ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ISSN 2307-1699 (Print)
ISSN 2708-9754 (Online)

AGRICULTURAL MACHINES

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

AGRICULTURAL MACHINES

2025' 51

ISSN 2307-1699 (Print)
ISSN 2708-9754 (Online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Науково-практичне видання

Журнал заснований у 1995 році

У журналі відображені науково-практичні проблеми сільськогосподарського виробництва.

Журнал призначений для наукових і науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів, а також усіх зацікавлених у розвитку сільськогосподарського виробництва.

Засновник і видавець:
Луцький національний технічний університет

Випуск 51

ТЕХНОЛОГІЯ

****

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

****

ТЕХНІКА

Луцьк 2025

УДК 631.3

Сільськогосподарські машини. Вип. 51. ЛНТУ, Луцьк, 2025. 170 с.

Рекомендовано до друку вченою радою
Луцького національного технічного університету
(протокол № 5 від 30.10.2025 р.)

Журнал включений до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України,
технічні науки за спеціальностями
133 Галузеве машинобудування та 208 Агроінженерія
(наказ Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 року)

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення,
рішення № 40 від 11.01.2024 року, ідентифікатор медіа R30-02454.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор:

Ігор ДУДАРЄВ — *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

Заступник головного редактора:

Володимир ДІДУХ — *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

Відповідальний секретар:

Руслан КІРЧУК — *к.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

Члени редакційної колегії:

Валентин ВЛАДУТ — *Ph.D., Національний інститут науково-дослідних розробок машин і установок для сільського господарства та харчової промисловості – INMA, Румунія*

Юрій ГАЙДА — *д.с.-г.н., професор, НУ «Чернігівська політехніка», Україна*

Олександр ГЕРАСИМЧУК — *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Тетяна ГОЛОВЕНКО — *д.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Віктор ЗАХАРЧУК — *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

Василь ЗАЯЧУК — *к.с.-г.н., доцент, Національний лісотехнічний університет України, Україна*

Олена НАЛОБІНА — *д.т.н., професор, Національний університет водного господарства та природокористування, Україна*

Світлана ПАНАСЮК — *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Лукреція ПОПА — *Ph.D., Національний інститут науково-дослідних розробок машин і установок для сільського господарства та харчової промисловості – INMA, Румунія*

Віталій ПУЦЬ — *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Луіс РІБЕЙРО — *Ph.D., професор, Політехнічний інститут Браганса – IPB, Португалія*

Роман РОГАТИНСЬКИЙ — *д.т.н., професор, Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, Україна*

Ірина ТАРАЙМОВИЧ — *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Микола ТОЛСТУШКО — *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Наталія ТОЛСТУШКО — *к.т.н., доцент, Луцький національний технічний університет, Україна*

Павло ХОЄЦЬКИЙ — *д.с.-г.н., професор, Національний лісотехнічний університет України, Україна*

Віктор ШЕЙЧЕНКО — *д.т.н., професор, Полтавський державний аграрний університет, Україна*

Світлана ЯГЕЛЮК — *д.т.н., професор, Луцький національний технічний університет, Україна*

© Луцький національний технічний університет, 2025

ISSN 2307-1699 (Print)
ISSN 2708-9754 (Online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

LUTSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

AGRICULTURAL MACHINES
AM
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

AGRICULTURAL MACHINES

Scientific and Practical Journal

Founded in 1995

The scientific and practical problems of agricultural production are presented.

The Journal is intended for science officers, lectures, PhD students and advanced students and for all those interested in the development of agricultural production.

Founder and publisher:
Lutsk National Technical University

Volume 51

TECHNOLOGY

***

TECHNOLOGICAL PROCESS

***

MACHINERY

Lutsk 2025

UDC 631.3

Agricultural Machines. Vol. 51. LNTU, Lutsk, 2025. 170 p.

Academic Council of Lutsk National Technical University
confirmed for printing
(record № 5 dated October, 30, 2025)

The Journal is inscribed to the category «Б» of the List of Scientific Professional Publications of Ukraine (Technical Sciences by Specialties 133 Industrial Mechanical Engineering, 208 Agricultural Engineering) maintained by order of Ministry of Education and Science of Ukraine № 409 dated March, 17, 2020

Registered by the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine, record № 40 dated January, 11, 2024, media identifier R30-02454.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

Igor DUDAREV — *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

Deputy Editor-in-Chief:

Volodymyr DIDUKH — *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

Executive Editor:

Ruslan KIRCHUK — *Ph.D., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

Members of Editorial Board:

Valentin VLADUT — *Ph.D., The National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed for Agriculture and Food Industry – INMA, Romania*
Yuriy HAYDA — *D.Sc., Professor, Chernihiv Polytechnic National University, Ukraine*
Oleksandr GERASYMCHUK — *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Tetiana HOLOVENKO — *D.Sc., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Viktor ZAHARCHUK — *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Vasyl ZAYACHUK — *Ph.D. Assoc. Professor, Ukrainian National Forestry University, Ukraine*
Olena NALOBINA — *D.Sc., Professor, National University of Water and Environmental Engineering, Ukrain*e
Svitlana PANASYUK — *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Lucretia POPA — *Ph.D., The National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed for Agriculture and Food Industry – INMA, Romania*
Vitalii PUTS — *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Luis RIBEIRO — *Ph.D., Professor, Polytechnic Institute of Bragança – IPB, Portugal*
Roman ROHATYNSKYI — *D.Sc., Professor, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine*
Iryna TARAYMOVICH — *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Mykola TOLSTUSHKO — *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Nataliya TOLSTUSHKO — *Ph.D., Assoc. Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*
Pavlo KHOYETSKYY — *D.Sc., Professor, Ukrainian National Forestry University, Ukraine*
Viktor SHEICHENKO — *D.Sc., Professor, Poltava State Agrarian University, Ukraine*
Svitlana YAHELIUK — *D.Sc., Professor, Lutsk National Technical University, Ukraine*

© Lutsk National Technical University, 2025

ЗМІСТ

О.А. Бурлака, А.О. Келемеш*, С.В. Ляшенко, А.І. Лазоренко
ВПЛИВ ЗНОСУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СКРЕБКОВОГО ЕЛЕВАТОРА ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА НА СТУПІНЬ ЗВОРОТНОГО СИПУ ЗЕРНА 7

А.О. Михайлов
ОБГРУНТУВАННЯ ПЕРЕЛІКУ ФАКТОРІВ ДЛЯ ВИБОРУ МОДЕЛІ РОБОТА – ПРОПОЛЮВАЧА БУР'ЯНІВ 15

К.В. Васильковська
АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ РІВНОМІРНОГО ПОТОКУ НАСІННЯ ДО БОРОЗНИ..... 24

Р.В. Кірчук, Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Ференц
ОСОБЛИВОСТІ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ НА ПРИСАДИБНИХ ДІЛЯНКАХ З ОБГРУНТУВАННЯМ СИСТЕМИ НАВІСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДО МОТОБЛОКУ 34

С.М. Хомич, І.Є. Цизь, Р.А. Хлопецький, С.Ф. Юхимчук, О.В. Захарчук
РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ, НАЛАШТУВАННЯ І УПРАВЛІННЯ ЕРЛІФТНИХ САПРОПЕЛЕДОБУВНИХ МАШИН 48

І.Я. Мисковець
ЗБЕРЕЖЕННЯ ГРУНТІВ – ЗБЕРЕЖЕННЯ МАЙБУТНЬОГО: АГРОЕКОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕРЕЗНІВЩИНИ 56

О.П. Герасимчук, О.Л. Ткачук, В.О. Волянський, В.Н. Бондар
ГІДРОСТРУМИННИЙ СПОСІБ ВІДДІЛЕННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ 64

В.Ф. Дідух, Т.Г. Щур
ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ ПЕРЕТВОРЕННЯ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО У ТРЕСТУ 73

Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук, Р.В. Ференц
СУТНІСТЬ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН 83

В.О. Волянський, О.П. Герасимчук, Т.В. Волянський, В.Н. Бондар
ВПЛИВ ЛІСОВОЇ РОСЛИННОСТІ НА МЕАНДРУВАННЯ РІЧОК ВОРСКЛА І ПСЕЛ 91

І.Є. Цизь, В.О. Голій, Т.П. Цизь, А.П. Ковальчук
ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ОПОРУ ЗНАРЯДДЯ ДЛЯ ГЛИБОКОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ 99

Р.А. Хлопецький, В.Ф. Дідух, С.М. Хомич, І.Є. Цизь
ОБГРУНТУВАННЯ КІНЕМАТИКИ РОБОЧОГО ОРГАНУ ФРЕЗЕРНОЇ СИСТЕМИ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ 107

І.Є. Цизь, В.Ф. Дідух, С.М. Хомич, О.В. Голій
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНЕВОДНЕННЯ САПРОПЕЛЮ У ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ ІЗ САМООЧИСНИМ ФІЛЬТРОМ 117

І.М. Мерленко, М.Б. Августинович, М.І. Зінчук, А.М. Шворак
РОЗРАХУНКИ БАЛАНСУ МАКРОЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ В УМОВАХ ФГ «НИВА» ДУБЕНСЬКОГО РАЙОНУ РІВНЕНСЬКОЇ ОБЛАСТІ 126

І.М. Мерленко
СКЛАДНІСТЬ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ 135

Е.Б. Алієв, Г.В. Теслюк, В.В. Головченко
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАШИНИ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ НАСІНИН РИЦИНИ ВІД ПЛОДІВ 147

В.О. Стефанов, І.В. Дзержинський
ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙ БАШТОВОГО КРАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШІ-ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ 159

CONTENT

O. Burlaka, A. Kelemesh, S. Liashenko, A. Lazorenko
INFLUENCE OF WEAR OF WORKING PARTS OF THE SCRAPER ELEVATOR OF A COMBINE HARVESTER ON THE DEGREE OF GRAIN REVERSE LOADING..... 7

A. Mykhailov
JUSTIFICATION OF THE LIST OF FACTORS FOR SELECTING A WEEDING ROBOT MODEL..... 15

K. Vasylkovska
ANALYSIS OF CREATING A UNIFORM SEED FLOW TO THE FURROW..... 24

R. Kirchuk, L. Zabrodotska, R. Ferenc
POTATOES HOME GARDENING FEATURES ON USING ATTACHABLE EQUIPMENT OF TWO-WHEEL TRACTOR 34

S. Khomych, I. Tsyz, R. Khlopetskyi, S. Yukhymchuk, I. Zakharchuk
DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR FORECASTING, ADJUSTMENT, AND CONTROL OF AIRLIFT SAPROPEL EXTRACTION MACHINES..... 48

I. Myskovets
SOIL CONSERVATION – CONSERVATION OF THE FUTURE: AN AGROECOLOGICAL STUDY OF THE BEREZNE REGION 56

A. Herasymchuk, O. Tkachuk,V. Volianskyi, V. Bondar
HYDRO-JET METHOD FOR SCOTS PINE NEEDLE SEPARATION FOR INTEGRATED PROCESSING 64

V. Didukh, T. Shchur
THERMOTECHNICAL PROCESSES OF CONVERSION OF OIL FLAX STEM INTO TRUST 73

L. Zabrodotska, R. Kirchuk, R.Ferenc
THE ESSENCE OF METHODS FOR CALCULATING DIMENSIONAL CHAINS IN DESIGNING DETAILS OF AGRICULTURAL MACHINERY..... 83

V. Volianskyi, A. Herasymchuk, T. Volianskyi, V. Bondar
INFLUENCE OF FOREST VEGETATION ON VORSKLA AND PSEL RIVERS MEANDERING 91

I. Tsiz, V. Holii, T. Tsyz, A. Kovalchuk, B. Pastushok
THEORETICAL STUDY OF THE TRACTION RESISTANCE OF A TILLAGE IMPLEMENT FOR DEEP SOIL CULTIVATION..... 99

R. Khlopetskyi, V Didukh, S. Khomych, I. Tsyz
MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF THE WORKING PROCESS OF A SPIRAL-TYPE CUTTER FOR SAPROPEL EXTRACTION 107

I. Tsiz, V. Didukh, S. Khomych, O. Holii
RESEARCH ON SAPROPEL DEHYDRATION IN A SCREW PRESS WITH A SELF-CLEANING FILTER..... 117

I. Merlenko, M. Avgustinovich, M. Zinchuk, A. Shvorak
CALCULATIONS OF THE BALANCE OF MACROELEMENTS WHEN GROWING WINTER WHEAT IN THE CONDITIONS OF THE FG "NIVA" OF THE DUBNO DISTRICT OF THE RIVNE REGION..... 126

