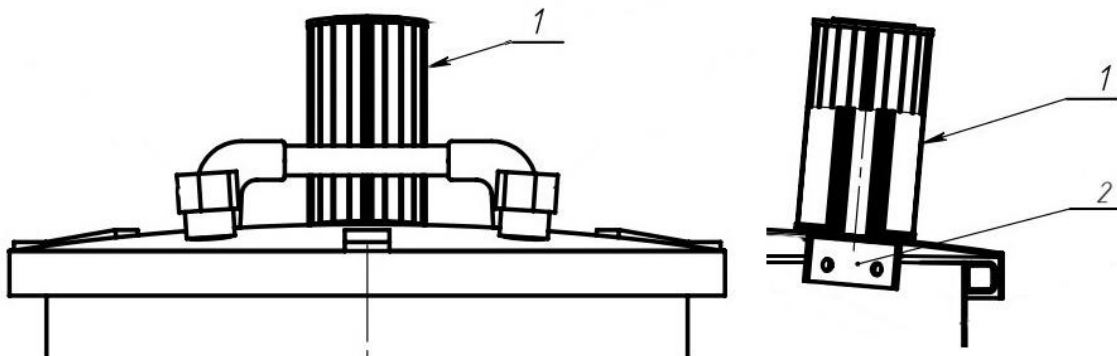


Рис. 2. Встановлений фільтр на кришці чаші:
1 – фільтр повітря; 2 – пристрій уловлення матеріалу

Під час наступних тестувань виявилось, що помел недостатньо інтенсивний, а встановлення фільтра проблему налипання більш подрібненого матеріалу на стінки чаші не вирішило. Та іноді фільтр продовжував забиватись і порушувалась герметичність чаші.

Однією з вимог до подрібнювальних машин є надійне вчасне видалення готового продукту з камери дроблення або подрібнення.

Із теоретичних міркувань шліфування та вирівнювання внутрішньої поверхні чаші повинно вирішити проблему налипання більш подрібненого матеріалу на стінки чаші. Встановлення спеціального відбійника 3 (рис. 3), направлено у зворотний бік від напрямку закручування потоку матеріалу в чаші, повинно вирішити

проблему скидання зайвого тиску, який створюється через забивання фільтра 1.

Також для кращої герметизації чаші звичайні завіси вирішено замінити на болтові затиски.

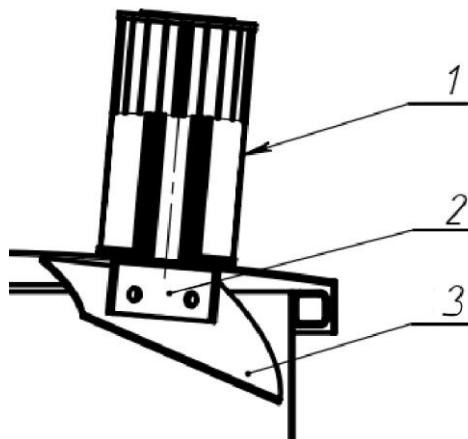


Рис. 3. Схема встановлення відбійника матеріалу:

1 – фільтр повітря; 2 – пристрій уловлення матеріалу; 3 – відбійник

При перевірці якості помелу виявилось, що залишається багато часток розмірами більше $+0,308$ мм. Із попередніх проблем стає зрозумілим, що це відбувається з-за невеликого часу роботи машини через її розгерметизацію та налипання матеріалу на стінках, а інтенсивність помелу низька. Навіть при довготривалому подрібненні в готовому продукті залишається певна кількість часток, які мають більший розмір, ніж необхідний. Підвищити якість помелу можна кількома способами.

Для вирішення проблеми інтенсивності помелу пропонується встановити спеціальний завихрювач (рис. 4), який буде створювати більш інтенсивний потік повітря, й при цьому матеріал буде більшу кількість разів розбиватись об ніж.

Завдяки наявності поперечних складових швидкості при застосуванні завихрювача змінюються умови для руху внутрішніх закручених потоків повітря з частками подрібненого матеріалу, що буде призводити до інтенсивності помелу. При цьому від додаткового ножа можна відмовитись [12].

Аналіз конструктивних змін у складових вертикального ножового млина показує, що вдосконалення конструкції дозволяє покращити якісні показники помелу, відмовитись від деяких елементів млина при невеликих енерговитратах.

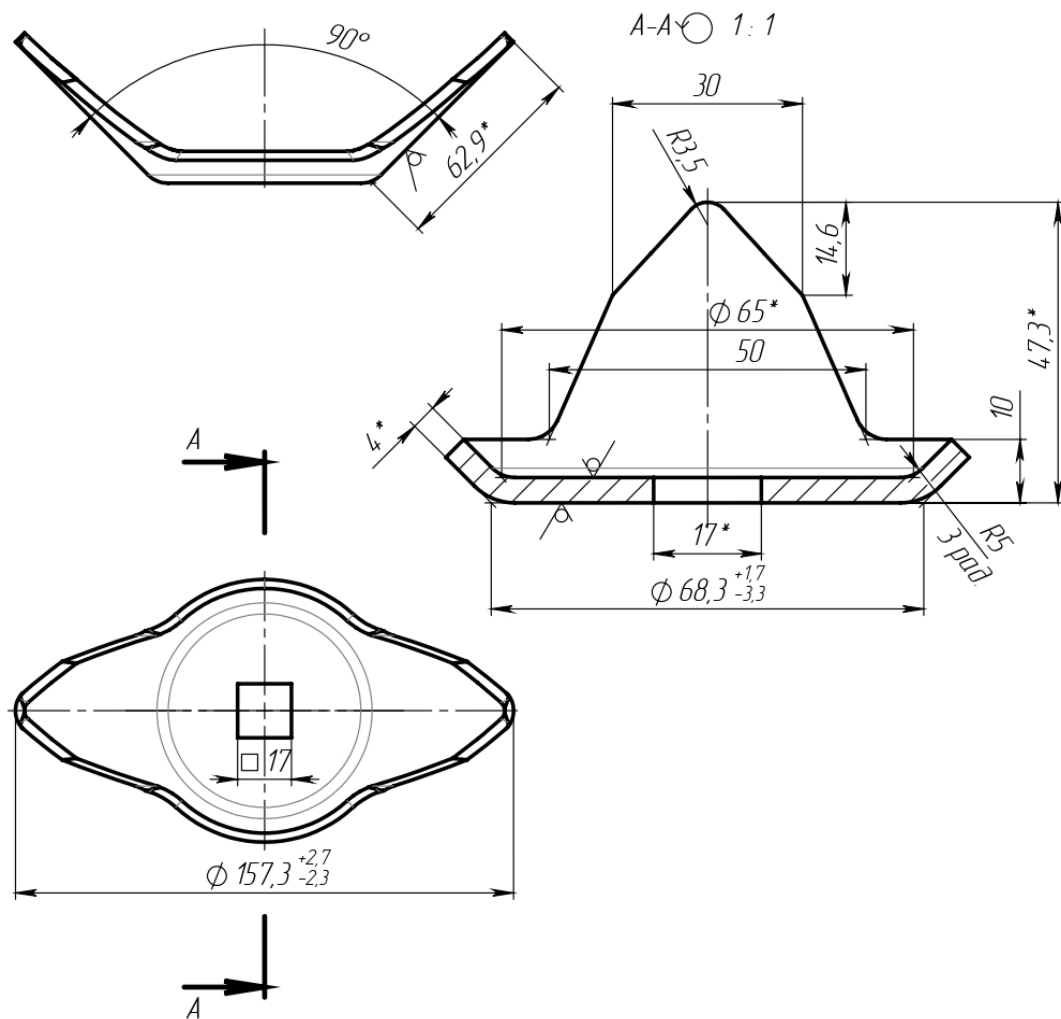


Рис. 4. Загальний вигляд завихрювача

Висновки. Для отримання високодисперсного діоксиду кремнію з метою поліпшення якісних показників помелу було запропоновано конструкцію вертикального ножового млина.

Були виконані зміни у конструкції: замінено двигун на інший із потужністю 11 кВт і частотою обертання 3000 об/хв., замінені шківни клинопасової передачі для забезпечення передаточного числа 1:1,4 із заміною пасів на паси іншої довжини, встановлено фільтр повітря і пристрій уловлення матеріалу.

Встановлення спеціального відбійника має вирішити проблему скидання зайвого тиску, який створюється через забивання фільтра. Для вирішення проблеми інтенсивності помелу запропоновано встановити спеціальний завихрювач для створення більш інтенсивного потоку повітря і покращення якості помелу й дослідити якісні показники.

*Список використаних джерел*

1. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 340 с.

2. Мікульонок І. О., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Іваненко О. І. Валкові дробарки і млини (Огляд конструкцій). *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2022. № 1(21). С. 30–43. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2022.254157>.

3. Тертишний О. О., Півоваров О. А., Кошулько В. С. Механічні процеси та обладнання харчових виробництв: навч. посібник. Дніпро: ДДАЕУ, 2022. 351 с.

4. Vochat A., Wesółowski L. Analysis of design solutions of hammer mills in terms of their operating efficiency (Analiza rozwiązań konstrukcyjnych rozdrabniaczy bijakowych waspekcie efektywności ich funkcjonowania). *Chem. Eng. Equip. (Inżynieria i Aparatura Chemiczna)*. 2010. № 5. P. 22–23.

5. Борщик С. О., Касян Я. В. Модернізація барабанного млина. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки: зб. доповідей II Всеукр. наук.-практ. конф.* Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 112.

6. Борщик С. О., Касян Я. В. Модернізація барабанного млина. *Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки: зб. доповідей II Всеукр. наук.-практ. конф.* Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 113.

7. Vochat A., Wesółowski L., Zastempowski M. A Comparative Study of New and Traditional Designs of a Hammer Mill. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2015. Vol. 58(3). P. 585–596. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10691/>

8. Опарин С. А. Процесс и оборудование помола растительных материалов до микронных размеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Днепропетровск, 2002. 193с.

9. Самойчук К. О., Паляничка Н. О., Верхоланцева В. О. Технологічне обладнання для виробництва борошна. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_27/ (дата звернення: 16.04.2023).

10. Knife mills. URL: <https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/knife-mill-110589-2.html> (дата звернення: 20.04.2023).

11. Дацишин О. В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: науковий посібник. Вінниця: Нова Книга, 2009. 488 с.

12. Дереза О. О., Водяницький І. О. Вдосконалення конструкції вертикального ножового млина. *Modern problems of science, education*



and society. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, 2023. P. 183–187.

13. Opielak M., Komsta H. Research directions of grinding process of bulk materials of agri-food products. *Scientific paper*. Opole, Poland: Opole University of Technology, 2000.

14. Opielak M. The study on the effect of hammer mill design on the grinding process. *Chemical and Process Engineering*. 2000. P. 28.

15. Сердюк В. В., Руденко В. А., Зубко В. М. Витрати енергії при роботі ударно-сепараційного подрібнювача. *Вісник ШНАУ. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2019. Вип. 2(36). С. 28–32.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2023 р.

O. Dereza, I. Vodyanitskyi
Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF THE VERTICAL KNIFE MILL

Summary

The article presents a study aimed at determining the impact of selected design features of a knife mill on grinding efficiency. The ability to effectively grind certain types of materials that have a fibrous structure requires improvement in the design of the knife mill. It is proposed to improve the design of the vertical knife mill for obtaining highly dispersed silicon dioxide. A special additive - nanodispersed silica (silicon dioxide) is used to improve flowability, reduce the tendency of powders to caking, turn the substance into a "dry liquid" convenient for dosing, stabilize viscosity, increase strength, etc.

When checking the quality of grinding, many particles larger than +0.308 mm were found. This problem arises from a short time of operation of the machine due to its depressurization and sticking of material on the walls, and the intensity of grinding is low.

The analysis of structural changes in the components of the vertical knife mill shows that the improvement of the design allows to improve the quality indicators of grinding, to abandon some elements of the mill with low energy consumption. Due to the presence of transverse velocity components when using a swirler, the conditions for the movement of internal swirling air flows with particles of crushed material change, which will lead to the intensity of grinding. At the same time, you can refuse the additional knife.

Installation of a special stopper solves the problem of releasing excess pressure, which is created due to clogging of the filter. To solve the problem of the intensity of grinding, it is proposed to install a special swirler to create a more intense air flow and improve the quality of grinding.

Keywords: grinding, silicon dioxide, rubber sealant, grinder, breaker, swirler.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-126-135

УДК [631.67+631.82]:634.16

С. Л. Сушко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-2933-2573

І. О. Чижиков¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3022-4828

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*e-mail: serhii.sushko@tsatu.edu.ua, тел. +380500133943

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ІНЖЕКТОРА ВЕНТУРІ ДЛЯ ФЕРТИГАЦІЇ ПЛОДОВИХ НАСАДЖЕНЬ

Анотація. Одним з найбільш розповсюдженим у застосуванні пристроєм для внесення добрив з поливною водою (фертигації) є інжектор Вентури. Для розрахунку струминного апарату (насоса, ежектора, інжектора) необхідно визначити такі гідравлічні та геометричні параметри: 1) витрати робочої та всмоктуваної рідини; 2) питомі енергії (повні тиски) робочої, всмоктуваної та змішаної рідин; 3) площі зрізу робочого сопла або його діаметр, площу поперечного перерізу камери змішування або його діаметр. В статті наведено результати розробки спрощеної методики розрахунку пристрою фертигації, що використовує інжектор Вентури в якості насоса для подачі маточного розчину добрив у поливну воду при зрошенні плодкових насаджень. Побудовано характеристики інжектора у відносній формі для випадку, коли площа входу в камеру зміщення інжектора перевищує у два рази площу робочого сопла. Встановлено, що в такій конфігурації максимальне значення ККД інжектора досягається при відносній витраті $q=0,6$. При цьому відносний напір складатиме $h=0,37$, а коефіцієнт витрат робочого сопла $\mu_{p,c}=0,21$. Наведено результати розрахунків витрати води через інжектор та об'єму інжекції залежно від геометричних параметрів інжектора та зміни тиску води.

Ключові слова: мінеральні добрива, багаторічні насадження, поливна вода, насос, вузол фертигації, методика розрахунку, тиск, напір.

Постановка проблеми. Плодові дерева, виростаючи впродовж багатьох років на одному місці і відрізняючись високою продуктивністю, поглинають із ґрунту велику кількість елементів живлення [1, 2, 3]. Так, деревами яблуня сорту Ренет Смиренка за врожайності 350 ц/га щорічно тільки з плодами відчужується азоту 20 кг, фосфору 12 кг, калію 50 кг. Це лише частина виносу, значна частка губиться з опадаючим листям, обрізаними гілками. Загальний винос плодоносними деревами яблуні і груші за всі роки життя досягає понад 400 кг азоту, 120 кг фосфору, 500 кг калію з 1 га [1, 2, 4].



Характерною особливістю харчування плодового дерева є тривале поглинання поживних речовин з ґрунту, хоча інтенсивність поглинання в різні фази розвитку неоднакова [1, 12, 22]. У живленні плодового дерева впродовж вегетації розрізняють два періоди: перший - з початку вегетації до закінчення зростання пагонів у молодих дерев і знімання врожаю у плодоносних, коли серед елементів живлення превалює азот [15, 16, 17]; другий період - по закінченні зростання пагонів після збирання врожаю до пізньої осені, коли потреба рослин у азоті порівняно знижена. У цей час велике значення набувають фосфор і калій, що сприяють нормальному завершенню вегетації та підвищенню зимостійкості рослин [19, 20, 21].

Отже, без внесення значних доз мінеральних добрив неможливо отримати великі та стабільні врожаї плодів у сучасних інтенсивних садах.

Аналіз останніх досліджень. Численними дослідженнями наукових установ і практикою передових господарств [5, 7, 9] доведено високу ефективність оптимальної системи (тобто розподілення в кількості, часі та сумісності) внесення добрив у садах: добрива збагачують ґрунт елементами живлення, підвищують урожайність і якість плодів, підвищують зимостійкість і довговічність дерев.

Крім макроелементів (азот, фосфор, калій) плодовій рослині потрібні і мікроелементи, недолік яких викликає страждання дерев. Наприклад, у садах півдня України нерідко зустрічається дефіцит таких мікроелементів, як залізо та цинк, що веде до ослаблення дерев та зниження урожайності [13, 14, 23].

Значні площі сучасних плодкових насаджень обладнані системами крапельного зрошення, при якому здійснюється локальне внесення мінеральних добрив з поливною водою (фертигація). Фертигація дозволяє постійно підтримувати оптимальну вологість ґрунту та подавати рослинам невеликими дозами збалансовану кількість елементів живлення впродовж вегетаційного періоду [11]. Для успішного проведення фертигації необхідно враховувати особливості поливного обладнання, види та форми добрив, що застосовуються, допустиму концентрацію поживних речовин у поливній воді, міграцію елементів живлення по ґрунтовому профілю, зміну реакції ґрунтового середовища в зоні зволоження, а також якість поливної води, що використовується для зрошення [12, 13, 14].

Одним з найбільш розповсюдженим пристроєм для фертигації є інжектор Вентурі. Система працює на основі інжекторного насоса типу Вентурі (рис. 1).

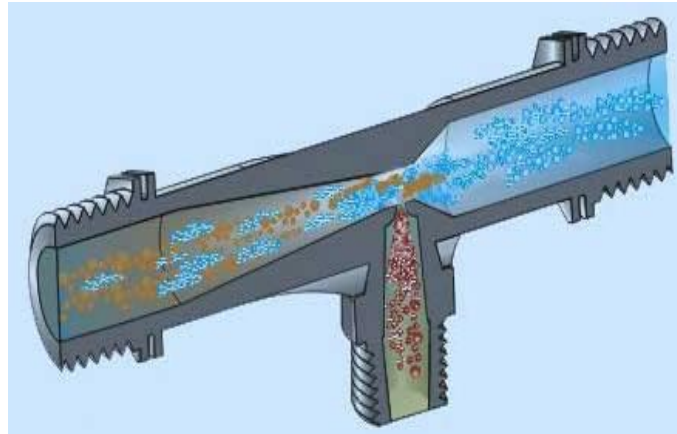


Рис. 1. Інжектор Вентурі

Конічне звуження у трубі призводить до збільшення швидкості потоку поливної води та утворення перепаду тиску, який засмоктує розчин добрив з бака (через фільтр) у поливну систему (рис. 2). Для цієї системи використовують лише рідкі добрива у вигляді маточних розчинів підвищеної концентрації. Швидкість всмоктування розчину дуже чутлива до змін тиску, тому для стабільної роботи інжектора необхідне точне регулювання тиску [5, 6]. Ця система проста в обслуговуванні та відносно недорога, забезпечує подачу розчинених концентрованих добрив з великою точністю в поливний трубопровід. Тому інжектор Вентурі добре підходить для фертигації плодових насаджень на відносно невеликих ділянках.

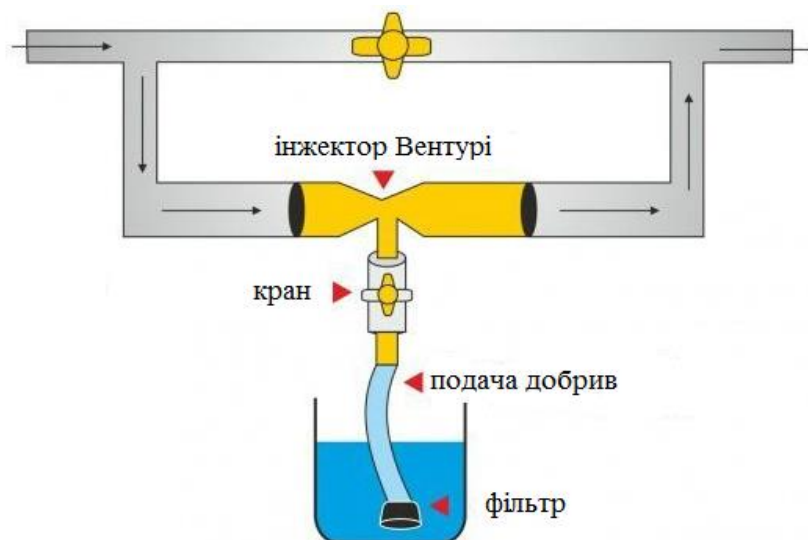


Рис. 2. Пристрій фертигації з інжектором Вентурі

Наразі відсутня загальна аналітична теорія, що дозволяє розраховувати струменеві апарати (насоси, гідроелеватори, ежекторів, інжектори) без використання емпіричних формул і величин. Для розрахунку струменевих апаратів запропоновано методи, що



ґрунтуються на таких теоріях: теорія змішування двох потоків; теорії поширення струменя в масі рідини, що знаходиться в стані спокою або рухається; механіка тіл змінної маси [8, 9, 10].

Розрахункові залежності для гідравлічних характеристик струменевих насосів виконані для апаратів із центральним соплом, іноді для апаратів із кільцевим соплом. Але в усіх роботах розглядаються змішування прямоточних потоків (робочого і пасивного) з одностороннім залученням рідини, що транспортується [9,24,25]. Для розрахунку струминного апарату (насоса, ежектора, інжектора) необхідно визначити такі гідравлічні та геометричні параметри:

- витрати робочої та всмоктуваної рідин (Q_p , $Q_{вс}$);
- питомі енергії (повні тиски) робочої (H_p), всмоктуваної ($H_{вс}$) та змішаної (H_c) рідин;
- площі зрізу робочого сопла (S_o) або його діаметр (d_o) поперечного перерізу камери змішування (Ск.с.) або його діаметр (дк.с.).

Решта геометричних параметрів проточної частини струминного апарату є функціями відношення $дк.с./d_o$.

Таким чином для розрахунку струминного насоса необхідно визначити сім невідомих величин рідин (Q_p , $Q_{вс}$, H_p , $H_{вс}$, H_c , S_o , d_o , Ск.с., $дк.с.$) та скласти сім рівнянь [8,9]. Але розрахунки за цими методиками достатньо складні. Для вирішення поставленої задачі бажано мати спрощену методику розрахунку, що дає результати з достатньою для практичного використання точністю даних.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою є розробка спрощеної методики розрахунку пристрою фертигації, що використовує інжектор Вентурі в якості насоса для подачі маточного розчину добрив у поливну воду при зрошенні плодових насаджень.

Основна частина. Для створення вузла фертигації на базі інжектора Вентурі необхідно визначити його витратні характеристики. Розрахункова схема інжектора наведена на рис. 3.

Режим інжектора характеризують такі параметри.

1. Втрати напору (H_p , м), що дорівнюють різниці напорів на вході в інжектор (переріз а-а) та на виході з нього (переріз с-с) на рис.3.

$$H_p = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{V_a^2}{2g} - \frac{P_c}{\rho g} - \frac{V_c^2}{2g}, \quad (1)$$

де P – тиск рідини у відповідному перерізі, Па;

v – швидкість рідини у відповідному перерізі, м/с;

ρ – щільність рідини, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, $g=9.8$ м/с².

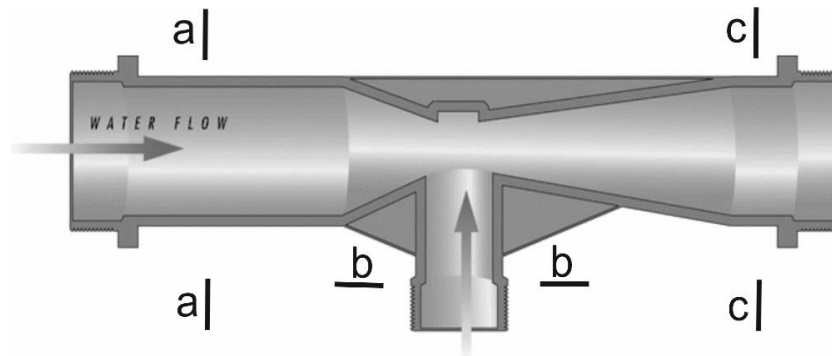


Рис. 3. Розрахункова схема інжектора

2. Корисний напір ($H_{\text{п}}$, м), який створено інжектором, що дорівнює різниці напорів поданої рідини за інжектором (переріз с-с) та на вході в нього (переріз b-b)

$$H_{\text{п}} = \frac{P_{\text{с}}}{\rho g} + \frac{V_{\text{с}}^2}{2g} - \frac{P_{\text{а}}}{\rho g} - \frac{V_{\text{а}}^2}{2g}, \quad (2)$$

3. Витрати води на вході в інжектор Q_1 , м³/с

$$Q_1 = v_{\text{а}} S_{\text{а}} = v_{\text{а}} \frac{\pi d_{\text{а}}^2}{4}, \quad (3)$$

де $v_{\text{а}}$ – швидкість води, м/с;

$d_{\text{а}}$ – діаметр входу інжектора, м.

4. Корисна подача Q_0 , м³/с

$$Q_0 = v_{\text{б}} S_{\text{б}} = v_{\text{б}} \frac{\pi d_{\text{б}}^2}{4}, \quad (4)$$

де $v_{\text{б}}$ – швидкість маточного розчину добрив, м/с;

$d_{\text{б}}$ – діаметр всмоктувальної трубки, м.

5. Витрати розчину добрив на виході з інжектора Q_2 , м³/с

$$Q_2 = Q_1 + Q_0 \quad (5)$$

Тоді коефіцієнт корисної дії інжектора η буде дорівнювати відношенню корисної потужності до використаної

$$\eta = \frac{H_{\text{п}} Q_0}{H_{\text{р}} Q_1} \quad (6)$$

Характеристика інжектора описує його роботу на змінних режимах в умовах $H_{\text{р}} + H_{\text{п}} = \text{const}$. Найбільш зручно приводити ці характеристики у відносній формі, як сукупність залежностей $h = f(q)$, $\eta = f(q)$, $\mu_{\text{р.с.}} = f(q)$. У даному випадку q - відносна витрата інжектора.

Тоді відносний напір інжектора

$$h = H_{\text{п}} / (H_{\text{п}} - H_{\text{р}}) \quad (7)$$

Відносна витрата інжектора

$$q = Q_0 / Q_1 \quad (8)$$

Коефіцієнт витрат робочого сопла інжектора

$$\mu_{\text{р.с.}} = Q_1 / S_{\text{а}} \sqrt{2g(H_{\text{п}} - H_{\text{р}})} \quad (9)$$

Параметр K – відносна площа, що дорівнює відношенню площі

входу у камеру зміщення до площі робочого сопла

$$K = S_b/S_c \quad (10)$$

де S_b – площа входу в камеру зміщення інжектора, m^2 ;

d_a – площа робочого сопла, m^2 .

Характеристики інжектора у відносній формі для $K = 2$ наведено на рис 4.

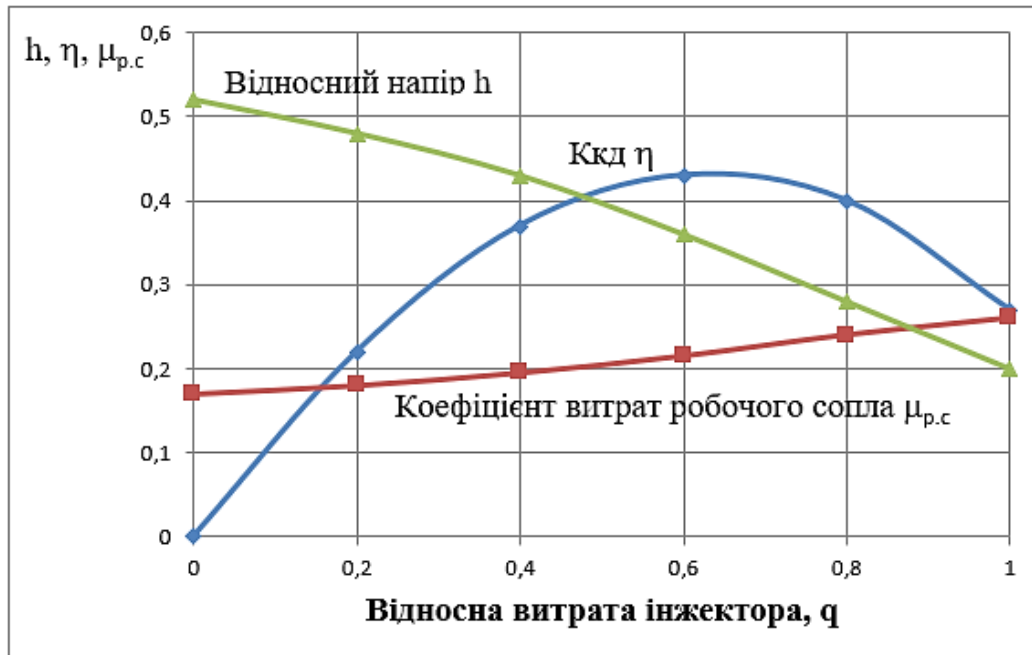


Рис. 4. Характеристики інжектора у відносній формі при $K = 2$

Максимального значення ККД ($\eta = 0,43$) інжектора досягає при відносній витраті $q=0,6$. Відносний напір при цьому складе $h = 0,37$, а коефіцієнт витрат робочого сопла $\mu_{p.c} = 0,21$.

Для вказаних параметрів були визначені витратні характеристики інжекторів для різних значень тиску на вході та виході інжектора, а також для трьох значень приєднувальних розмірів інжектора – $3/4''$, $1''$, $1\ 1/2''$. Ці характеристики наведені у таблиці 1.

Точне дозування маточного розчину добрив в систему з врахуванням води в трубопроводі можна розрахувати за формулою

$$q_m = (F \cdot S) / (3,6 \cdot C_m \cdot K \cdot t), \quad (11)$$

де q_m - витрата маточного розчину, л/с;

t - тривалість поливу, годин;

K - коефіцієнт, що виражає залежність між часом закінчення подачі маточного розчину і закінченням вегетаційного поливу, як правило, $K = 0,8$, щоб дати час для промивки мережі.



Таблиця 1

Витратні характеристики інжекторів

Тиск на вході, атм	Тиск на виході, атм	Присднувальний розмір ежектора					
		3/4"		1"		1 1/2"	
		Витрата через інжектор, л/год	Об'єм інжекції л/год	Витрата через інжектор, л/год	Об'єм інжекції л/год	Витрата через інжектор, л/год	Об'єм інжекції л/год
0,35	0,00	480	94	1560	360	3240	590
	0.10	480	92	1380	198	2700	294
	0,20	480	82	1260	84	2580	200
	0,28	420	32	-	na	-	na
	0,30	-	na	-	na	-	na
0,7	0,00	660	91	2160	372	4440	720
	0,40	660	88	1860	144	3840	450
	0,50	660	43	1860	90	3480	108
	0.60	600	30	-	na	-	na
1	0,00	840	90	2400	354	4980	720
	0,40	840	88	2340	270	4440	483
	0,50	780	44	2220	108	4200	180
	0,60	780	35	-	na	-	na
1,4	0,00	960	80	2820	336	5580	720
	0,35	960	80	2820	336	5400	642
	0,70	900	77	2760	264	5160	440
	1,00	900	47	2700	126	4980	204
2,1	0,00	1140	82	3360	312	6600	700
	0,35	1140	82	3360	312	6600	700
	0,70	1140	80	3360	312	6600	678
	1,00	1140	79	3360	312	6480	600
	1,40	1080	59	3240	204	6240	390
	1,70	1080	34	3180	36	5940	70
3,1	0,00	1440	83	3960	300	7860	700
	0,35	1440	83	3960	300	7860	700
	0,70	1440	83	3960	300	7860	700
	1,00	1440	83	3960	300	7860	700
	1,70	1440	75	3960	300	7800	630
	2,00	1380	61	3960	282	7620	504
	2,40	1380	43	3900	123	7440	213
4,1	0,00	1620	85	4620	300	8040	700
	2,00	1620	81	4620	300	8040	700
	2,40	1620	77	4620	300	8040	612
	3,00	1560	47	4560	230	7920	324
	3,24	1560	26	-	na	7920	168
	0,00	1920	84	5400	300	9540	720
5,5	2,06	1920	84	5400	300	9540	720
	3,10	1920	81	5400	300	9480	708
	4,10	1860	60	5400	255	9360	378
	4,48	1860	26	5340	84	9240	132
	0,00	2100	93	5700	300	10680	720
6,9	2,75	2100	93	5700	300	10680	720
	4,50	2100	81	5700	300	10620	660
	5,20	2040	68	5640	234	10500	384
	5,44	2040	55	5640	147	10440	240



Висновок. Наведено результати розробки спрощеної методики розрахунку пристрою фертигації, що використовує характеристики інжектора Вентурі у відносній формі. Побудовано характеристики інжектора у відносній формі для випадку, коли площа входу в камеру зміщення інжектора перевищує у два рази площу робочого сопла. Встановлено, що в такій конфігурації максимальне значення ККД інжектора досягається при відносній витраті $q=0,6$. При цьому відносний напір складатиме $h=0,37$, а коефіцієнт витрат робочого сопла $\mu_{p,c}=0,21$. Приведені результати розрахунків витрати води через інжектор та об'єму інжекції залежно від геометричних параметрів інжектора та зміни тиску води.