I. Merlenko
THE COMPLEXITY OF PROJECT MANAGEMENT IN AGRICULTURAL PRODUCTION..... 135

E. Aliiev, H. Tesliuk, V. Holovchenko
NUMERICAL MODELING OF A MACHINE FOR SEPARATION AND CLEANING OF CASTOR BEAN SEEDS FROM FRUITS 147

V. Stefanov, I. Dzerzhinsky
FORECASTING AND PREVENTING TOWER CRANE FAILURES USING AI TECHNOLOGIES UNDER WIND LOAD CONDITIONS 159

INFLUENCE OF WEAR OF WORKING PARTS OF THE SCRAPER ELEVATOR OF A COMBINE HARVESTER ON THE DEGREE OF GRAIN REVERSE LOADING

O. Burlaka, A. Kelemesh*, S. Liashenko, A. Lazorenko

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
scraper elevator,
quality of grain transportation,
reverse loading,
mechanical wear,
oscillations in chain transmission

Article history:
Received 30.06.2025
Accepted 01.10.2025

****Corresponding author:***
anton.kelemesh@pdau.edu.ua

ABSTRACT

A modern combine harvester can be considered as a complex technological system that performs the final part of the technologies for the production of grain crops. Accordingly, the scientific direction of improving the quality of the threshing-separating and transport systems of the grain group does not lose its relevance and relevance in today's conditions. The presented research is devoted to improving the quality of transportation and centrifugal unloading of grain by scraper elevators of combine harvesters of the KZS-9-1 type and their further modernizations. The theoretical and experimental part of the study established that the quality of transportation and centrifugal unloading of the scraper elevator of the combine harvester is influenced not only by the design features, but also by the degree of mechanical wear of the working parts of the elevator. Based on the research, it was determined that the degree of wear of the working surfaces of the drive sprocket in the upper part of the grain elevator of the KZS-9-1 combines leads to more pronounced oscillatory loads. It is recommended to use new structural materials, including composites, for the manufacture of both the drive sprocket and the scraper chain of the grain elevator itself. It is proposed to implement a computerized system for direct observation of the change in the reverse flow in the grain elevator using high-speed video cameras and flowmeter sensors. The latter will allow for timely repair, maintenance and technological adjustment of the elements of the grain group of the threshing machine of the combine harvester. It is also advisable to use an electric drive and electronic regulation of the speed of grain transportation by scraper elevators in accordance with the degree of loading of the grain group within the range of fulfillment of the centrifugal unloading condition.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1893

To cite this article:
Burlaka, O., Kelemesh A., Liashenko S. & Lazorenko A. (2025). Influence of Wear of Working Parts of the Scraper Elevator of a Combine Harvester on the Degree of Grain Reverse Loading. *Agricultural Machines*, *51*, 7-14. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1893

УДК 631.365:620.178.16:631.171

ВПЛИВ ЗНОСУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СКРЕБКОВОГО ЕЛЕВАТОРА ЗЕРНОЗБИРАЛЬНОГО КОМБАЙНА НА СТУПІНЬ ЗВОРОТНОГО СИПУ ЗЕРНА

О.А. Бурлака, А.О. Келемеш*, С.В. Ляшенко, А.І. Лазоренко

Полтавський державний аграрний університет, Полтава, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
скребковий елеватор,
якість транспортування зерна,
зворотний сип,
механічний знос,
коливання в ланцюговій передачі

Історія публікації:
Отримано 30.06.2025
Затверджено 01.10.2025

***Автор для листування:**
anton.kelemesh@pdau.edu.ua

АНОТАЦІЯ

Сучасний зернозбиральний комбайн можливо розглядати як складну технологічну систему, що виконує завершальну частину технологій по виробництву зернових сільськогосподарських культур. Відповідно науковий напрямок по покращенню якості роботи молотильно-сепарувальних та транспортних систем зернової групи не втрачає доцільності та актуальності в умовах сьогодення. Надані дослідження присвячені підвищенню якості транспортування та відцентрового розвантаження зерна скребковими елеваторами зернозбиральних комбайнів типу КЗС-9-1 та їх подальших модернізацій. Теоретичною та експериментальною частиною дослідження встановлено, що на якість транспортування та відцентрового розвантаження скребкового елеватора зернозбирального комбайна впливають не тільки особливості конструкції, але й ступінь механічного зношування робочих органів елеватора. На основі досліджень визначено, що ступінь зносу робочих поверхонь приводної зірочки у верхній частині зернового елеватора комбайнів КЗС-9-1 призводить до більш виражених коливальних навантажень. Рекомендується застосовувати нові конструкційні матеріали, в тому числі і композити, для виготовлення як приводної зірочки, так і безпосередньо самого скребкового ланцюга зернового елеватора. Пропоновано впровадити комп'ютеризовану систему безпосереднього спостереження за зміною зворотного сипу в зерновому елеваторі з використанням швидкісних відеокамер та датчиків-витратомірів. Останнє дасть змогу вчасно здійснювати ремонт, технічне обслуговування та технологічну наладку елементів зернової групи молотарки зернозбирального комбайна. Також доцільно застосовувати електропривод та електронне регулювання швидкості транспортування зерна скребковими елеваторами відповідно до ступеню завантаження зернової групи в межах діапазону виконання умови відцентрового розвантаження

DOI: 10.36910/acm.vi51.1893

Цитувати цю статтю:
Бурлака О.А., Келемеш А.О., Ляшенко С.В. & Лазоренко А.І. (2025). Вплив зносу робочих органів скребкового елеватора зернозбирального комбайна на ступінь зворотного сипу зерна. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 7-14. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1893

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасний зернозбиральний комбайн можливо розглядати як складну технологічну систему, що виконує завершальну частину технологій по виробництву зернових сільськогосподарських культур.

Тематика більшості наукових досліджень за таким напрямом відображена у наукових працях відомих українських вчених: Погорілого Л. В., Сакуна В. А., Шейченка В. О., Погорільця О. М., Головчука А. Ф, Демко А. А., Зенко М. Д., Ліника М. К., Нєдовєсова В. І. та ін. (*Погорілий та ін., 2002; Лящук та ін., 2019; Артьомов та ін., 2022*).

Частина досліджень складових технологій збирання врожаю зернозбиральними комбайнами спрямована на екологічність та енергоощадність виробничих процесів (*Krajewski et al., 2024; Imelda & Hidayat, 2024*).

Одною з основних тенденцій щодо удосконалення складових сучасної збиральної техніки є віднайдення шляхів зменшення енергетичних витрат щодо виконання механізованих операційних технологій (*Бурлака та ін., 2021*).

Відповідно науковий напрямок по покращенню якості роботи молотильно-сепарувальних та транспортних систем зернової групи не втрачає доцільності та актуальності в умовах сьогодення.

Мета дослідження – встановити закономірності впливу зносу робочих органів скребкового елеватора зернозбирального комбайна на якість транспортування та ступінь зворотного сипу зерна, а також обґрунтувати шляхи підвищення надійності та ефективності роботи транспортної системи комбайна шляхом удосконалення конструктивних елементів і застосування сучасних матеріалів та засобів контролю.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Об’єктом дослідження був скребковий зерновий елеватор зернозбирального комбайна КЗС-9-1, а предметом – вплив зносу його робочих органів (привідної зірочки та ланцюга зі скребками типу ТРД-38-4000-2-2-6-6) на якість транспортування зерна та величину зворотного сипу. Для досягнення мети використано комплекс методів: прямі вимірювання маси зворотного сипу, графоаналітичний аналіз коливань ланцюгової передачі, математичне моделювання процесу відцентрового розвантаження зерна з використанням рівнянь руху та методу Лагранжа. Експериментальна перевірка здійснювалася на спеціально спроєктованій установці із застосуванням нових і зношених зразків приводних зірочок і ланцюгів, а також засобів контролю кутової швидкості, амплітуди коливань і маси зерна. Для підвищення точності спостережень використовувалися відеофіксація та вимірювальні прилади; отримані дані піддавалися статистичній обробці з визначенням основних параметрів і порівнянням результатів для різних ступенів зношування.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Робочим органом зернового елеватора комбайна типу КЗС-9-1 є ланцюг ТРД-38-4000-2-2-6-6, з встановленими прямокутними гумовими скребками на **рис. 1**.

Зерно з домішками пилу, відносно умов роботи ланцюга зі скребками елеватора комбайна, можливо охарактеризувати як основну причину абразивного зносу складових такої транспортної системи. Геометричні параметри досліджуваного ланцюга та привідної зірочки (**рис. 2**) є визначальними при дослідженні впливу коливань, зумовлених конструкцією частини привідного механізму зернового елеватора

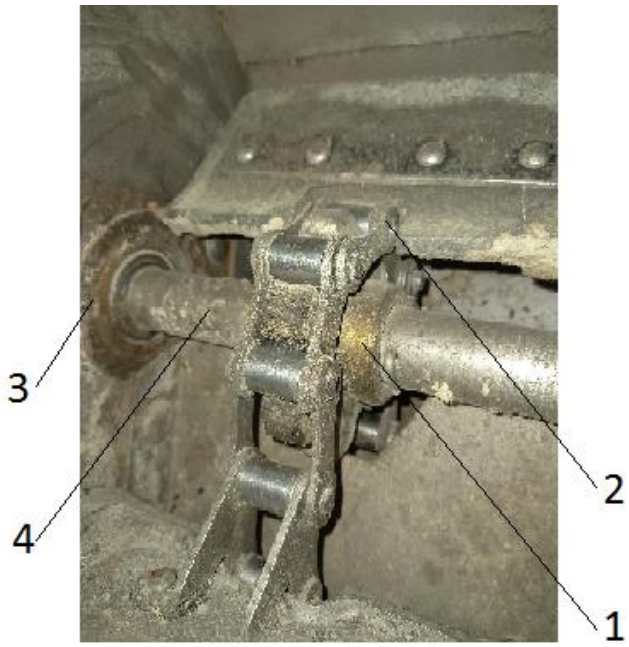


Рис.1 – Внутрішня частина зони відцентрового розвантаження зернового елеватора зернозбирального комбайна типу КЗС-9-1 *(фото авторів, 2025)*:
1 – приводна зірочка; 2 – ланцюг; оснащений скребками; 3 – підшипникова опора у сукупності з натяжним пристроєм; 4 – приводний вал

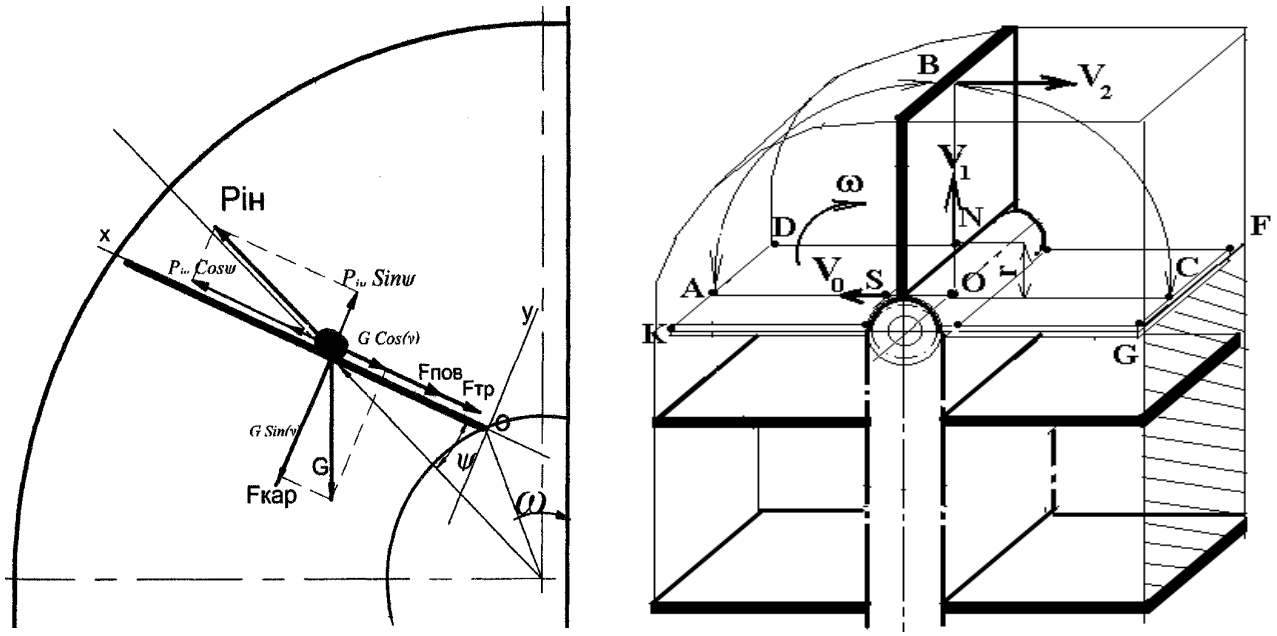
.

а б в

Рис. 2 – Приводна зірочка скребкового зернового елеватора КЗС-9-1 (*фото авторів, 2025*):
(а) – нова; (б, в) – із суттєвим зносом робочих поверхонь зубців

Тобто, абразивне середовище та циклічні навантаження, спричинені природою коливань в ланцюговій передачі не тільки впливають на зношування робочих органів, але й на якість транспортування та розвантаження зерна елеватором комбайна.

Коротко розглянемо теоретичні складові природи відцентрового розвантаження зерна у верхній частинці елеватора комбайна з урахуванням коливань на ланцюговій передачі та ступеня зношування робочих органів безпосередньо самого елеватора (**рис. 3**).



а б

Рис. 3 – Схема сил (а) та схема напрямку руху (б) при відцентровому розвантаженні зерна скребкового елеватора (*удосконалено авторами як продовження власних досліджень з* (*Бурлака & Яхін, 2017; Бурлака & Яхін, 2018*))

Приймаємо для розрахунку наступні сили: $G = mg$ – вага зерна; N – нормальна реакція поверхні; $F = kN$ – сила тертя; $P_{ин} = mr^2$ – відцентрова сила інерції; $F_{пов} = kmv$ – сила опору повітря, $F_{кар} = 2mv$ – сила Коріоліса. Диференційне рівняння руху у векторній формі має вигляд (*Бурлака & Яхін, 2017; Бурлака & Яхін, 2018*):

$$m\left(d^2xdt^2\right) = P_{ин} + G + F_{кар} + F_{тр} + F_{тр1} + F_{пов}, \tag{1}$$

або:

$$m\left(d^2xdt^2\right) = m^2x - km\ dxdt - 2fm\ dxdt - \left[mg\ \cos\left(-t\right) + fmg\ \sin\left(-t\right)\right]. \tag{2}$$

Робочим органом зернового елеватора на прикладі КЗС-9-1 є ланцюг зі скребками – типу ТРД-38-4000-2-2-6-6. У довільному кутовому положенні ведучої зірочки – повздовжня швидкість ланцюга (**рис. 4**):

$$v = \omega r\cos\alpha, \tag{3}$$

де ω – постійна кутова швидкість ведучої зірочки; r – радіус розташування шарнірів ланцюга; α – кут повороту в межах від 0 до π / z_1.

Відповідно швидкість ланцюга мінлива в межах від $v_{\max}$ до $v_{\max}\cos\left(\pi / z_1\right)$.

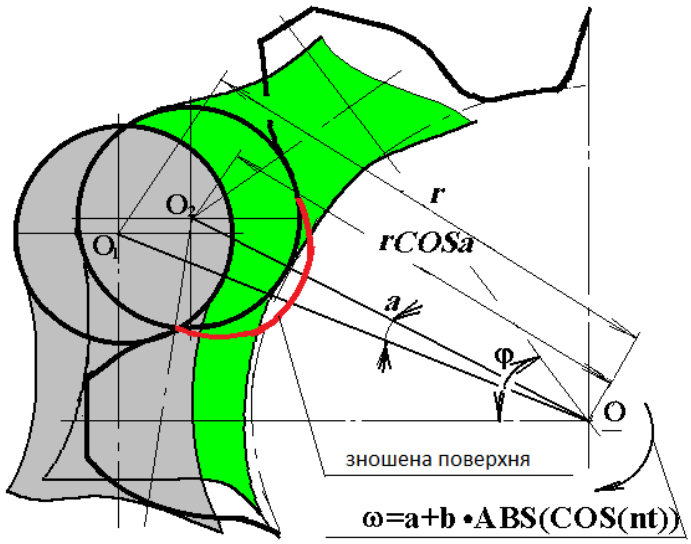


Рис. 4 – Схема до обґрунтування коливань в ланцюговій передачі (*удосконалено авторами як продовження власних досліджень з* (*Бурлака & Яхін, 2017; Бурлака & Яхін, 2018*))

Розглянемо рівняння (1) руху зерна по скребку елеватора комбайна при відцентровому розвантаженні з урахуванням коливань кутової швидкості:

$$x''+\left(k+2f\underline{\omega}\right)x'-\underline{\omega}^2x=g\left[\sin\left(\underline{\omega}t\right)+f\cos\left(\underline{\omega}t\right)\right], \tag{4}$$

де $\underline{\omega}$ – функція від t, $\underline{\omega}=a+bABS\left(\cos\left(nt\right)\right)$. Для вирішення рівняння (4) використаємо метод Лагранжа (*Бурлака & Яхін, 2017*). Загальну систему рішень представимо у вигляді:

$$X\left(t\right)_{заг}=C_1\left(t\right)Z_1+C_2\left(t\right)Z_2, \tag{5}$$

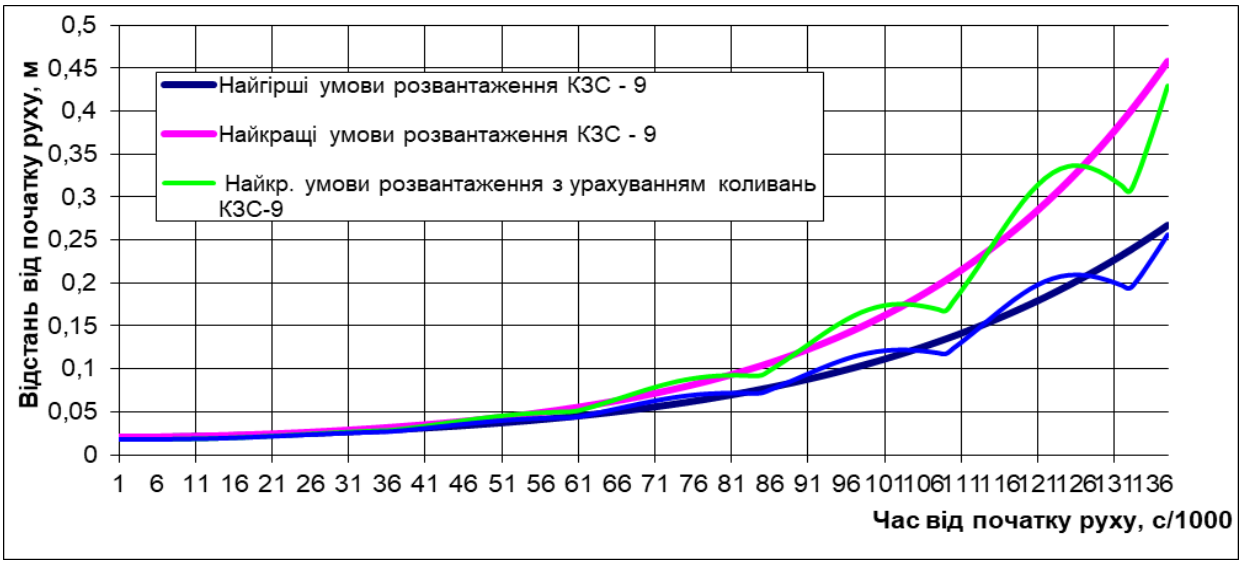
де $C_1\left(t\right)$ та $C_2\left(t\right)$ – функції від часу руху t, що треба визначити, тоді:

$$X_{заг}(t)=\int\frac{-g\sqrt{1+f^2}\sin(\psi+\gamma-\underline{\omega}t)}{e^{\chi 1t}\left(tbnABS\left[\sin(nt)\right]\dfrac{4fk+8f^2\underline{\omega}+8\underline{\omega}^2}{\sqrt{(k+2f\underline{\omega})^2+4\underline{\omega}^2}}+\sqrt{(k+2f\underline{\omega})^2+4\underline{\omega}^2}\right)}dte^{\lambda 1t}+$$

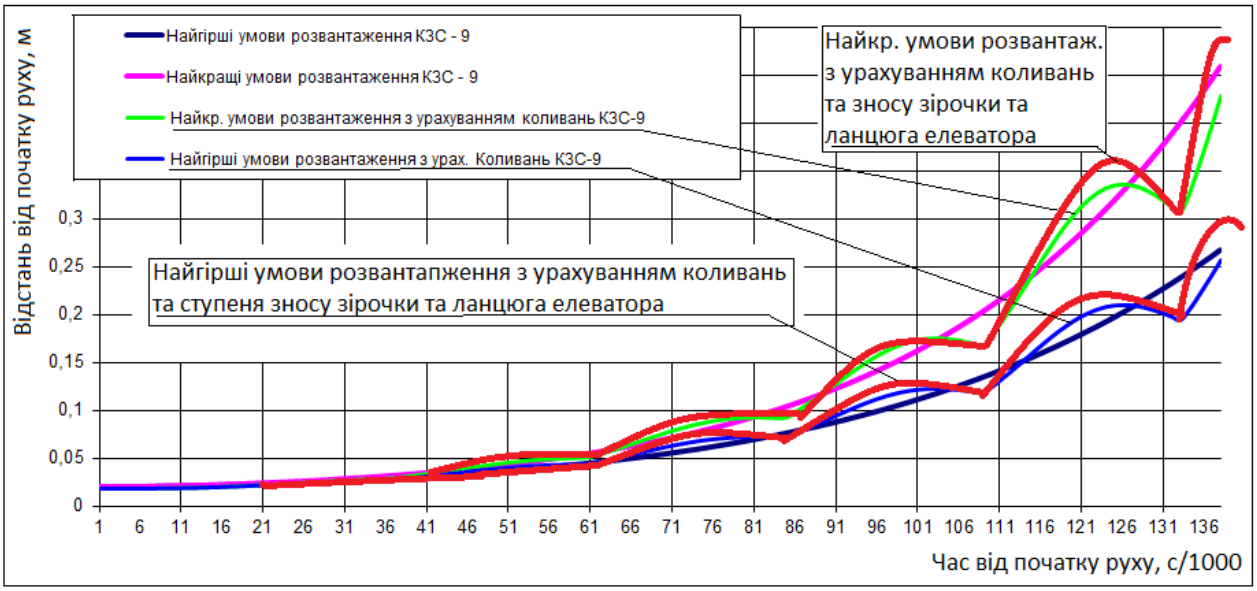
$$+\int\frac{g\sqrt{1+f^2}\sin(\psi+\gamma-\underline{\omega}t)}{e^{\chi 2t}\left(tbnABS\left[\sin(nt)\right]\dfrac{4fk+8f^2\underline{\omega}+8\underline{\omega}^2}{\sqrt{(k+2f\underline{\omega})^2+4\underline{\omega}^2}}+\sqrt{(k+2f\underline{\omega})^2+4\underline{\omega}^2}\right)}dt+ \tag{6}$$

$$+C_1e^{l_1t}+C_2e^{l_2t}$$

Рівняння (6) описує рух зернини по скребку елеватора при будь-яких додатних функціях $\underline{\omega}=f(t)$, що характеризують нерівномірність обертання верхньої ведучої зірочки. Графічна інтерпретація розв'язку подана на **рис 5**. Додатково змодельована ситуація, коли знос привідної зірочки збільшує амплітуду коливань в ланцюговій передачі.



а



б

Рис. 5 – Діаграма руху порції зерна по скребку елеватора, розрахована на прикладі конструктивних параметрів комбайна КЗС-9 «Славутич» (*удосконалено авторами як продовження власних досліджень з* (*Бурлака & Яхін, 2017; Бурлака & Яхін, 2018*)):

(а) – варіант для нової зірочки та ланцюга; (б) – порівняльний варіант нових та зношених елементів робочих органів елеватора комбайна

Зазначимо:

- ступінь нерівномірності руху зерна по скребку збільшується за експоненціальною залежністю за умови віддалення зерна відносно центру обертання привідного валу зірочки елеватора;
- діапазон варіації коефіцієнтів тертя $(f = 0,3\ldots0,5)$ та коефіцієнтів опору повітря $(k = 0,07\ldots0,15)$ є визначним щодо кращих та гірших умов відцентрового розвантаження зерна (**рис. 3**);
- ступінь зносу робочих поверхонь приводної зірочки у верхній частині зернового елеватора комбайна КЗС-9-1 призводить до більш виражених коливальних навантажень та збільшення відстані OO_1 (**рис. 4**).

Експериментальна перевірка теоретичних тверджень нами була здійснена на спеціально спроектованій установці (*Бурлака & Слинько, 2009; Бурлака & Слинько, 2010*). При цьому досліджувалась ступінь впливу зносу робочих органів скребкового елеватора на якість транспортування зерна за рахунок вимірювання величини зворотного сипу зерна, спостерігалось збільшення зворотного сипу у 1,5…2 рази по досяганню граничного зносу приводної зірочки скребкового ланцюга елеватора.