Список використаних джерел

1. Єжов В. М., Гриник І. В. Біохімія плодових культур. Київ: ПП Санспарель, 2020. 364 с.
2. Куян В. Г. Плодівництво. Житомир: ЖНАЕУ, 2009. 480 с.
3. Кіщак О. А. Основи промислової культури черешні в Лісостепу України: монографія. Київ: Аграр. наука, 2017. 240 с.
4. Караєв О. Г., Одинцова В. А., Сушко С. Л. Формирование базы данных для автоматизированного управления физиологическим состоянием плодовых деревьев мелкодисперсным дождеванием. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18(1). P. 55–61.
5. Калачев В. В. Струйные насосы. Теория, расчет и проектирование. Москва: Филинь: “Омега-Л”, 2017. 418 с.
6. Лямаев Б. Ф. Гидроструйные насосы и установки. Ленинград: Машиностроение, 1988. 278 с.
7. Сазонов Ю. А., Деговцов А. В., Казакова Е. С., Клименко К. И. Многопоточный эжектор и новое направление для развития струйной техники. *Территория НЕФТЕГАЗ*. 2012. № 4. С. 75-77.
8. Сазонов Ю. А. Основы расчета и конструирования насосно-эжекторных установок. Москва: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 300 с.
9. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. Ленинград: Машиностроение, 1988. 256 с.
10. Альтшуль А. Д., Киселёв П. Г. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости). Москва: Стройиздат, 1965. 274 с.
11. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
12. Шатковський А. П., Журавльов О. В. Наукові основи технологій краплинного зрошення сільськогосподарських культур. Херсон: ВД Гельветика, 2021. 405 с.
13. Фоменко Т. Г., Попова В. П. Результаты мониторинга физико-химических свойств чернозема обыкновенного в плодовых



насаждениях при капельном орошении. *Научные труды ГНУ СКЗНИИСиВ*. 2013. Т. 3. С. 42–49.

14. Фоменко Т. Г., Попова В. П. Формирование контуров увлажнения почвы при локальных малообъемных способах орошения плодовых насаждений. *Мелиорация и водное хозяйство*. 2016. № 4. С. 22–27.

15. Odyntsova V., Sushko S., Bondarenko L., Scherbakova N. Application of phenoclimatographic models in stone fruits protecting from spring frosts. *Modern Development Paths of Agricultural Production. Trends and Innovations*. 2019. P. 267–280.

16. Aggelopoulou K. D., Pateras D., Fountas S., Gemtos T. A. Soil spatial variability and site-specific fertilization maps in an apple orchard. *Precision Agriculture*. 2011. Vol. 12 (1). P. 118–129.

17. Küçükyumuka C., Kaçal E., Ertek A., Öztürk G. at el. Pomological and vegetative changes during transition from flood irrigation to drip irrigation: Starkrimson Delicious apple variety. *Scientia Horticulturae*. 2012. T. 136. P. 17–23.

18. Fernández J. E., Cuevas M. V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2011. Vol. 150. P. 135–151.

19. Friedman S. P., Naftaliev B. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards. *Agricultural Water Management*. 2012. Vol. 115. P. 132–147.

20. Kafkafi U., Tarchitzky J. Fertigation: A Tool for Efficient Fertilizer and Water Management. First edition, IFA, Paris, France and IPI, Horgen, Switzerland, 2011. 138 p.

21. Romashchenko M., Shatkowski A., Zhuravlev O. Features of application of the «Penman – Monteith» method for conditions of a drip irrigation of the Steppe of Ukraine (on example of grain corn). *Journal of Water and Land Development*. 2016. Vol. 31. P. 123–127. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0043>.

22. Shatkovskiy A., Romashchenko M., Vasyuta V., Zhuravlov O. at el. Measurement of the cell sap concentration of plant's leaves for irrigation's scheduling. *Modern Phytomorphology*. 2019. Vol. 13. P. 54–57. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3518881>.

23. Shatkovskiy A. P., Romashchenko M. I., Zhuravlov O. V., Vasyuta V. V. at el. Evaluation of the «Penman-Monteith» model for determination of soybeans' evapotranspiration in irrigated conditions of the Steppe of Ukraine. *Modern Phytomorphology*. 2020. Vol. 14. P. 115–118. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4449887>.

24. Hassan M. Badr, Wael H. Ahmed. Common Problems in Centrifugal Pumps. *Pumping Machinery Theory and Practice*. 2014. T. 5. <https://doi.org/110.1002/9781118932094>.

25. Kajero O. T., Thorpe R. B., Yao Yu., Wong D. S. H., Chen T.. Meta Model-Based Calibration and Sensitivity Studies of Computational



Fluid Dynamics Simulation of Jet Pumps. *Chemical engineering and technology*. 2017. Vol. 4(9). P. 1674–1684.
<https://doi.org/10.1002/ceat.201600477>.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2023 р.

S. Sushko¹, I. Chyzykov¹

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

METHOD FOR CALCULATING DEVICE PARAMETERS BASED ON VENTURI INJECTOR FOR FRUIT PLANT FERTIGATION

Summary

Fruit trees, growing for many years in one place and distinguished by high productivity, absorb a large amount of nutrients from the soil. Numerous experiments of scientific institutions and the practice of advanced farms have proven the high efficiency of the optimal fertilizer application system in gardens. Significant areas of modern orchards are equipped with drip irrigation systems, in which mineral fertilizers are applied locally with irrigation water (fertigation). Fertigation allows you to constantly maintain optimal soil moisture and supply plants with small doses of a balanced amount of nutrients during the growing season. One of the most used devices for applying fertilizers with irrigation water is the Venturi injector. This system is easy to maintain and relatively inexpensive, providing the supply of dissolved concentrated fertilizers with great precision into the irrigation pipeline. Currently, there is no general analytical theory that allows the calculation of jet devices (pumps, hydraulic elevators, ejectors, injectors) without using empirical formulas and quantities. Methods based on the following theories are proposed for the calculation of jet devices: theory of mixing of two flows; theories of the propagation of a jet in a mass of liquid that is at rest or moving; mechanics of bodies of variable mass. To calculate the jet device (pump, ejector, injector), it is necessary to determine the following hydraulic and geometric parameters: 1) consumption of working and suction fluid 2) specific energy (total pressure) of working, suction and mixed fluids; 3) cross-sectional area of the working nozzle or its diameter, cross-sectional area of the mixing chamber or its diameter. Thus, in order to calculate a jet pump, it is necessary to determine seven unknown quantities of liquids, that is, seven equations must be compiled. To solve the given problem, it is desirable to have a simplified method of calculation that gives results with sufficient accuracy for practical use. The article presents the results of the development of a simplified method of calculating the fertigation device, which uses a Venturi injector as a pump for feeding the mother solution of fertilizers into the irrigation water when irrigating fruit plantations. The characteristics of the injector are constructed in relative form for the case when the area of the entrance to the displacement chamber of the injector exceeds twice the area of the working nozzle. It was found that in such a configuration, the maximum value of the injector efficiency is reached at a relative flow $q=0.6$. At the same time, the relative pressure will be $h=0.37$, and the flow rate of the working nozzle $\mu_{p.c}=0.21$. The results of calculations of water flow through the injector and injection volume depending on the geometric parameters of the injector and changes in water pressure are given.

Keywords: mineral fertilizers, perennial plantings, irrigation water, pump, fertigation unit, calculation method, pressure, pressure.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-136-144

УДК 631.361.43:664.788.3

Н. О. Фучаджи¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9433-6282

О. О. Ковальов¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4974-5201

І. М. Кузьмінська², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-0053-1501

О. О. Червоткіна¹, асистент

ORCID: 0000-0002-6814-0566

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*² *Заклад вищої освіти «Подільський державний Університет»*e-mail: natalia.fuchadzy@tsatu.edu.ua, тел.: +380688778589

ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТНИХ СХЕМ ПЕРЕРОБКИ ГРЕЧКИ

Анотація Державна програма України має на меті розробку та модернізацію комплексів для переробки зерна на борошно та крупи, переробки на олію олійних культур. Видалення з поверхні ядра плодівих та насінневих оболонки є досить актуальною проблемою круп'яної промисловості. Тому бачимо вирішення цієї актуальної на сьогоднішній день проблеми у визначенні напрямків вдосконалення комплексів обладнання для переробки зерна, а саме гречки.

Рішення проблеми технічного забезпечення автономного виробництва крупів безпосередньо в регіонах вирощування сировини робить необхідним створення нових засобів конкретного технологічного призначення та завершеного технічного рішення у вигляді агрегатного устаткування.

Перспективними для використання є лінії переробки гречки з проміжним відбиранням ядра, яка значною мірою відповідає вимогам ресурсозберігаючих технологій і придатні для лушення гречки без попереднього сортування на фракції.

Для покращення ефективності виробництва проаналізовано сучасний стан та основні напрямки досліджень стосовно модернізацій ліній та розробки комплексів обладнання для децентралізованої переробки гречки. Стаття присвячена питанням дослідження існуючих технологічних схем переробки гречки на крупу.

Ключові слова: схема, гречана крупа, лушення, сортування.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку зернопереробної промисловості існуючі технологічні лінії виробництва круп не в змозі задовольнити потреби децентралізованих підприємств. Значні витрати матеріальних та енергетичних ресурсів в процесі переробки, втрати готової продукції найбільше пов'язані з інертністю централізованих систем переробки гречки та потребують застосування децентралізованого виробництва з розробкою відповідних потокових ліній. [1, 2] Це дослідження дозволить



визначити раціональні технологічні схеми, що забезпечать автономну переробку гречки в малих переробних підприємствах безпосередньо в районах зрощування. [3, 4]

Аналіз останніх досліджень. Значна роль у розробці та вдосконаленні існуючих наукових систем забезпечення галузі належить видатним вченим, які займалися механікою сипких матеріалів та твердого тіла Г. А. Генієву [5, 6], І. І. Артоболевському [7], В. П. Горячкіну [8], М. Н. Летошнєву, П. М. Василенко [9].

Велика кількість наукових робіт й досліджень галузі круп'яного виробництва, що належать В. І. Ільченко, О. Я. Соколова [10, 11], А. Б. Демського [12], Г. Є. Птушкіної [13], В. А. Бутковського [14] присвячена взагалі галузі зернопереробки, не тільки круп'яному виробництву.

Значна кількість наукових досліджень І. І. Блехмана, П. М. Заїки [15], В. М. Цециновського [16], В. В. Гортинського [17] була спрямована на дослідження зв'язку між фізико-механічними властивостями круп'яної сировини та методами впливу на зернівку при її обробці, а також систематизацію існуючого технологічного обладнання, виявлення.

Характерною рисою процесу переробки гречки на крупу, як зауважено в наукових працях [10, 13] є багаторазова повторюваність певних операцій. Використання наявних технологічних схем виробництва, навіть при високому коефіцієнті лушення, призводить до зайвого завантаження технологічного обладнання та різкого збільшення обороту продукту. Коефіцієнт лушення характеризує лише кількість зерна, що піддалася процесу лушення, але не характеризує якість та пофракційний склад отриманого масиву зерна. Відомо, що середній показник отримання ядриці першого гатунку складає менше половини від олушеного зерна, другого сорту – 12 ... 15%, а на долю борошенця та проділу припадає біля 10% [11],

Аналогічні проблеми, що робить неможливим впровадження наявних технологічних систем були розглянуті й іншими авторами. Нажаль, запропоновані варіанти підвищення енергоефективності виробництва не можуть бути застосовані для децентралізованої переробки гречки на крупу, через суттєву розгалуженість.

Доведено, що впровадження саме таких технологічних схем дозволяє досить добре використовувати їх на великих централізованих виробництвах, але невирішеним залишилося питання ефективності проміжного одбирання олушеного зерна в процесі виробництва гречаних круп в умовах децентралізації.

Постановка завдання. Створення агрегатного устаткування для переробки гречки на місцях вирощування сировини, споживання готової продукції та утилізації побічних продуктів виробництва

обумовлює необхідність створення модернізованих поточних ліній децентралізованого виробництва.

Основна частина. Відповідно до способу відокремлення лушених зерен від неолущених розрізняють три принципові схеми лушення [18, 19]:

1. Схема без проміжного відбирання ядра, у якій лушення відбувається конвеєрним способом (рис. 1, 2).

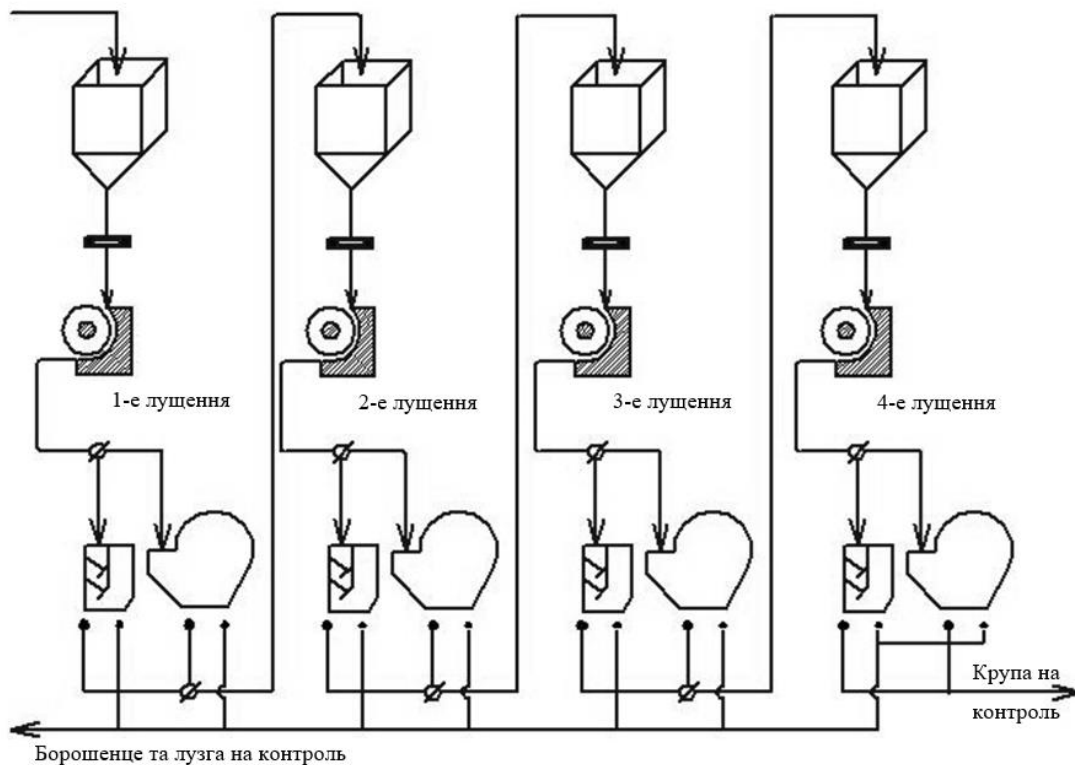


Рис. 1. Принципова схема лушення зерна без проміжного відбирання ядра (I-й спосіб)

В цьому варіанті використання технології зерно лушиться з 3 – 4-хкратним послідовним проходженням через лущильні машини, при цьому відбувається відокремлення тільки лузги після кожної системи лушення (рис. 1), чи з проміжним відбиранням дробленого ядра і борошнця з наступним відокремленням лузги (рис. 2). [20]

2. Схема з проміжним відбиранням ядра та повертанням неолущених зерен в машину, що виконує початкове лушення.

Крупу отримують в результаті відділення ядриці (олущеного зерна гречки) в просіювальних (рис. 3) або круповідокремлювальних машинах (рис. 4) після кожного пропускання гречки через лущильну машину.

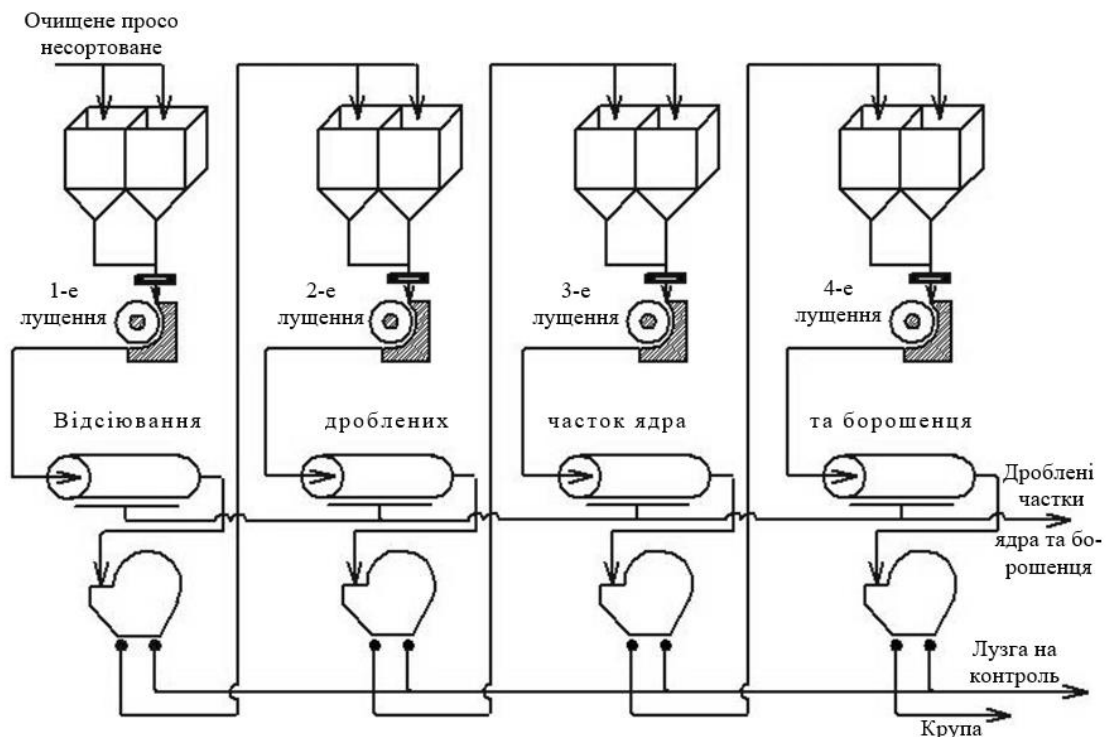


Рис. 2. Принципова схема лущення зерна без проміжного відбирання ядра (II -й спосіб)

3. Схема з проміжним відбиранням ядра та застосуванням окремої «сходової» системи для повторної обробки зерен, які залишилися неолущеними після лущення.

Відповідно до цієї схеми крупу отримують в результаті відокремлення ядра (в сортувальних машинах, тріерах та ін.) після кожного пропускання через луцильні машини, при цьому повертають неолущені зерна на спеціально виділену «сходову» систему (машину для лушення).

Проаналізувавши існуючі схеми лушення виявили, що найбільшу ефективність процесу переробки гречки на крупу досягають при наявності в системі проміжного відбирання ядра та «сходової» системи для повторного лушення лущених зерен, що залишилися після першого пропускання. Що дає можливість значно скоротити оборот продукту, зменшити кількість дробленого ядра, підвищити вихід крупи.

В схемах, в яких відсутнє проміжне видалення ядра, а відокремлюється лише лузга (оболонка), суміш, яка отримана після 1-ого пропускання через машину, надходить на наступну луцильну машину. При цьому частина вже лущених зерен, знов піддається впливу робочих органів машин і дробиться, а дроблене зерно подрібнюється у більшому ступені, що спричиняє втрати ядра та суттєво знижує вихід крупи [21].

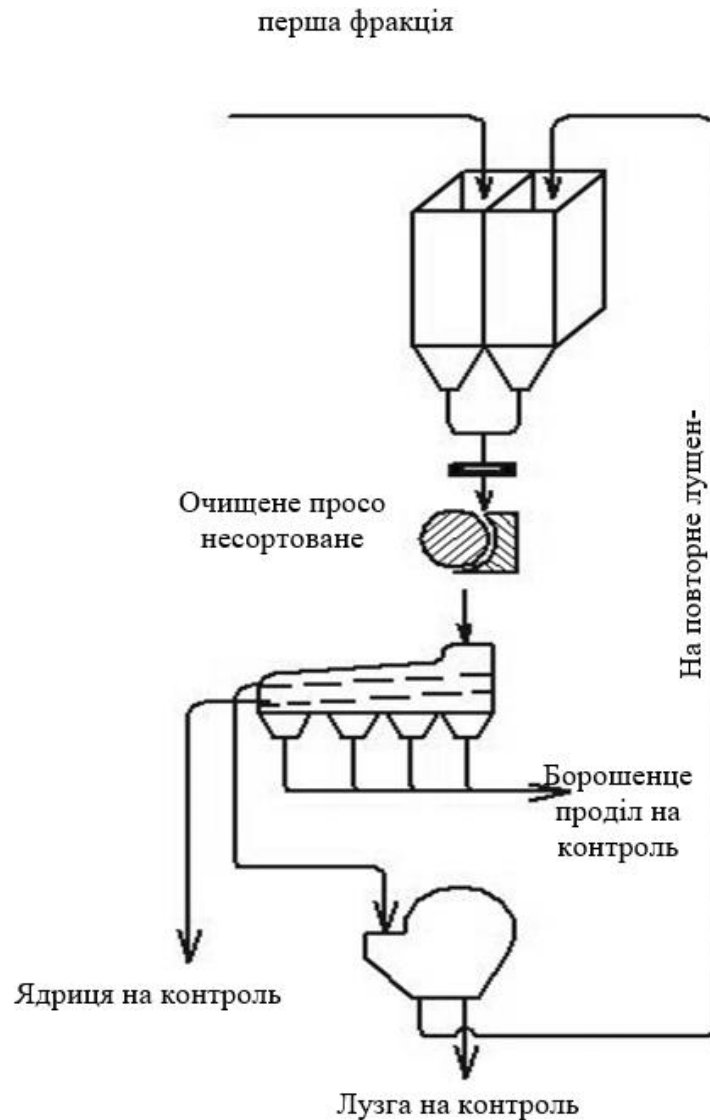


Рис. 3. Принципова схема лушення зерна з використанням просіювальних машин

При включенні в схему проміжного відбирання ядра оборот продукту значно знижується.

При використанні цієї схеми суттєво збільшується загальний вихід крупи, особливо цілого ядра, при значному зменшенні виходу дробленого ядра та борошенця. Зважаючи на вище викладене, при впровадженні процесу отримання гречаної крупи у підприємства малої продуктивності, доцільним є використання саме схеми з проміжним відбиранням ядра після пропускання через луцильну машину.

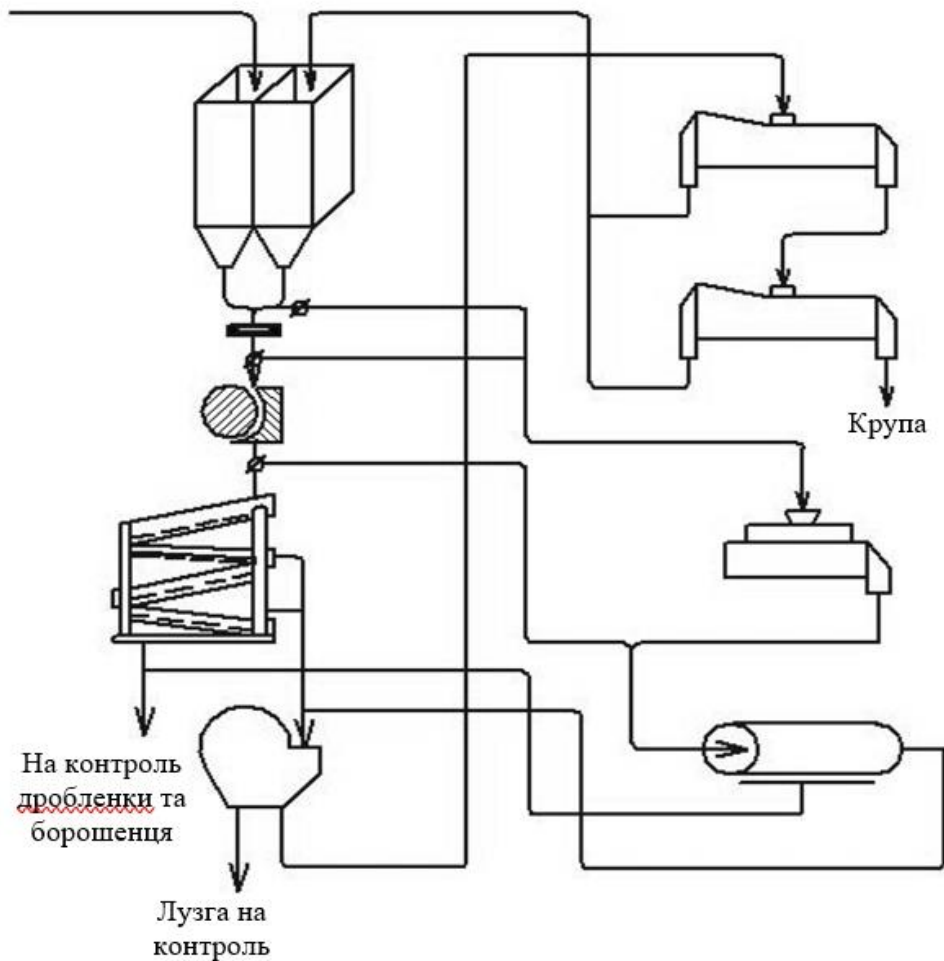


Рис. 4. Принципова схема лушення зерна з використанням круповідокремлювальних машин

Висновки. Вимоги до скорочення кількості операцій технологічних процесів, зменшення витрат енергії на їх реалізацію та підвищення якості кінцевої продукції зумовили створення різних методів підготовки гречки до переробки та інтенсифікації обробних операцій. На їх основі можливе вирішення і конкретних завдань на етапі розробки компактних технологічних процесів виробництва крупи на агрегатному устаткуванні.

Значні витрати матеріальних та енергетичних ресурсів, втрати сировини і готової продукції та висока інертність системи централізованої переробки гречки потребують негайної децентралізації виробництва на базі створення або модернізації технологічного забезпечення малих переробних підприємств.

В результаті аналізу сучасного стану існуючих схем переробки гречки визначити рекомендованою для впровадження схему з проміжним відбиранням ядра після пропускання через луцильну машину.

*Список використаних джерел*

1. Ikubanni P. P., Komolafe O. O., Agboola O. O., Osueke C. O. Moringa seed dehulling machine: a new conceptual design. *Journal of Production Engineering*. 2017. Vol. 20(2). P. 73–78. <http://doi.org/10.24867/JPE-2017-02-073>.
2. Trusova N. V., Hryvkivska O. V., Tanklevska N. S., Vdovenko L. A., Prystemskyi O. S., Skrypnyk S. V. Regional aspect of formation: The potential of financial safety in Agrarian enterprises of Ukraine. *Asia Life Sciences*. 2019. Vol. 1. P. 169–186.
3. Trusova N. V., Tanklevska N. S., Prystemskyi O. S., Hryvkivska O. V., Advokatova N. O. Determinants of the development venture financing of the subjects of Agrarian market of Ukraine. *Asia Life Sciences*, 2019. Vol. 1. P. 377–398.
4. Trusova N. V., Kohut I. A., Osypenko S. A., Radchenko N. G., Rubtsova N. N. Implementation of the results of fiscal decentralization of Ukraine and the countries of the European union. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*. 2019. Vol. 10(6). P. 1649–1663. [https://doi.org/10.14505/jarle.v10.6\(44\).07](https://doi.org/10.14505/jarle.v10.6(44).07).
5. Gupta R. K., Das S. K. Performance of centrifugal dehulling system for sunflower seeds. *Journal of Food Engineering*. 1999. Vol. 42(4). P. 191–198. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00119-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00119-3).
6. Vishwakarma R. K., Shivhare U. S., Gupta, D. N. [at el.]. Status of pulse milling processes and technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018. Vol. 58(1). P. 1615–1628. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1274956>.
7. Кузьмінська І. М. Сепарація зернових сумішей у повітряному каналі. *Праці ТДАТУ*. 2019. Вип. 19, т. 1. С. 87–91.
8. Фучаджи Н. О., Верхоланцева В. О., Червоткіна О. О., Паляничка Н. О. Напрямки вдосконалення конструкцій сучасних обрешувальних машин. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 2. С. 7–8.
9. Lazaro E. L., Benjamin Y., Mranduji S. M. Development of a Low Cost Machine for Improved Sorghum Dehulling Efficiency Tanzania. *Journal of Agricultural Sciences*. 2019. Vol.12(2). P. 47–54.
10. Bulgakov V., Pascuzzi S., Adamchuk V., Kuvachov V., Nozdrovicky L. Theoretical study of transverse offsets of wide span tractor working implements and their influence on damage to row crops. *Agriculture*. 2019. Vol. 9(144). P. 117-127.
11. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна / под ред. А. Я. Соколова. 5-е изд. перераб. и доп. Москва: Колос, 1984. 445 с.
12. Волощенко О. С. Дослідження якості гречаних круп, представлених в роздрібному продажі м. Одеса. *Збірка тез доп. 79-ї*



наук конф викл акад , Одеса, 16–1 квітня 2019р. Одеса: ОНАХТ, 2019. С. 18–20.

13. Аникеев А. А. Практическое применение аэродинамического шелушителя. *Хранение и переработка зерна*. 1999. № 1. С. 7–8.

14. Liu C. S., Shang T., Yang S. Q., Wu W. F., Chen S. Y. Analysis on the influence of the exchange area on the heat exchange efficiency during far-infrared convection combination grain drying process. *International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*. 2017. P. 155–158.

15. Dmitrie A., Ziganshin B., Khaliullin D., Aleshkin A. Study of efficiency of peeling machine with variable deck. *Engineering for rural development*. 2020. Т. 19. Р. 1053–1058. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF249>.

16. Solanki C., Mridula D., Aleksha Kudos S. K., Gupta R. K. Buckwheat Dehuller and Optimization of Dehulling Parameters. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018. Vol. 7(11). P. 1041–1052.

17. Dondee S., Meeso N., Soponronnarit S., Siriamornpun S. Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 104(1). P. 6–13.

18. Гросул Л. Г. Агрегатне обладнання для переробки зерна. *Техніка АПК*. 1999. № 1. С. 42–43.

19. Фучаджи Н. О. Оптимізація технологічного процесу лущення власнокруп'яних культур : Дис. ... к-та техн. наук: 05.18.03. Херсон, 2006. 168 с.

20. Ялпачик В. Ф., Загорко Н. П., Скляр О. Г., Кюрчев С. В. [та ін.]. Обладнання складів. Зберігання зерна і зернопродуктів. Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2018. 293 с.

21. *Технологічне обладнання борошномельних і круп'яних підприємств*: підручник / О. І. Гапонюк, Л. С. Солдатенко, Л. Г. Гросул, В. Ф. Петько, В. М. Петров, І. І. Гапонюк; під ред. О. І. Гапонюка, Л. С. Солдатенко. Херсон: Олді-плюс, 2018. 752 с

Стаття надійшла до редакції 23.10.2023 р.



N. Fuchadzy¹, O. Kovalev¹, I. Kuzminska², O. Chervotkina¹
¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
²Podillia State University

RESEARCH OF VEHICLE CHARTS OF PROCESSING OF BUCKWHEAT

Summary

The government program envisages perfection and development of complex equipment for processing, grains on a flour and cereal, processing of oil-bearing cultures on oil. Moving away from the surface of kernel of fruit and seminal shells is the issue enough of the day of cereal industry. Requirements to reduction of amount technological processes operations of charges reduction to energy on their realization and upgrading of eventual products stipulated creation of different methods of buckwheat preparation to processing and intensification of finishing operations. On their basis possible decision and concrete tasks on the stage of development of compact technological processes of production of groats on an aggregate equipment. Therefore see the decision of this for today issue of the day by means of determination of directions of perfection of complexes of equipment for processing of grain, namely buckwheats. This research allowed to define rational flowsheets that will provide the autonomous processing of buckwheat in small reprocessors directly in the districts of growing.

The considerable charges of material and power resources, loss of raw material and prepared products and high sluggishness of the system of the centralized processing of cultures need immediate decentralization of production on the basis of creation of the technological providing and technical rigging of small reprocessors and workshops of farms. The decision of problem of hardware of croups autonomous production irectly in the regions of growing of raw material does the necessity of creation of new facilities of the concrete technological setting and completed technical decision as an aggregate equipment.

Perspective for the use are lines of processing of buckwheat with the intermediate taking away of kernel, that largely corresponds the requirements of resource saving technologies.

For the improvement of efficiency productions are analysed the modern state and basic directions of researches in relation to modernisations of lines and development of complexes of equipment for the decentralizing processing of buckwheat. The article is sanctified to the questions of research of existent flowsheets of buckwheat processing on cereal.