В якості перспектив подальших досліджень в такому напрямку рекомендовано проводити на моделях комбайнів СКІФ та скребкових елеваторах зернопереробної галузі.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень нами рекомендовано:

1. Використовувати нові конструкційні матеріали, в тому числі і композити, для виготовлення як приводної зірочки, так і безпосередньо самого скребкового ланцюга зернового елеватора. В такому напрямку бажано рухатись шляхом зменшення кроку ланцюга, використовувати більш міцні матеріали ланок ланцюга.
2. Упровадити комп'ютеризовану систему безпосереднього спостереження за зміною зворотного сипу в зерновому елеваторі з використанням швидкісних відеокамер та датчиків-витратомірів. Останнє дасть змогу вчасно здійснювати ремонт, технічне обслуговування та технологічну наладку елементів зернової групи молотарки комбайна.
3. Застосовувати електропривод та електронне регулювання швидкості транспортування зерна скребковими елеваторами відповідно до ступеню завантаження зернової групи в межах діапазону виконання умови відцентрового розвантаження.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Burlaka, O. A., Yakhin, S. V., Padalka, V. V., & Burlaka A. O. (2021). 100 Tons per hour, what is next? Let us compare and analyze characteristics of the latest models of highly productive combine harvesters. *Scientific Progress & Innovations*, *3*, 274–288. https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34

Imelda, & Hidayat, R. (2024). Climate change impacts, adaptation and mitigation in the agricultural sector. *Global Journal of Environmental Science and Management, 10*(3), 1457–1476. https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.30

Krajewski, S., Žukovskis, J., Gozdowski, D., Cieśliński, M., & Wójcik-Gront, E. (2024). Evaluating the Path to the European Commission's Organic Agriculture Goal: A Multivariate Analysis of Changes in EU Countries (2004–2021) and Socio-Economic Relationships. *Agriculture*, *14*(3), 477. https://doi.org/10.3390/agriculture14030477

Артьомов, М. П., Мельник, В. І., Качанов, В. В., Харченко, С. О., Анікєєв, О. І., Циганенко, М. О., Сировицький, К. Г., Цехмейструк, М. Г., Калюжний, О. Д., Романашенко, О. А., Гаєк, Є. А., Панкова, О. В., Чигрина, С. А., & Ільїна, Н. О. (2022). *Технологічна блочно-варіантна система машиновикористання в землеробстві України: монографія. Частина 2 «Комплекси машинно-тракторних агрегатів в рослинництві України та їх енергоємність» (Technological block-variant system of machine use in agriculture of Ukraine: monograph. Part 2 "Complexes of machine-tractor units in crop production of Ukraine and their energy intensity")*. Харків: ТОВ «Планета-прінт».

Бурлака, О. А., & Яхін, С. В. (2017). Теоретичні аспекти процесу відцентрового розвантаження зерна у елеваторі зернозбирального комбайну (*Theoretical aspects of the process of centrifugal unloading of grain in the elevator of a combine harvester*). *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, *1-2*(84-85), 139–143.

Бурлака, О. А., & Яхін, С. В. (2018). Підвищення ефективності роботи скребкових елеваторів з відцентровим типом розвантаження (*Increasing the efficiency of scraper elevators with centrifugal unloading type*). *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, *4*, 195–200. https://doi.org/10.31210/visnyk2018.04.31

Бурлака, О.А., & Слинько, О.П. (2010). Установка для дослідження технологічних процесів елеватора комбайна (*Installation for researching technological processes of a combine elevator*). Патент України 91783. Київ: Державний департамент інтелектуальної власності.

Бурлака, О.А., & Слинько, О.П. (2009). Спосіб дослідження технологічних процесів (*Method of researching technological processes*). Патент 41557. Київ: Державний департамент інтелектуальної власності.

Ляшук, О.Л., Гевко, Р.Б., Дзюра, В.О., Кирик, О.М., & Довбиш, А.П. (2019). *Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання: монографія* (*Creation and modernization of transport and technological mechanisms of machines and equipment: monograph*). Тернопіль: ТНТУ.

Погорілий, Л., Івасюк, В., & Соломаха, О. (2002). До практичної реалізації моніторингу ґрунтів у системі точного землеробства (*Towards the practical implementation of soil monitoring in the precision agriculture system*). *Техніка АПК*, *10-11*, 8−9.

JUSTIFICATION OF THE LIST OF FACTORS FOR SELECTING A WEEDING ROBOT MODEL

A. Mykhailov

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
AM
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
weeds,
robot,
expert evaluation,
factors,
weed control methods

Article history:
Received 03.07.2025
Accepted 01.10.2025

****Corresponding author:***
a.o.mykhailov@nuwm.edu.ua

ABSTRACT

The problem of weeds is one of the most pressing issues in modern agriculture. Traditional technologies, which involve the use of large amounts of chemical agents, have become a serious threat to global ecological systems. Moreover, some weed species have developed resistance to various herbicides, reducing the effectiveness of chemical control measures. This situation necessitates the adoption of innovative approaches to organizing technological processes for efficient weed elimination. Analysis of current research has shown that the global scientific community considers the introduction of robotics in agriculture a highly promising and relevant direction for further development. The deployment of robots in agriculture in countries such as the United States, the Netherlands, and China already contributes to resolving multiple pressing problems. Specifically, it allows farmers to reduce production costs, address labor shortages, maintain consistently high product quality, and improve overall working conditions. Considering these factors, the National University of Water and Environmental Engineering conducts applied scientific projects aimed at developing and testing robots for various agricultural tasks. The author has carried out a series of works on developing a specialized robot for targeted weed removal. This article presents the results of analyzing current research focused on designing and implementing advanced technologies for weed detection and control based on robotic systems. The analysis serves as the foundation for the conceptual design of a practical robot model. Additionally, the article outlines the results of expert evaluation of key factors determining the choice of a weeding robot for a specific agricultural enterprise. Effective selection of a robot for a particular farm requires a systematic scientific approach to organizing the weed elimination process, considering all quantitative and qualitative factors, many of which may not directly depend on the manufacturer. The results obtained can be used by agricultural producers to make a well-justified choice of robot and efficiently organize weeding technologies in a sustainable and productive manner.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1891

To cite this article:
Mykhailov A. (2025). Justification of the List of Factors for Selecting a Weeding Robot Model. *Agricultural Machines*, *51*, 15-23. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1891

УДК 62-1:631.3

ОБГРУНТУВАННЯ ПЕРЕЛІКУ ФАКТОРІВ ДЛЯ ВИБОРУ МОДЕЛІ РОБОТА – ПРОПОЛЮВАЧА БУР'ЯНІВ

А.О. Михайлов

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
бур'яни,
робот,
експертне оцінювання,
фактори,
способи боротьби з бур'янами.

Історія публікації:
Отримано 03.07.2025
Затверджено 01.10.2025

Автор для листування:*
a.o.mykhailov@nuwm.edu.ua

АНОТАЦІЯ

Проблема бур'янів є однією з актуальних для сільського господарства. Традиційні технології, які передбачають застосування великої кількості хімічних речовин, стали загрозою для світових екологічних систем. Крім того, деякі види бур'янів розвинули стійкість до ряду гербіцидів. Все це вимагає запровадження інноваційних підходів до організації технологічних процесів знищення бур'янів. Аналіз чинних досліджень виявив, що світова наукова спільнота рахує запровадження робототехніки в галузь сільського господарства перспективним й актуальним напрямком його подальшого розвитку. Запровадження роботів у сільському господарстві у США, Нідерландах, Китаї вже на даний час сприяє вирішенню ряда проблем. Зокрема, дозволяє аграріям скорочувати виробничі витрати, вирішувати проблему дефіциту робочих рук, забезпечує стабільно високі показники якості продукції, сприяє поліпшенню умов праці робітників. З урахуванням зазначеного у Національному університеті водного господарства та природокористування проводяться науково – прикладні роботи, спрямовані на розробляння та випробування роботів для виконання різних видів сільськогосподарських робіт. Автором проведено ряд робіт із розробляння робота для прополювання бур'янів. У статті представлено результати аналізу чинних досліджень, спрямованих на розробляння та запровадження новітніх технологій в галузі виявлення та боротьби з бур'янами, які базуються на застосуванні роботів. Проведений аналіз буде покладено в основу концептуального проєктного рішення моделі робота. Також викладено результати експертного оцінювання факторів, які визначають вибір моделі робота – прополювача для конкретного сільськогосподарського підприємства. Ефективний підбір робота для конкретного господарства вимагає системного наукового підходу до організації самого процесу знищення бур'янів. Необхідно враховувати всі кількісні та якісні фактори, які не завжди залежать від виробника.

Отримані результати можуть бути використані аграрними виробниками для обґрунтованого вибору робота й ефективної організації технологій прополювання.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1891

Цитувати цю статтю:
Михайлов А.О. (2025). Обгрунтування переліку факторів для вибору моделі робота – прополювача бур'янів. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 15-23. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1891

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сільське господарство – одна з перспективних галузей економіки України. Враховуючі зростання кількості населення планети, а отже й потреб у продуктах харчування, сільськогосподарське виробництво потребує постійних інноваційних змін. Запровадження робототехнічних засобів – є перспективним напрямком підвищення ефективності аграрного виробництва.

Роботизація сільського господарства у таких країнах, як США, Нідерланди, Китай вже на даний час дозволяє комплексно вирішувати проблеми скорочення виробничих витрат, забезпечення стабільно високої якості продукції, поліпшення умов праці робітників, забезпечення зростання обсягів виробництва, збільшення технологічної гнучкості виробництва, скорочення виробничих відходів та збільшення виходу продукції, забезпечення відповідності вимогам техніки безпеки та підвищення якості охорони праці, скорочення плинності під час персоналу ресурси, незавершене виробництво), економія виробничих площ (*Kushwaha, H. et al.,2020; Zhao, X. et al.,2024; Sparrow, R., Howard M., 2021; Moshayedi, Ata Jahangir et al.,2024*).

Також роботизація сільськогосподарського виробництва сприяє мінімізації впливу суб'єктивного фактору на процеси управління технологічними операціями та управління парком сільськогосподарської техніки.

Однак впровадження робототехніки в сільське виробництво на даному етапі утруднюється через відсутність теоретичних розробок з даної проблеми, недостатньої вивченості доцільності впровадження та ефективності використання робототехніки в порівнянні з традиційними засобами виробництва, відсутності методик із підбору, впровадження, експлуатації робототехніки. Цим пояснюються актуальність теми дослідження.

Сільськогосподарська робототехніка вважається однією з найскладніших галузей у сфері робототехнічних досліджень через численні виклики, пов'язані з особливостями місцевості, культур і навколишнього середовища. З цим пов'язані різноманітні підходи авторів до досліджень даного виду техніки.

Так автори (*Martin, T., Gasselin, P., Hostiou, N. et al, 2022)* називають роботів у сільському господарстві революцією в сільському господарстві.

Ряд авторів аналізують процес запровадження роботів у сільському господарстві в сенсі впливу даного процесу на ринок праці (*Gallardo RK, Sauer J., 2018; G. Gebre-senbet, at all, 2023*).

Так у роботі (*Gallardo RK, Sauer J., 2018)* автори аналізуючи функціонування сімейних молочних ферм у Європейських країнах, відмічають постійне зростання середнього розміру стада. Саме даний фактор дослідники називають ключовим для запровадження робототехнічних засобів на фермах.

Нестача робочої сили призводить до залучення сезонних робітників, зокрема мігрантів, для роботи у фермерських господарствах Європейських країн. Запровадження роботів дає можливість зменшити витрати на утримання робочої сили, а також підвищити ефективність виконання робіт (*G. Gebre-senbet, at all, 2023*). Крім того, запровадження роботів приводить до зростання висококваліфікованих робітників у галузі сільського господарства.

На сільськогосподарське виробництво постійно впливають різноманітні фактори: температурний режим, стан ґрунту, кількість опадів, тощо. Роботи, які використовують штучний інтелект та машинне навчання, здатні використовувати дані, що оцінюють дані фактори, в режимі реального часу для збору корисних знань, таких як коли садити насіння, які культури вибрати, яке гібридне насіння вибрати для вищої врожайності, тощо (*M. Javaid at all,2023).*

Використання роботів в аграрному виробництві допомагає у ранньому виявленні шкідників, хвороб та дефіциту поживних речовин на фермах (*M. Javaid at all,2023).*

З урахуванням наукових розробок інженери створюють роботів, які використовують комп'ютерний зір та штучний інтелект для точного моніторингу бур'янів та їх обприскування або прополювання (*A. Khadatkar at all, 2025*).

Так у роботі (*A. Khadatkar at all, 2025*) авторами представлено конструкцію механічного сільськогосподарського робота для прополювання. Схема робота для прополювання просапних культур (WeeRo) подана на рис. 1.

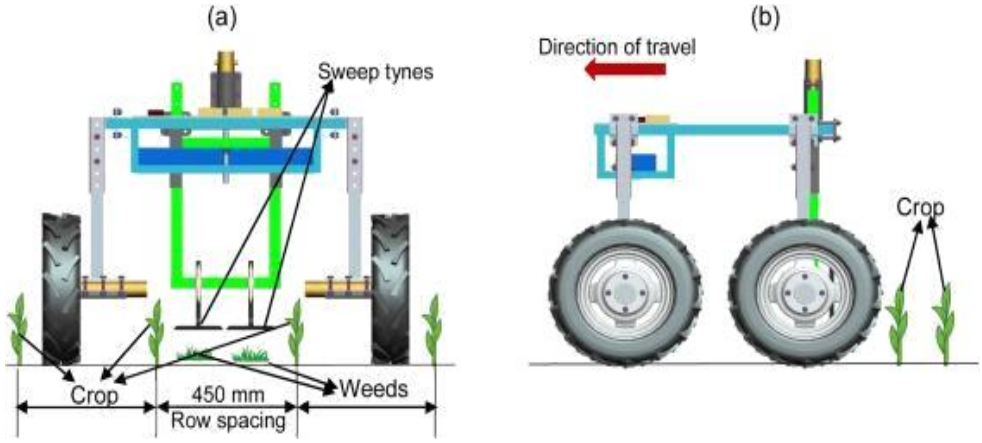


Рис. 1 – Робот WeeRo (*A. Khadatkar at all, 2025*)

Робот, запропонований у роботі (*A. Khadatkar at all, 2025*) дозволяє (відповідно до результатів польових досліджень) досягати ефективності прополювання 81,6% з рівнем пошкодження рослин лише 4,5%. Крім того, робот вирішує проблему нестачі робочої сили в пікові сільськогосподарські періоди, пропонуючи надійну та ефективну альтернативу боротьбі з бур'янами.

Ряд дослідників спрямовували свою роботу на питанні екологічного контролю бур'янів за рахунок використання роботів (*A. Khadatkar at all, 2025; A. C.N. Merfield, 2016; C.N. Merfield, 2023; C. MacLaren at all, 2020; R. Raja at all, 2023; L. Quan at all, 2022; J. Machleb at all,2020).*

Автори (*R. Raja, 2023)* базуючись на ідеї зменшення залежності від хімічних гербіцидів, мінімізації витрат на оплату праці та обмеження негативного впливу на навколишнє середовище, розробили інтелектуальну механічну роботизовану систему внутрішньорядного прополювання, засновану на глибокому навчанні для виявлення культур та бур'янів (рис.2). Проведено польові випробування розробленої роботизованої системи, яка вибірково знищувала бур'яни. Ефективність знищення становила 98%.

Як показав аналіз чинних досліджень, вчені значну увагу приділяють розробляннюінноваційних підходів до механічного роботизованого видалення бур'янів (*L. Petrich at all, 2022; D.S. Paraforos at all,2022*).

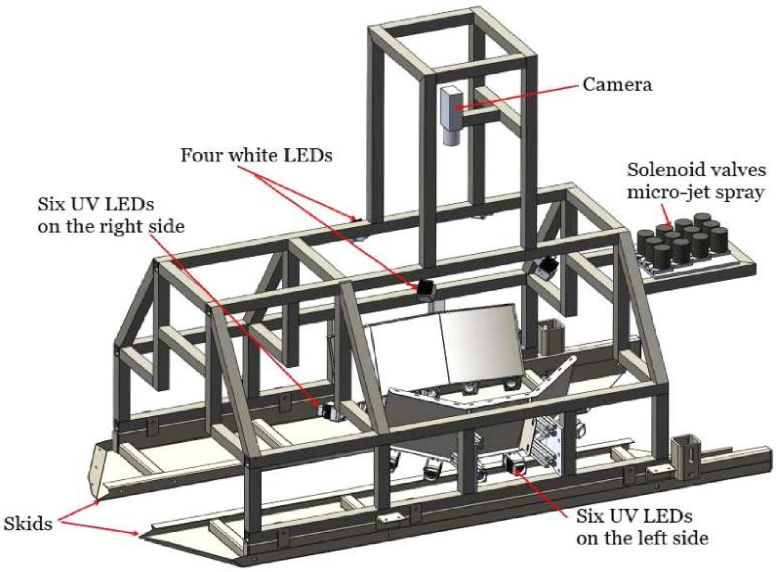


Рис. 2 – Мікроструминний розпилювач Raja (*R. Raja at all, 2023*)

Перспективність методу механічної боротьби з бур'янами відмічена в роботі (*L. Quan at all, 2022*), особливо для органічного землеробства. У роботі викладено результати досліджень внутрішньорядного прополювання, заснованого на глибокому навчанні для виявлення культур та бур'янів. На основі результатів глибокого навчання було запропоновано цільову схему прополювання. Крім того, авторами запропоновано три види ножів для боротьби з бур'янами. Польові випробування показали, що найкращі результати отримано за умови використання клиноподібного ножа для прополювання. Коефіцієнт видалення бур'янів становив 85,91%, а коефіцієнт пошкодження посівів – 1,17%. Результати продемонстрували доцільність запропонованого методу боротьби з бур'янами в рядках.

Слід відмітити також, що одним з популяярних напрямків дослідження є розробляння систем, які дозволяють точно виявляти та ідентифікувати бур'яни та культурні рослини на полі. Процес ідентифікації складається зі збору наборів даних, підготовки наборів даних, алгоритмів цифрової обробки зображень. При цьому вирішуються наступні проблеми: диференціація бур'янів від посівів, які мають схожий зовнішній вигляд; розпізнавання окремої рослини при значному їхньому скупченні (*Li N, Zhang X, Zhang C, Ge L, He Y, Wu X., 2019; N. Hussain et all, 2020*).

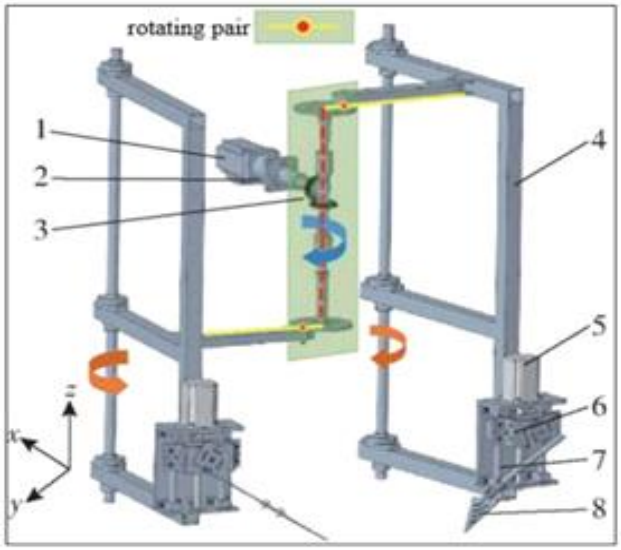


Рис. 3 – Модель конструкції для внутрішньорядного прополювання: 1- серводвигун, 2- редуктор, 3- вісь оптична, 4 –опора, 5 – гвинтовий кроковий двигун, 6- редуктор, 7 - повзун, 8 – робочий орган (*L. Quan at all, 2022*).

У роботі (*L. Petrich at all, 2022*) викладено результати випобувань розробленого роботизованого обладнання, яке навішується на трактор. Авторами доведено, що навісне роботизоване обладнання добре підходить для застосування на полях, де є значні скупчення бур'янів.

Рис. 4 – Роботизоване обладнання (*L. Petrich at all, 2022*)

Як бачимо, розробляння й запровадження роботів у сільськогосподарському виробництві, зокрема з метою знищення бур'янів, є актуальним в умовах сучасності.

Роботи викликають значний інтерес як агрохолдингів, так й фермерів. Але для вибору робота потрібно розуміти на які особливості потрібно звертати увагу щоб обрати модель, яка буде найбільш ефективною для конкретного господарства. З урахуванням цього сформуємо мету нашої роботи.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ – аналіз факторів, які найбільшим чином впливають на вибір робота – прополювача на основі системного аналізу процесу знищення небажаної рослинності.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Ефективний підбір робота для конкретного господарства вимагає системного наукового підходу до організації самого процесу знищення бур'янів. Необхідно враховувати всі кількісні та якісні фактори, які не завжди залежать від виробника.

Першим етапом дослідження стала експертна оцінка ключових факторів, що впливають на ефективність роботи робота.

З урахуванням рекомендацій, викладених у спеціальній літературі, була сформована експертна група (*Г.М. Гнатієнко., В.Є. Снитюк, 2008*) До її складу увійшли 12 експертів: 4 викладачі, 9 представників аграрних підприємств.

Технологія експертної оцінки включала в себе кілька етапів:

- формулювання мети експертного аналізу;
- формування експертної групи;
- розробка процедур та експертної оцінки;
- отримання результатів;
- обробка результатів та аналіз отриманих даних;
- визначення ступеня досягнення мети експертної оцінки.

Експертам було запропоновано проаналізувати наступні фактори: спосіб знищення бур'янів, технології для розпізнавання бур'янів, тип двигуна, продуктивність роботи, маса робота, час автономної роботи, екологічність, грунтово – метеорологічні умови.

Для обробки індивідуальних експертних висновків використано метод ранжирування - розташування факторів у порядку зростання або спадання. Метод ранжирування дозволяє вибрати найбільш важливі з набору факторів або параметрів, які були вивчені. Отриманий ранжований список називається ранжируваним списком, де ранг найбільш важливого показника дорівнює 1, а ранг найменш важливого показника дорівнює числу n. Перевагою методу є його простота. Відповіді експертів усереднюються для отримання узагальненої оцінки групи експертів. Найчастіше для цього використовуються середні значення.

Середнє арифметичне рейтингів, присвоєних об'єктів:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^{m} x_j}{m}, \bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^{m} x_j}{m}, \quad (1)$$

де $\bar{X}$ - середнє арифметичне балів експертної групи;

x_j- оцінка *j* експерта.

Точність оцінок' експертів визначалася ступенем збігу думок експертів. Коефіцієнт узгодженості розраховувався за формулою

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3-m)}, W = \frac{12S}{n^2(m^3-m)}, \quad (2)$$

де S - сума квадратів відхилень кількості рейтингів або переваг кожного фактора від середнього значення; *n* - кількість експертів; *m*- кількість факторів для оцінки.

Сума квадратів відхилень від середньої арифметичної

$$S = \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m} x_{i,j} - \bar{x}\right)^2, S = \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m} x_{i,j} - \bar{x}\right)^2, \quad (3)$$

де x_{ij} - кількість рангів, присвоєних *j* експертом *i* фактору;

$\bar{X}$ - середнє арифметичне ранжирування.

Результати експертного рейтингу представлені нижче (табл.1).

Узгодженість результатів оцінювалась за (2) і становила 0,78, що вказує на узгодженість'думок експертів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Систематизуємо зміст перших трьох факторів, визначених експертами як такі, що надають найбільший вплив на вибір моделі робота для здійснення технологічного процесу знищення бур'янів.

1. Спосіб знищення бур'янів.

Розглянемо переваги та недоліки способів боротьби з бур'янами, що застосовуються робототехнічними системами.

Традиційний спосіб– механічний. Даний спосіб передбачає фізичний вплив на бур'яни з метою їхнього руйнування. При цьому застосовують різноманітні методи, наприклад, скошування, зрізання, обробіток ґрунту, тощо.

Перевагами застосування методу є зменшення використання хімічних гербіцидів, що особливо важливо в органічному землеробстві. Крім того, застосування роботів дозволяє вирішити проблему нестачі робочої сили. Так, зокрема, у (L. Shang *at all, 2023*) авторами встановлено, що роботи для механічного прополювання можуть зменшити використання робочої сили на 85% та 60% в органічному вирощуванні цукрових буряків та моркви. Але слід враховувати, що роботи оснащені такими інструментами, як граблі та роторні леза, може привести до значного порушення ґрунтів, що призводить до ерозії (L. Shang *at all, 2023*). Застосування таких роботів ефективне за потреби знищувати бур'яни з глибоким корінням (L. Shang *at all, 2023*).