Keywords: chart, buckwheat cereal, shelling, sorting



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-145-152

УДК 631.365.2:621.31

С. В. Коробка ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-4717-509X
Р. Є. Кригуль ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0003-1295-4162
М. І. Бабич ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0002-3061-9176
І. Г. Стукалець ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-7107-4865
С. В. Сиротюк ¹ , канд. техн. наук	ORCID 0000-0001-9966-6299
Б. В. Болтянський ² , канд. техн. наук	ORCID 0000-0003-2072-4025

¹ Львівський національний університет природокористування² Таврійський державний агротехнологічний університет

імені Дмитра Моторного

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

ОПИС ВИРОБНИЧОЇ ГЕЛІОСУШАРКИ З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

Анотація. Запропоновано конструкцію геліосушарки з тепловим насосом, застосування якого дає змогу збільшити теплопродуктивність установки в 2 рази з метою розв'язання задач щодо використання відновлюваних екологічно чистих джерел теплової енергії для сушіння фруктів. Розроблена геліосушарка з тепловим насосом на базі відновлюваних джерел енергії сприятиме інтенсифікації процесу сушіння і освоєння їх виробництва, та водночас позитивному впливу на вирішення екологічних проблем енергетики за рахунок заміщення електричної та теплової енергії, отриманої з використанням сонячної енергії, та пом'якшення соціальних проблем внаслідок створення нових робочих місць при виготовленні, монтажі та експлуатації таких установок. Отримані результати можна використати під час розробки та вдосконалення технічних засобів сушіння фруктів, для підвищення технологічної та енергетичної ефективності процесу.

Ключові слова. Сонячна енергія, геліосушарка фруктів, тепловий насос, тепловий акумулятор, сушильна камера.

Постановка проблеми. Одним із елементів харчової безпеки країни є формування запасів сухих продуктів харчування, наприклад, сухофруктів та сушених овочів, які входять до щоденного раціону супових та борщових наборів та інших напівфабрикатів, що характеризуються високою поживністю та стійкістю до псування. Їх виготовлення здійснюється з використанням сушарок різного типу з традиційним джерелом тепла у вигляді електричної енергії, або ж тепла продуктів згоряння палива. В той же час, використання сонячних повітряних колекторів або теплових насосів, які спільно працюють із сушарками, може вирішити питання незалежності від централізованого енергозабезпечення, зниження рівня споживання енергоресурсів тощо.



Аналіз останніх досліджень. Вказаній тематиці присвячені дослідження Озарків М. І., які стосуються особливостей розрахунку геліосушильної установки для деревини, в тому числі з використанням комп'ютерного моделювання [1]. Ці дослідження є фундаментальними для розробки методики розрахунку геліосушарок, але і водночас є застарілими для сучасної кліматології України.

Переважна частина досліджень ведеться закордонними вченими. Зокрема, у роботі [2] було розроблено нові конструкції змішаних сонячних сушарок для сушіння харчових продуктів без теплового накопичувача та досліджено процес конвективного сушіння. У дослідженні [3] обґрунтовано конструкцію та аналіз продуктивності сонячної сушарки змішаного типу для сушіння риби в прибережних районах та розроблено числовий метод розв'язання математичної моделі розрахунку напружень та розподілу вологи у харчових продуктах під час сушіння а також сформульовано задачу оптимізації цієї моделі. Крім цього запропоновано інженерні науково-методичні засади визначення оптимального об'єму сушильної камери, підвищення температури теплоносія в сушарці за рахунок додаткового опромінення сушильної камери, що базується на методиці розрахунку інфрачервоних сушарок. У роботі [4] подано повний огляд сонячних сушарок та проаналізовано процес конвективного сушіння фруктів для різних тепловологісних режимів сушіння в сушарці.

У роботі [5] виконано короткий аналіз останніх досягнень в технології сонячного сушіння, обґрунтовано раціональні конструкції та оптимальні конструктивно-технологічні параметри сушарок. У праці [6] обґрунтовано економічний метод покращення продуктивності сонячних повітрянагрівачів за допомогою дискретних макро-інкапсульованих РСМ капсул для сушіння харчових продуктів. Авторами у роботі [6] розроблено інженерну методику розрахунку необхідної площі геліоколектора та здійснено оцінку можливості енергетичної ефективності використання неглазурованого сонячного колектора для геліосушарки в порівнянні з використанням зашкленого колектора.

Введення до геліотермічної установки у складі сонячної повітряної та фотоелектричної установок і акумулюючої системи засобів перетворення променевої енергії у теплову та електричну дозволить побудувати енергетичну установку комплексного енергозабезпечення віддалених та автономних об'єктів з високим рівнем ефективності перетворення первинної енергії та рівнем надійності енергопостачання.

При створенні локальних автономних систем теплопостачання віддалених об'єктів існує проблема низької їх ефективності внаслідок



відносно низького рівня коефіцієнта корисної дії системи акумулювання, що може бути мінімізоване за рахунок оптимізації обсягів енергії, яка до них подається. Однак використання у геліотермічних установках акумулятора теплоти на основі гальки приводить до пониження якості висушеного продукту через надмірне волого утворення в ранковий період за рахунок утворення точки роси на поверхні акумулюючого матеріалу [7-9,11]. Тому ми пропонуємо замість акумулятора теплоти на основі гальки використовувати тепловий насос.

Таким чином для вирішення даної проблематики необхідно розробити лінійку сонячних енергетичних установок, призначенням яких є сушіння овочів і фруктів, з відповідною структурою технічних та енергетичних засобів, до яких відносяться сонячні колектори, сушильні камери, системи розподілу тепла, засоби акумулювання теплової енергії, теплові насоси, що дозволить знизити обсяги споживання енергетичних ресурсів в процесі виробництва сухих харчових продуктів для підвищення рівня автономності [11-14].

Для реалізації основної ідеї необхідно розробити, обґрунтувати та оптимізувати структуру та параметри сонячних енергетичних установок з використанням теплових насосів, що забезпечить зниження залежності від централізованого енергопостачання, а також підвищить рівень енергозабезпечення. Також для проведення досліджень необхідно забезпечити виготовлення експериментального стенду геліотермічної установки з тепловим насосом, яка буде основою для проведення експериментальних досліджень з метою оптимізації її структури та параметрів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою даного дослідження є підвищення ефективності технологічного процесу сушіння фруктів на підставі розробки конструкції та обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки, що забезпечить зменшення затрат енергоресурсів.

Відповідно до поставленої мети необхідно було виконати таке завдання: розробити конструкцію геліосушарки з тепловим насосом та обґрунтувати її конструктивно-технологічну схему.

Основна частина. Загальний вигляд запропонованої геліосушальної установки з використанням теплового насоса наведено на рис. 1. Основні елементи установки: корпус (2) сушильна камера (1), каркас виготовлений з оптично прозорого матеріалу, компресор (3), повітряний конденсатор (4), повітроохолоджувач (5), зачернений плоский випарник (6), встановлений в сонячному колекторі (7), направленому на південь під кутом 25-40° до горизонту. Випарник (5, 6) з'єднаний паралельно з випарником (8) і тепловим акумулятором-випарником (8 акумулятор-випарник). Повітропровід

(9) забезпечений шибером (10), вентилятор (11) служить для подачі зовнішнього повітря в камеру (1). Після акумулятора-випарника (8) встановлений циркуляційний повітропровід (12) з шибером (13). Компресор (3) з'єднаний з повітряним конденсатором (4), трубопроводом (14), з випарником (5) трубопроводом (15) і з акумулятором-випарником (8) трубопроводом (16). Конденсатор (4) з'єднаний з випарником (5) трубопроводом (17) через вентиль (18) і з акумулятором-випарником (8) трубопроводом (19) через вентиль (20). Повітряний конденсатор (4) з'єднаний з камерою (1) повітропроводом (21) через отвір (22) в торцевій стінці (23) камери (1). У камері (1) встановлено сітчастий конвеєр (24) для переміщення продукту в процесі сушіння. Наприкінці розвантажувальної частини конвеєра (24) встановлена перегородка (25), періодично прилегла до його верхньої частини.

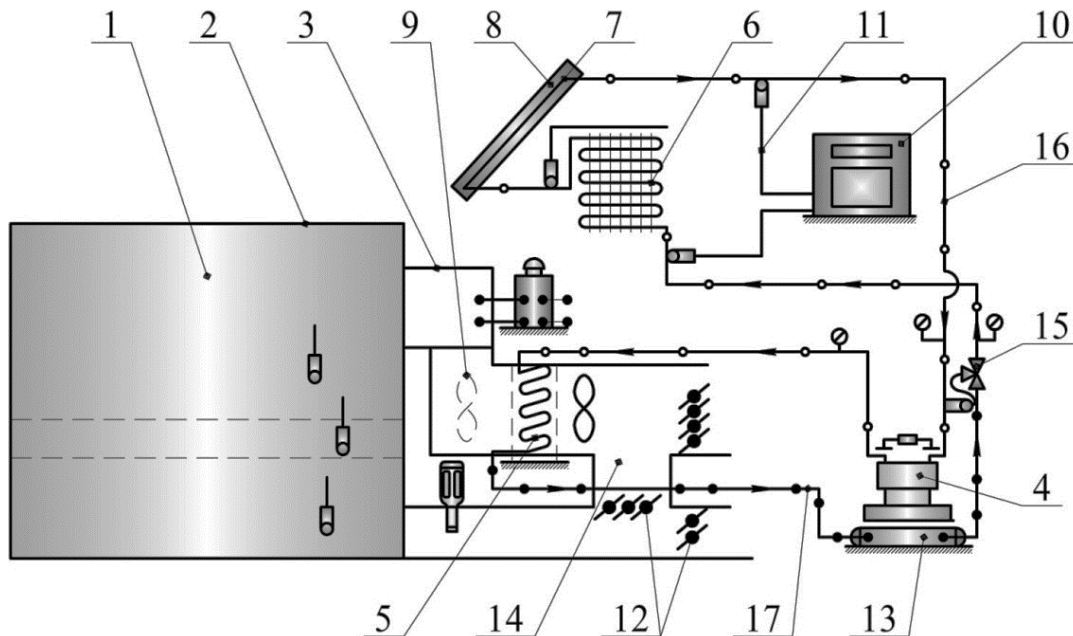


Рис. 1. Схема геліосушильної установки з тепловим насосом:
1 – камера; 2 – прозорий корпус; 3 – компресор; 4 – конденсатор;
5,6 – випарник; 7 – сонячний колектор; 8 – випарник і акумулятор-випарник;
9, 12, 21, 26 – повітропроводи; 10, 13, 27 – шибери;
11 – вентилятор; 14, 15, 16, 17 – трубопроводи;
18, 20 – терморегулятори вентиля; 24 – конвеєр; 25 – перегородка

Акумулятор-випарник (8) являє собою контейнер з ящиками для підтримування насадки з шаром гальки. У шарі насадки розміщений випарник, що представляє собою трубчастий теплообмінник.

Сушильна установка працює таким чином. Продукт, покладений в камеру (1) в денний час висушується одночасно під впливом сонячної радіації, що проникає через оптично прозорий корпус (2) і



повітря з температурою 55-60°C, пронизливого щільний шар продукту. При цьому зовнішнє повітря за допомогою вентилятора (11) подається за повітропроводи (9) через конденсатор (4) теплового насоса (3), де нагрівається до температури 55-60°C і з повітропроводу (21) надходить в камеру (1). Залежно від сорту і вологості продукту, часу доби і року, температура відпрацьованого повітря в денний час складає 48-60°C. Теплота, що йде з відпрацьованим повітрям, акумулюється в гравійний акумулятор-випарник (8), а охолоджене повітря по повітропроводу (12) направляється в атмосферу. При температурі повітря, що йде більше температури навколишнього повітря $t_{\text{х.в.}} > t_{\text{oc}}$ за допомогою шибера (13), залежно від вологості повітря, він частково або повністю рециркулює.

У денний час тепловий насос (3) працює по замкнутому контуру а): повітряний конденсатор (4) з'єднаний з повітроохолоджувачем (5) і випарником, встановленим в сонячному колекторі (6), трубопроводом (17) через вентиль (18). При цьому температура всмоктування робочого тіла $R-410a$ дорівнює $t_{\text{ec}} = 45-50^\circ\text{C}$, а температура конденсації $t_{\text{к}} = 70^\circ\text{C}$, $t_{\text{o}} = 16-20^\circ\text{C}$.

У вечірній час доби або хмарний час джерелом тепла для нагрівання повітря в конденсаторі (4) є теплота акумульована в гравії і теплота відпрацьованого повітря. При цьому, якщо температура після дроселювання (вентиля) буде менше температури навколишнього середовища $t_{\text{o}} < t_{\text{oc}}$. Обидва вентиля (18, 20) будуть відкритими, а якщо $t_{\text{o}} > t_{\text{oc}}$ то вентиль (18) буде закритий, а вентиль (20) відкритий. Відпрацьоване повітря, проходячи через випарник (8), віддає в ньому частину своєї теплоти, при цьому температура його досягає температури роси і повітря осушується, а потім через рециркуляційний повітропровід (12) за допомогою шибера (13) він прямує в повітропровід (9).

Так як в процесі сушіння фруктів обсяг продуктів зменшується в 4-5 рази, а тривалість сушіння складає 2-3 доби, через добу необхідно на половині довжини конвеєра (24) при щільному приляганні перегородки (25) до сітки продукту перемішати і ущільнити. Одночасно в завантажувальній частини установки закладаються нові партії продукту.

Висновки. Розроблена геліосушарка з тепловим насосом на базі відновлюваних джерел енергії сприятиме інтенсифікації процесу сушіння і освоєння їх виробництва, та водночас позитивному впливу на вирішення екологічних проблем енергетики за рахунок заміщення електричної та теплової енергії, отриманої з використанням сонячної енергії, та пом'якшення соціальних проблем внаслідок створення нових робочих місць при виготовленні, монтажі та експлуатації таких установок.



Тому реалізацію наших досліджень було подано у вигляді інженерних методів для розрахунку і прогнозування процесів конвективно-радіаційного сушіння зі змінними потенціалами тепломасоперенесення, які є базою для прогнозування інтенсивності сушіння та підставою для розробки й вдосконалення раціональних та енергоощадних як технологій, так і сушильних установок. Практичну цінність даних досліджень представляє новий тип обладнання для використання сонячної теплової енергії в процесах сушіння матеріалу, визначення параметрів конвективно-радіаційного теплообміну в процесі сушіння, що є базою для проектування нових конструкцій сушарок та створення на їх основі енергоощадних технологій сушіння.

Список використаних джерел

1. Озарків І. М., Ференц О. Б., Кобринович М. С. Особливості розрахунку геліосушильної установки для деревини. *Науковий вісник НЛТУ*. 2007. Вип. 17, т. 1. С. 91–96.
2. Abubakar, S., Umaru, S., Kaisan, M. U., Umar, U. A., Ashok, B., Nanthagopal, K. Development and performance comparison of mixed-mode solar crop dryers with and without thermal storage. *Renewable Energy*. 2018. Vol. 128. P. 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.049>.
3. Mehta P., Samaddar S., Patel P., Markam B., Maiti S. Design and performance analysis of mixed mode-tent type solar dryer for fish drying in coastal areas. *Solar energy*. 2018. Vol. 170. P. 671–681. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.095>.
4. Yagnesh B. Chauhan and Pravin P. Rathore. (2020). A comprehensive review of the solar dryer. *International Journal of Ambient Energy*. 2020. Vol. 41(3). P. 348–367. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1456960>.
5. Berville C., Croitoru C.-V., Nastase L. Recent Advances in Solar Drying Technologies – A Short Review. *International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*, 23 December 2019. P. 294–298. <https://doi.org/10.1109/CIEM46456.2019.8937614>.
6. Raj A. K., Srinivas M. and Jayaraj S. A cost-effective method to improve the performance of solar air heaters using discrete macro-encapsulated PCM capsules for drying applications. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 146. P. 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.055>.
7. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.90299>.



8. Babych M., Korobka S., Skrynkovskyy R., Korobka S., Krygul R. Substantiation of economic efficiency of using a solar dryer under conditions of personal peasant farms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 6/8(84). P. 41–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.83756>.
9. Korobka S., Babych M., Krygul R., Zdobytskyj A. Results of research into technological process of fruit drying in the solar. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 1/8(91). P. 64–73. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122816>.
10. Manoj M., Manivaimair A. Simulation of solar dryer utilizing green house effect for cocoa bean drying. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2013. IV (II). URL: <http://www.technicaljournalonline.com/ijeat/VOL.pdf> (дата звернення 16.09.2023).
11. Korobka S., Syrotyuk S., Zhuravel D., Boltianskyi B., Boltianska L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*. 2021. № 2. P. 60–75.
12. 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. конференції (Львів, 04-06 жовтня 2022 р.)*. Львів: ЛНУП, 2022. С. 16–18.
13. Скляр О. Г., Скляр Р. В., Болтянський Б. В. Обґрунтування техніко-технологічних рішень створення оптимального мікроклімату в птахівницькому приміщенні. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 2(81). С. 32–38. URL: <https://ojs.kntu.net.ua/index.php/visnyk/about> (дата звернення 10.09.2023).
14. Болтянський Б. В., Болтянська Л. О. Альтернативні напрями енергозбереження в домогосподарствах населення. *Функціонування сільськогосподарських підприємств на засадах циркулярної економіки: матер. міжнар. наук.-практ. ІНТЕРНЕТ-конф., 6-7 червня 2023 р.* Львів: Галицька видавнича спілка, 2023. С. 26-30.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2023 р.



**S. Korobka¹, M. Babych¹, R. Krygul¹, I. Stukalets¹, S. Syrotyuk¹,
B. Boltianskyi²**

¹**Lviv National Environmental University**

²**Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University**

DESCRIPTION OF THE MANUFACTURED HELIO DRYER WITH HEAT PUMP

Summary

The purpose of this study is to improve the efficiency of the technological process of drying fruits based on the development of the design and the justification of the structural and technological parameters of the solar dryer, which will ensure a reduction in the cost of energy resources.

In accordance with the set goal, it was necessary to perform the following task: to develop the design of a solar dryer with a heat pump and to justify its structural and technological scheme.

The design of a solar dryer with a heat pump is proposed, the use of which makes it possible to increase the thermal productivity of the installation by 2 times in order to solve the problems of using renewable, environmentally friendly sources of heat energy for drying fruits.

The developed solar dryer with a heat pump based on renewable energy sources will contribute to the intensification of the drying process and the development of their production, and at the same time have a positive effect on the solution of environmental problems of the energy industry due to the replacement of electric and thermal energy obtained with the use of solar energy, and the mitigation of social problems due to the creation new jobs in the manufacture, installation and operation of such installations. At the same time, the use of solar air collectors or heat pumps, which work together with dryers, can solve the issue of independence from centralized energy supply, reducing the level of energy consumption, etc.

Therefore, the implementation of our research was presented in the form of engineering methods for calculating and forecasting processes of convective-radiation drying with variable potentials for heat and mass transfer, which are the basis for forecasting the intensity of drying and the basis for the development and improvement of rational and energy-saving technologies as well as drying plants. The practical value of these studies is represented by new types of equipment for using solar thermal energy in material drying processes, determining the parameters of convective-radiative heat exchange in the drying process, which is the basis for designing new designs of dryers and creating energy-saving drying technologies based on them.

The obtained results can be used during the development and improvement of technical means of drying fruits, to increase the technological and energy efficiency of the process.

Keywords: solar energy, solar fruit dryer, heat pump, heat accumulator, drying chamber.



**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-153-163**УДК** 538.975:621.383.5В. В. Кідалов¹, д-р фіз.-мат. наук ORCID: 0000-0002-5128-1880А. Ф. Дяденчук¹, канд. техн. наук ORCID: 0000-0002-6625-9985¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет**імені Дмитра Моторного*e-mail: alena.dyadenchuk@tsatu.edu.ua, тел.: +380668288519**ОДЕРЖАННЯ ТА ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ГЕТЕРОСТРУКТУРИ ZnO/SiC/porous-Si/Si**

Анотація. У роботі наведено результати одержання гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si та вивчення її структурних та електрофізичних властивостей. Дослідження відбувалося в чотири етапи: отримання поруватих кремнієвих шарів; осадження плівок SiC методом твердофазної епітаксії; осадження плівок ZnO методом магнетронного розпилення; моделювання функціональних характеристик фотоперетворювача на основі виготовленої структури. На третьому етапі зразки були поділені на дві партії в залежності від тривалості процесу осадження (10 та 20 хвилин). За результатами скануючої електронної мікроскопії визначено параметри шарів досліджуваної структури, які в подальшому використано для моделювання фотоелектричних параметрів сонячного елемента ZnO/SiC/porous-Si/Si в симуляторі PC1D. Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача. Встановлено, що для зразків партії 2 було отримано вищий ККД – ефективність зростає із ростом плівки ZnO.

Ключові слова: плівка ZnO, плівка SiC, поруватий кремній, фотоперетворювач.

Постановка проблеми. Оксиди металів (TiO₂, ZnO, Al₂O₃, Fe₂O₃ та ін.) дуже перспективні для багатьох застосувань у мікро- та оптоелектроніці. Серед перелічених оксидів металів ZnO виділяється своїми перевагами: стабільністю, хорошою електронною провідністю, високою хімічною стійкістю, широкою забороненою зоною (3,1-3,3 eV) тощо [1-2]. Однак властивості виготовлених електронних пристроїв на основі оксиду цинку значною мірою залежать від підкладок. Останнім часом активно досліджуються гетероструктури ZnO/Si [3-5]. Однак під час осадження плівки ZnO на кремнієву підкладку виникає технологічна проблема, пов'язана зі значною різницею в теплових коефіцієнтах розширення і постійних ґраток цих



матеріалів, що призводить до появи дислокацій в структурі. Концентрація таких наскрізних дислокацій може призвести до значного псування пристроїв на основі цих гетероструктур. Для зменшення кількості дефектів у гетероструктурі запропоновано використання буферних шарів [6-7], які захищатимуть кремнієву підкладку від хімічної взаємодії з киснем, водяною парою та хлорвмісними сполуками [8] та запобігатимуть появі аморфних та полікристалічних фаз на межі розділу напівпровідників [9]. Одним із варіантів є використання плівки SiC як буферного шару [10].

У зв'язку з цим актуальними є подальші дослідження формування системи ZnO/Si з проміжними шарами SiC і поруватого кремнію та її впливу на властивості поверхні отриманої гетероструктури.

Аналіз останніх досліджень. У фотовольтаїці плівка ZnO використовується не лише як вікно сонячного елемента, але й як частина p-n гетеропереходу. Однак наявні дослідження гетеропереходу ZnO/Si свідчать про низьку ефективність фотоперетворення [11-12]. У ряді робіт повідомляється про мінімізацію дефектів на межі оксиду цинку і кремнію та підвищення ефективності сонячного елемента завдяки використанню буферних шарів (Zn, GaN, AlN, SiO₂ та інших) [13-15]. Прикладом буферного шару може бути порувата поверхня кремнієвої підкладки [16-17]. Нами в [18] доведено покращення характеристик фотоперетворення ZnO/porous-Si, що призводить до збільшення чутливості, підвищуючи ймовірність використання даних структур як фотоприймача з широким спектральним діапазоном довжин хвиль. Однак під час одержання гетероструктур ZnO/porous-Si/Si зростає ймовірність утворення проміжного шару SiO₂, який буде впливати на властивості структур.

З іншого боку, серед матеріалів, що можуть виступати як буферний шар, особливе місце займає карбід кремнію SiC, маючи високу рухливість електронів, високу прозорість, високе поле пробою та високу теплопровідність [19].

Для одержання плівки ZnO на поверхні карбиду кремнію використовують різні методи: металоорганічна епітаксія з пару (MOCVD) [21], золь-гель метод [22], високочастотне магнетронне розпилення [23], осадження атомного шару (ALD) [24], молекулярно-променева епітаксія [20] тощо. Методи отримання складових фотовольтаїчної структури значною мірою впливають не лише на властивості гетероструктури, але й на параметри приладів, які виготовляють на їх основі.

Встановлено, що гетероперехід ZnO/SiC/Si може використовувати сонячну енергію в широкому спектрі [25]. Duan L. та



інші показали, що плівка ZnO на шарі SiC має більш високу якість кристалів, ніж безпосередньо на підкладці Si, а використання буферного шару SiC є ефективним методом вирощування високоякісних плівок ZnO на підкладках Si [21].

Вже в роботі [26] було показано, що ефективність фотоелектричного перетворення тодішніх гетеропереходів ZnO/n-SiC/p-Si зростала в чотири рази, у порівнянні з гетеропереходами n-ZnO/p-Si.

У дослідженні [27] змодельовано сонячний елемент структури Air/ZnO/SiC/c-Si/a-Si(n)/Al за допомогою програмного забезпечення Wafer Ray Tracer. Автори показують, що без шару SiC поглинається лише 57,48 % падаючого світла і генерується 26,85 мА/см² фотогенерованого струму. При товщині шару SiC 70 нм можна досягти збільшення світлопоглинання на 22,16 % і фотогенерування струму на 38,54 %.

Таким чином, й надалі залишається актуальним питання виготовлення, дослідження структурних, оптичних, а також електрофізичних властивостей структури ZnO/SiC/porous-Si/Si з метою подальшого використання її як фотоперетворювача сонячних елементів.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є отримання гетероструктур ZnO/SiC/porous-Si/Si, характеристика поверхні виготовлених структур та моделювання функціональних характеристик фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si.

Основна частина. Фотоперетворювач на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si було виготовлено в кілька етапів:

1. Анодне травлення монокристалічних пластин Si (111) з метою одержання поруватого шару Si [28].
2. Відпал мезопоруватих зразків Si в потоці суміші газів оксиду вуглецю CO та силану SiH₄, в результаті якого відбувається утворення плівки карбиду кремнію за методикою, опиманою в роботах [29-30].
3. Осадження тонких плівок ZnO високочастотним магнетронним розпиленням цинкової мішені в атмосфері аргону та кисню [8].
4. Моделювання параметрів фотоперетворювачів на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si (рис. 1).

На третьому етапі зразки були поділені на дві групи в залежності від тривалості процесу осадження: перша партія дослідних зразків була отримана під час відпалу зразків SiC/porous-Si/Si в атмосфері аргону з киснем впродовж 10 хвилин (далі – партія 1), друга – 20 хвилин (далі – партія 2). Обидві партії досліджувалися методом скануючої електронної мікроскопії (скануючий електронний

мікроскоп (SEM) Tescan Mira 3 LMU). SEM-мікрофотографії структур наведено на рис. 1.

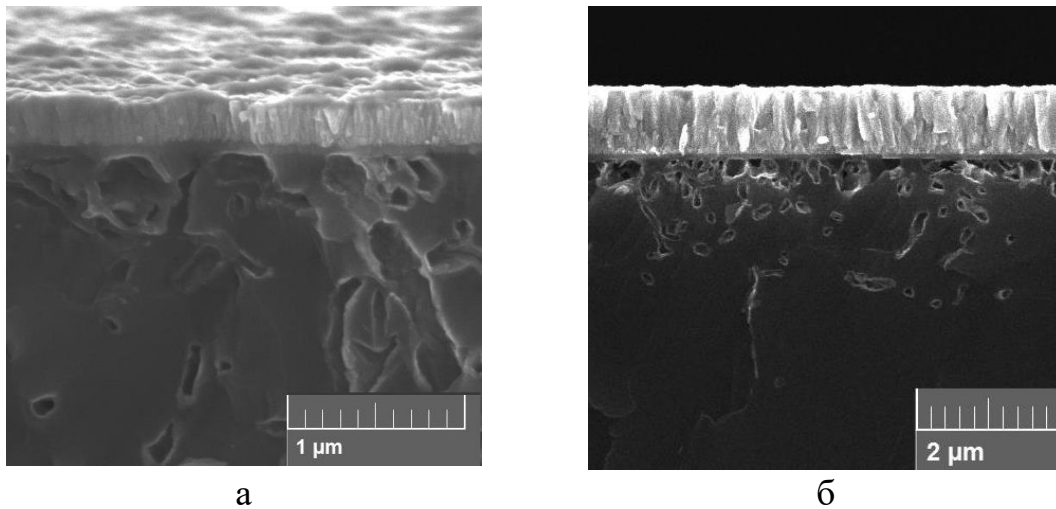


Рис. 1. SEM-зображення поперечного перерізу гетероструктур ZnO/SiC/porous-Si/Si: а – дослідний зразок партії 1; б – дослідний зразок партії 2

За результатами SEM (рис. 1) визначено параметри шарів (табл. 1).

Таблиця 1

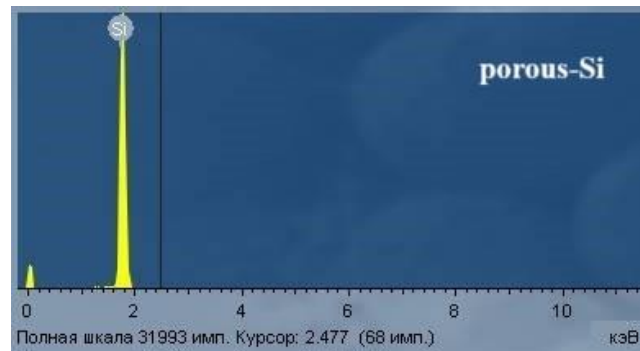
Параметри шарів гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

Шар	Товщина шару, мкм	
	Зразок партії 1	Зразок партії 2
ZnO	0,29	0,97
SiC	0,08	0,09
porous-Si	3,0	2,8
Si	10,0	10,0

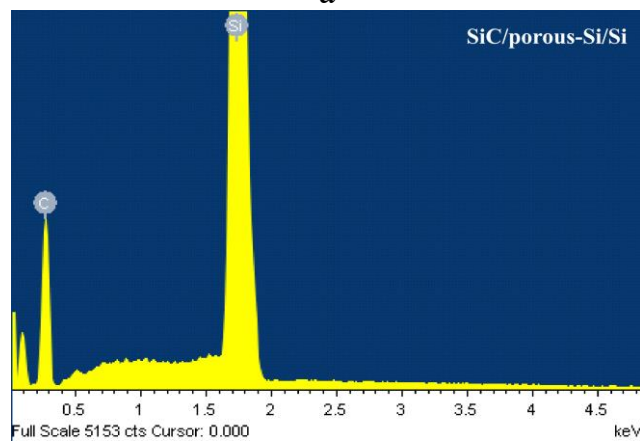
Дослідження хімічного складу кожного з шарів гетероструктури було виконано за допомогою енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-Max 80 мм². Спектр EDAX (рис. 2) підтверджує склад кожного із шарів досліджуваної гетероструктури. Результати аналізу EDAX показують наявність спектрів-піків, що відповідають елементам-складникам аналізованої вибірки [31].

На основі отриманої структури було запропоновано виготовити сонячний елемент. Конструкція виготовленого фотоелектричного перетворювача наведена на рис. 3. Плівка ZnO на верхньому шарі структури дозволяє світлу проходити через шар. Усередині активного базового шару електрон-діркові пари генеруються падаючим світлом з відповідною довжиною хвилі. Ці фотогенеровані дірки та електрони

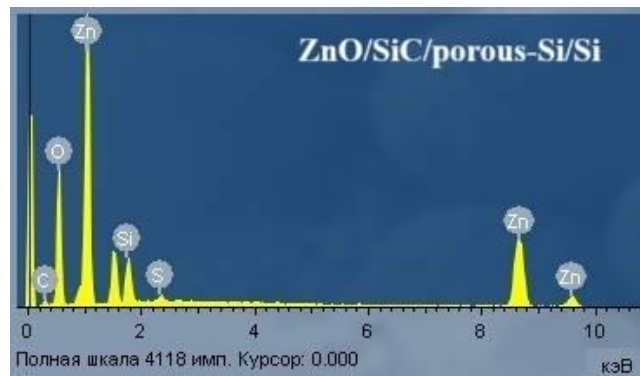
розділяються процесами дифузії та дрейфу, що призводить до появи фотоструму.



а



б



в

Рис. 2. EDAX-дослідження шарів гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

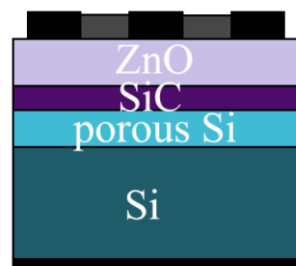


Рис. 3. Схематичне зображення фотоперетворювача на основі гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

Моделювання фотоелектричних параметрів сонячного елемента ZnO/SiC/porous-Si/Si проведено в одновимірному симуляторі напівпровідникових приладів PC1D [32, 33]. Під час моделювання використано фотоелектричні параметри матеріалів ZnO, SiC, поруватий Si та Si, наведені в науковій літературі [34-39]. Товщина шарів обиралась відповідно до результатів скануючої електронної мікроскопії (рис. 4).