Другий поширений спосіб – це хімічне знищення бур'янів, який передбачає використання використання хімічних речовин. До переваг даного методу можна віднести те, що він дає можливість знищувати широкий спектр бур'янів і тим самим, забезпечують порівняно високу продуктивність виконання технолологічного процесу прополювання. **Таблиця 1.**

Точна подача гербіциду значним чином дозволяє зменшити витрату хімічних речовин і зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Одним із іноваційних способів знищення бур'янів із застосуванням роботів є лазерна обробка небажаної рослинності. Лазерний спосіб рекомендований для застосування в умовах органічного землеробства, оскільки не передбачає використання хімічних речовин. Крім того, лазер не порушує структуру ґрунту. Роботи, які використовують лазер, не рекомендовані до використання на полях, де домінують бур'яни з глибоким корінням та товстим стеблом.

Відомими є роботи, які використовують гаряче повітря або воду для знищення бур'янів (*A. Thakur, S. Venu, M. Gurusamy, 2023*), а також полум'я (*M.J. Mia at all, 2020*). Згідно (*A. Thakur, S. Venu, M. Gurusamy, 2023; M.J. Mia at all, 2020*) термічні методи дозволяють порушує клітинну структуру рослин бур'янів, що призводить до їх зневоднення, в'янення та, зрештою, загибелі. Недоліками є: висока енергоємність; не можливість знищення глибоко вкорінених або багаторічних бур'янів; високі експлуатаційні витрати; можливі пошкодження культурних рослин; значні витрати води або пари.

2. Технології для розпізнавання бур'янів.

Під час вибору робота слід приділяти особливу увагу характеристикам систем, які призначені для диференціації бур'янів на полі. Від точності виявлення бур'янів залежить ефективність їхнього знищення, об'єм використаних ресурсів; пошкодження врожаю культур. Для виявлення бур'янів використовують: різноманітні датчики, мультиспектральні, гіперспектральні, інфрачервоні камери; машинне навчання; LiDAR.

Використання мультиспектральних камер дозволяє забезпечувати високу точність ідентифікації бур'янів. Крім того, вони є значно дешевшими ніж гіперспектральні камери, які здатні вирізняти небажану рослинність в умовах щільного переплетення її з культурними рослинами.

Роботи, інтегровані з машинним зором та методами глибокого навчання, забезпечують найбільш точну ідентифікацію бур'янів, що дозволяє цілеспрямовано та ощадно використовувати гербіциди.

3. Ґрунтово – метеорологічні умови.

Типи ґрунтів і метеорологічні умови визначають вид культур, які вирощують у господарствах. Від цього, в свою чергу, залежить щільність посівів, а також види бур'янів, які переважають на полях. Щільність посівів буде впливати на точність виявлення бур'янів, що потрібно враховувати при виборі складу систем для виявлення небажаної рослинності, встановлених на роботах.

На вибір способу знищення бур'янів також впливає рельєф місцевості.

На точність роботи камер та датчиків впливають погодні умови, які переважають у тій чи іншій місцевості.

ВИСНОВОК

Виконано аналіз факторів, які впливають на вибір моделі робота прополювача, з метою найбільш ефективної організації технологічного процесу знищення небажаної рослинності на полях конкретних господарств.

Результати дослідження з використанням експертного аналізу дозволили зробити наступний висновок: вибір моделі робота – прополювача необхідно здійснювати з урахуванням наступних факторів: спосіб знищення бур'янів, технології для розпізнавання бур'янів, тип двигуна, продуктивність роботи, маса робота, час автономної роботи, екологічність, ґрунтово – метеорологічні умови. Причому найбільш значущими серед них є: спосіб знищення бур'янів, технології для розпізнавання бур'янів, ґрунтово – метеорологічні умови.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Sujit, P. B., Agrawal, R., Vishwanath, K., Sawant, C. P., Magar, A. P., & Chaudhary, V. P. (2025). WeeRo: Design, development and application of a remotely controlled robotic weeder for mechanical weeding in row crops for sustainable crop production. Results in Engineering, 26, 105–202. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105202

Gallardo, R. K., & Sauer, J. (2018). Adoption of labor-saving technologies in agriculture. Annual Review of Resource Economics, 10, 185–206. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023018

Gebresenbet, G., Bosona, T., Patterson, D., & Persson, H. (2023). A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems. Smart Agricultural Technology, 5, 100–255. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100255

Kushwaha, H. (2020). Robotic and mechatronic application in agriculture. RASSA Journal of Science for Society, 1(3), 89–97.

Li, N., Zhang, X., Zhang, C., Ge, L., He, Y., & Wu, X. (2019). Review of machine-vision-based plant detection technologies for robotic weeding. In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2370–2377.

Machleb, J., Peteinatos, G. G., Kollenda, B. L., Andújar, D., & Gerhards, R. (2020). Sensor-based mechanical weed control: Present state and prospects. Computers and Electronics in Agriculture, 176, 105–638. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105638

MacLaren, C., Storkey, J., Menegat, A., Metcalfe, H., & Research, R. (2020). An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment: A review. Agronomy for Sustainable Development, 40(4). https://doi.org/10.1007/s13593-020-00631-6

Martin, T., Gasselin, P., Hostiou, N., et al. (2022). Robots and transformations of work in farm: A systematic review of the literature and a research agenda. Agronomy for Sustainable Development, 42, 66. https://doi.org/10.1007/s13593-022-00796-2

Merfield, C. N. (2016). Robotic weeding's false dawn? Ten requirements for fully autonomous mechanical weed management. Weed Research, 56(5), 340–344. https://doi.org/10.1111/wre.12217

Merfield, C. N. (2023). Could the dawn of Level 4 robotic weeders facilitate a revolution in ecological weed management? Weed Research, 63(2). https://doi.org/10.1111/wre.12570

Mia, M. J., Massetani, F., Murri, G., & Neri, D. (2020). Sustainable alternatives to chemicals for weed control in the orchard – A review. Horticultural Science, 47(1), 1–12. https://doi.org/10.17221/29/2019-HORTSCI

Mohd Javaid, A., Haleem, A., Khan, I. H., & Suman, R. (2023). Understanding the potential applications of artificial intelligence in agriculture sector. Advanced Agrochem, 2(1), 15–30. https://doi.org/10.1016/j.aac.2022.10.001

Moshayedi, A. J., Khan, A., Yang, Y., Hu, J., & Kolahdooz, A. (2024). Robots in agriculture: Revolutionizing farming practices. EAI Endorsed Transactions on AI and Robotics, 3, 1–23. https://doi.org/10.4108/airo.5855

Paraforos, D. S., Aube, C., Athanasakos, L., Avgoustakis, I., Baron, S., Bresilla, T., Fountas, S., Hemming, J., Karagiannis, P., Mylonas, N., Nieuwenhuizen, A. T., Garcia, F. R., Pavlenko, T., Scovill, A., Sharipov, G. M., Vidal, J., & Van Evert, F. K. (2022). Connecting agricultural robots and smart implements by using ISO 11783 communication. IFAC-Papers OnLine, 55, 200–205. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.139

Petrich, L., Lohrmann, G., Martin, F., Stoll, A., & Schmidt, V. (2022). Model-based scenario analysis for effective site-specific weed control on grassland sites. Computers and Electronics in Agriculture, 202, 107–332. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107332

Quan, L., Jiang, W., Li, H., Li, H., Wang, Q., & Chen, L. (2022). Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode. Biosystems Engineering, 216, 13–31. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.019

Raja, R., Slaughter, D. C., Fennimore, S. A., & Siemens, M. C. (2023). Real-time control of high-resolution micro-jet sprayer integrated with machine vision for precision weed control. Biosystems Engineering, 228, 31–48. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.02.006

Shang, L., Pahmeyer, C., Heckelei, T., Rasch, S., & Storm, H. (2023). How much can farmers pay for weeding robots? A Monte Carlo simulation study. Precision Agriculture, 24, 1712–1737. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10015-x

Sparrow, R., & Howard, M. (2021). Robots in agriculture: Prospects, impacts, ethics, and policy. Precision Agriculture, 22, 818–833. https://doi.org/10.1007/s11119-020-09757-9

Thakur, A., Venu, S., & Gurusamy, M. (2023). An extensive review on agricultural robots with a focus on their perception systems. Computers and Electronics in Agriculture, 212, 108146. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108146

Zhao, X., Yang, J., Zhong, Y., Zhang, C., & Gao, Y. (2024). Study on chassis leveling control of a three-wheeled agricultural robot. Agronomy, 14, 1765. https://doi.org/10.3390/agronomy14081765

Гнатієнко, Г. М., & Снитюк, В. Є. (2008). Експертні технології прийняття рішень [Expert decision-making technologies]. Київ: Маклаут.

Jiang, W., Quan, L., Wei, G., Chang, C., & Geng, T. (2023). A conceptual evaluation of a weed control method with post-damage application of herbicides: A composite intelligent intra-row weeding robot. Soil Tillage Research, 234. https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105837

Hussain, N., Farooque, A. A., Schumann, A. W., McKenzie-Gopsill, A., Esau, T., Abbas, F., et al. (2020). Design and development of a smart variable rate sprayer using deep learning. Remote Sensing, 12(24), 4091. https://doi.org/10.3390/rs12244091

Таблиця 1
Результати’ експертної оцінки

Фактори	оцінки експертів												сума рейтингу	квадрат відхилень
Бали	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
час автономної роботи	1	1	2	3	1	1	1	2	3	1	1	1	18	1296
ґрунтово – метеорологічні умови	6	5	6	5	5	5	6	6	6	3	5	2	60	36
продуктивність роботи	2	2	1	1	2	3	2	1	1	2	3	3	23	961
спосіб знищення бур’янів	8	7	8	8	8	6	8	7	7	8	7	8	90	1296
екологічність	5	4	5	4	6	7	5	3	5	4	6	4	58	16
технології для розпізнавання бур’янів	7	6	7	6	7	8	7	8	8	7	8	7	86	1024
тип двигуна	3	3	4	7	4	2	3	4	2	5	2	6	45	81
маса робота	4	8	3	2	3	4	4	5	4	6	4	5	52	4
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$\bar{x} = 54$	56856

ANALYSIS OF CREATING A UNIFORM SEED FLOW TO THE FURROW

K. Vasylkovska*

Central Ukrainian National Technical University, м. Kropyvnytskyi, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
AM
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
precise seeding,
coulter,
seed,
soil,
furrow

Article history:
Received 10.07.2025
Accepted 01.10.2025

Corresponding author:*
vasilkovskakv@ukr.net

ABSTRACT

The sowing process must ensure that the seeds are distributed well over the seedbed, thus providing each seed with nutrients and moisture. The initial uniform flow of seeds is created in the seeding unit of the seeder, where the seeds are placed evenly on the seeding element, transported to the discharge zone and directed to the furrow. An important condition for the coulter to work is not only to create a furrow, but also to maintain a uniform flow of seeds and to place individual seeds at the bottom of the furrow at equal distances from each other and to cover them. Therefore, the choice of a coulter in accordance with the chosen cultivation technology of the respective crop and soil and climatic conditions is an important task. Providing seeds with the best conditions for their development is the link that connects high-quality sowing with a good harvest. According to the technological principle, the coulters are divided into three groups: with a sharp, blunt and straight angle of entry into the soil. Coulters with a sharp angle of penetration (anchor and tine coulters) form a furrow by moving the soil layer from the bottom up, resulting in a loose furrow bottom. Ploughshares with an obtuse angle of penetration (keel, skid and disk) create a furrow by pressing the soil layer from top to bottom, thus creating a compacted furrow bottom. Coulters with a straight angle of entry into the soil (tubular) push the soil layers apart, forming a furrow. The main advantages and disadvantages of each type of coulter are analyzed and determined. The possibilities of different cultivation technologies and different soil and climatic conditions are analyzed. To ensure the quality of the sowing process, when choosing the right sowing unit and coulter group, it is necessary to accurately assess the climatic conditions, soil type and its physical and mechanical properties, moisture supply and field topography. The use of continuous and strip sowing will increase sowing productivity due to the higher speed of the sowing unit and preserve moisture in the soil. Therefore, taking into account the above factors, we will be able to choose the right coulter for the appropriate technology for growing a particular crop.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1890

To cite this article:
Vasylkovska, K. (2025). Analysis of Creating a Uniform Seed Flow to the Furrow. *Agricultural Machines*, *51*, 24-33. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1890

УДК 631.331

АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ РІВНОМІРНОГО ПОТОКУ НАСІННЯ ДО БОРОЗНИ

К.В. Васильковська
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
точний висів,
сошник,
насінина,
ґрунт,
борозна

Історія публікації:
Отримано 10.07.2025
Затверджено 01.10.2025

****Автор для листування:***
vasilkovskakv@ukr.net

АНОТАЦІЯ

Процес сівби повинен забезпечити якісний розподіл насіння по площі живлення, забезпечивши таким чином кожну насінину поживними речовинами та вологою. Початковий рівномірний потік насіння створюється у висівному апараті сівалки, де насінини розміщуються рівномірно на висівному елементі, транспортуються до зони скидання і направляються до борозни. Важливою умовою роботи сошника є не тільки створення борозни, а й збереження рівномірного потоку насіння та укладання окремих насінин на дно борозни на рівних відстанях одна від одної і загортання їх. Тому вибір сошника відповідно до обраної технології вирощування відповідної культури та ґрунтово-кліматичних умов є важливою задачею. Надання насінині тих найкращих умов для початку їх розвитку є саме тією ланкою, яка єднає якісний висів із отриманням гарного врожаю. За технологічним принципом сошники поділяються на три групи: з гострим, тупим і прямим кутом входження у ґрунт. Сошника з гострим кутом входження в ґрунт (анкерні та лапові) утворюють борозну за допомогою переміщенням ґрунтового шару знизу вгору, отримуючи пухке дно борозни. Сошники з тупим кутом входження у ґрунт (кілевидні, полозкові та дискові) утворюють борозну вдавлюючи шар ґрунту зверху вниз, таким чином дно борозни виходить ущільненим. Сошники з прямим кутом входження в ґрунт (трубчасті) розсувають ґрунтові шари в сторони, формуючи борозну. Проаналізовано та визначено основі переваги та недоліки кожного типу сошників. Проаналізовано можливості при різних технологіях вирощування та за різних ґрунтово-кліматичних умовах. Для якісного виконання технологічного процесу сівби, обираючи потрібний посівний агрегат та сошникову групу, потрібно точно оцінити кліматичні умови, тип ґрунту та його фізико-механічні властивості, вологозабезпечення та рельєф поля. Використання суцільного та смугового посіву наддасть змогу збільшити продуктивність сівби за рахунок більшої швидкості посівного агрегату та збереже вологу у ґрунті. Тому, зваживши на перераховані фактори, ми зможемо правильно обрати той чи інший сошник під відповідну технологію вирощування тої чи іншої культури.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1890

Цитувати цю статтю:
Васильковська, К. В. (2025). Аналіз створення рівномірного потоку насіння до борозни. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 24-33. https://doi.org/acm.vi51.1890

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасні технології вирощування сільськогосподарських культур передбачають все більше застосування елементів цифровізації. Процес впровадження сучасних інформаційних і комунікаційних технологій для підвищення ефективності та продуктивності сільськогосподарських операцій не можливий без програмування врожайності (*Васильковська та ін., 2016; Васильковська, 2018-1*).

Тому, слід приділити найбільше уваги посіву, так як забезпечення схожості та проростання рослин – є кроком до їх рівномірного проростання і появи сходів рослин в найкоротші терміни, що дозволяє уникнути втрат насіння і, як наслідок, втрат врожаю сільськогосподарських культур (*Botta et al.,2023*).

Врожайність напряму залежить від того, як розвивається посіяна культура, які початкові умови для її зростання складаються на кожному конкретному полі протягом усього періоду вегетації. Тобто врожайність – це підхідна від площі живлення рослини і забезпеченості її вологою та поживними речовинами. Найкраще розміщення насінин забезпечується посівною системою, яка включає себе висівний апарат і елементи загортання насіння (*Морозов та ін., 2013*).

Таким чином, в системі висіву просапних культур важливу роль займає саме точне укладання насінини в борозну. При цьому реалізується головна мета – закладення насінини рівномірно щодо площі її живлення, що є основою для оптимального проростання її та створення однакових умов розвитку для всіх насінин (*Морозов та ін., 2013; Васильковська, 2018-2*).

Для різних культур величина і форма площі живлення на початковому етапі регулюється нормою висіву і способом розміщення насіння в борозні. Нерівномірність посіву призводить до погіршення умов проростання насіння, зміни площі живлення та, як насідок, до зниження польової схожості насіння, що призводить, в кінцевому випадку, до зменшення врожайності насіння (*Войтик, 2018; Зубко та ін., 2016*).

Для обрання тої технології вирощування та висіву насіння слід враховувати кліматичні умови зони вирощування культури, тип та стан ґрунту, погодні умови, форму насіння, якість насіннєвого матеріалу, спосіб сівби, глибину заробки насіння, розподіл насіння за площею живлення, наявність бур'янів та шкідників і хвороб на обраному полі.

Початковий рівномірний потік насіння створюється у висівному апараті сівалки, де насінини розміщуються рівномірно на висівному елементі, транспортуються до зони скидання і направляються до борозни (*Vasylkovska et al., 2014*). Важливою умовою роботи сошника є не тільки створення борозни, а й збереження рівномірного потоку насіння та укладання окремих насінин на рівних відстанях одна від одної на дно борозни і загортання їх.

Закладання насінини у ґрунт є тією завершальною стадією посіву, при якій відбувається початок взаємозв'язку насінини із ґрунтом з метою зміни властивостей насіння та створення умов для проростання його. І саме задача сошника якісно укласти насінину в борозну для подальшого її проростання.

Мета дослідження: провести аналіз існуючих конструкцій сошників для точного висіву, їх ролі в створення однонасіннєвого потоку насіння до борозни для пошуку шляхів усунення їх недоліків та покращення переваг.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В процесі проведення дослідження виконано огляд літературних джерел. На основі аналізу досліджень було встановлено основних функціональних особливостей сошників із різними кутами входження в ґрунт, виявлено переваги та недоліки кожного виду їх конструкцій та запропоновано напрямки їх вдосконалення.

Під час проведення досліджень використано методи аналізу, синтезу, наукової абстракції та комплексного підходу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Збільшення продуктивності сільськогосподарського виробництва неможливе без вдосконалення техніки для посіву, а саме: підвищення якості посіву та стабільності виконання технологічного процесу.

Як відомо, технологічна операція посіву поділяється на дві складові: рівномірна подача насіння висівним елементом від бункера з насінням до сошників та підготовка борозни, укладання насіння в неї і загортання. Тож, частина технологічної операції за яку відповідає сошник є не менш важливою, ніж та за яку відповідає висівний апарат.

При цьому саме сошник відповідатиме за більшу часину дотримання агротехнічних вимог.

За принципом дії сошники поділяються на дві групи: поступального та обертального руху (*Сисолін та ін., 2001*).

За технологічним принципом сошники поділяють три групи: з гострим, тупим і прямим кутом входження у ґрунт (**рис. 1**) (*Сало та ін., 2016; Думич, 2014*).

з гострим кутом	з тупим кутом	з прямим кутом
анкерні	кілевидні	трубчасті
лапові	полозкові	
	дискові	

Рис. 1. – Поділ сошників за кутом входження в ґрунт

Борозна у сошника з гострим кутом входження в ґрунт (анкерні та лапові сошники) утворюється переміщенням ґрунтового шару знизу вгору, таким чином ми отримуємо пухке дно борозни.

Сошники з тупим кутом входження у ґрунт (кілевидні, полозкові та дискові сошники) утворюють борозну вдавлюючи шар ґрунту зверху вниз, таким чином дно борозни виходить ущільненим.

Сошники з прямим кутом входження в ґрунт (трубчасті сошники) розсувають ґрунтові шари в сторони, формуючи борозну.

Виходячи із того, яку саме борозну утворює той, чи інший сошник, створюється необхідна поверхня ложа борозни, що впливатиме на проростання насінини (*Зубко, 2020*).

Будь-який сошник, незалежно від конструктивних особливостей, повинен забезпечувати наступне:

- очищення посівного ложа від органічних залишків;
- укладання насіння у посівний горизонт;
- постійна глибина висіву;
- самоочищення;
- загортання насіння достатньою кількістю вологого ґрунту;
- пристосування до змінних ґрунтових умов;
- наявність захисту від каміння для безперебійної роботи;
- забезпечення оптимальну якість висіву при робочій швидкості до 20 км/год.;
- наявність значного терміну використання та низькі експлуатаційні витрати на обслуговування.

Проаналізуємо переваги і недоліки тих видів сошників, які використовуються на сівалках точного висіву.

Першими роздивимось сошники із гострим кутом входження в ґрунт.

Анкерні сошники є класичними сошниками (**рис. 2а**). Вони розрізають ґрунт, формуючи посівне ложе. Анкерні сошники застосовуються для висіву на полях з якісно проведеною передпосівною підготовкою ґрунту. Завдяки тупому куту входження в ґрунт, анкерні сошники утворюють щільне насіннєве ложе, рівномірно розкладаючи насіння по глибині. Також, ці сошники добре працюють на малих глибинах, що важливо для деяких сільськогосподарських культур. Анкерні сошники є достатньо чутливими до нерівностей поля та стану ґрунту на ньому(*Зубко, 2020; Сало та ін., 2017*).

Накінечник анкерного сошника, зазвичай, виконано змінним із чавуну. Для виконання операції посіву за нульової або стрічкової технології використовуються накінечники особливої форми.

Перевагами таких сошників є простота конструкції та можливість їх використання як для точного висіву, так і для стрічкового посіву.

Недоліком анкерних сошників при неякісні підготовці поля до сівби, насіння може лишатись загорнутим у ґрунт. Крім того, для посіву за нульовою технологією посів обмежений.

а

б

Рис. 2. – Загальний вигляд сошників із гострим кутом входження в ґрунт:
а – анкерний; б – лаповий

В свою чергу, лапові сошники (**рис. 2б**) застосовуються для висіву насіння зернових культур по необробленій стерні на легких ґрунтах, схильних до вітрової ерозії (*Сало та ін., 2022*). Такі сошники слід застосовувати при одночасному розпушенні ґрунту та знищенні бур'янів в якості культиваторів та виконувати посів із внесенням мінеральних добрив.

Лапові сошники бувають для рядкового (стрічкового) та безрядкового посівів.

До недоліків лапових сошників слід віднести погіршення висіву насіння, яке має високий коефіцієнт пружності при падінні з насіннєпровода, зменшуючи, при цьому рівномірність висіву як по площі так і по глибині загортання.

До групи сошників із тупим кутом входження належать наступні сошникі – кілевидні, полозовидні та дискові. (**рис. 3**).

Кілевидні сошники (**рис 3а**) застосовують в основному для висіву насіння на невелику глибину (*Сало та ін., 2022; Сало та ін., 2012*). Такі сошники використовуються в зонах із недостатнім зволоженням. До переваг кілевидних сошників слід віднести дотримання більш стабільної глибини загортання насіння та більш якісного формування борозни із насіннєвим ложем для розміщення насіння.

Ефективно застосовувати кілевидні сошники на ґрунтах добре розпушених для насіння, закладання якого відповідно до агровимог допускається на невелику глибину. Так, кілевидні сошники завдяки тупому куту входження в ґрунт, створюють U- подібне ущільнене дно борозни за рахунок дії сил наральника на ґрунт. В такому випадку, вологий шар ґрунту не виноситься на поверхню і не висушується, причому, дно борозни є ущільненим. Це забезпечує надходження вологи з нижніх шарів ґрунту до насіння, сприяє рівномірному розміщенню насіння по глибині та забезпечує добру польову схожість насіння.

Зазвичай, такі сошники використовуються на зернотукотравяних сівалках для сівби трав, а також можуть бути використані і для сівби зернових культур, глибина загортання насіння яких не перевищує 4 см.

Кілевидні сошники добре працюють на легких за механічним складом ґрунтах. На важких ґрунтах заглибити такі сошники на глибину 6-8 см (сівба озимих) дуже важко. Також, слід зазначити, що кілевидні сошники практично не працюють на засмічених полях, так як забиваються рослинними рештками.

а

б

в

г

Рис. 3. – Загальний вигляд сошників із тупим кутом входження в ґрунт:
а – кілевидний; б – полозковий, в –однодисковий, г – дводисковий

Полозкові сошники (**рис. 3б**) найбільше поширення отримали на сівалках точного висіву просапних, овочевих та олійних культур, де висів вібувається безпосередньо в підготовлений ґрунт і висівний апарат знаходиться прямо над сошником, уникаючи перерозподілу насіння в насіннєпроводах (*Сало та ін., 2012*). Висів в таких посівних системах здійснюється як на малі глибини 1,5-4 см, так і на глибину до 12 см.

Ніж-наральник, щоки і клиновидні полози разом утворюють борозну з ущільненим насіннєвим ложе. Наральник створює борозну, щоки запобігають осипанню стінок, а п'ятка ущільнює дно борозни. Процес загортання насіння в полозковому сошникові відбувається достатньо якісно утворення клиноподібної ущільненої борозни, яка утримує насіння на заданій глибині.