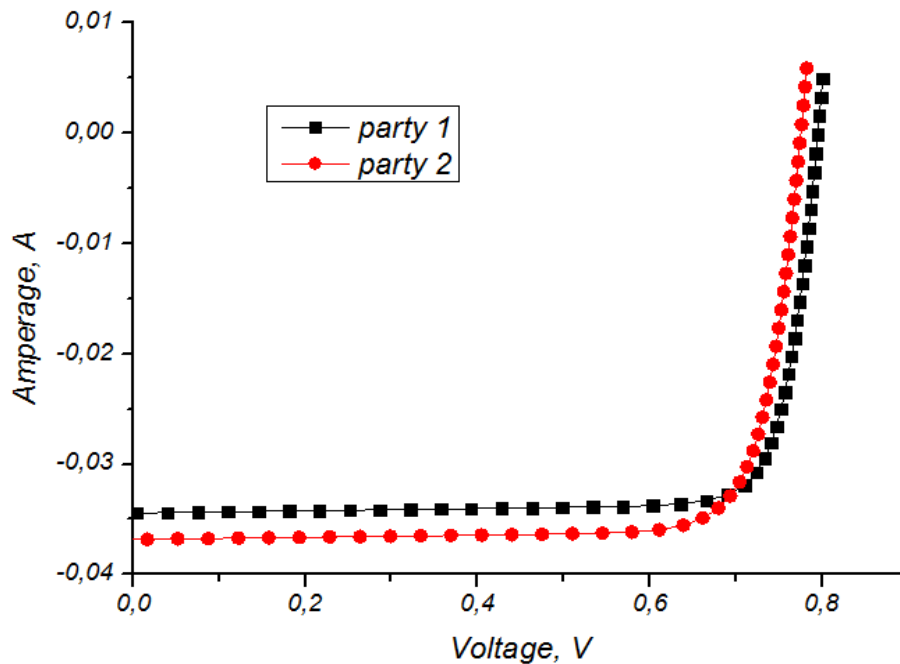


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики фотоперетворювачів ZnO/SiC/porous-Si/Si

Таблиця 2

Основні фотоелектричні параметри гетероструктури ZnO/SiC/porous-Si/Si

Дослідний зразок	Сила струму, I_{SC} , mA	Напруга, V_{OC} , mV	Фактор заповнення FF, %	ККД, %
Партія 1	34,4	795,4	83,0	22,7
Партія 2	36,8	775,6	80,9	23,1

Товщина шару ZnO визначає кількість випромінювання, що надходить до кремнієвого шару фотоперетворювача. З рис. 3 і табл. 2 слідує, що для зразків партії 2 було отримано ККД вищий на 0,4%, тобто ефективність сонячного елемента зростає з ростом товщини плівки ZnO.

Висновки. Методом магнетронного розпилення отримано плівки ZnO на підкладках SiC/porous-Si/Si. Зразки були поділені на дві партії в залежності від тривалості процесу осадження (10 та 20 хвилин),



товщина плівок склала 0,29 та 0,97 мкм відповідно. У програмному пакеті PC1D змодельовано функціональні характеристики фотоперетворювача на основі виготовлених структур. Встановлено, що для структур з товщиною плівки ZnO ~290 нм ефективність перетворення сонячного випромінювання склала 22,7%, для плівок товщиною ~970 нм – 23,1%.

Подяка

Дослідження виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України, а саме: НДР № 0121U113502 та № 0121U109519.

Список використаних джерел

1. Wibowo A., Marsudi M. A., Amal M. I., Ananda M. B., Stephanie R., Ardy H., Diguna L.J. ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications. *RSC advances*. 2020. Vol. 10(70). P. 42838–42859. <https://doi.org/10.1039/D0RA07689A>.
2. Borysiewicz M. A. ZnO as a functional material, a review. *Crystals*. 2019. Vol. 9(10). P. 505. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>.
3. Koc N. S., Altintas S. P., Gokcen M., Dogruer M., Altug C., Varilci A. Current-voltage characteristics of nano whisker ZnO/Si heterojunction under UV exposition. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022. Vol. 342. P. 113618. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113618>.
4. Maqsood S., Ali Z., Ali K., Ishaq M., Sajid M., Farhan A., Rahdar A., Pandey S. Assessment of different optimized anti-reflection coatings for ZnO/Si heterojunction solar cells. *Ceramics International*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.313>.
5. Mandal L., Sadique Anwer Askari S., Kumar M., Imam M. Analysis of ZnO/Si heterojunction solar cell with interface defect. *Advances in Computer, Communication and Control: Proceedings of ETES 2018*. 2019. P. 533–538. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3122-0_53.
6. Gupta C. P., Singh A. K., Jain P. K., Sharma S. K., Birla S., Sancheti S. Electrical transport properties of thermally stable n-ZnO/AlN/p-Si diode grown using RF sputtering. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2021. Vol. 128. P. 105734. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.105734>.
7. Sharma A. K., Kumar R., Jha P. K., Kumar M., Chourasia N. K., Chourasia R. K. Bulk Parameters Effect and Comparative Performance Analysis of p-Si/n-CdS/ALD-ZnO Solar Cell. *Silicon*. 2023. Vol. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02518-z>.
8. Kidalov V. V., Kladko V. P., Dyadenchuk A. F., Gudymenko O. I., Baturin V. A., Karpenko A. Y., Kidalov V. V. ZnO/SiC/Porous-Si/Si Heterostructure: Obtaining and Properties. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2022. Vol. 20(3).



9. Kukushkin S. A., Osipov A. V., Romanychev A. I. Epitaxial growth of zinc oxide by the method of atomic layer deposition on SiC/Si substrates. *Phys. Solid State*. 2016. Vol. 58. P. 1448–1452. <https://doi.org/10.1134/S1063783416070246>.
10. Kim H., Jung M. J., Choi B. J. Current transport mechanism of atomic layer deposited ZnO on 3C–SiC/p-Si heterostructure. *Solid State Communications*. 2021. T. 332. No 114341. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2021.114341>.
11. Gulomov J., Accouche O., Aliev R., Ghandour R., Gulomova I. Investigation of n-ZnO/p-Si and n-TiO₂/p-Si heterojunction solar cells: TCAD+ DFT. *IEEE Access*. 2023. Vol. 99. P. 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268033>.
12. Ali R. S., Sharba K. S., Jabbar A. M., Chiad S. S., Abass K. H., Habubi N. F. Characterization of ZnO thin film/p-Si fabricated by vacuum evaporation method for solar cell applications. *NeuroQuantology*. 2020. Vol. 18(1). P. 26. <https://doi.org/10.14704/nq.2020.18.1.NQ20103>.
13. He J., Yang S., Wei Q. Structural and Optical Property of High Quality GaN Thin Film on Si with ZnO Buffer Layer. *Journal of Photonic Materials and Technology*. 2019. Vol. 5(1). P. 1–4. <https://doi.org/10.11648/j.jmpt.20190501.11>.
14. Li L., Sha L., Yuan Y. Photoluminescence properties of zinc oxide film with local epitaxial growth on silicon using aluminum nitride buffer layer. *Acta Physica Polonica A*. 2020. Vol. 137(6). P. 1110–1115. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.1110>.
15. Lam N. D., Van Thanh H., Thien T. D., Nguyen-Tran T. The Roles of the CuO Buffer Layer on the Photocatalytic Activity of the p-Si/p-CuO/n-ZnO Composite Films. *Materials Transactions*. 2023. Vol. 64(2). P. 578–585. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2022145>.
16. Wahabaalla E. A., El-Menyawy E. M., Abdallah T., Youssef G. M. Improving the photoelectrical conversion efficiency of silicon solar cells using ZnO:Al/porous silicon double antireflective layers. *Applied Physics A*. 2019. Vol. 125(12). P. 842. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3127-2>.
17. Algün G., Akçay N. The role of etching current density and porous structure on enhanced photovoltaic performance of ZnO/PS heterojunction solar cells. *Applied Physics A*. 2019. Vol. 125(8). P. 568. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2867-3>.
18. Khudiar S. S., Mutlak F. A. H., Nayef U. M. Synthesis of ZnO nanostructures by hydrothermal method deposited on porous silicon for photo-conversion application. *Optik*. 2021. Vol. 247. No 167903. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167903>.
19. Hotza D., Di Luccio M., Wilhelm M., Iwamoto Y., Bernard S., da Costa J.C.D. Silicon carbide filters and porous membranes: A review of



processing, properties, performance and application. *Journal of Membrane Science*. 2020. Vol. 610. No 118193.

<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118193>.

20. Zhang Y., Lin N., Li Y., Wang X., Wang H., Kang J., Wilks R., Bär M., Mu R. The isotype ZnO/SiC heterojunction prepared by molecular beam epitaxy – A chemical inert interface with significant band discontinuities. *Sci Rep*. 2016. Vol. 6. No 23106. <https://doi.org/10.1038/srep23106>.

21. Duan L., Lin B., Yao R., Fu Z. The properties of ZnO/SiC/Si heterostructure. *Chinese Journal of Materials Research*. 2006. Vol. 20(3). P. 259.

22. Chung Gwiy-Sang. Characteristics of ZnO Films Deposited on Poly 3C-SiC Buffer Layer by Sol-Gel Method. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*. 2011. Vol. 12(3). P. 102–105. <https://doi.org/10.4313/TEEM.2011.12.3.102>.

23. Duy-Thach Phan, Gwiy-Sang Chung. Comparison of ZnO thin films grown on a polycrystalline 3C-SiC buffer layer by RF magnetron sputtering and a sol-gel method. *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257(8). P. 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.003>.

24. Kim H., Jung M. J., Choi S., Choi B. J. Atomic layer deposition of ZnO for modulation of electrical properties in n-GaN Schottky contacts. *Journal of Electronic Materials*. 2021. Vol. 50. P. 1955–1962. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08673-y>.

25. Kobayashi H., Tachibana S., Yamanaka K., Nakato Y., Yoneda K. Improvement of indium-tin-oxide/silicon oxide/n-Si junction solar cell characteristics by cyanide treatment. *J Appl Phys*. 1997. Vol. 81(11). P. 7630–7634. <https://doi.org/10.1063/1.365340>.

26. Xiaopeng Wu, Xiaoqing Chen, Lijie Sun, Shun Mao, Zhuxi Fu. Photoelectric conversion characteristics of ZnO/SiC/Si heterojunctions. *Journal of Semiconductors*. 2010. Vol. 31. No 103002. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/31/10/103002>.

27. Sasmal Sajal, Ray Mrityunjy. Optimization of multijunction solar cell by wafer ray tracer for development of high photogenerated. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. 04. <https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0404065>.

28. Kidalov V. V., Dyadenchuk A. F., Khrypko S. L., Khrypko O. S. Investigation the Structures ZnO:Al/SiO_x/PorSi/p-Si/Al. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2017. Vol. 18(2). P. 180-183. <https://doi.org/10.15330/pcss.18.2.180-183>.

29. Kidalov V. V., Kukushkin S. A., Osipov A. V., Redkov A. V., Grashchenko A. S., Soshnikov I. P., Boiko M. E., Sharkov M. D., Dyadenchuk A. F. Properties of SiC films obtained by the method of substitution of atoms on porous silicon. *ECS Journal of Solid State Science*



and Technology. 2018. Vol. 7(4). P. 158.
<https://doi.org/10.1149/2.0061804jss>.

30. Кідалов В. В., Кукушкін С. А., Осіпов А. В., Редьков А. В., Гращенко А. С., Сошніков І. П., Бойко М. Е., Шарков М. Д., Дяденчук А. Ф. Гетероепітаксійний ріст SiC на підкладках поруватого Si методом заміщення атомів. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2018. Т. 10, № 3. С. 03026 (бсс). [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(3\).03026](https://doi.org/10.21272/jnep.10(3).03026).

31. Amoozadeh A., Rahmani S. Nano-WO₃-supported sulfonic acid: New, efficient and high reusable heterogeneous nano catalyst. *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2015. Т. 396. P. 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2014.09.020>.

32. Gran J., Kübarsepp T., Sildoja M., Manoocheri F., Ikonen E., Müller I. Simulations of a predictable quantum efficient detector with PC1D. *Metrologia*. 2012. Vol. 49(2). P. 130. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S130>.

33. Thirunavukkarasu G. S., Seyedmahmoudian M., Chandran J., Stojcevski A., Subramanian M., Marnadu R., Alfaify S., Shkir M. Optimization of mono-crystalline silicon solar cell devices using PC1D simulation. *Energies*. 2021. Vol. 14(16). No 4986. <https://doi.org/10.3390/en14164986>.

34. Hashmi G., Rashid M. J., Mahmood Z. H., Hoq M., Rahman M. H. Investigation of the impact of different ARC layers using PC1D simulation: application to crystalline silicon solar cells. *Journal of Theoretical and Applied Physics*. 2018. Vol. 12. P. 327–334. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0313-0>.

35. Shah D. K., KC D., Akhtar M. S., Kim C. Y., Yang O. B. Vertically arranged zinc oxide nanorods as antireflection layer for crystalline silicon solar cell: a simulation study of photovoltaic properties. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(17). P. 6062. <https://doi.org/10.3390/app10176062>.

36. Shah D. K., Devendra K. C., Kim T. G., Akhtar M. S., Kim C. Y., Yang O. B. Influence of minority charge carrier lifetime and concentration on crystalline silicon solar cells based on double antireflection coating: A simulation study. *Optical Materials*. 2021. Vol. 121. No 111500. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111500>.

37. Laohawiroj S., Fangsuwannarak T., Rattanawichai P., Limsiri W., Naidoo N.J., Phatthanakun R. Silicon composite films as an anti-reflection coating layer for third generation photovoltaic. *Suranaree Journal of Science & Technology*. 2022. Vol. 29(3).

38. Dyadenchuk A., Domina N., Oleksenko R. Simulation of Solar Element Characteristics Based on Porous Silicon. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System*



(MEES). 2022. Р. 1–4.
<https://doi.org/10.1109/MEES58014.2022.10005773>.

39. Дяденчук А. Ф., Філіпович Є. В. Моделювання функціональних характеристик сонячних елементів на основі ZnO і TiO₂. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 1. С. 1–11.
<https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v12i1.299>.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2023 р.

V. Kidalov¹, A. Dyadenchuk¹

¹ Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

OBTAINING AND STUDYING THE ZnO/SiC/porous-Si/Si HETEROSTRUCTURE PROPERTIES

Summary

The paper presents the results of obtaining the ZnO/SiC/porous-Si/Si heterostructure and studying its structural and electrophysical properties. The research took place in four stages. At the first stage, porous layers on a silicon substrate were obtained. At the second stage, SiC films were deposited on the porous silicon surface by the solid-phase epitaxy method. ZnO films were deposited on the surface of SiC/porous-Si/Si heterostructures by magnetron sputtering. At the last stage, the functional characteristics of the photoconverter were modeled on the basis of the manufactured structure. The study of the chemical composition of each of the layers of the heterostructure was performed using an Oxford Instruments X-Max 80 mm² energy dispersive spectrometer. The EDAX spectrum confirms the composition of each of the layers of the investigated heterostructure. At the third stage, the samples were divided into two batches depending on the duration of the deposition process (10 and 20 minutes). Based on the obtained structure, it was proposed to manufacture a solar cell.

Based on the results of scanning electron microscopy, the parameters of the layers of the studied structure were determined, which were subsequently used to simulate the photovoltaic parameters of the ZnO/SiC/porous-Si/Si solar cell in the PC1D simulator. Other parameters of ZnO, SiC, porous Si and Si materials are taken from scientific literature.

It was found that for structures with a ZnO film thickness of ~290 nm, the solar radiation conversion efficiency was 22.7%, for films with a thickness of ~970 nm – 23.1%. That is, for the samples of batch 2, the efficiency was obtained higher by 0.4%, that is, the efficiency of the solar cell increases with the increase in the thickness of the ZnO film. The thickness of the ZnO layer determines the amount of radiation that reaches the silicon layer of the photoconverter.

Keywords: ZnO film, SiC film, porous Si, photoconverter.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-164-178

УДК 620.92

С. В. Галько¹, канд. техн. наук
О. О. Мірошник², д-р техн. наук
М. М. Сивенко², аспірант
Т. Shchur³, Ph.D
A. Markowska⁴, master

ORCID: 0000-0001-7991-0311
ORCID: 0000-0002-6144-7573
ORCID: 0000-0003-1311-646X
ORCID: 0000-0003-0205-032X
ORCID: 0009-0009-9279-5560

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*

² *Державний біотехнологічний університет, м. Харків*

³ *Cyclone Manufacturing Inc, Mississauga, Ontario, Canada*

⁴ *Military Technical Academy, Warsaw, Poland*

e-mail: galkosv@gmail.com, тел.: +380674217508

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ЇЇ РОБОТИ

Анотація. В роботі представлені етапи моделювання автономної сонячної електростанції для дослідження режимів її роботи. Оцінка виконується за допомогою простого аналітичного методу вилучення параметрів, включених в рівняння поведінки фотоелектричного модуля (ФЕМ). Представлена математична модель фотоелектричного елемента (ФЕЕ) за допомогою середовища Matlab Simulink для знаходження параметрів нелінійного рівняння, що зв'язує струм (I) з рівнянням напруги (U). Використано простий і успішний метод для оцінки послідовного опору, коефіцієнта ідеальності, контролю точки максимальної потужності (ТМП), струму насичення і провідності, що шунтує, в сонячних елементах, що опромінюються. Розглядається конструкція DC-DC перетворювача та інтеграція DC-DC перетворювача з фотомодулем. DC/AC перетворювач, розроблений і змодельований за допомогою Matlab Simulink. Вхідні і вихідні дані перетворювача отримані в результаті моделювання в умовах відкритого контуру з постійною вхідною напругою постійного струму. Крім того, виходи беруться з перетворювача, подаючи на нього вихід фотоелектричного модуля.

Ключові слова: сонячна панель, моделювання, математичний метод, сонячна енергія, автономна енергетика, фотоелектричний модуль, план живлення.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку електроенергетичних систем пов'язані з масовим впровадженням нових технологій, таких як розподілена генерація на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1]. Основними задачами світової політики в галузі альтернативних джерел енергії є збільшення виробництва і споживання енергії, яка виробляється ВДЕ, з метою економного використання традиційних паливно-енергетичних



ресурсів [2].

Дослідження відновлюваної енергетики показали її ефективність. Сонячна енергетика є найбільш розвиненим напрямком, яка дозволяє знизити вартість і витрату палива децентралізованих і енергетичних віддалених джерел живлення. Також такі системи не мають рухомих частин, не виробляють шуму, практично не вимагають обслуговування, не забруднюють навколишнє середовище, мають модульну структуру і високу надійність [3-5].

Фотоелектрична генерація (ФЕГ) електроенергії є найважливішим і стійким альтернативним джерелом електроенергії, доступним в даний час завдяки великій кількості та легкому доступу сонячної радіації навколо Землі. Незважаючи на коротку тривалість сонячного світла, сонячна енергія широко доступна в денний час і вільна для використання [6,7]. Нещодавно фотоелектрична система була визнана лідером у виробництві відновлюваної електроенергії, оскільки вона може генерувати постійну електроенергію без сильного впливу на навколишнє середовище та забруднення [8].

Електрофізичні характеристики фотоелектричних панелей – найважливіші параметри, оцінюючи які, можна зробити обґрунтований вибір про перспективність використання панелі для створення сонячної електростанції з необхідним значенням вихідної електричної потужності. До цих параметрів відносяться: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, ККД тощо.

Аналіз останніх досліджень. Використовуючи модель, теоретично можливо передбачити поведінку фотоелектричної системи щодо певних параметрів, таких як сонячна радіація, температура і опір. Існують різні моделі фотоелектричних систем. Серед них найпростіші моделі з одним діодом. Це хороший компроміс між простотою і точністю. Найбільш широко застосовуються моделі як з послідовними, так і з паралельними резисторами, щоб показати вплив світла і температури на фотоелектричний модуль, забезпечити взаємодію з перетворювачем потужності, знайти оптимальні рівняння струму (I) і напруги (U) для моделі з одним фотоелементом і впливом послідовного і паралельного опорів [9, 10]. Прямий розрахунок контролюється математичною моделлю за допомогою програмного забезпечення Matlab Simulink.

Розрахунок максимальної потужності дуже важливий в фотоелектричних системах. Фактично це відповідає умові оптимального використання системи. Системи ФЕГ з контрольованою точкою максимальної потужності забезпечують кращу продуктивність, виконують систематичний аналіз при моделюванні та оцінці ключових підсистем для максимізації потужності сонячних батарей. При їх моделюванні використовується одnodіодна схема

заміщення [11].

Формування цілей статті. Розробка алгоритму контролю точки максимальної потужності ФЕМ для регулювання потужності фотоелектричної системи.

Основна частина. Фотоелектричні масиви використовуються в багатьох технічних додатках, таких як зарядні пристрої, підключені до мережі фотоелектричні системи, гібридні сонячні батареї та супутникові енергетичні системи (рис. 1).

На рис. 1, а, б наведені моделі фотоелементів, які найбільш часто використовуються, а саме джерело струму паралельне одному або двом діодам. Модель одного діода має чотири компоненти: джерело фотоструму, діод паралельно джерелу, ряд резисторів R_s і резистор R_{sh} , що шунтує. На рисунку 1, б представлена модель з двома діодами: додатковим діодом для кращого підгону кривої.

Опір шунта R_{sh} досить великий, тому ним зазвичай можна знехтувати. Таким чином, параметричні моделі на рис. 1, а, б можуть бути спрощені до рис. 1, в.

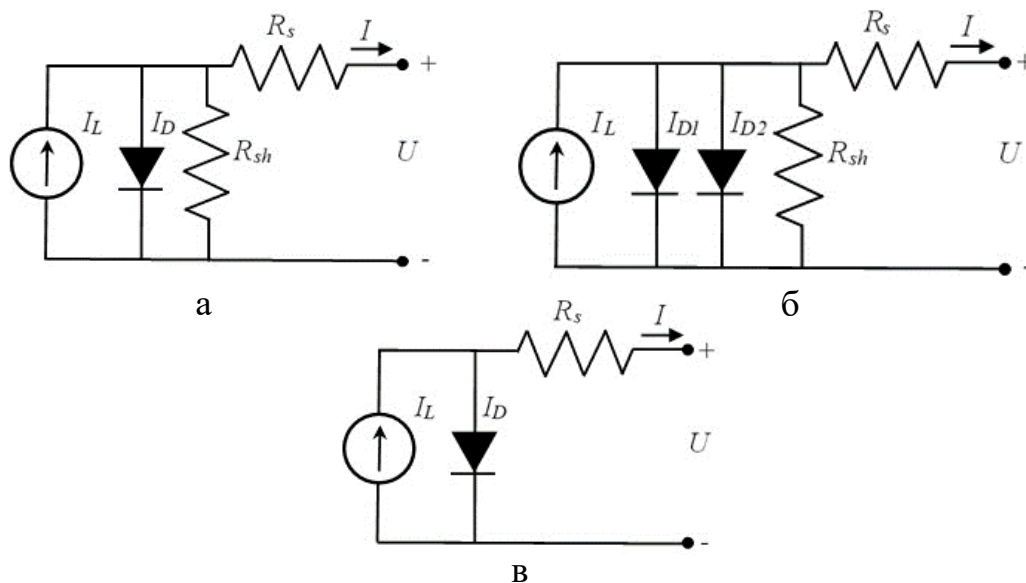


Рис. 1. Схеми еквівалентні моделей фотоелектричних елементів: а – модель одного діода; б – модель подвійного діода; в – спрощена схема заміщення ФЕ

Вихідна напруга U і струм навантаження I пов'язані як [1]:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{U + IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

де I_L – світловий струм, А;

I_0 – струм насичення, А;

I – струм навантаження, А;

U – вихідна напруга, В;



R_S – послідовний опір, Ом;

α – коефіцієнт завершення вимірювання теплової напруги, В.

Чотири параметри (I_L , I_0 , R_S і α) можуть бути визначені для отримання співвідношення $I-U$ (модель з чотирма параметрами). Еквівалентна схема на рисунку 1, в і рівняння (1) маскують складність фактичної моделі, оскільки чотири параметри є функціями температури, струму навантаження, сонячної радіації.

Світловий струм I_L можна розрахувати так:

$$I_L = \frac{\Phi}{\Phi_{em}} [I_{L,em} + \mu_{I,SC}(T_C - T_{C,em})], \quad (2)$$

де Φ – освітлення, Вт/м²;

Φ_{em} – еталонна освітленість (використовується значення 1000 Вт/м²);

$I_{L,em}$ – світловий струм за стандартних умов (1000 Вт/м² та 25 °С);

T_C – температура фотоелемента (°С);

$T_{C,em}$ – еталонна температура (використовується значення 25°С);

$\mu_{I,SC}$ – температурний коефіцієнт струму короткого замикання (А/°С);

$I_{L,em}$ і $\mu_{I,SC}$ – вказується у технічному паспорті виробника.

Струм насичення I_0 можна виразити через його значення при стандартних умовах [7]:

$$I_0 = I_{0,em} \left(\frac{T_{C,em} + 273}{T_C + 273} \right)^3 \exp \left[\frac{e_{gap} N_S}{q \alpha_{em}} \left(1 - \frac{T_{C,em} + 273}{T_C + 273} \right) \right], \quad (3)$$

де $I_{0,em}$ – струм насичення при стандартних умовах, А;

e_{gap} – міжсмуговий зазор матеріалу (1,17 еВ для матеріалів Si);

N_S – кількість елементів в серії фотоелектричних модулів;

q – електронний заряд ($1,60217733 \times 10^{-19}$ С);

α_{em} – вартість при стандартних умовах.

Параметри модуля були в значній мірі налаштовані відповідно до специфікацій Solar MSX60 для сонячного випромінювання 1000 Вт/м² і температури елементів 25°С [3]. Параметри модуля наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри модуля, що використовуються у моделюванні

Параметри модуля	Значення
Опорна напруга (U_r)	17,1 В
Опорний струм (I_r)	3,5 А
Температурний коефіцієнт струму короткого замикання	3×10^{-3} мА/°С
Температурний коефіцієнт струму короткого замикання, β	-73×10^{-3} мВт/°С
Струм короткого замикання, I_{SC}	3,8 А
Послідовний опір, R_S	0,47 Ом

На рис. 2 показано моделювання за допомогою програмного забезпечення Matlab Simulink запропонованого фотомодуля, який підключений до резистивного навантаження постійного струму. Резистор R_L був встановлений на 4,5 Ом для роботи у ТМП. У моделюванні використовувалося випромінювання (G), 1000 Вт/м² і температура модуля (T_C) 25 °С.

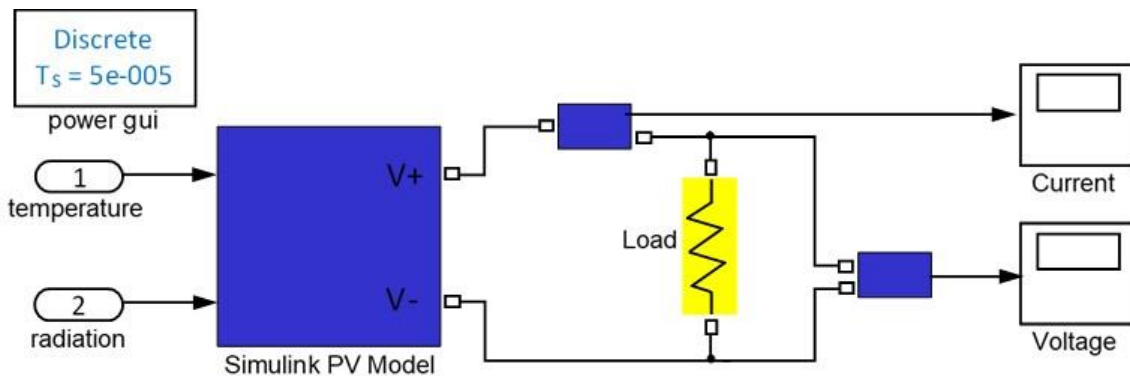


Рис. 2. Моделювання фотомодуля для навантаження постійного струму

Внутрішній резистор R_i і конденсатор C_i були встановлені на 1 Ом і 10^{-2} Ф відповідно. Перехідний процес ФЕМ при його підключенні до резистивного навантаження показаний на рис. 3, а, б, в. Напряга навантаження і струм встановлюються в постійне значення приблизно через 0,05 с перехідного процесу.

Розрахунковий час може бути скоригований для C_i і R_i . Регулювання перехідної реакції ФЕМ особливо корисно для аналізу стабільності напруги та потужності енергосистем, що живляться від фотоелектричних панелей. Потужність, що подається на навантаження з фотомодуля, досягалася в сталому режимі після проектування перехідних процесів. Це дозволяє більш реалістично аналізувати фотоелектричні панелі при моделюванні енергосистеми.

На характеристиках фотомодуля є єдина точка максимальної потужності для конкретного робочого стану. Бажано, щоб фотомодуль працював близько до цієї точки, тобто вихід фотомодуля наближався до ТМП [4, 12].

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) і характеристики потужності фотоелектричної панелі типу JA Solar JAM60S09-325PR, що випускається компанією JA Solar, отриманні експериментальним шляхом приведені на рис. 4. Вона має такі основні технічні характеристики: $P_{max} = 325$ Вт, $U_{x.x.} = 41,04$ В, $I_{к.з.} = 10,25$ А, $U_{max.} = 33,4$ В, $I_{max.} = 9,72$ А, габаритні розміри – 1657 мм × 996 мм × 35 мм.

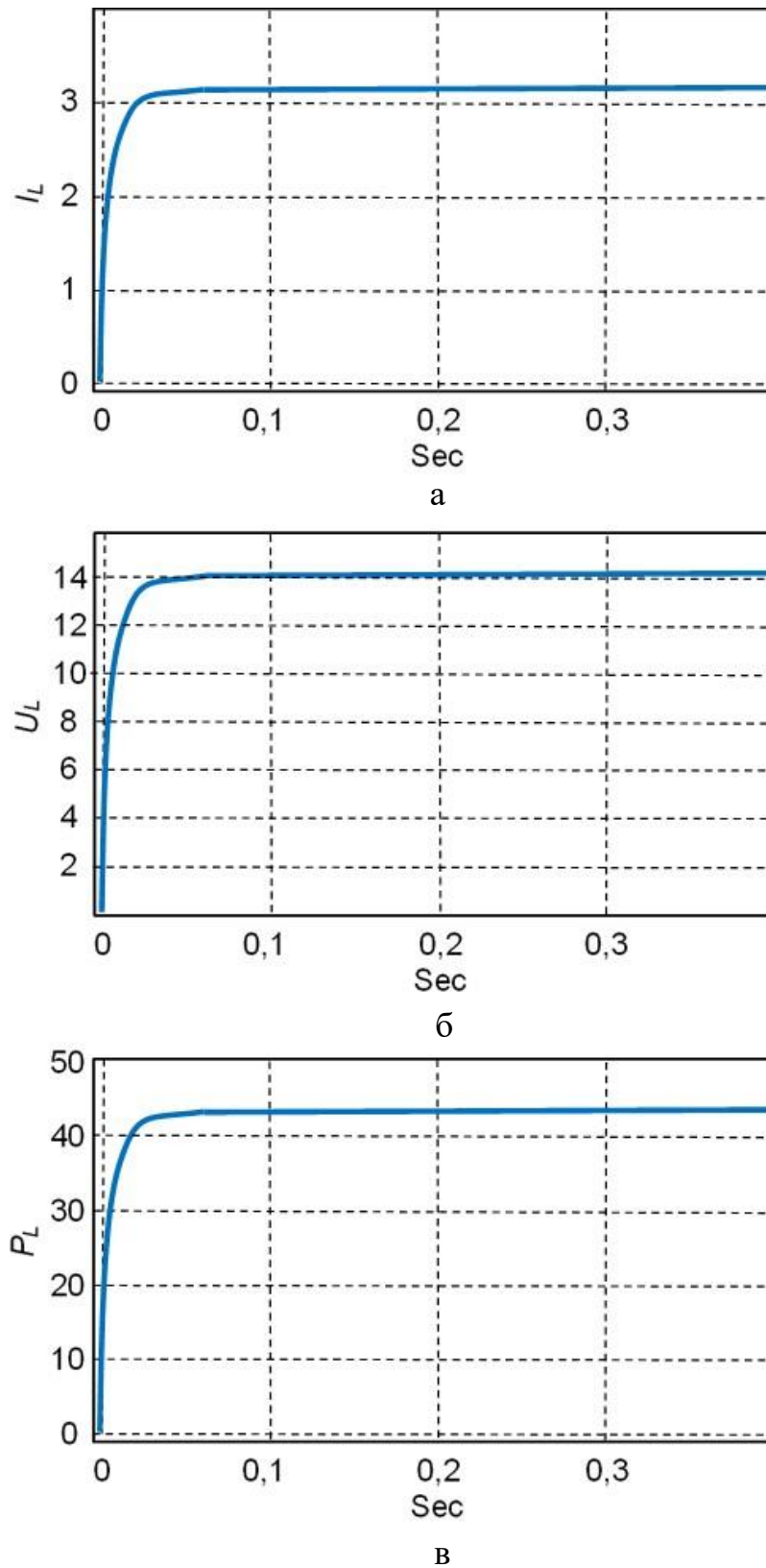


Рис. 3. Струм I (а), напруга U (б) і потужність P (в) фотомодуля для опору навантаження 4,5 Ом

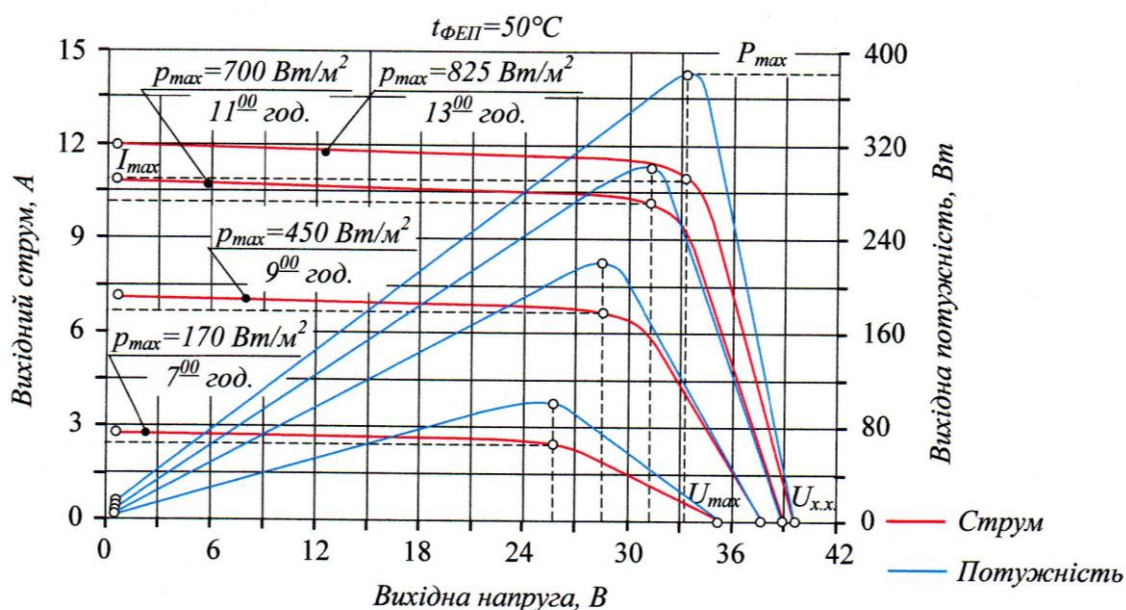


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики і характеристики потужності фотоелектричної панелі типу JA Solar JAM60S09-325PR

Вихідна максимальна потужність P_{max} при щільності питомої потужності сонячного випромінювання 825 Вт/м^2 становить 381 Вт при вихідній напрузі $U_{max} = 34 \text{ В}$ і вихідному струмі $I_{max} = 11 \text{ А}$ [13].

Існує безліч алгоритмів контролю ТМП. Алгоритм “Збурюйте і спостерігайте” (3&C) гарантує, що система працює оптимально в різних умовах. На рис. 5 наведено запропонований алгоритм контролю ТМП для регулювання потужності фотомодуля.

Метою алгоритму контролю ТМП є автоматичне знаходження максимальної робочої напруги та максимального робочого струму, при якому фотомодуль може працювати на максимальній потужності при заданих світлових і температурних умовах. Алгоритм 3&C контролю ТМП починається з розрахунку вихідної потужності фотомодуля та її зміни шляхом вимірювання як струму, так і напруги фотомодуля [11, 14]. Метод контролю ТМП в цьому випадку періодично контролює підвищення або зниження напруги сонячного ФЕМ. Якщо таке обурення генерується в одному і тому ж напрямку і якщо воно призводить до зниження потужності фотомодуля, то обурення генерується в зворотному напрямку [5].

Робочий цикл змінюється до моменту отримання ТМП. Однак система коливається навколо точки максимальної потужності, зменшуючи розмір кроку збурення, при цьому зменшується коливання, але уповільнюється відстеження [12, 15-17].

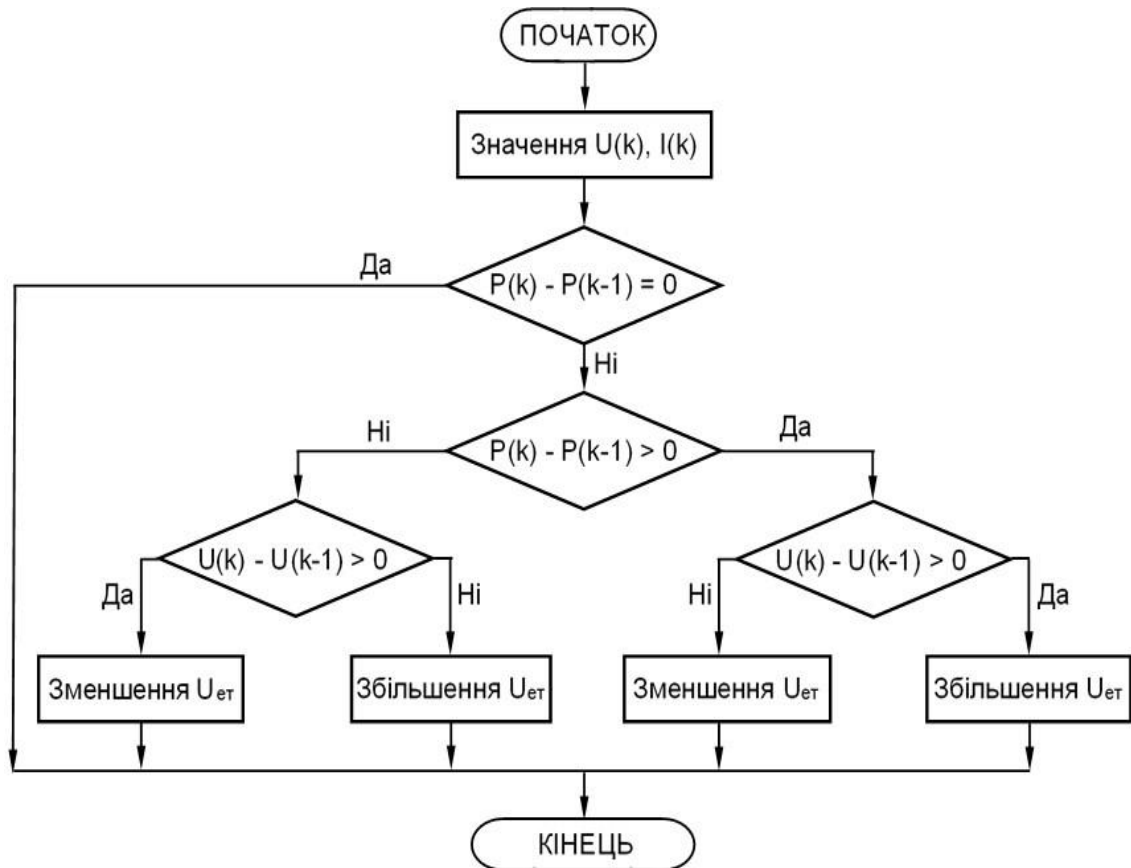


Рис. 5. Схема методу контролю ТМП (3&С)

На рис. 6 приведена система змодельована з точки зору управління. Зміна температури або випромінювання створює нову ТМП. Система повинна перейти на цю нову установку. ТМП виконує завдання моніторингу спільно з ПІ контролером. Потім необхідний робочий цикл подається на пристрій, який приводить в рух затвор MOSFET перетворювача.

Бібліотека спеціалізованих енергетичних систем та електричних спеціалізованих енергосистем була використана для моделювання перехідних процесів. Модель створена на основі приблизних характеристик ФЕГ і спрощених математичних функцій, яка представлена у вигляді блоку підсистеми [18-20]. Реалізація всієї системи в Matlab Simulink показана на рис. 6.

Результати досліджень. При моделюванні використовувалися чотири різних погодних умови [11]. Це набори: 550 Вт/м² і 25 °С, 600 Вт/м² і 35 °С, 1200 Вт/м² і 45 °С та 1000 Вт/м² і 55 °С. Максимальна потужність ФЕМ і вихідна потужність наведені на рис. 7, а. Зрозуміло, що система досягає максимальної потужності. Різниця між вихідною потужністю і потужністю фотомодуля обумовлена втратами в перетворювачі [21, 22].

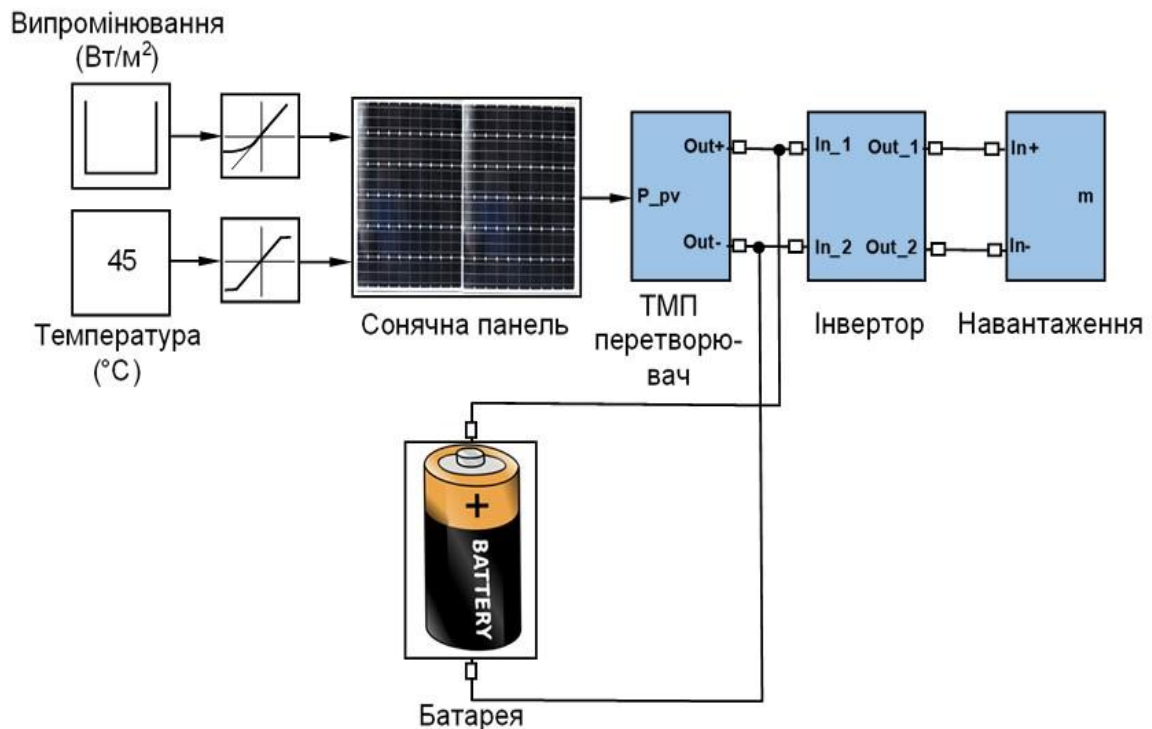


Рис. 6. Модель запропонованої фотоелектричної системи

Змодельовано два сценарію для оцінки продуктивності системи. Сценарій I: 220 Вт/м² і 25 °С, 600 Вт/м² і 35 °С, 800 Вт/м² і 45 °С та 600 Вт/м² і 55 °С. З рис. 7, б видно, що система відстежує максимальну потужність навіть на цих низьких рівнях. Сценарій II: 550 Вт/м² і 25 °С, 600 Вт/м² і 35 °С, 1200 Вт/м² і 45 °С та 1000 Вт/м² і 55 °С [12].

На рис. 7, в показана відповідна вихідна потужність. Перевірено вплив коефіцієнта підсилення ПІ контролера на продуктивність системи [23-26].

Збільшення коефіцієнта підсилення збільшує час підйому системи і, отже, покращує реакцію системи на зміну температури і випромінювання [27-29], як показано на рис. 8, а.

На рис. 8, б показаний вплив частоти ТМП на характеристику системи. При 200 Гц відгук повільний, при 1 кГц відгук стає швидше. Збільшення частоти ТМП вище 1 кГц не покращує відгук системи, оскільки динаміка всієї системи контролюється динамікою перетворювача [30-32].

Висновки.

1. На основі середовища Matlab Simulink визначена максимальна продуктивність автономних фотоелектричних систем в залежності від рівня сонячної радіації і стану заряду батареї. Результати досліджень показують, що навантаження на споживача покривається незалежно від рівня сонячної радіації.

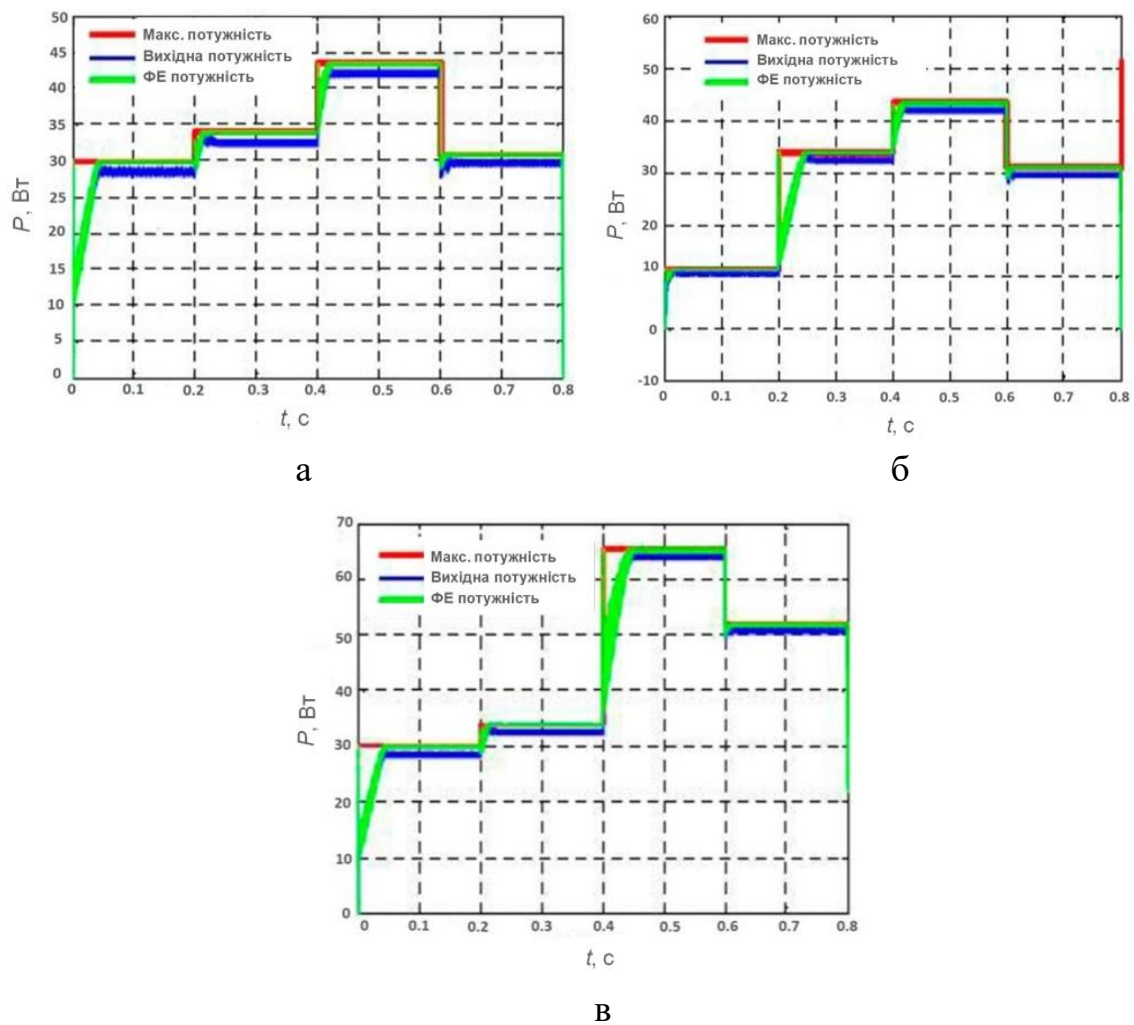


Рис. 7. Максимальна, вихідна та фотоелектрична потужності модуля

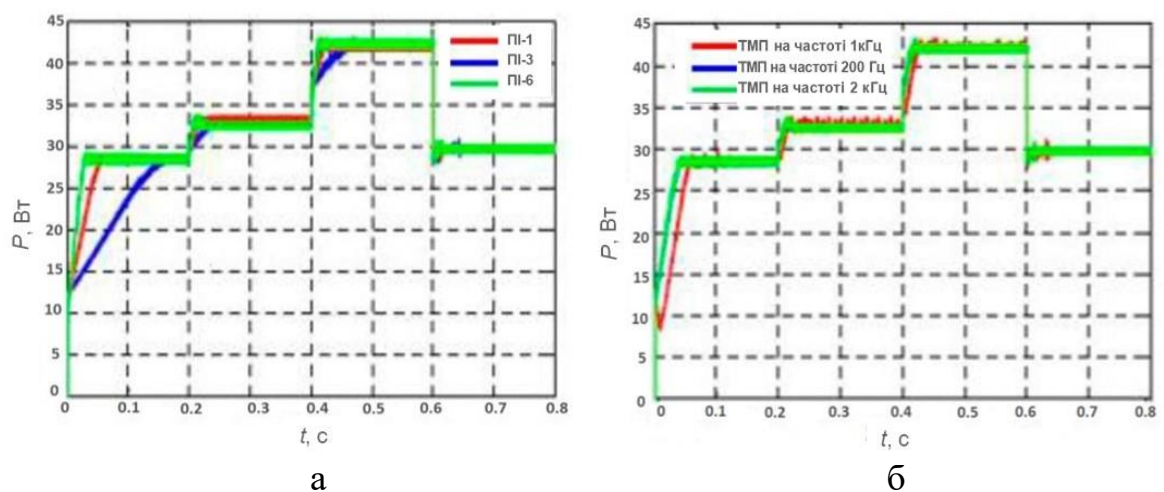


Рис. 8. Вихідна потужність системи з різним коефіцієнтом підсилення (а) та на різних частотах ТМП (б)



2. Модель фотоелектричної системи на основі методу контролю ТМП з використанням алгоритму “Збурюйте і спостерігайте” допомагає аналізувати продуктивність комерційних фотомодулів. Загальна модель фотоелектричного модуля спроектована з широко використовуваними блоками у вигляді блоку замаскованої підсистеми. Результати моделювання показують відмінну узгодженість з кривими продуктивності, наведеними в технічних паспортах обраних моделей.

3. Модель може бути використана для аналізу продуктивності будь-якого комерційного фотомодуля. Також змодельовано підвищувальний перетворювач DC/AC, а результати отримано від перетворювача з постійним джерелом входу постійного струму і шляхом підключення до нього фотомодуля. Результати показують близьку відповідність між виходом вхідного перетворювача постійного струму та фотоелектричного перетворювача.

4. Отримані вихідні напруга та струм фотоелектричного перетворювача постійного струму при зміні рівнів експозиції при постійній температурі.

Список використаних джерел

1. Benoy S., Pandey M., Bhattacharjya D, Saikia B. Recent trends in super capacitor-battery hybrid energy storage devices based on carbon materials. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 52. В. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104938>.

2. 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. 6–41. <https://doi.org/10.15199/48.2021.08.07>.

3. 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>.

4. Khasawneh A., Qawaqzeh M., Miroshnyk O., Danylchenko D., Minakova K., Potryvai A. Methodology for Accounting for the Influence of Dust Cover on the Performance of a Photovoltaic System for Matlab. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES*. Kremenchuk, Ukraine, 2021. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598611>.

5. Belik M. Weather dependent mathematical model of photovoltaic panels. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2017. Vol. 1(15). P. 698–701.



6. Zaitsev R., Kirichenko M., Minakova K., Khrypunov G., Drozdov A., Khrypunova I., Prokopenko D. DC–DC Converter for High-Voltage Power Take-Off System of Solar Station. *2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2019)*, 2-6 July 2019, Conference proceedings. Lviv: IEEE, 2019. P. 582–587. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8879860>.

7. Pazyi V., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Savchenko O., Halko S. Analysis of technical condition diagnostics problems and monitoring of distribution electrical network modes from smart grid platform position. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPIWeek 2020-Conference Proceedings*. Kharkiv, Ukraine, 2020. P. 57–60. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250080>.

8. Галько С.В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. 2019. Вип. 19, т. 3. С. 130–141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.

9. Трунова І., Мірошник О., Савченко О., Мороз О. Удосконалення мотиваційної моделі підвищення якості електропостачання з використанням одностороннього дисперсійного аналізу. *Науковий вісник національного гірничого університету*. 2019. Вип. 6. С. 163–168. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>.

10. Belik M. PV power stations – fire hotbeds and fire tolls. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2019. Vol. 17. P. 229–234.

11. 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.

12. Карта розподілу сонячної радіації. URL: <https://rent techno.ua/assets/images/blog/pvgis-eu-2012.png> (дата звернення: 16.09.2023).

13. 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>.

14. 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. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. Vol. 89(5). P. 76–80.

15. Зайцев Р., Хрипунов Г., Веселова Н., Кіріченко М., Харченко М., Зайцева Л. Тонкі плівки телуриду кадмію для гнучких ФЕП, отриманих магнетронно-дисперсійним методом. *Журнал нано- та*



електронної фізики. 2017. Вип. 9, № 3. С. 03015-1–03015-7. https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/2216.

16. Мірошник О., Тимчик С. Рівномірний розподіл навантажень в електричній системі 0,38/0,22 кВ з використанням генетичних алгоритмів. *Технічна електродинаміка*. 2013. Вип. 4. С. 67–73. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS> (дата звернення 02.09.2023).

17. James P. Dunlop “Photovoltaic systems,” *National Joint Apprenticeship and Training Committee for the Electrical Industry, American Technical Pub*, 2010. 469 p.

18. 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.v66i1.4295>.

19. 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>.

20. 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, KhPIWeek 2021 – Conference Proceedings*. Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 666–669. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570023>.

21. Rubanenko O., Hunko I., Rubanenko O., Rassölkin A. Influence of Solar Power Plants on 0.4 kV Consumers. *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga, Latvia, 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/RTUCON48111.2019.8982257>.

22. Cericola D., Kötz R., Hybridization of rechargeable batteries and electrochemical capacitors: Principles and limits. *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 72. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151>.

23. Minakova K., Zaitsev R. Двовісна модель теплового балансу сонячного колекторе. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2022. Вип. 14, № 4. С. 1–4. https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/3530.

24. 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.v66i1.4295>.

25. Qawaqzeh M., Szafranec A., Halko S., Mirosnyk O., Zharkov A. Modelling of a household electricity supply system based on a wind power plant. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96. P. 36–40. <https://doi.org/10.15199/48.2020.11.08>.



26. Yun H. One-dimensional partial differential model for asymmetric hybrid supercapacitor. *Journal of Power Sources*. 2023. Т. 562. No 232788. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232788>.

27. Veligorskyi O., Kosenko R., Stepenko S. Розробка та оцінка ефективності високоефективного сонячного трекера. *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Київ, Україна, 2014. С. 153–158. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874169>.

28. Kirichenko M., Khrypunov G., Khrypunov M., Zaitsev R., Drozdov A. EMI protection elements on cadmium telluride thin films. *2018 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Lesvos, Greece, 2018. 459 p. No 012009. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/459/1/012009> (дата звернення 08.09.2023).

29. 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>.

30. 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)*. Wrexham, UK, 2015. P. 365–369. <https://doi.org/10.1109/ITechA.2015.7317428>.

31. Qawaqzeh M., Al_Issa H., 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>.

32. Bezruchko V., Buinyi R., Strogii A., Tkach V. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. Kyiv, Ukraine, 2019. P. 84-87. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>.

Стаття надійшла до редакції 21.09.2023 р.



S. Halko¹, O. Miroshnik², M. Syvenko², T. Shchur³, A. Markowska⁴

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²State Biotechnological University

³Cyclone Manufacturing Inc

⁴Military Technical Academy

SIMULATION OF AN AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANT TO STUDY THE MODES OF ITS OPERATION

Summary

The paper presents the stages of modeling an autonomous solar power plant to study the modes of its operation. The evaluation is performed using a simple analytical method for extracting the parameters included in the behavior equations of the photovoltaic module. A mathematical model of a photovoltaic cell is presented using the Matlab Simulink medium to find the parameters of a nonlinear equation that relates current to a voltage equation. Based on the Matlab Simulink environment, the maximum performance of autonomous photovoltaic systems was determined depending on the level of solar radiation and the state of charge of the battery. The results of the research show that the load on consumers is covered regardless of the level of solar radiation.

A simple and successful method was used to evaluate the sequential resistance, the coefficient of ideality, the control of the maximum power point, the saturation current and the shunt conductivity in irradiated solar cells.

A photovoltaic system model based on the maximum power point control method using the "Perturb and Observe" algorithm helps to analyze the performance of commercial PV modules. The general model of the photovoltaic module is designed with widely used units in the form of a masked subsystem block. The simulation results show excellent consistency with the performance curves given in the data sheets of the selected models.

The design of the DC-DC converter and the integration of the DC-DC converter with the PV module are considered. A DC/AC converter designed and simulated using the Matlab Simulink environment. The input and output data of the converter are obtained as a result of simulation in an open circuit with a constant DC input voltage. In addition, the outputs are taken from the converter, feeding the output of the photovoltaic module to it.

The output voltage and current of a photovoltaic DC-DC converter at changing exposure levels at a constant temperature are obtained.

The effect of the PI gain of the controller on the performance of the system has been checked. Increasing the gain increases the ascent time of the system and therefore improves the system's response to changes in temperature and radiation. The influence of the frequency of the maximum power point on the characteristic of the system is investigated. At 200 Hz, the response is slow, at 1 kHz, the response becomes faster. Increasing the frequency of the maximum power point above 1 kHz does not improve the response of the system, as the dynamics of the entire system are controlled by the dynamics of the converter.

Keywords: solar panel, modeling, mathematical method, solar energy, autonomous energy, photovoltaic module, power plan.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-179-187

УДК 621. 316. 929

І. О. Попова¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5429-8269

С. О. Квітка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-9234-9274

О. Ю. Вовк¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-0154-6972

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*e-mail: iryana.popova@tsatu.edu.ua, тел: +380983765519

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ НА РОБОТУ ДИНАМІЧНОГО ІНДУКТИВНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. В роботі проаналізовано причини виникнення несиметрії напруг у електричній мережі напругою до 1000 В. Запропоновано методику розрахунку фазних струмів при несиметрії напруг мережі при одночасному включенні однофазних і симетричних трифазних споживачів динамічного індукційного характеру (асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором). Дослідження передбачає еквівалентне перетворення, при якому несиметричне трифазне навантаження замінено на еквівалентне симетричне навантаження; симетрична лінія електропередачі з однаковими опорами замінена несиметричною лінією електропередачі з різними опорами. Режим мережі описано системою рівнянь згідно методу симетричних складових, законів Кірхгофа і комплексних чисел. Наведені рівняння розрахунку фазних струмів динамічного індуктивного навантаження в залежності від напруг і опорів прямої і зворотної послідовностей і математичні рівняння розрахунку опорів прямої і зворотної послідовностей динамічного індуктивного навантаження в залежності від частоти обертання (ковзання). Приведені рівняння ковзання динамічного навантаження в залежності від коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності, моментів прямої і зворотної послідовності та моменту опору робочої машини для різних коефіцієнтів, що характеризують механічну характеристику робочої машини. Приведена методика аналізу дозволяє розрахувати фазні струми динамічного індуктивного навантаження в несиметричному режимі.

Ключові слова: симетричні складові, фазний струм, динамічне індуктивне навантаження, опір, коефіцієнт завантаження, коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності.

Постановка проблеми. Останнім часом з'явилася значна кількість навантажень (електроприймачів), що досить відчутно впливають на режим роботи інших споживачів (плавильні печі, асинхронні двигуни великої потужності тощо), які, в більшості випадків, погіршують якість електроенергії, оскільки ці приймачі характеризуються великими одиночними потужностями, викликають несиметрію низьковольтної мережі до 1000 В [1]. В побуті застосування великої



кількості різних однофазних побутових електроприймачів (електроплит, комп'ютерної техніки, однофазних індуктивних асинхронних двигунів тощо), їх випадковий характер роботи, порушують симетрію трифазної системи, що призводить до додаткових втрат як в системі електропостачання, так в системі електроспоживання, викликають значну несиметрію напруг та струмів навантажень фаз електричних мереж. Це призводить до зниження техніко-економічних показників мереж і електроприймачів, до зміни у їхніх режимах роботи [2].

Така ситуація характерна для розподільних мереж промислових підприємств зі значною частиною однофазних навантажень, головними навантаженнями яких є трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненими роторами, які є динамічними індуктивними навантаженнями [3-4].

Ще гірше стан справ у сільських електромережах, які характеризуються значною довжиною ліній електропередач, нерівномірним розподілом навантажень, тому в них несиметричний режим напруг є правилом, ніж виключенням.

Аналіз останніх досліджень. Сучасна промисловість випускає двигуни серії 4А, 4АМ, АІР, які задовольняють всім вимогам міжнародних стандартів. Однак, не зважаючи на все те позитивне, що було закладено в конструкцію асинхронних двигунів, аварійність їх у важких умовах роботи доволі висока. Фактичний ресурс асинхронних двигунів в агропромисловому комплексі в 2–3 рази менше необхідного: в тваринництві становить 3,5 року, рослинництві – 4 роки, а на підсобних підприємствах – 5 років. Відмови електроприводів через низьку якість асинхронних двигунів не перевищують 2–5 %. Основна причина виведення їх з ладу – аварійні режими. Однією з головних причин, що викликає їхню велику аварійність є низька якість напруги в мережі, зокрема її несиметрія [5].

Несиметрія напруги проявляється в різкому погіршенні техніко-економічних характеристик асинхронних двигунів (збільшення втрат електричної енергії, підвищення нагріву їх складових частин), зниженні експлуатаційної надійності і скорочення їхнього терміну служби. Причиною великої аварійності асинхронних двигунів при несиметричному режимі роботи є підвищення фазних струмів за рахунок залежності опорів фаз статора та ротора від завантаження робочої машини, що призводить до значного збільшення швидкості теплового зносу їх ізоляції. [6-7].

Існуючі методи дослідження режимів роботи асинхронних двигунів як динамічного індуктивного навантаження, як правило, не враховують залежності їх від несиметрії напруги електромережі, завантаження робочих машин та особливостей їх механічних

характеристик. Це обумовлено складностями у визначенні параметрів обмоток асинхронного двигуна.

Формулювання цілей статті. Дослідити несиметричні режими в розподільчій мережі з динамічним індуктивним навантаженням, визначити вплив несиметрії на фазні струми і напруги при різному ступені завантаження робочих машин та особливостей їх механічних характеристик.

Основна частина. При дослідженні використано метод симетричних складових трифазної системи величин, символічний метод аналізу електричних кіл і методи дослідження лінійних електричних кіл. Для визначення залежності фазних струмів АД від несиметрії напруг мережі проаналізовано електричне коло, яке складається з джерела симетричної трифазної електрорушійної сили, симетричної лінії електропередачі (ЛЕП) з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ та несиметричного навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c : статичного навантаження (несиметричного побутового) і симетричного динамічного навантаження (досліджуваний і інші АД) [8]. Несиметрія напруг у споживача залежить від ступеню несиметрії напруг у конкретного динамічного індуктивного навантаження (тобто АД), несиметрії струмів ЛЕП, яка з'єднує даний споживач із джерелом живлення. Розглянемо випадок, коли до мережі підключено несиметричне статичне навантаження і симетричне динамічне навантаження – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (рисунок 1).

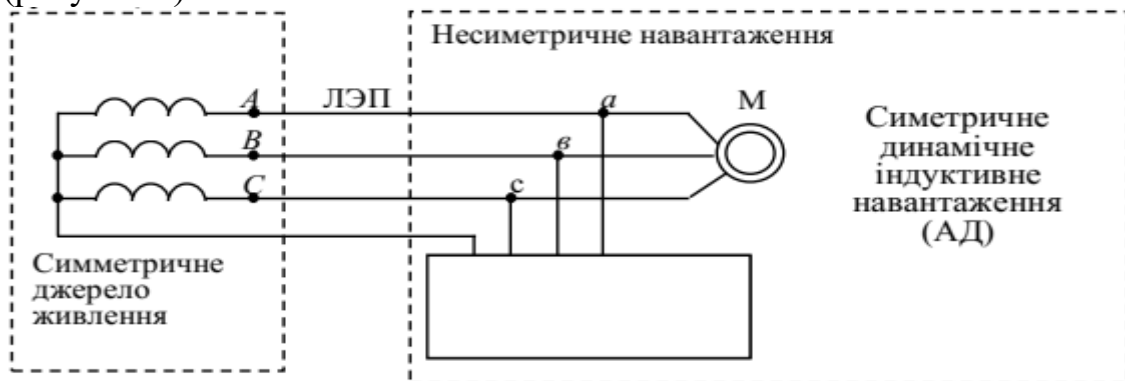


Рис. 1. Принципова схема трифазного кола з несиметричним навантаженням

Складемо розрахункову схему (рис. 2) досліджуваного трифазного кола з несиметричним навантаженням, в якому проведемо еквівалентне перетворення:

- несиметричне навантаження з фазними опорами Z_a , Z_b , Z_c замінено на еквівалентне симетричне навантаження з фазними опорами Z_{ea} , Z_{eb} , Z_{ec} ;
- симетричну ЛЕП з опорами $Z_{лА}$, $Z_{лВ}$, $Z_{лС}$ замінено

несиметричною ЛЕП з опорами $Z_{елA}$, $Z_{елB}$, $Z_{елC}$.

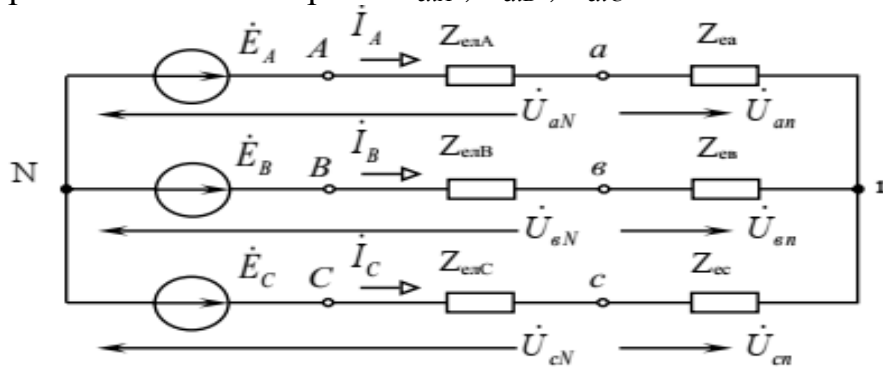


Рис. 2. Розрахункова еквівалентна схема трифазного кола

Введемо наступні позначення співвідношень

$$\frac{\dot{U}_{aN}}{\dot{E}_A} = m; \quad \frac{\dot{U}_{бN}}{\dot{E}_B} = n; \quad \frac{\dot{U}_{сN}}{\dot{E}_C} = p; \quad (1)$$

$$\frac{Z_{ад}}{Z_{еа}} = \alpha; \quad \frac{Z_{бд}}{Z_{еб}} = \beta; \quad \frac{Z_{сд}}{Z_{еc}} = \gamma, \quad (2)$$

де $Z_{ад}$, $Z_{бд}$, $Z_{сд}$ – комплекси повних фазних опорів АД, Ом.

Опори несиметричної еквівалентної ЛЕП у залежності від несиметрії напруг мережі визначаються наступним чином [9]

$$Z_{елA} = \frac{Z_a(1-m)}{\alpha m}; \quad Z_{елB} = \frac{Z_b(1-n)}{\beta n}; \quad Z_{елC} = \frac{Z_c(1-p)}{\gamma p}. \quad (3)$$

Використовуючи метод симетричних складових і розклавши напруги \dot{U}_{Aa} , \dot{U}_{Bb} , \dot{U}_{Cc} на симетричні складові \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 , прийняв фазу А за основну, для розрахункових схем прямої, зворотної і нульової послідовностей кола складено систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \dot{E} &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_1; \\ 0 &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2; \\ \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\ a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2); \\ a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 &= Z_{елл} (a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де \dot{E}_1 – комплекс ЕРС фази джерела живлення, яка прийнята за модулем рівною номінальній фазній нарузі АД, В;

Z_1, Z_2 – повні опори обмоток прямої й зворотної послідовностей АД, Ом;

a – фазний множник.

Визначимо із системи рівнянь (4) струми прямої \dot{I}_1 і зворотної \dot{I}_2 послідовностей, а також напруги прямої \dot{U}_1 , зворотної \dot{U}_2 і нульової



\dot{U}_0 послідовностей, знайдено сили фазних струмів $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ АД

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2. \quad (5)$$

Оскільки фазні струми АД різні за величиною та із збільшенням несиметрії напруги мережі різниця між ними лише збільшиться, то використаємо середнєквадратичне значення струму

$$I_{c.ф.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}, \quad (6)$$

Аналізуючи системи рівнянь (4) виявлено, що фазні струми динамічного індуктивного навантаження залежать від несиметрії напруг мережі (симетричних складових напруг прямої U_1 і зворотної U_2 послідовностей) і повних опорів прямої і зворотної послідовностей динамічного навантаження, тобто

$$I = f(U_1, U_2, Z_1, Z_2). \quad (7)$$

Слід відмітити, що із збільшенням несиметрії фазних напруг розбіжності між фазними струмами зростають.

У загальному випадку для динамічного навантаження (оберткових машин) $Z_1 > Z_2$. Використаємо параметри спрощеної Г-подібної схеми заміщення, тоді комплекси повних опорів струмам прямої й зворотної послідовностей навантаження визначимо так [10]

$$Z_1 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r1})}{Z_m + Z_s + Z_{r1}}; \quad Z_2 = \frac{Z_m(Z_s + Z_{r2})}{Z_m + Z_s + Z_{r2}}, \quad (8)$$

де повний опір намагнічуючого контуру Z_m , повний опір обмотки статора Z_s , опори обмотки ротору для прямої Z_{r1} і зворотної послідовності Z_{r2} визначаються за математичними виразами

$$Z_m = r_1 + j(x_1 + x_{\mu}); \quad Z_s = r_1' + jx_1'; \quad Z_{r1} = r_2''/s + jx_2''; \\ Z_{r2} = r_2''/(2-s) + jx_2''. \quad (9)$$

Повні опори фаз індуктивного динамічного навантаження є функцією ковзання s . Для визначення залежності ковзання від несиметрії напруг мережі приймемо

$$M = M_1 - M_2; \quad (10)$$

$$M = M_c, \quad (11)$$

де M_1, M_2 – моменти, що залежать від напруг прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей, які прикладені до фаз динамічного індуктивного навантаження, Н·м;

M_c – момент опору робочої машини, Н·м.

Лінійні напруги прямої U'_1 і зворотної U'_2 послідовностей мережі, а також коефіцієнт несиметрії напруги зворотної послідовності визначаємо за виразами



$$\dot{U}'_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + a\dot{U}_{bc} + a^2\dot{U}_{ca}); \quad (12)$$

$$\dot{U}'_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_{ab} + a^2\dot{U}_{bc} + a\dot{U}_{ca}); \quad (13)$$

$$\kappa_{U2\%} = (U_2' / U_{нл}) \cdot 100, \quad (14)$$

де \dot{U}_{ab} , \dot{U}_{bc} , \dot{U}_{ca} – комплекси лінійних напруг мережі, В;
 $U_{нл}$ – номінальна лінійна напруга мережі, В.

Рівняння системи «робоча машина–АД» наступне

$$M_0 + (k_3 M_{с.н.} - M_0) \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^x = M_1 - M_2, \quad (15)$$

де M_0 – момент опору тертя частин робочої машини, Н·м;

$M_{с.н.}$ – номінальний момент опору робочої машини, Н·м;

s_H – номінальне ковзання;

k_3 – коефіцієнт завантаження;

x – коефіцієнт, який характеризує механічну характеристику робочої машини.

Тобто ковзання динамічного індуктивного навантаження

$$s = f(U_1, U_2, M_0, M_{с.н.}, s_H, x). \quad (16)$$

Одержимо математичні рівняння ковзання у функції несиметрії напруг мережі та коефіцієнта завантаження робочої машини в залежності від коефіцієнта, що характеризує механічну характеристик робочої машини

$$\text{при } x = 0 \quad s = \frac{\kappa_3}{\frac{u_1}{s_H} - u_2^2 m_{II}}; \quad (17)$$

$$x = 1 \quad s = \frac{m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H}}{\frac{\kappa_3 - m_0}{1 - s_H} + \frac{1}{s_H} u_1^2 - m_{II} u_2^2}; \quad (18)$$

$$x = 2 \quad s_{1,2} = \frac{-e \pm \sqrt{e^2 - 4dc}}{2d}, \quad (19)$$

де $d = \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}$; $e = m_{II} u_2^2 - \frac{1}{s_H} u_1^2 - 2 \frac{(\kappa_3 - m_0)}{(1 - s_H)^2}$; $c = m_0 + \frac{\kappa_3 - m_0}{(1 - s_H)^2}$;

$$m_0 = \frac{M_0}{M_H}; \quad \kappa_3 = \frac{M_c}{M_{с.н.}}; \quad m_{II} = \frac{M_{II}}{M_H}; \quad u_1 = \frac{U'_1}{U_{нл}}; \quad u_2 = \frac{U'_2}{U_{нл}} \quad (20)$$

З системи рівнянь (4) комплекси фазних напруг динамічного індуктивного навантаження (АД) визначаються за формулами [11]

$$\dot{U}_{an} = Z_1 \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2; \quad (21)$$

$$\dot{U}_{bn} = a^2 Z_1 \dot{I}_1 + a Z_2 \dot{I}_2; \quad (22)$$

$$\dot{U}_{cn} = a Z_1 \dot{I}_1 + a^2 Z_2 \dot{I}_2. \quad (23)$$

Проведено розрахунок фазних струмів динамічного навантаження 4A90L4УЗ з $I_n = 5$ А (рис. 3) для різних типів робочих машин $x = (0, 1, 2)$, при різних коефіцієнтах завантаження $K_3 = (0,2...1,0)$, в залежності від коефіцієнта напруги зворотної послідовності мережі $K_{U2\%} = (0...10\%)$ (рис. 3).

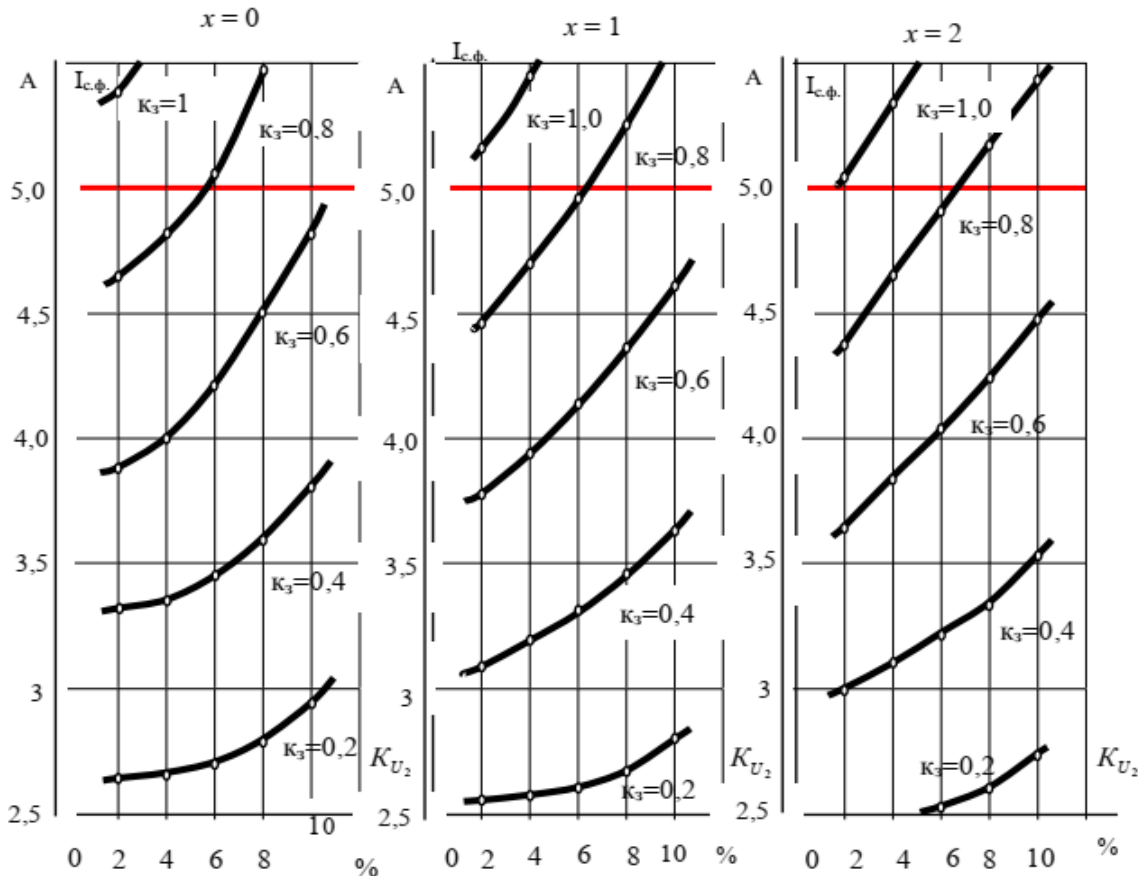


Рис. 3. Графічні залежності $I_{c.ф.} = f(K_{U2}, K_3)$ при $x = (0, 1, 2)$ динамічного навантаження 4A90L4УЗ

Виявлено, що із збільшенням коефіцієнта завантаження K_3 і несиметрії напруги мережі середньквдратичне фазне значення струму збільшується, оскільки ковзання динамічного навантаження збільшується, в наслідок чого змінюються повні опори прямої та зворотної послідовностей, при чому: опір прямої послідовності зменшується, а опір зворотної послідовності збільшується. Причому при рівних умовах коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності $K_{U2\%}$, та коефіцієнту завантаження робочої машини K_3 середньквдратичне значення струму досягає більших значень при $x=0$ і менших при $x=2$. При збільшенні коефіцієнту завантаження робочої машини і коефіцієнта несиметрії напруг зворотної послідовності



збільшується ще і напруга зміщення нейтралі, яка і є причиною зміни фазних струмів.

Висновки. Несиметрія напруг мережі, коефіцієнт завантаження робочої машини та коефіцієнт, що характеризує механічну характеристику робочої машини впливають на фазні струми динамічного навантаження. Наведена методика дозволить провести розрахунок фазних струмів і фазних напруг динамічного індуктивного навантаження не тільки для визначених коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній послідовності мережі, а і враховуючи коефіцієнт механічної характеристики робочої машини, приводним двигуном якої він є, та коефіцієнт завантаження робочої машини.

Список використаних джерел

1. Pivnyak G. G., Zhezhelenko I. V., Papaika Yu. A., Lysenko O. H. Interharmonics in power supply system. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2017. № 6. P. 109–114.
2. Yang, X., Li, X., Ning, B., Tang, T. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016. Vol. 17(1). P. 2–13.
3. Sunderland K., Coppo M., Turri R. Correction current injection method for power flow analysis of unbalanced multiple-grounded 4-wire distribution networks. *Electric Power Systems Research*. 2017. Vol. 132. P. 30–38.
4. Охріменко В. М., Збітнєва М. В., Перепечений В. О. Дослідження несиметричних режимів чотири провідних розподільних мереж. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2018. Вип. 53, № 03. С. 76–80. <https://doi.org/10.33042/2079-424X-2018-3-53-76-81>.
5. Токарев О. В., Борягин Д. О., Шеремет О. І. Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів та засоби діагностування їх режимів роботи. *Науковий вісник ДГМА*. 2018. № 1(25Е). С. 39–45.
6. Bahrevar P., Esmaili M. Optimal Charging Strategy of Electric Vehicles in Unbalanced Three-Phase Distribution Network. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. Vol. 9(S1). P. 1–7.
7. Смолянінов В. Г., Сухопара О. М. Методика розрахунку струму споживачів при змінному активно-індуктивному навантаженні в радіоелектронних засобах. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2010. № 40. С. 61-25.
8. Pakkawe S, Nayamin V., Chaiyapon D. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*. 2018. Vol. 26(3). P. 98–103.
9. Попова І. О. Попрядухін В. С. Параметри контролю несиметричних режимів роботи асинхронних двигунів для розробки ефективного захисту. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2019. Вип. 9, т. 1.



<https://doi.org/10.31388/2220-8674-2019-1-41>.

10. Kurashkin S. F., 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.*

11. Попова І. О., Ковальов О. В. Визначення напруги зміщення нейтралі як діагностичного параметра режиму роботи асинхронного двигуна. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2021. Вип. 11, т. 2(39). <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-39>.

Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.

I. Popova, S. Kvitka, O. Vovk
Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university

INVESTIGATION OF AN UNBALANCED MODE IN A DISTRIBUTION NETWORK WITH A DYNAMIC INDUCTIVE LOAD

Summary

The paper analyzes the causes of voltage asymmetry in the distribution network with a voltage of up to 1000 V. a method for assessing the state of asymmetry of a four-wire distribution network with simultaneous inclusion of single-phase and symmetrical three-phase consumers of a dynamic induction nature (asynchronous motors with a short-circuited rotor) is proposed. The study involves an equivalent transformation in which an unbalanced three-phase load is replaced by an equivalent symmetrical load; a symmetrical power line with the same resistances is replaced by an unbalanced power line with different resistances. The calculation of the coefficients of the ratios of Phase voltages between the neutral of the power supply to the terminals of a dynamic inductive load is provided for calculating the resistances of an unbalanced equivalent power line depending on the voltage asymmetry in the distribution network. The network mode is described by a system of equations according to the symmetric component method, Kirchhoff's laws, and complex numbers. Equations for calculating the phase currents of dynamic inductive load depending on the voltages and resistances of the forward and reverse sequences and mathematical equations for calculating the resistances of the forward and reverse sequences of dynamic inductive load depending on the speed of rotation (sliding) based on the parameters of a simplified asynchronous motor replacement scheme are given. Mathematical equations of the dependence of the sliding of a dynamic load (asynchronous motor) on the coefficient of asymmetry of the reverse sequence voltage, moments of the forward and reverse sequence depending on the asymmetry of the mains voltages and the moment of resistance of the working machine for various coefficients that characterize the mechanical characteristic of the working machine are given. The inverse sequence coefficient is calculated for linear network voltage complexes. The presented method makes it possible to calculate the phase currents and voltages of a dynamic inductive load, taking into account the voltage asymmetry coefficient of the reverse sequence, the load coefficient of the working machine.

Keywords: symmetric components, phase current, dynamic inductive load, resistance, load factor, reverse sequence voltage asymmetry coefficient. The presented analysis method makes it possible to calculate the phase currents of a dynamic inductive load in an unbalanced mode.



ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-188-198**УДК** 664.8.037:635.31O. P. Priss¹, Dr. Sci. Tech.

ORCID: 0000-0002-6395-4202

P. O. Bulhakov¹, postgraduate

ORCID: 0009-0002-9011-8151

T. O. Kolisnychenko¹, PhD

ORCID: 0000-0003-0560-9520

L. V. Gazzavi-Rogozina², PhD

ORCID: 0000-0002-8050-414X

¹*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*²*State Biotechnology University*e-mail: olesia.priss@tsatu.edu.ua, tel.: +380675273110**USING PROTECTIVE COATING FOR REDUCTION OF LOSSES
WHILE STORING ASPARAGUS**

Summary. Asparagus is a highly valuable and perishable crop. It is advisable to use edible coating based on natural compounds to extend the shelf life of asparagus. Alginate is an effective natural polysaccharide used to form coating. At the same time, alginate coating is lacking in antioxidant properties. Therefore, the aim of the present research is to determine the effect of coating based on sodium alginate and some antioxidant substances on the preservation of asparagus. The article considers the effect of coating based on sodium alginate and rutin on the extension of shelf life, reduction of weight loss, marketability and organoleptic properties of the asparagus of two differently coloured varieties.

The green asparagus of the Prius F1 variety and the green-purple Rosalie F1 variety were researched. It has been found that the use of coating based on sodium alginate and rutin can extend the shelf life of asparagus by 3...7 days (depending on the composition of the coating). The combination of alginate and rutin can reduce weight loss 2.1...2.2 times, depending on the variety. The standard yield of asparagus treated with the composition of alginate and rutin after storage was 88.14...91.79 %, with a 7-day longer storage period. The amount of waste did not increase either. All the experimental samples showed higher organoleptic scores than the control samples. However, alginate and rutin-based coating did not have the desired effect in order to reduce the desiccation of bases.

Keywords. Storage, green asparagus, green-purple asparagus, edible coating, alginate, rutin, weight loss, marketability.

Problem statement. Food loss and waste are the manifestations of inefficient food systems [1]. Fruit and vegetables are at the top of the food waste and losses ranking (40-50% of their production), which leads to the use of non-renewable resources to produce food that will not be consumed (about 25% of all water used by agriculture each year and 23% of all arable land, producing about 8% of annual global greenhouse gas emissions) [2].



Reducing fruit and vegetable losses and waste can therefore be one of the leading global strategies for achieving sustainable food security and improving diets, reducing greenhouse gas emissions, reducing the pressure on water and land resources, as well as increasing productivity and economic growth.

Recent research and publications analysis. The main issue of high level of losses during storage of fruit and vegetable products is high moisture content (75-95%), intensive gas exchange, active metabolism, abiotic and biotic stresses, which leads to rapid spoilage and decay. The mechanisms of postharvest ageing and rapid quality loss are associated with the development of oxidative stress [3]. Preventing the natural ageing process and spoilage of fruit and vegetables in the process of storage is a fundamental challenge from a technical point of view. The main way to inhibit normal metabolism is by means of cooling and the use of coating that slows down the gas exchange and affects tissue oxidation. The application of edible coating on the surface of fruit and vegetable products has been actively used abroad since the early 2000s. However, in recent years, the increased attention of scientists has been paid to the environmental friendliness of the used substances, which explains the number of studies related to the use of edible coating based on natural compounds in order to extend the shelf life of fruit and vegetable products.

Polysaccharides such as chitosan, carboxymethyl cellulose and pectin demonstrate great perspective for preserving fruit quality and effectively delay weight loss, reduce the content of anthocyanins and secondary metabolites [4]. This edible coating provides a good antimicrobial effect yet has significant drawbacks, such as low water resistance and unsatisfactory mechanical properties. Other biopolymers including starches, lipids and proteins are used for improvement of the functional properties of chitosan coating [5]. Casein-based coating significantly effects the moisture and gas exchange, slows down metabolism, but does not have bactericidal properties. The coating of this type requires the inclusion of antioxidant and antimicrobial agents [6]. Essential oils and phenolic compounds are often used as antioxidants [7]. The inclusion of essential oils in polysaccharide matrices increases their antimicrobial effect as well as antioxidant properties. It has been found that the polysaccharide matrix adapts the release of essential oils and thus affects the shelf life of nutrition products [8]. However, these substances sometimes diffuse into nutrition products, imparting an undesirable taste and aroma due to the presence of a mixture of volatile and non-volatile components, which limits their use [9]. Another approach to processing fruit and vegetable products to reduce weight loss and extend shelf life is the use of bionanocomposite coating [10]. The authors point out the antioxidant and antibacterial properties of nanocomposite coating. Storage efficiency varies greatly,



depending on the concentration of the treatment substances, storage conditions and the type of fruit and its characteristics [11]. Excessive concentrations of exogenous substances can be toxic to fruit cells due to their pro-oxidant effects or ability to utilize reactive oxygen species, which are necessary for cell functioning [12]. Despite the proven effectiveness of using various treatments to reduce the loss of fruit and vegetable products, the mechanism of influence of such coatings on the endogenous processes underlying fruit preservation is still poorly understood.

Asparagus is a highly valuable vegetable crop with a short shelf life. A number of coating types based on natural compounds are used to extend the shelf life of asparagus [13]. Some studies on the use of coatings containing alginate have been conducted [14]. Alginates are hydrophilic colloidal carbohydrates extracted from various species of brown seaweed belonging to the class Phaeophyceae [15]. Alginate is one of the most effective natural polysaccharides for coating formation. It has non-toxic and unique colloidal properties, such as thickening, stabilization, suspension, film formation, gel formation and emulsion stabilization. Films formed by alginate are uniform, transparent and represent good oxygen barriers, though they have low water resistance due to their hydrophilic nature. Tran, Y. T. N. et al. investigated the preservation of asparagus with a protective coating based on chitosan and alginate. They found that such coating reduces weight loss and extends shelf life by 3 days [16]. It can be assumed that the introduction of antioxidant substances, which affect the degree of tissue oxidation, into an alginate-based film will extend the shelf life of asparagus.

Purpose statement. The purpose of the article is to determine the effect of coating based on sodium alginate and antioxidant substances on the preservation of asparagus.

To achieve this purpose, the following tasks were solved:

- the effect of the applied coating on the natural weight loss in the process of asparagus storage was determined;
- the effect of the applied coating on the marketable condition of asparagus after storage was investigated;
- the effect of the applied coating on changes in the organoleptic characteristics of asparagus after storage was researched.

Materials and methods. The asparagus (*Asparagus officinalis* L.) of two differently coloured varieties was used for the research (the green Prius F1 variety and the green-purple Rosalie F1 variety). The asparagus was grown in 2021 on the “Liubymivsky Saffron” farm in the Region of Kherson, Ukraine. After harvesting, the samples were quickly cooled and transported to the laboratory of Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University within 4 hours. The asparagus spears, used for the research, were intact, approximately the same length and diameter

with closed bracts and met the requirements of CODEX STAN 225-2001 (the maximum allowable spear length for the green-purple and green varieties was 27 cm) (Fig.1).



Fig. 1. Asparagus that was laid up for storage:
a – Rosalie F1; b – Prius F1

Coating application. An aqueous solution of 1% sodium alginate (A) was prepared by gradually dissolving the preparation in hot water ($t=45^{\circ}\text{C}$). To prepare rutin solution, the dry preparation was dissolved in 96% ethyl alcohol (5% by weight) and then adjusted with water to obtain a concentration of 1% rutin (R). For the complex preparation of rutin with alginate (R+A), alginate was added to the heated 1% rutin solution and left to cool and gel uniformly for 20 minutes. The asparagus was completely immersed in the cooled solutions, then left to drain off the remaining solution and dry vertically for 1 hour. At the same time, a control sample was prepared without treatment.

Control samples and processed asparagus were stored in an industrial refrigerator at a temperature of $2^{\circ}\text{C} \pm 0.5$ and relative humidity of $95\% \pm 1$.

Determination of marketability. Asparagus marketability was assessed based on the requirements of CODEX STAN 225-2001. Waste included rotten produce and produce with signs of microbial damage. Non-standard produce included spears that had lost turgidity as well as spears with open bracts. Storage was considered complete when the amount of losses and waste reached 10%.

The organoleptic parameters were determined by the characteristics of turgidity (from fresh appearance to severe loss of turgidity), longitudinal striation (from the absence of stripes to strong striation), desiccation of



bases (from no desiccation to intensive desiccation), colour change (from bright green or green-purple, typical for the variety, up to yellowing), the presence of off-odour (from no odour to noticeable odour) and the absence of microbial spoilage [17]. A four-point scale was used (4 – very good; 3 – good; 2 – acceptable; 1 – unacceptable). In addition, the importance coefficient of the indicators was taken into account: 0.3 – turgidity; 0.2 – presence of off-odours and absence of microbial spoilage; 0.1 – other indicators.

Natural weight loss was determined by weighing fixed samples during the entire storage period.

The research was carried out in the laboratory of crops primary processing and storage technology of Agrotechnology and Ecology RDC of Melitopol Tavria State Agrotechnological University.

All studies were performed in fivefold recurrence and the data obtained were presented as mean \pm standard deviation. Data analysis was done by an analysis of variance, with mean separation by LSD at the 0.05 level.

Results and discussion. According to our data, control samples of asparagus of both varieties were stored under cooling conditions for no more than 14 days without significant loss of quality. During further storage, the sprouts quickly turned yellow, lost their elasticity and became woody. Under the same storage conditions, asparagus treated with protective coating and processing variants was stored for 18...21 days. The treatment with the R+A composition extended the shelf life as much as possible. With this treatment, the shelf life was 1 week longer compared to the control samples. Treatment with alginate or rutin alone extended the shelf life by 3 days.

One of the ways to reduce losses during storage of fruit and vegetable products is to reduce natural weight loss due to respiration and transpiration. The process of transpiration occurs due to the pressure gradient of water vapor between the shoots and the surrounding air. Transpiration usually depends on the thickness of the epidermal cell layer. Therefore, varietal differences in weight loss are quite possible. However, according to our results, the natural weight loss of the Prius and Rosalie varieties does not differ significantly (Table 1).

However, in previous studies it was found that the Prius F1 variety showed higher activity of respiratory processes compared to the Rosalie F1 variety [18]. It can be assumed that the varietal differences were leveled due to higher transpiration of the Rosalie F1 variety. The effect of the treatments used obviously reduces weight loss. A significant reduction (1.8 times regardless a variety in 14 days, when control samples were removed from storage) was observed when applying the alginate treatment.

Table 1

Dynamics of natural weight loss, (%). M±SD, n=5

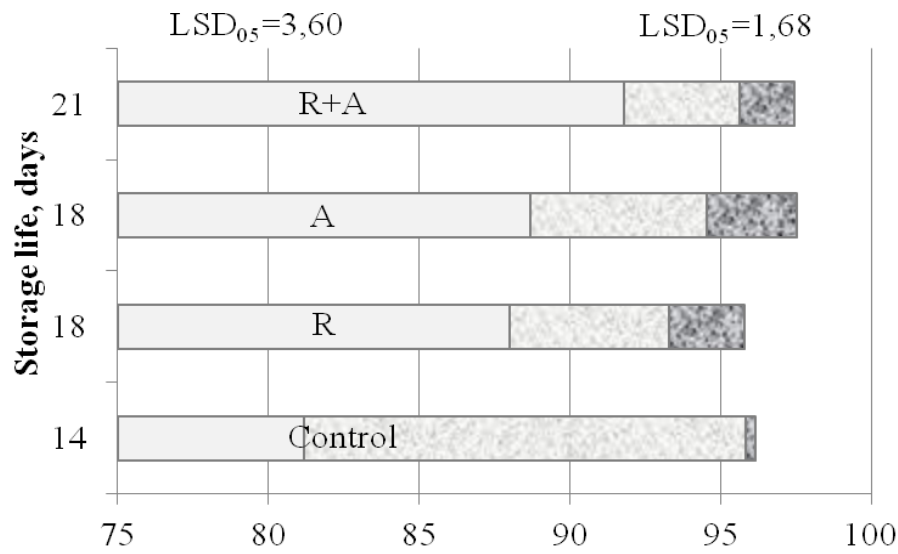
Variety	Shelf life, days	Control	R+A	R	A
Prius F1	0...7	2.20±0.17	1.10±0.16*	2.12±0.05	1.15±0.02*
	7...14	1.64±0.23	0.69±0.02*	1.19±0.04*	1.00±0.07*
	14...18	0.86±0.05	0.41±0.03*	0.91±0.05	0.35±0.04*
	18...21	0.74±0.09	0.35±0.02*	0.68±0.04	0.37±0.09*
	Total for 14 days	3.84±0.39	1.79±0.16*	3.32±0.06*	2.15±0.07*
	Total for 21 days	5.44±0.48	2.55±0.13*	4.90±0.08	2.86±0.16*
Rosalie F1	0...7	2.35±0.11	1.01±0.09*	2.32±0.08	1.28±0.17*
	7...14	1.65±0.11	0.83±0.12*	1.18±0.04*	0.96±0.04*
	14...18	1.29±0.07	0.55±0.07*	0.91±0.03*	0.73±0.03*
	18...21	0.78 ± 0.07	0.41±0.07*	0.79±0.05	0.41±0.07*
	Total for 14 days	4.00±0.21	1.84±0.20*	3.50±0.07*	2.24±0.18*
	Total for 21 days	6.07±0.32	2.80±0.32*	5.21±0.12*	3.38±0.26*

*– difference is significant as compared to control samples at $p \leq 0.05$

The applied coating acts as an additional layer that covers the stomata, which leads to a decrease in transpiration and, accordingly, a decrease in weight loss, which is considered the main effect of protective coating. A similar level of weight loss reduction was described by Spanish researchers when using alginate coatings for plum storage [19]. Even greater reduction in losses occurs when using the R+A composition: it makes 2.1 times for the Prius F1 variety and 2.2 times for the Rosalie F1 variety. It is generally accepted that weight losses are 75% due to moisture loss during transportation and 25% due to the consumption of dry matter during respiration. It has been proven that exogenous antioxidants can reduce the loss of dry matter by inhibiting the intensity of respiratory processes [20]. Therefore, it is quite logical that the coating containing antioxidant rutin helps to reduce weight loss.

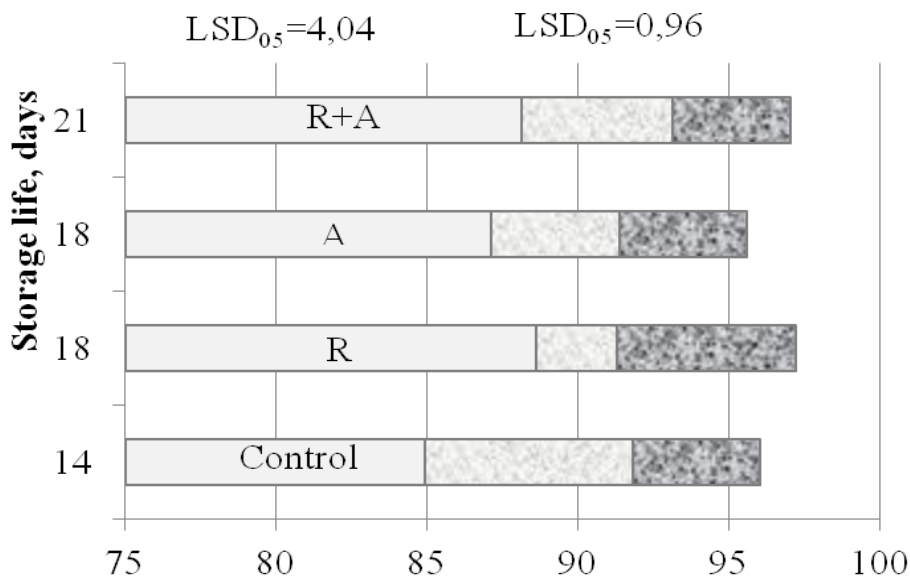
The achieved reduction of weight loss is positively reflected in the increase in the yield of standard production after storage (Fig. 2). The standard production (taking into account weight loss) was 87.14-88.69 % for the asparagus treated with rutin or alginate, depending on the variety and treatment option. The standard production was higher for the asparagus treated with R+A. This figure reached 91.79 % for the Prius F1 variety and 88.14 % for the Rosalie F1 variety, even with a 7-day longer storage period. Samples of the asparagus treated with protective coating also had a lower proportion of non-standard products.

However, extended storage leads to the increase in the amount of waste. It should be noted that according to our data, Rosalie F1 had more waste during storage. Treatment with protective coating allowed to minimize the amount of waste for this variety. The amount of waste when using the R+A composition did not significantly increase even with an extended shelf life.



Marketability of asparagus spears*, %

a



Marketability of asparagus spears*, %

b

*the results are shown taking into account weight loss

Fig. 2. Marketability of asparagus:

a – Prius F1; b – Rosalie F1;

□ – standard products; ◻ – non-standard products; ■ – waste

The organoleptic evaluation was carried out after 14 days of storage of control samples, 18 days for samples treated with A and R, 21 days for the R+A variant. The organoleptic evaluation of asparagus is shown in Fig. 3.

In general, all the experimental samples showed a larger profilograph area in terms of organoleptic characteristics compared to the control samples. The most noticeable difference is in the colour change. While the

control asparagus of the Prius F1 variety had 2.2 points, the R+A sample had 3.7 points. Slightly smaller colour changes were recorded for Rosalie F1 asparagus. Here, the control samples had 2.6 points. On the other hand, the R+A sample had only 3.3 points. This is less than R samples (3.8 points) and A samples (3.6 points). This, of course, can be explained by the longer shelf life of the R+A samples. At the same time, the R+A composition was more effective for the Prius F1 variety, even with a longer shelf life.

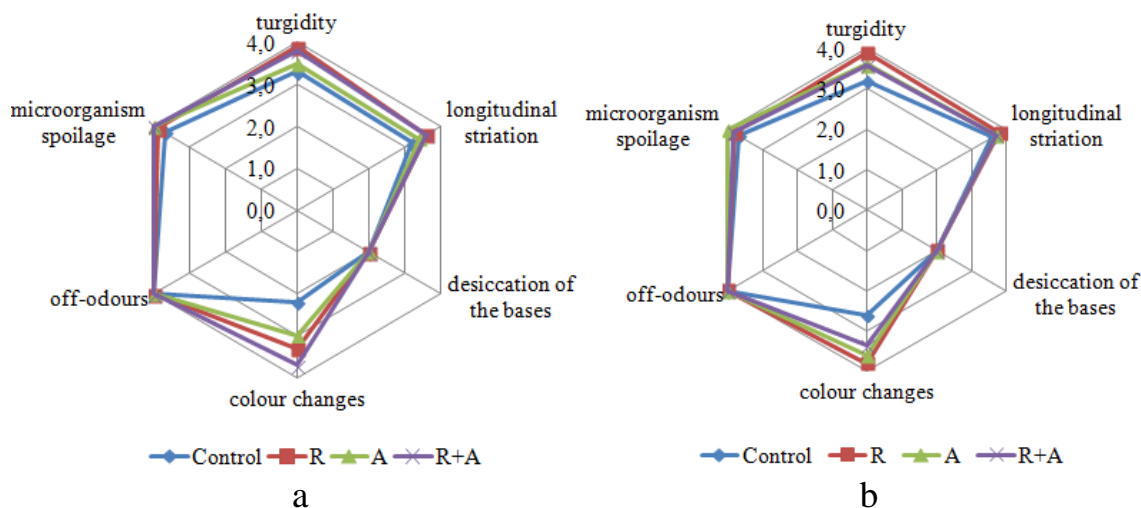


Fig. 2. Organoleptic profilograph: a – Prius F1; b – Rosalie F1

Reduced turgidity is associated with natural mass loss through transpiration and respiration. Accordingly, a reduction in natural weight loss correlates with better turgidity of asparagus. Longitudinal striation is one of the important indicators that significantly reduce the marketability of asparagus. The Prius F1 variety is more susceptible to this defect. The applied treatment made it possible to virtually avoid the formation of longitudinal striation. None of the tested samples had differences in the odour inherent in fresh asparagus. The desiccation of the bases (the place of cut) decreased the overall organoleptic score the most. Unfortunately, the applied treatment did not have a positive effect on the desiccation of the bases. This is partly due to the oblique (slanted) cut made during harvesting. This obviously increases the area of moisture evaporation. Aligning the cuts could have a positive result. However, such an operation will increase the amount of waste. Therefore, it is necessary to perform an even cut when harvesting asparagus in the field. For this reason, further research is needed to find effective solutions to prevent this disadvantage.

Conclusions. In summary, the use of coating based on sodium alginate and rutin can extend the shelf life of asparagus by 3...7 days (depending on the composition of the coating) compared to untreated versions. Alginate coating can significantly reduce weight loss. For example, the combination of alginate and rutin reduces weight loss 2.1 times for the Prius F1 variety



and 2.2 times for the Rosalie F1 variety. The standard production of the asparagus treated with the composition of alginate and rutin after storage was 91.79% for Prius F1 and 88.14% for Rosalie F1, even with a longer storage period of 7 days. The amount of waste did not increase with the extended storage period. The samples of asparagus treated with protective coating also had a lower proportion of substandard produce.

It was found that all the experimental samples showed a larger profilograph area in terms of organoleptic characteristics compared to the control samples. The desiccation of the sections was the biggest problem during storage. In fact, alginate and rutin coating did not have the desired effect on this indicator. Therefore, further developments should be aimed at finding effective solutions to eliminate this drawback during asparagus storage.

References

1. FAO. Voluntary Code of Conduct for Food Loss and Waste Reduction. 2022. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb9433en>.
2. Cassani L., Gomez-Zavaglia A. Sustainable Food Systems in Fruits and Vegetables Food Supply Chains. *Frontiers in Nutrition*. 2022. Vol. 9. No 829061. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.829061>.
3. Gouda M. B., Zhang C., Wang J., Peng S. J., Chen Y. R., Luo H. B., Yu L. J. ROS and MAPK cascades in the post-harvest senescence of horticultural products. *J. Proteomics Bioinform*. 2020. Vol. 13(1). P. 1–7.
4. Nair M. S., Tomar M., Punia S., Kukula-Koch W., Kumar M. Enhancing the functionality of chitosan-and alginate-based active edible coatings/films for the preservation of fruits and vegetables: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 164. P. 304–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.083>.
5. Zhu J., Wu H., Sun Q. Preparation of crosslinked active bilayer film based on chitosan and alginate for regulating ascorbate-glutathione cycle of postharvest cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *International journal of biological macromolecules*. 2019. Vol. 130. P. 584–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.006>.
6. Khan M. R., Volpe S., Valentino M., Miele N. A., Cavella S., Torrieri E. Active casein coatings and films for perishable foods: structural properties and shelf-life extension. *Coatings*. 2021. Vol. 11(8). P. 899. <https://doi.org/10.3390/coatings11080899>.
7. Hasheminejad N., & Khodaiyan F. The effect of clove essential oil loaded chitosan nanoparticles on the shelf life and quality of pomegranate arils. *Food chemistry*. 2020. Vol. 309. P. 125-520. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125520>.
8. Anis A., Pal K., Al-Zahrani S. M. Essential oil-containing polysaccharide-based edible films and coatings for food security applications. *Polymers*. 2021. Vol. 13(4). P. 575. <https://doi.org/10.3390/polym13040575>.



9. Gyawali R., Ibrahim S. A. Natural products as antimicrobial agents. *Food control*. 2014. Vol. 46. P. 412–429. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.05.047>.
10. Jafarzadeh S., Nafchi A. M., Salehabadi A., Oladzaad-Abbasabadi N., Jafari S. M. Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 291. No 102405. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>.
11. Bose S. K., Howlader P., Wang W., Yin H. Oligosaccharide is a promising natural preservative for improving postharvest preservation of fruit: A review. *Food Chemistry*. 2021. T. 341. No 128178. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128178>.
12. Priss O. P., & Zhukova V. F. Optimized concentration of exogenous antioxidants for the storage of zucchini fruit. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2019. Vol. 27(1). P. 40–47. <https://doi.org/10.15421/081904>.
13. Булгаков П. О., Прісс О. П. Зберігання спаржі з використанням захисних покриттів і пакування. *The 13th International scientific and practical conference "Information activity as a component of science development" (April 04–07, 2023)*. Edmonton, Canada, 2023. P. 21–27. <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.13>.
14. Cazón P., Velazquez G., Ramírez J. A., Vázquez M. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*. 2017. Vol. 68. P. 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>.
15. Costa M. J., Marques A. M., Pastrana L. M., Teixeira J. A., Sillankorva S. M., Cerqueira M. A. Physicochemical properties of alginate-based films: Effect of ionic crosslinking and mannuronic and guluronic acid ratio. *Food hydrocolloids*. 2018. Vol. 81. P. 442–448. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.014>.
16. Tran Y. T. N., Nguyen A. T. T., Bui A. N. N. A Study of Asparagus Preservation Capacity of Chitosan-Alginate and Chitosan-Carrageenan Biofilms. *Journal of Food Engineering and Technology*. 2020. Vol. 9(2). P. 89–94. <https://doi.org/10.32732/jfet.2020.9.2.89>.
17. Villanueva M. J., Tenorio M. D., Sagardoy M., Redondo A., Saco M. D. Physical, chemical, histological and microbiological changes in fresh green asparagus (*Asparagus officinalis*, L.) stored in modified atmosphere packaging. *Food Chemistry*. 2005. Vol. 91(4). P. 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.06.030>.
18. Priss O. P., Sukhenko V. Yu., Bulhakov P. O. Asparagus dry soluble and insoluble matter during storage. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. С. 289-298. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2023-1-24>.
19. Valero D., Díaz-Mula H. M., Zapata P. J., Guillén F., Martínez-Romero D., Castillo S., & Serrano M. Effects of alginate edible coating on



preserving fruit quality in four plum cultivars during postharvest storage. *Postharvest Biology and Technology*. 2013. Vol. 77. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.10.011>.

20. Priss O. Effect of heat treatment with antioxidants on respiratory substrates during storage of cucumbers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 3(10). P. 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.44240>.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2023 р.

О. Прісс¹, П. Булгаков¹, Т. Колісниченко¹, Л. Газзаві-Рогозіна²

¹Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

²Державний біотехнологічний університет

СКОРОЧЕННЯ ВТРАТ ПРИ ЗБЕРІГАННІ СПАРЖІ ЗІ ЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ

Анотація

Фрукти та овочі займають перше місце у кількості харчових відходів і втрат. При їх вирощуванні, використовується 25% усієї води, що використовується сільським господарством щороку і 23% усіх орних угідь, продукуючи приблизно 8% щорічних глобальних викидів парникових газів. Це призводить до використання невідновлюваних ресурсів для отримання харчових продуктів, які не будуть спожиті. Тому скорочення втрат і відходів плодоовочевої продукції може бути однією з провідних глобальних стратегій досягнення сталої продовольчої безпеки та покращення раціонів харчування, скорочення викидів парникових газів, зменшення навантаження на водні та земельні ресурси, а також підвищення продуктивності та забезпечення економічного зростання. Спаржа є високоцінною і швидкопсувною овочевою культурою. Для подовження термінів зберігання спаржі доцільно використовувати їстівні покриття на основі природних сполук. Альгінат є одним з найцікавіших природних полісахаридів для формування покриттів. Однак альгінатні плівки не володіють антиоксидантними властивостями. Тож, метою роботи було встановлення впливу покриттів на основі альгінату натрію та речовин антиоксидантної дії на збереженість спаржі. У роботі розглянуто вплив покриттів на основі альгінату натрію та рутину на подовження термінів зберігання, скорочення втрат маси, вихід товарної продукції та органолептичні характеристики спаржі двох сортів різного забарвлення. Досліджували зелену спаржу сорту Prius F1 та зелено-фіолетову сорту Rosalie F1. Встановлено, що використання покриттів на основі альгінату натрію та рутину дозволяє подовжити термін зберігання спаржі на 3...7 діб (залежно від складу покриття). Поєднання альгінату та рутину дозволяє скоротити втрати маси в 2,1-2,2 рази залежно від сорту. Стандартна продукція у спаржі обробленої композицією альгінату і рутину після зберігання становила 88,14-91,79 %, при довшому на 7 днів терміні зберігання. Кількість відходів також не збільшилась. Всі дослідні зразки за органолептичними показниками показали вищу оцінку, ніж контрольні варіанти. Проте, покриття на основі альгінату та рутину не дали бажаного ефекту для зменшення висихання зрізів. Тож подальші розробки мають бути направлені на пошук ефективних рішень для усунення цього недоліку при зберіганні спаржі.

Ключові слова. зберігання, зелена спаржа, зелено-фіолетова спаржа, харчові покриття, альгінат, рутин, втрати маси, товарна продукція.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-199-206

УДК [664.859.2+664.8.037.5]:634.1

Д. К. Зарецька¹, аспірант

ORCID: 0000-0003-3083-5191

М. Є. Сердюк¹, д-р .техн. наук

ORCID: 0000-0002-6504-4093

І. А. Кривонос¹, ст. викладач

ORCID: 0000-0001-7079-5150

В. М. Бандура², д-р .техн. наук

ORCID: 0000-0001-8074-3020

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного*² *Національний університет біоресурсів і природокористування
України*e-mail: daria.zaretska@tsatu.edu.ua, тел.: +380984132437

ЗАМОРОЖЕННИЙ НАПІВФАБРИКАТ З ДОДАВАННЯМ ОБЛІПИХИ, ЯК СИРОВИНА ДЛЯ ПРОДУКТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Збалансоване харчування є однією з найважливіших умов здоров'я людини, яке впливає на його працездатність, імунну систему, та тривалість життя. Завдання моделювання полягало у визначенні інгредієнтного складу рецептури замороженого напівфабрикату із застосуванням різних видів сировини, які мають певні органолептичні характеристики та високу вітамінну цінність. У роботі розглянуто вплив заморожування та криогенного зберігання на вміст вітаміну С в айвовому напівфабрикаті з додаванням плодів обліпіхи. Для виготовлення айвового напівфабрикату з підвищеним вмістом аскорбінової кислоти, як функціональний інгредієнт було обрано плоди обліпіхи. Заморожували готові композиційні суміші за температури $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та зберігали за $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ строком 9 місяців. В результаті досліджень встановлено, що збільшення вмісту обліпіхи, призводить до зростання не тільки вмісту аскорбінової кислоти, а і активності аскорбатоксидази, яка прискорює руйнування аскорбінової кислоти. Аналіз отриманих результатів дозволив визначити оптимальне співвідношення інгредієнтів суміші: 90 г /100 г пюре айви та 10 г/100 г пюре обліпіхи. Використання для заморожених напівфабрикатів місцевої рослинної сировини дозволить мати багату сировинну базу для їх виготовлення.

Ключові слова. айва; обліпіха; композиційна суміш; криогенне зберігання; заморожування; вітамін С.

Постановка проблеми. Збалансоване харчування має численні переваги для організму людини. Воно забезпечує всі необхідні поживні речовини для збереження здоров'я та запобігання хворобам. Збалансоване харчування може знизити ризик серцево-судинних захворювань, діабету та раку. Віно також може підвищити імунну систему та покращити роботу мозку, а також може допомогти підтримувати здорову вагу та підвищити фізичну працездатність.



Генетичні, екологічні та життєві фактори в першу чергу визначають тривалість та якість життя людини. Отже харчування є ключовим компонентом, що впливає на наше здоров'я. [1]

Необхідно також враховувати і фізичну активність, адже разом вони є двома основними модифікуючими факторами, що визначають здоров'я і благополуччя в сучасній цивілізації. Ці два фактори часто вивчаються і розглядаються як окремі сутності, хоча насправді вони, по-різному, взаємопов'язані [2]

Аналіз останніх досліджень. Вживання продуктів рослинного походження приносить багато переваг організму людини. Рослинні продукти, зокрема плодови, містять багато клітковини, вітамінів, мінералів і антиоксидантів, які необхідні для здоров'я. Рослинна дієта може знизити ризик серцево-судинних захворювань, діабету та раку. Продукти рослинного походження також зазвичай мають низький вміст жиру та калорій, що може допомогти підтримувати здорову вагу. Вживання рослинних продуктів також може допомогти знизити рівень холестерину та регулювати артеріальний тиск. Крім того, рослинна дієта може допомогти захистити довкілля та зменшити страждання тварин.

Людство дедалі більше споживає шкідливих продуктів харчування, багато рафінованих та крохмалистих продуктів, штучних складових, велику кількість тваринних жирів, цукру, що призводить до виснаження адаптаційних та компресорних механізмів [3,4].

Велику категорію в продуктах функціонального призначення займають напої. Функціональні напої пропонують багато переваг для організму людини. Вони містять спеціальні інгредієнти, які можуть допомогти вирішити або запобігти певним проблемам зі здоров'ям. Наприклад, деякі функціональні напої містять антиоксиданти, які можуть допомогти захистити організм від пошкодження вільними радикалами. Інші містять пробіотики, які можуть допомогти покращити здоров'я кишечника та зміцнити імунну систему. Деякі функціональні напої також містять спеціальні трави або поживні речовини, які можуть допомогти підвищити рівень енергії або покращити концентрацію [5] Функціональні напої також можуть допомогти підтримувати організм гідратованим, що важливо для міцного здоров'я. Крім того, функціональні напої можуть бути хорошою альтернативою солодким напоям, оскільки вони часто містять менше цукру, а тому можуть допомогти зменшити ризик ожиріння та діабету [6, 7].

Беручи до уваги сучасні проблеми та недоліки індустрії функціональних продуктів, зокрема напоїв, дуже актуальним постає постійне змінення та розширення асортименту продукції даного спрямування, особливо збагаченої вітамінами та біологічно



активними елементами.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження було моделювання та оптимізація рецептури замороженого напівфабрикату з підвищеним вмістом аскорбінової кислоти. Крім того, слід дослідити вплив підвищеної аскорбінової кислоти на сенсорні властивості напівфабрикату.

Основна частина. Природно-рослинна сировина має велику цінність, завдяки специфічному поєднанню в своєму складі біологічно і фізично активних речовин, які майже неможливо створити штучно. Саме рослинна сировина є джерелом дефіцитних поліфенолів з гіпотензивною та судинозміцнюючою дією, пектинових речовин, які здатні виводити з організму ксенобіотики [8,9].

Айва — це корисний і поживний фрукт, який має численні переваги для людського організму. Вона багата клітковиною, вітамінами та мінералами, особливо вітаміном С, калієм і залізом [10].

Напівзварена айва, також відома як айвова паста або айвовий напівфабрикат, є ще одним корисним варіантом. Виготовлений з вареної та протертої айви айвовий напівфабрикат має в своєму складі високий вміст клітковини та антиоксидантів. Напівфабрикат з айви може допомогти покращити травлення та регулювати рівень цукру в крові. Він також є гарним джерелом енергії та можуть допомогти забезпечити організм необхідними поживними речовинами. У вигляді напівфабрикату айва може чудово слугувати як інгредієнт для виробництва кондитерських виробів, начинок для випічок, основою для джемів, смузі та дитячого харчування [11,]. Також такий напівфабрикат дуже гарно поєднується з багатьма функціональними інгредієнтами, наприклад з обліпихою.

Обліпиха – це ягода, яка росте в багатьох частинах світу і протягом століть цінується за її користь для здоров'я. Ягода багата вітамінами, мінералами та антиоксидантами, які необхідні для здорового харчування. Ось деякі переваги обліпихи для харчування людини:

Обліпиха є одним із найкращих джерел вітаміну С, який важливий для імунної системи, здоров'я шкіри та вироблення колагену. Порція ягід обліпихи містить понад три рази більше рекомендованої добової дози вітаміну С.

Багата антиоксидантами: обліпиха містить різноманітні антиоксиданти, які борються з вільними радикалами та можуть знизити ризик раку, серцево-судинних захворювань та інших хронічних захворювань.

Обліпиха містить клітковиною, яка може допомогти травленню та запобігти запорам. Ягода також може допомогти при шлунково-кишкових проблемах, таких як печія та виразка шлунка.



Обліпихова олія часто використовується в продуктах по догляду за шкірою, оскільки вона багата вітаміном Е та омега-7 жирними кислотами, які можуть зволожити шкіру та захистити її від сонячних променів.

Підтримка здоров'я серця: обліпиха може допомогти знизити рівень холестерину та знизити ризик серцево-судинних захворювань. Також ягода містить калій, який може знизити тиск.

Загалом, обліпиха – корисна та поживна ягода, якою можна насолоджуватися у багатьох формах, включаючи сік, олію та сушені ягоди. Багато переваг для здоров'я можна отримати, якщо включити обліпиху в раціон людини, а також споживати її в поєднанні з іншими продуктами, зокрема айвовим напівфабрикатом [12].

Завдання моделювання полягало у визначенні інгредієнтного складу рецептури замороженого напівфабрикату із застосуванням різних видів сировини, які мають певні органолептичні характеристики та високу вітамінну цінність.

Для приготування композиційної суміші використовували плоди айви, які за формою та кольором відповідали помологічному сорту та не мали пошкоджень, що передбачено стандартом ДСТУ 7023:2009 [13]. Плоди збирали в міру дозрівання. Плоди обліпихи повинні відповідати якісним характеристикам і нормам, зазначеним у стандарті ДСТУ 4837:2007 «Плоди та ягоди швидкозаморожені» [14]. Відібрані плоди були свіжими, чистими, здоровими, не зів'ялими, стиглими до споживання, без механічних пошкоджень, відповідали типовій помологічній формі та кольору.

Свіжі плоди айви та обліпихи перебрали, відкалібрували, промили та просушили для видалення зайвої вологи. Айву нарізали і нагрівали вібрацією надвисокої частоти 600 Вт протягом 1 хвилини, щоб отримати пюре однорідної консистенції з мінімальною втратою вітаміну С (до 7,2%). Обліпиху подрібнили до однорідного пюре. Отримане пюре купажували за експериментальною рецептурою, фасували в 100-грамову тару і заморожували при -30°C для зберігання при -18°C (табл. 1).

Таблиця 1

Дослідні рецептурні композиції, г/100г

Найменування сировини	Айва	Обліпиха
Варіант 1 (контроль)	100	0
Варіант 2	90	10
Варіант 3	70	30
Варіант 4	50	50
Варіант 5	30	70
Варіант 6	10	90

Експеримент перевіряв, як заморожування та зберігання при дуже низьких температурах впливають на частку аскорбінової кислоти у фруктовій суміші. Вимірювання проводили йодометричним методом [15]. Результати показують, що хімічний склад фруктової суміші змінюється під час заморожування, і ці зміни тривають під час криогенного зберігання (рис. 1).



Рис. 1. Втрати вітаміну С у досліджуваних зразках, %

Зразки фруктового пюре з айви спочатку містили $10,34 \pm 0,3$ мг/100 г аскорбінової кислоти. При додаванні пюре з обліпихи вміст аскорбінової кислоти у досліджуваних зразках значно підвищувався. Після заморожування вміст вітаміну С у пюре з айви (контрольна група) знизився на 34%, а після дев'яти місяців криогенного зберігання ще на 44,7%.

Додавання великої кількості пюре з обліпихи не мало позитивного впливу на втрату аскорбінової кислоти. При додаванні 70-90% обліпихи загальні втрати становили 52,4-55,7%. Але при додаванні лише 30-50% обліпихи втрати після заморожування і тривалого зберігання були дещо меншими і становили 49,9-47,3%. Це може бути пов'язано з активністю аскорбатоксидази, яка каталізує окислення аскорбінової кислоти і зберігає свою активність після заморожування. Збільшення вмісту обліпихи призводить до підвищення вмісту аскорбінової кислоти, а також активності аскорбатоксидази. Таким чином, швидкість руйнування вітаміну С у рецептурних добавках з вищим вмістом вітаміну С може бути вищою.



Найменші загальні втрати були зафіксовані при додаванні 10% обліпихи і становили вони 15,3 % після заморожування та дев'ятимісячного криогенного зберігання.

Аналізуючи результати, можна визначити оптимальне співвідношення інгредієнтів для суміші: 90 г/100 г пюре з айви та 10 г/100 г пюре з обліпихи. Таке поєднання покращує функціональні властивості суміші та зберігає її при зберіганні при низьких температурах. Використання айвових напівфабрикатів розширює асортимент корисних напоїв на ринку, підвищує конкурентоспроможність компаній і допомагає споживачам знати своє здоров'я та запобігати захворюванням. Цей продукт особливо підходить для приготування функціональних напоїв, таких як кріпленний чай, смузі та коктейлі.

Висновки. У даній роботі досліджено вплив заморожування та криогенного зберігання на масову частку аскорбінової кислоти при тривалому зберіганні за низьких температур. Результати показують, що збільшення вмісту обліпихи призводить не тільки до збільшення вмісту аскорбінової кислоти, але й підвищує активність аскорбатоксидази, яка прискорює руйнування аскорбінової кислоти. За цими результатами визначено оптимальне співвідношення інгредієнтів суміші: 90 г/100 г пюре з айви та 10 г/100 г пюре з обліпихи. Використання місцевої рослинної сировини для заморожених напівфабрикатів дає можливість створити багату сировинну базу для їх виробництва.

Список використаних джерел

1. Ekmekcioglu C. Nutrition and longevity – from mechanisms to uncertainties. *Critical Review Food Science Nutrition*. 2020. Vol. 60. P. 3063–3082
2. Strasser B., Pesta D., Rittweger J., Burtscher J., Burtscher M. Nutrition for Older Athletes. *Focus on Sex-Differences. Nutrients*. 2021. Vol. 13 (5). P. 1409.
3. Лялик А., Криськова Л., Равчук Л. Концепція функціональних харчових продуктів. *Стан і перспективи харчової науки та промисловості: тези доп. IV Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль, 2017. С. 44-47.*
4. Hartmann R., Meisel H. Food-derived peptides with biological activity: from research to food applications. *Current opinion in biotechnology*. 2007. Vol. 18(2). P. 163–169.
5. Howlett J. Functional foods: from science to health and claims: Monograph. Belgium: Brussels, ILSI Europe, 2008. 538 p



6. Tselaesele N. et al. Plant-based traditional foods and beverages of Gumare Village, Botswana. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2023.

7. Bhandalkar Sh. Enteral Nutrition Market Overview and Forecast to 2025. N.-Y.: BG Company, 2018. 89 p.

8. Antiushko D. Evaluation of gerodietetic product's for enteral nutrition protein value. *Journal of chemistry and technologies*. 2020. Vol. 28(2). P. 161–167.

9. Біохімія плодів та овочів: навч. посібник / В. В. Євлаш, О. П. Прісс, М. Є. Сердюк [та ін.]. Мелітополь, 2019. 205 с.

10. Odarchenko D. [et al.]. Determining the rational modes for low-temperature storage and for obtaining products of Japanese Quince processing with high consumer properties. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 3(11). P. 23–29.

11. Тарасенко Т. А. та ін. Теоретичне дослідження способів сушіння овочів та фруктів. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького*. 2015. Т. 17, № 4. P. 148-158.

12. Зарецька Д. К., Сердюк М. Є. Вплив НВЧ коливань на якість айвового напівфабрикату. *Новації в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв: II між нар. Наук.-практ. ІНТЕРНЕТ-конф., 23 листопада 2021 р.* Мелітополь: ТДАТУ, 2021. 96 с.

13. ДСТУ 7023:2009. Айва свіжа. Технічні умови. [Чинний від 2011–01–01]. Київ, 2010. 7 с.

14. ДСТУ 4837:2007. Фрукти та ягоди швидкозаморожені. Технічні умови. [Чинний від 2007-10-10]. Київ, 2007. 7 с.

15. Дослідницький практикум. Частина 1. Методи дослідження плодоовочевої та ягідної продукції: підручник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти / М. Є. Сердюк, О. П. Прісс, Н. А. Гапріндашвілі та ін. Мелітополь: ВПЦ Люкс, 2020. 370 с.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2023 р.



D. Zaretska¹, M. Serdyuk¹, I. Kryvonos¹, V. Bandura²

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

²National university of life and environmental sciences of Ukraine

FROZEN SEMI-FINISHED PRODUCT WITH THE ADDITION OF SEA BUCKTHORN AS A RAW MATERIAL FOR PRODUCTS WITH A FUNCTIONAL PURPOSE

Summary

A balanced diet is one of the most important conditions for a person's health, which affects its working capacity, immune system, and life expectancy. A healthy balanced diet provides the human body with the most necessary components for its normal functioning. Natural plant raw materials have great value, thanks to the specific combination of biologically and physically active substances in their composition, which are almost impossible to create artificially. It is vegetable raw materials that are a source of deficient polyphenols with hypotensive and vaso-strengthening effects, pectin substances that are able to remove xenobiotics from the body.

The task of modeling was to determine the ingredient composition of the frozen semi-finished product recipe using different types of raw materials that have certain organoleptic characteristics and high vitamin value. The paper examines the effect of freezing and cryogenic storage on the content of vitamin C in semi-finished quince with the addition of sea buckthorn fruits. For the production of quince semi-finished products with an increased content of ascorbic acid, sea buckthorn fruits were chosen as a functional ingredient. Sea buckthorn and puree made from it are quite a good physiological functional filler for many food products, because it contains a lot of macro and microelements, dietary fibers, polyphenols, organic acids, vitamins, etc. The use of sea buckthorn puree in the production technology of semi-finished quince contributes to enrichment vitamin and mineral composition and increasing its organoleptic properties. The finished composite mixtures were frozen at a temperature of -30 °C and stored at -18 °C for 9 months. As a result of research, it was established that increasing the content of sea buckthorn leads to an increase not only in the content of ascorbic acid, but also in the activity of ascorbate oxidase, which accelerates the destruction of ascorbic acid. The analysis of the obtained results made it possible to determine the optimal ratio of the mixture ingredients: 90 g/100 g of quince puree and 10 g/100 g of sea buckthorn puree. The use of local plant raw materials for frozen semi-finished products will allow us to have a rich raw material base for their production.

Keywords: quince; sea buckthorn; composite mixture; cryogenic storage; freezing; vitamin C.



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-1-207-218

УДК 664.664

М. М. Воробець¹, канд. хім. наук

ORCID 0000-0003-0474-7382

В. В. Євлаш², д-р техн. наук

ORCID 0000-0001-7479-1288

І. М. Кобаса¹, д-р хім. наук

ORCID 0000-0002-5184-468X

І. В. Кондрачук¹, канд. хім. наук

ORCID 0000-0003-2253-0523

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича²Державний біотехнологічний університетe-mail: m.vorobets@chnu.edu.ua, тел.: +38098-492-92-56

ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ХЛІБА ПШЕНИЧНОГО З ДОБАВКОЮ «КЛІТКОВИНА ГРЕЧАНА»

Анотація. Стаття присвячена формуванню якості хліба пшеничного, виготовленого з добавкою «Клітковина гречана» на основі гречаної лузги. Проведено оцінку зразків хліба з різним вмістом добавки «Клітковина гречана» за органолептичними та фізико-хімічними показниками. Встановлено, що за вмісту добавки 1 % від маси борошна порівняно із зразком без добавки не відчувається зміна запаху хліба, ледь відчутний горіхо-маковий присмак; за вмісту 3 % – відчутні приємний горіхо-маковий запах і присмак; за вмісту 5 % – виражені горіхо-маковий запах і присмак (у всіх зразках хрускоту на зубах немає); за вмісту 10 % – відчутні запах і присмак гречки, ледь відчутний хрускіт на зубах. Для таких фізико-хімічних показників як вологість і пористість спостерігається закономірність: чим більший вміст добавки, тим менше їх значення; на кислотність добавка майже не впливає.

Ключові слова: гречана лузга, хліб пшеничний, нетрадиційна сировина, клітковина гречана, органолептичні показники, фізико-хімічні показники.

Постановка проблеми. Хліб – найпоширеніший повсякденний продукт харчування всіх верств населення. Хліб та хлібобулочні вироби у своєму складі містять невелику кількість вітамінів, мінеральних речовин і харчових волокон. Тому одним з найперспективніших методів збагачення раціону харчування є збагачення саме цих продуктів. Сучасні дослідження вчених спрямовані на поліпшення якості та харчової цінності хліба та хлібопродуктів, розширення їх асортименту й удосконалення технологій хлібобулочних виробів функціонального призначення, що тісно пов'язано з використанням композитних сумішей різних видів борошна [1], харчових ресурсів, зокрема з переробкою нетрадиційної сировини [2]. У такому контексті значну увагу приділяють продуктам з використанням лікарсько-технічної сировини та місцевих сировинних ресурсів. Для створення нового покоління хлібопродуктів



оздоровчого та профілактичного призначення для різних груп населення можна пропонувати гречану лузгу, яка складає близько 22 % від маси сировини під час отримання крупи із зерна гречки.

Аналіз останніх досліджень. Наразі актуальності набули дослідження використання фітосировини (овочеві та фруктові порошки, рослинні екстракти, пряні трави тощо). Наприклад, введення до рецептури хліба 2 % від маси борошна екстракту кореня солодки голої пришвидшує процес бродіння тіста, позитивно впливає на фізико-хімічні й органолептичні показники виробу [3]. Введення порошоків кореневища ревеню та ягід чорної смородини дозволяє розширити асортимент оздоровчих хлібобулочних виробів [4], продуктів переробки конопель (борошна та насіння) – збільшити харчову цінність хлібопродуктів [5, 6]. Вченими [7] встановлено, що використання 3 – 5 % шроту виноградних кісточок від маси борошна незначно знижує показники якості хліба, проте дозволяє збагатити вироби фізіологічно активними речовинами. Використання борошна кіноа світлого, фітоекстракту ромашки, високодисперсного порошка агрусу в технології хлібобулочних і кондитерських виробів дає можливість поліпшити органолептичні показники готових виробів [8, 9]. Встановлено [3, 10], що використання шротів олійних культур (насіння гарбуза, кунжуту, волоського горіха, розторопші, обліпихи тощо) впливає на інтенсивність бродіння тіста, формостійкість і термін збереження свіжості хліба, збільшує питомий об'єм виробу, є джерелом вітамінів і мікроелементів. Вироби з добавками борошна з насіння гарбуза проявляють імунокоригуючі, радіопротекторні, бактеріцидні, антиатеросклеротичні, протиалергічні, антимікробні, фунгіцидні властивості [11].

Гречана лузга відрізняється високим вмістом поліфенолів від оболонки низки зернових культур. У ній наявні рутин, кемферол, кварцетин, фенолкарбонові кислоти: протокатехінова, хлорогеннова [12]. Найбільший вміст рутину у квітках, листях гречки та зернах окремих її сортів. У сучасній медицині рутин застосовують для профілактики і лікування серцево-судинних захворювань, цукрового діабету, ревматизму, гіпертонії, злоякісних утворень, захворювань печінки і жовчного міхура. Рутин зменшує відмирання тканин за обмороження, підсилює захисні функції організму.

Хімічний склад гречаної лузги коливається в широких діапазонах і залежить від сорту гречки, умов її вирощування та від характеристики технологічного процесу переробки зерна. Тому в літературних джерелах відомості щодо хімічного складу гречаної лузги дещо відрізняються між собою. Згідно [13] вона містить до 50 % клітковини, 3 – 4 % сирого білка, 4 – 5 % жиру, 0,2 – 0,3 % цукрів, вміст амінокислот становить 1,65 %. У роботі [14] наведений такий



склад лузги гречки: до 50 % клітковини, 4 – 5 % ліпідів, 70 % полісахаридів, 0,2 – 0,3 % цукрів, 9 – 10 % золи. Гречана лузга багата комплексним мінеральним складом; в ній є залізо, хром, калій, натрій, магній, цинк, мідь, фосфор, срібло, кальцій, алюміній. Вміст мінеральних речовин залежить від багатьох показників, зокрема, певною мірою від сорту гречки, але для всіх сортів характерний значний вміст калію. Також у ній наявні сирий білок, амінокислоти, вітаміни E, B₁, B₂, мінеральні речовини, пігменти, колір яких дуже близький до шоколадного і, найголовніше, така необхідна нашому організму клітковина.

Харчові волокна зменшують секрецію інсуліну, зв'язують і виводять із організму токсичні речовини, жовчні кислоти, шкідливі мінеральні сполуки, а також впливають на обмін ліпідів, значну роль відіграють у функції шлунково-кишкового тракту, забезпечують почуття ситості. Вони – основа правильного травлення, збереження здорової ваги, профілактики раку та діабету 2-го типу [15, 17]. Розрахунок фізіологічної потреби сучасної людини в харчових волокнах складає 30 – 40 г на добу за енергетичної цінності харчового раціону 2500 ккал. Однак, щодня в раціон входить, у середньому, трохи більше 10 г дієтичної клітковини, що в 3 – 4 рази менше необхідної норми. Наразі світові тенденції зниження калорійності раціону харчування зумовлюють необхідність розширення асортименту хлібопекарських виробів, які б характеризувались збільшеним умістом харчових волокон.

Гречану лузгу раніше не використовували у харчовій промисловості. Однак, беручи до уваги хімічний склад і низьку собівартість, можна розглядати її як цінну харчову добавку. За невеликої вартості гідролізована гречана лузга набуває чудових технологічних властивостей і може використовуватися як харчова добавка, зокрема у борошняних кондитерських виробках [11, 16]. Оброблена лузга має приємний смак, аромат, шоколадно-коричневий колір.

Отже, дослідження нетрадиційної рослинної сировини – гречаної лузги, багатой вітамінами, макро- і мікроелементами, харчовими волокнами – актуальне завдання сьогодення.

Мета статті – формування якості хліба пшеничного з додаванням різної масової частки добавки «Клітковина гречана».

Основна частина. Як харчову добавку до хліба пшеничного використовували добавку «Клітковина гречана», технологію отримання якої з гречаної лузги та повний її аналіз щодо безпечності й відповідності стандартним вимогам, які висуваються до рослинних добавок, розроблено й проведено на кафедрі хімії та експертизи



харчової продукції Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича [18].

Дослідження проводили шляхом пробного випікання, використовуючи традиційну технологію. Контрольний зразок: хліб пшеничний без добавки. Для приготування досліджуваних зразків частину борошна пшеничного (БП) заміняли на добавку «Клітковина гречана» (Д) (табл. 1) під час стадії замішування тіста.

Таблиця 1

Рецептури контрольного та досліджуваних зразків хліба пшеничного з добавкою «Клітковина гречана»

Рецептурний компонент, г	Зразок				
	Контроль	№1	№2	№3	№4
Борошно пшеничне	100	99	97	95	90
Цукор	6	6	6	6	6
Сіль кам'яна	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Дріжджі пресовані	1	1	1	1	1
Вода	100	100	100	100	100
Добавка	0	1	3	5	10
<i>Примітки</i>	Без Д	1 % (мас.) заміни БП на Д	3 % (мас.) заміни БП на Д	5 % (мас.) заміни БП на Д	10 % (мас.) заміни БП на Д

Проводили органолептичну оцінку контрольного та досліджуваних зразків хліба пшеничного за низкою показників користуючись ДСТУ-П 8536:2015. Такі фізико-хімічні показники, як: пористість, вологість, кислотність визначали згідно ДСТУ 7517:2014.

Корисний та безпечний продукт не буде викликати інтересу у споживачів, якщо він не володіє хорошими смаковими властивостями, запахом, привабливим зовнішнім виглядом та консистенцією. Результати органолептичного аналізу завжди вирішальні під час оцінки якості харчової продукції, незалежно від її харчової цінності. Тому, вивчаючи вплив добавки «Клітковина гречана» з нетрадиційної рослинної сировини – гречаної лузги на властивості хліба пшеничного, першим етапом було проведення органолептичної оцінки виготовлених зразків. Результати органолептичного оцінювання контрольного й досліджуваних зразків подані в таблиці 2.

Аналіз наведених даних (табл. 2) засвідчує, що заміна борошна пшеничного на добавку «Клітковина гречана» у кількостях 1 – 10 % (мас.) не впливає на форму виробів та стан м'якушки. Усі зразки мають форму, в якій проводили випікання, без бокових впливів.



М'якушка пропечена, без слідів непромісу, не липка, не волога на дотик, достатньо еластична, рівномірно пориста.

Таблиця 2

Органолептичні показники досліджуваних зразків хліба пшеничного

Показник	Характеристика показників				
	Контроль	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3	Зразок №4
Зовнішній вигляд:					
- стан поверхні	Гладка, без великих тріщин і великих підривів, без забруднення.				Шорсткувата, наявна тріщина.
- колір скоринки	Світло-коричневий, верхівка з блиском, без підгоріlostей	Світло-коричневий, верхівка з блиском, без підгоріlostей.	Коричневий, верхівка з блиском, без підгоріlostей	Темно-коричневий, верхівка без блиску, без підгоріlostей	
- форма	Відповідає формі, в якій проводили випікання, не розпливчаста, без бокових впливів.				
Стан м'якушки	Пропечена, без слідів непромісу, не липка, не волога на дотик, достатньо еластична, рівномірно пориста. Відсутнє відшаровування скоринки від м'якушки, біля нижньої скоринки відсутній безпористий щільний шар.				
Смак	Властивий цьому виду хліба, приємний, без стороннього присмаку.	Властивий цьому виду хліба, з ледь відчутним горіхово-маковим присмаком.	Властивий цьому виду хліба, з відчутним горіхово-маковим присмаком.	Властивий цьому виду хліба, з вираженим горіхово-маковим присмаком.	Властивий цьому виду хліба, з відчутним присмаком гречки.
Запах	Властивий цьому виду хліба, приємний, без стороннього запаху.		Властивий цьому виду хліба, приємний, з ледь відчутним запахом маку та горіха.	Властивий цьому виду хліба, приємний, з відчутним запахом маку та горіха.	Властивий цьому виду хліба, із запахом гречки.
Розжовуваність м'якушки	Добре розжовується.				Ледь відчутний хрускіт на зубах

М'якушка добре розжовується у зразках № 1, 2, 3; у зразка № 4 (заміна 10 % БП на Д) ледь відчутний хрускіт на зубах. Колір скоринки, залежно від вмісту добавки, змінюється від світло-коричневого (контрольний зразок) до темно-коричневого (зразок № 4). Таку зміну забарвлення, найімовірніше, спричинює меланін – коричневий барвник, наявний у гречаній луззі.

У всіх зразках, крім зразка № 4, верхівка з блиском. Поверхня контрольного та зразків № 1 – 3 гладка, без великих тріщин і підривів, без забруднення, зразка № 4 – нерівна, наявна тріщина, шорсткувата, що є причиною відсутності блиску верхівки виробу.

Аналізуючи результати органолептичної оцінки, можна констатувати, що добавка «Клітковина гречана» найбільше впливає на такі показники, як: смак і запах. За вмісту добавки 1 % від маси борошна (зразок № 1) ледь відчувається присмак горіху й маку; за вмісту 3 % (зразок № 2) – відчутний присмак горіху й маку; за вмісту 5 % (зразок № 3) – виражений присмак горіху й маку; за вмісту 10 % (зразок № 4) – відчутний присмак гречки. Майже аналогічні відчуття щодо запаху досліджуваних зразків.

Незалежними експертами проводилось кількісне оцінювання кожного показника за десятибальною шкалою. За профілограмою результатів (рис. 1) можна візуально порівняти якість досліджуваних зразків з контрольним зразком.

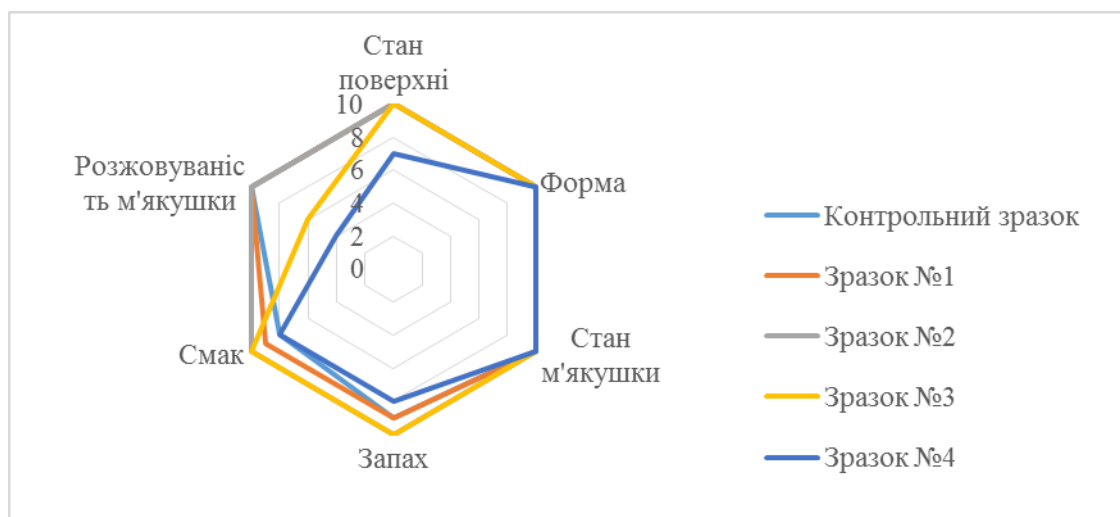


Рис. 1. Профілограма результатів органолептичної оцінки зразків хліба пшеничного з добавкою «Клітковина гречана» у порівнянні з контрольним зразком

Отже, можна констатувати, що за органолептичними показниками найгірший досліджуваний зразок №4 (вміст добавки 10 % від БП): поверхня шорсткувата, з тріщиною, ледь відчувається

хрускіт на зубах під час розжовування, а найліпший – зразок №2 (вміст добавки 3 % від БП), який за смак і запах отримав більше балів порівняно з контрольним зразком.

Під час вивчення впливу добавки «Клітковина гречана» на властивості хліба пшеничного, окрім органолептичних показників, нами досліджено фізико-хімічні властивості зразків, зокрема: вологість, пористість і кислотність. Ці показники визначали на першій добі після випікання та протягом семи діб зберігання за звичайних умов. За нормативними вимогами вологість хліба пшеничного має бути не більше 47 %. Серед досліджуваних зразків найбільше значення вологості – 42,6 %, тобто за цим показником всі зразки відповідають нормативним вимогам. На рисунку 2 приведена залежність вологості хліба пшеничного від вмісту добавки «Клітковина гречана». Спостерігається закономірність: чим більший вміст добавки, тим менша вологість, що можна пояснити не гігроскопічністю добавки.

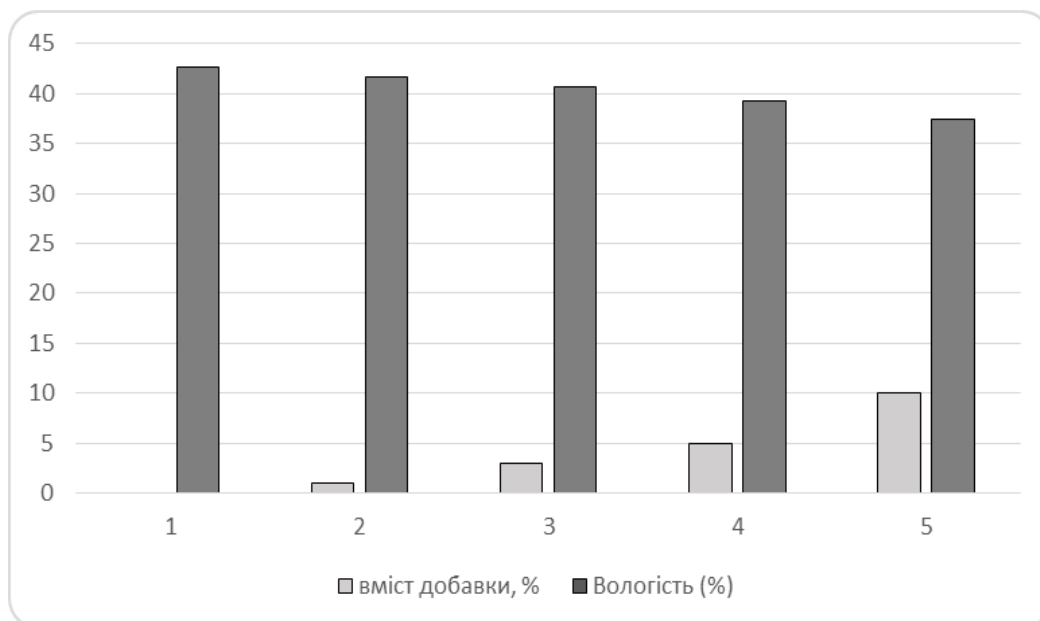


Рис. 2. Залежність вологості зразків хліба пшеничного від вмісту добавки «Клітковина гречана» (мас. % від борошна)

Цей показник визначали через кожну добу зберігання за звичайних умов протягом семи діб з метою дослідити вплив добавки на втрату вологи. Вологість у всіх зразках зменшувалася майже на однакову величину ($12,7 \pm 0,4$ %), (рис. 3), тобто вміст добавки «Клітковина гречана» не впливає на збереження вологи у хлібі пшеничному.

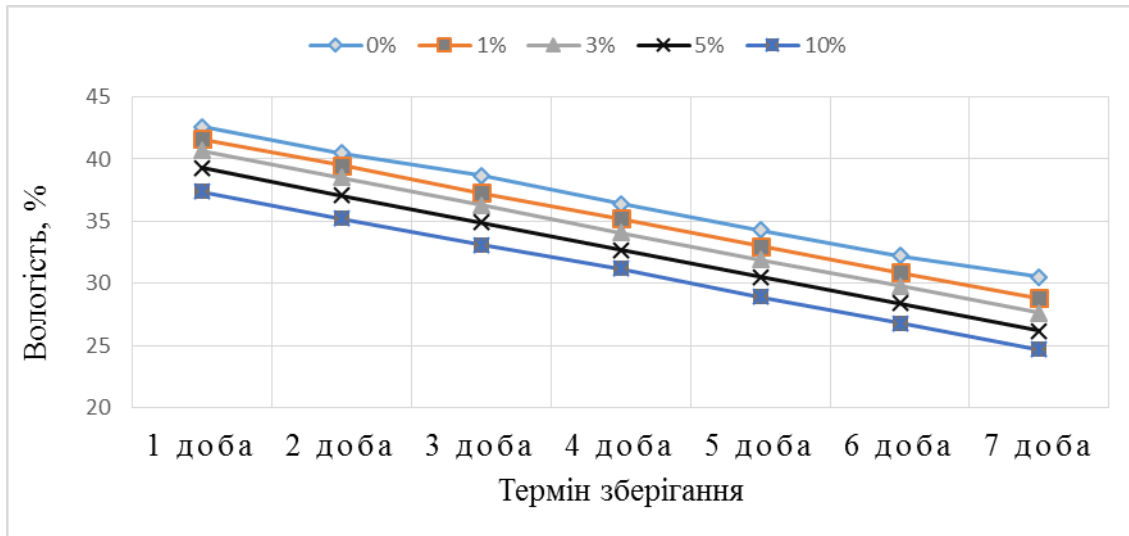


Рис. 3. Зміна вологості зразків хліба пшеничного з добавкою «Клітковина гречана» (мас. % від борошна) протягом семи діб

Для такого показника фізико-хімічних властивостей як пористість спостерігається аналогічна закономірність: чим більший вміст добавки, тим менша пористість. Через сім діб пористість у всіх зразках зменшилася майже на однакову величину ($(2,5 \pm 0,2) \%$) (рис. 4), тобто вміст добавки «Клітковина гречана» не впливає на зміну пористості хліба пшеничного з часом.

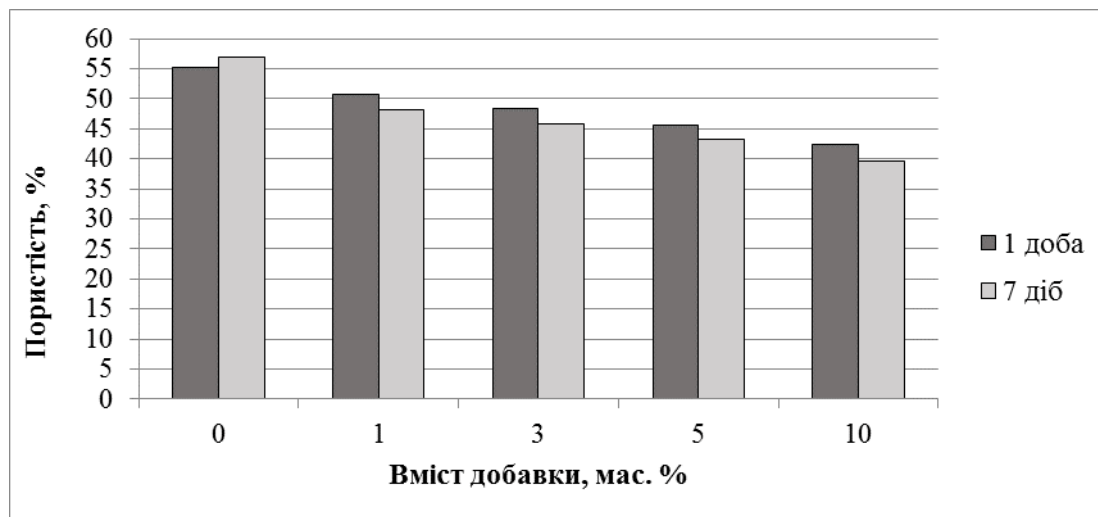


Рис. 4. Зміна пористості зразків хліба пшеничного з добавкою «Клітковина гречана» (мас. % від борошна) протягом семи діб

Кислотність хліба зумовлена наявністю в ньому низки органічних кислот: ацетатної, молочної, мурашиної яблучної, винної та ін. і виражається у градусах, які відповідають об'єму (у cm^3) розчину NaOH з концентрацією 1 моль-екв/ dm^3 , витраченого на нейтралізацію кислот, що містяться у 100 г хліба. Надто кислий хліб шкідливий для

людей з підвищеною кислотністю шлунку. Для хліба пшеничного кислотність не повинна перевищувати 3° .

Результати титриметричного визначення кислотності контрольного та досліджуваних зразків хліба пшеничного представлені на рис. 5.

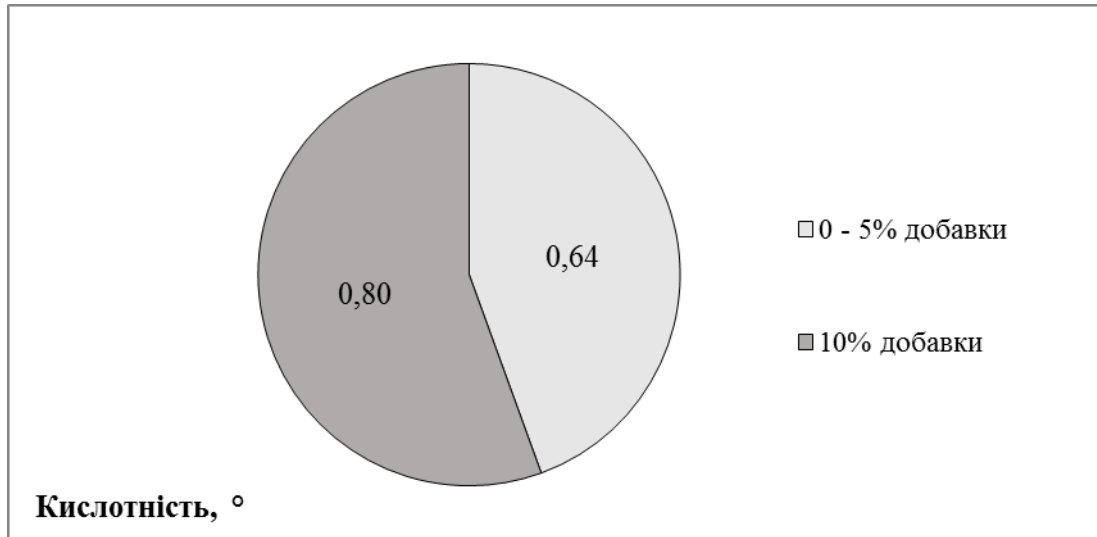


Рис. 5. Залежність кислотності зразків хліба пшеничного від вмісту добавки «Клітковина гречана» (мас. % від борошна)

Аналіз даних засвідчує, що вміст добавки «Клітковина гречана» майже не впливає на значення кислотності. У контрольного та досліджуваних зразках з добавкою 1, 3, 5 % від маси борошна кислотність дорівнює $0,64^{\circ}$, з добавкою 10 % – $0,8^{\circ}$, що відповідає нормативним вимогам. Після семи діб зберігання значення кислотності для всіх зразків абсолютно не змінилося.

Висновки. Сформовано якість хліба пшеничного з додаванням різної масової частки добавки «Клітковина гречана». Остання найбільше впливає на смак і запах. Відчуваються приємні горіхомаковий запах і присмак.

Для таких показників хліба як вологість і пористість спостерігається закономірність: чим більший вміст добавки, тим менші значення показника, але всі відповідають нормативним вимогам. Уміст добавки (мас. %) не впливає на зміну з часом пористості та вологості запропонованих зразків хліба пшеничного. Добавка «Клітковина гречана» у межах 1 – 5 мас. % від борошна не впливає на значення кислотності зразків.

У гречаній луззі міститься багато корисних речовин, тому варто її використовувати як цінний вторинний сировинний ресурс для розробки нової продукції оздоровчого призначення, зокрема можна



використовувати як харчову добавку до хліба пшеничного. Найоптимальніший вміст цієї добавки 3 – 5 мас. % від борошняної компоненти.

Список використаних джерел

1. Дубініна А. А., Попова Т. М., Ленерт С. О., Холодна А. В. Розробка рецептурного складу та оцінка якості хліба з гречаним борошном. *Young Scientist*. 2019. № 1 (65). С. 189–192.

2. Юдічева О. П., Калашник О. В., Мороз С. Е., Рибалко О. А., Корсун А. В. Органолептичне оцінювання хліба пшеничного, збагаченого продуктами переробки гарбуза. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2020. № 23. С. 136–144.

3. Дзюндзя О. В., Звагольська К. М. Аналіз нетрадиційної борошняної сировини для виробництва хлібобулочних виробів. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 1. С. 22–29.

4. Гойко І., Самойленко О. Булочка оздоровчого призначення. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 86 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 2–3 квітня 2020*. Київ: НУХТ. Ч. 1. С. 29.

5. Молодід Т., Бажай-Жежерун С. Показники якості хліба, збагаченого продуктами перероблення конопель. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 86 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 2–3 квітня 2020*. Київ: НУХТ. Ч. 1. С. 40.

6. Соколова Н., Ряснюк В. Вплив конопляного борошна на реологічні властивості пшеничного тіста для хлібних паличок. *International scientific conference of young scientist and students «Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution», April 2–3 2020. Book of abstract. Part 1*. NUFT, Kyiv, 2020. P. 105.

7. Дебилинська К., Дробот В. Перспективи використання шроту виноградних кісточок. *International scientific conference of young scientist and students «Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution», April 2–3 2020. Book of abstract. Part 1*. NUFT, Kyiv, 2020. P. 110.

8. Борковський З., Фалендиш Н. Використання борошна кіноа світлого та фітоекстракту ромашки при виробництві органічного хліба. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: матеріали 86 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 2–3 квітня 2020*. Київ: НУХТ. Ч. 1. С. 111.

9. Боруц С. Д., Кобаса І. М., Воробець М. М. Органолептичні властивості та харчова безпека кондитерських виробів із вмістом



високодисперсного агрусу. *Підприємництво, торгівля: теоретичні підходи та практичні аспекти розвитку*: матер. II Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Старобільськ, 26–27 листопада 2020 року). Харків: Вид-во Іванченка І. С., 2020. С. 80–83.

10. Соловійова К., Башта А. Отримання пшеничного хліба оздоровчого призначення, збагаченого шротом насіння олійних культур. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*: матеріали 86 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 2–3 квітня 2020. Київ: НУХТ. Ч. 1. С. 26.

11. Науменко О. В., Овсієнко С. М. Використання біологічно активних речовин у хлібопеченні. *Продовольчі ресурси*. 2021. Т. 9, № 17. С. 107–118.

12. Каравай Л. В., Кузнецова А. А., Николаєнко О. Ю., Чернышова А. Н., Левочкина Л. В. Влияние комбинированного гидролиза на пищевую ценность лузги гречихи и использование ее пищевых волокон в производстве мучных кондитерских изделий. *Технология продовольственных товаров*. 2012. С. 34–42.

13. Язев С.Г. Использование лузги гречихи в пищевом производстве. *Наука и современность*. 2014. № 34. С. 102–105.

14. Туева И. А., Дмитрук С.Е., Калинкина Г.И., Сальникова Е.Н. Исследование химического состава отходов переработки семян гречихи, льна и рапса. *Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья*: матер. II Всерос. конф., Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2005. Кн. I. С. 344–348. http://conf.chem.asu.ru/public/conferences/3/biblio/conf-2005/sbornik_tezis-2005-kniga-I.pdf (дата звернення 14.05.2023).

15. Сімакова О. О., Никифоров Р. П. Розробка новітніх технологій виробів з борошна із заданими властивостями: монографія. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2018. 146 с.

16. Шаповаленко О. І., Ковбаса В. М., Янюк Т. І., Терлецька В.А. Про можливості використання лузги гречки. *Хранение и переработка зерна*. 2008. № 10. С. 43–44.

17. Івашко І., Усатюк С. Використання харчових волокон у виробництві хлібобулочних виробів. *International scientific conference of young scientist and students «Youth scientific achievements to the 21st century nutrition problem solution»*, April 2–3 2020. Book of abstract. Part 1. NUFT, Kyiv, 2020. P. 72.

18. Протокол випробувань №578/2002 від 23.11.2022 р. Мінекономіки ДП Чернівецький регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації. 2 с.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2023 р.



M. Vorobets¹, V. Evlash², I. Kobasa¹, I. Kondrachuk¹

¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

²State Biotechnological University

FORMATION OF THE QUALITY OF WHEAT BREAD WITH THE ADDITION OF «BUCKWHEAT FIBER»

Summary

The article is devoted to the formation of the quality of wheat bread made with the additive «Buckwheat fiber» based on buckwheat husk. Buckwheat husk differs from the husks of other cereal crops in its high content of polyphenols. It also contains crude protein, amino acids, vitamins E, B1, B2, minerals, fiber, pigments, the color of which is very close to chocolate. It was established that with an additive content of 1% to the mass of flour, compared to the control sample (without husk), there is no change in the smell of the bread, a barely perceptible nutty-poppy aftertaste, there is no crunch on the teeth; with a content of 3% – a pleasant nutty-poppy smell and taste are noticeable, there is no crunch on the teeth; 5% – pronounced nutty-poppy smell and taste, a barely perceptible crunch on the teeth; 10% – a noticeable smell and taste of buckwheat and a crunch on the teeth. Regarding such physico-chemical indicators of bread as moisture and porosity, a regularity was found: the higher the content of buckwheat fiber, the lower the values of these indicators. The content of the additive in the range of 1-5% to the mass of flour does not affect the value of acidity of bread. It is possible to recommend the use of buckwheat fiber as a non-traditional enriching raw material in wheat bread technology with a content of 3–5% by weight of flour. The introduction of the «Buckwheat fiber» additive will reduce the energy value of bakery products, it will be economically expedient, as their cost price will decrease. This will make it possible to expand the range of products and give them variety in terms of organoleptic indicators. Also, an important argument regarding the necessity and relevance of adding an additive from non-traditional plant raw materials – buckwheat husk – is the fact that the share of bakery products for medicinal and dietary purposes in the total volume of production is quite small.

Keywords: buckwheat husk, wheat bread, non-traditional raw materials, buckwheat fiber, organoleptic indicators, physical and chemical indicators.

ПРАЦІ
Таврійського державного агротехнологічного університету

Наукове фахове видання

Випуск 23, том 1

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