До недоліків притаманним даному виду сошників слід віднести неможливість роботи в умовах нульового посіву та певні труднощі при стрічковім висіві.

Найбільш розповсюдженими в світі є наступний різновид сошників із тупим кутом входження в ґрунт – дискові сошники. Дискові сошники поділяються однодискові (**рис. 3в**) та дводискові (**рис. 3г**).

Робота однодискових сошників подібна до роботи дискової борони. Сошник обертається у ґрунті під кутом 3-7° до напряму руху, що дозволяє під час руху відхиляти пожнивні залишки і верхній шар ґрунту дещо вбік. За диском розташовано борозник, який і утворює посівне ложе, в яке лягає насіння.

Перевагами однодискових сошників є можливість посіву по мульчі, вони добре працюють при нульовій технології обробітку та при стрічковому посіві. Такі сошники потребують мінімального технічного обслуговування і мають достатньо просту конструкцію.

До недоліків слід віднести появу ефекту подвійного ряду, коли ряди можуть наближатись один до одного внаслідок зношування навішування. Для вирішення цієї проблеми сошники встановлюються на трубі, яку можна переміщувати під час регулювання (*Сало та ін., 2022*).

На відміну від однодискових сошників, дводискові мають пару. Диски розташовані поряд та утворюють V-подібне насіннєве ложе. До борозни, яка утворюється таким чином, потрапляє насіння. Зазвичай, парні диски утворюють кут близько 3° по напряму руху (*Сало та ін., 2012; Zeng et al., 2021*).

Чистоту дисків у дводискоивих сошників підтримують скребки, які розташовані позаду дисків, що забезпечує менше зношення та краще очищення дисків з обох сторін.

Слід зазначити, що перевагою дводискових сошників, які і однодискових, є можливість посіву по мульчі. Такі сошники менш чутливі до рослинних решток на полі та неякісно проведеного передпосівного обробітку ґрунту (*Думич, 2014*). Вони показали себе при роботі із нульовою і стрічковою технологією висіву. Також, дводискові сошники мають високу якість укладання насіння в борозну, завдяки центрованому руху сошників.

Найбільшою перевагою дискових сошників являється практично відсутнє налипання вологого ґрунту. Обидві конструкції дискових сошників забезпечують надійний процес посіву в умовах важких та грудкуватих ґрунтів, засмічених рослинними рештками та залишками кореневих систем за достатньо великій швидкості – до 20 км/год.

До недоліків слід віднести нерівномірність глибини загортання насіння те, що дискові сошники не створюють посівної борозенки з щільним насіннєвим ложем. Крім того, дводискові сошники мають більш складну конструкцію в порівнянні з однодисковими сошниками.

Слід зазначити, що дискові сошники можуть бути зубчатими, покращуючи таким чином якість розрізання верхнього шару ґрунту, Крім того, такі диски виготовляються опуклої форми. Перевагою дисків опуклої форми є те, що вони вимагають менше місця, відкидають менше ґрунту, а також дозволяють працювати з вужчими міжряддями (*Aliiev et al., 2024*).

До групи сошників із прямим кутом входження в ґрунт відносяться трубчасті сошники (**рис. 4**).

Трубчасті сошники встановлюються на зернових сівалках для сівби по стерні та ґрунтах, що піддаються вітровій ерозії. Такий сошник має достатньо просту конструкцію та

складається з трубки і наральника, що є його вагомою перевагою. Під час роботи сошник вібрує, що сприяє його самоочищенню (*Сало та ін., 2012*).

До недоліків такого сошника слід віднести те, що глибина загортання насіння не завжди відповідає вимогам.

Рис. 4. – Загальний вигляд сошника із прямим кутом входження в ґрунт - трубчастого

Україна є великою країною із потужним сільським господарствам. В усіх кліматичних зонах є свій набір культур, які культивуються. Із змінами кліматичних умов відбувається поступове зміщення кордонів цих зон. Ті культури, які повсякчас культивувались в зоні Степу, поступово переходять до зони Лісостепу та Полісся, де їм комфортніше (*Vasylkovska et al., 2024*). Тому пошук універсальної технології висіву триває весь час. Чи можна рекомендувати універсальний сошник для всіх типів ґрунтів? Очевидно, що ні. В Україні налічується 39 типів ґрунтів, які включають 91 вид, які істотно відрізняються між собою за фізико-механічними властивостями (*Морозов та ін., 2013*). Однак можлива така конструкція сошника яка забезпечить певну універсальність для певної групи культур в межах обраної технології вирощування.

Із обранням захисних технологій, які вимагають зміни кліматичних умов, слід звернути увагу на долотовидні сошники (**рис. 5**).

Рис. 5. – Загальний вигляд сошника із гострим кутом входження в ґрунт - долотовидного

Долотовидні сошники можуть розпушувати навіть сухий, твердий ґрунт і справляються з товстим шаром мульчі. Використання такої сошникової групи під час посіву надає можливість не проводити ніякого іншого обробітку ґрунту. Сошник має форму частини лапи культиватора і працює на встановленій глибині .

Такі сошники використовуються при смуговій технології обробітку ґрунту з одночасним внесенням добрив. Таким чином, насіння закладається в оброблені смуги, при цьому майбутні паростки будуть забезпечені достатньою кількістю поживних речовин, що сприятиме розвитку здорової кореневої системи. Конструкція дозволяє використовувати високі робочі швидкості і є хорошою альтернативою для великих площ.

Перевагою долотовидних сошників є хороша придатність для посіву по мульчі, висока продуктивність, можливість прямого посіву, проста конструкції машини. Такий висів має також таку перевагу, як боротьба із ерозією та зменшення вимивання ґрунту і збереження вологи.

Таким чином, при обранні того чи іншого сошника потрібно точно оцінити умови роботи, а саме: клімат, тип ґрунт, рельєф. Також, слід обрати технологію обробітку ґрунту та технологію вирощування обраної культури. Після обрання технології, визначаються необхідні добрива та їх дози. Суцільний та смуговий висів дає змогу збільшити продуктивність посіву за рахунок більшої швидкості або кількості агрегатів. Тому, зваживши на перераховані фактори, ми зможемо правильно обрати той чи інший сошник під відповідну технологію вирощування тої чи іншої культури.

ВИСНОВКИ

Для забезпечення найбільш сприятливих умов проростання насіння їх потрібно укладати сошником у борозну з ущільненим дном і закривати зверху рихлим ґрунтом.

Тож слід зазначити, що для обранні потрібного посівного агрегату та сошникової групи в ньому потрібно точно оцінити кліматичні умови, тип ґрунту та його фізико-механічні властивості, вологозабезпечення та рельєф поля. При обранні потрібної технології обробітку ґрунту та відповідної технології вирощування обраної культури, визначаються необхідні для внесення добрива та їх дози. Використання суцільного та смугового посіву надасть змогу збільшити продуктивність сівби за рахунок більшої швидкості посівного агрегату або збільшення їх кількості. Тому, зваживши на перераховані фактори, ми зможемо правильно обрати той чи інший сошник під відповідну технологію вирощування тої чи іншої культури.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Васильковська К.В., Трикіна Н.М., Васильковський О.М. (2016). Точний висів просапних культур крок до програмування врожаю (*Precision sowing of row crops is a step towards crop programming*). *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти, 4.* 88-97.

Васильковська К.В. (2018). Системний аналіз конструкцій пневмомеханічних висівних апаратів для точного висіву насіння просапних культур (*System analysis of pneumomechanical sowing machines for precision sowing of row crop seeds*). *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник, 48,* 22-35. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.22-35

Botta G.F., Romay C., Rivero E.R.D., Ezquerra-Canalejo A., Ghelfi D.G. and Hidalgo R.J. (2023). Quantification of the effects of agricultural machinery traffic on soil and sunflower yields (*Helianthus annuus L.*). *Agriscientia, 40*(2), 23-35. DOI: https://doi.org/10.31047/1668.298x.v40.n2.40953

Морозов І., Макаренко М. (2013). Вибір сошника (*Selecting the coulter*). *Агробізнес сьогодні.* Retrieved February 17, 2025, from https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1013-vybir-soshnyka.html

Васильковська К.В. (2018). Сівалки точного висіву – фаворити ринку (*Precision seeders are market favorites*). *Пропозиція, 2,* 52-57.

Войтик А. (2018). Поради експерта: як правильно вибрати сошник для сівалки? (*Expert advice: how to choose the right coulter for a seeder?*). *Аграрне інформаційне агентство Agravery.* Retrieved February 19, 2025, from https://agravery.com/uk/posts/show/poradi-eksperta-ak-pravilno-vibrati-sosnik-dla-sivalki

Зубко В.М., Сіренко В.Ф., Кузіна Т.В. (2016). Аналіз конструкцій сошників посівних машин (*Analysis of the design of sowing machine coulters*). *Інженерія природокористування, 1*(5), 98-102.

Vasylkovska, K., Vasylkovskyy, O. (2014). The influence of shape and type of sowing disc cells on the seed dosage quality. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6*(7), 33-36. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29272

Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. (2001). *Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування* (*Agricultural machinery: theoretical foundations, construction, design*). К.: Урожай.

Сало В., Гайденко О. (2016). Основні типи сошників для прямої сівби зернових культур (*Main types of coulters for direct sowing of grain crops*). *Агробізнес сьогодні.* Retrieved February 20, 2025, from https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1242-osnovni-typy-soshnykiv-dlia-priamoi-sivby-zernovykh-kultur.html

Думич В. (2014). Сошники на всі випадки (*Coulters for every occasion*). *AgroTimes.* Retrieved February 21, 2025, from https://agrotimes.ua/article/soshniki-na-vsi-vipadki/

Зубко В. (2020). Обґрунтування та вибір агромашин за обраними робочими органами (*Justification and selection of agricultural machines by selected working bodies*). *Інженерія природокористування, 1*(15), 36-43. DOI: https://doi.org/10.37700/enm.2020.1(15).36-43

Сало В., Лузан П. (2017). Дисковий та анкерний сошники для прямого висіву зернових культур (*Disc and anchor coulters for direct sowing of grain crops*). *Пропозиція.* Retrieved February 21, 2025, from https://propozitsiya.com/ua/diskoviy-ta-ankerniy-soshniki-dlya-pryamogo-visivu-zernovih-kultur

Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. (2022). *Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: Навчальний посібник* (*Machines for sowing, planting, and tending crops: Study guide*). – Кропивницький: Лисенко В.Ф.

Сало В.М., Лузан О.Р., Лузан П.Г., Мачок Ю.В. (2012). *Загортаючі робочі органи для прямої сівби зернових культур* (*Sowing tools for direct sowing of grain crops*). – Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф.

Aliiev, E., & Tesliuk, H. (2024). Analytical justifications of constructive parameters of bionic colters for vertical soil treatment. *Machinery & Energetics, 15*(3), 129-139. DOI: https://doi.org/10.31548/machinery/3.2024.129

Zeng Z., Thoms D., Chen Y., & Ma X. (2021). Comparison of soil and corn residue cutting performance of different discs used for vertical tillage. *Scientific Reports, 11*, 2537. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-82270-9

Vasylkovska K., Andriienko O., Malakhovska V., Vasylkovskyi O., Andriienko A. and Shepilova T. (2024). Analysis of effective sunflower cultivation zones using the example of Ukraine. *Agronomy Research*, *22*(3), 1362–1376. DOI: https://doi.org/10.15159/AR.24.097

Зернові сівалки (*Grain seeders*). *BEDNAR*. Retrieved February 26, 2025, from https://www.bednar.com/uk

Артеменко Д. (2023). Дослідження конструкційних параметрів елементів сошника для посіву просапних культур (*Study of the structural parameters of the coulter elements for sowing row crops*). *Науково-технічні дослідження у галузі механічної інженерії та транспорту: колективна монографія.* – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г.М. 72-109.

POTATOES HOME GARDENING FEATURESON USING ATTACHABLE EQUIPMENT OF TWO-WHEEL TRACTOR

R. Kirchuk *, L. Zabrodotska, R. Ferenc
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
potato,
home gardening,
two-wheel tractor,
attachable equipment,
ridge planting method,
yield,
organic fertilizers.

Article history:
Received 23.07.2025
Accepted 01.10.2025

****Corresponding author:***
kirchukruslan@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

The article examines the peculiarities of potato cultivation on household plots using walk-behind tractors and specialized attachments. Modern agricultural technologies, particularly the Dutch ridge planting method, are analyzed and adapted for small-scale farming conditions. Various types of attachments (plows, ridgers, potato planters, rotary tillers, potato diggers, etc.) are described, and the requirements for engine power depending on plot size and soil type are substantiated. The research results demonstrate the efficiency of applying organic fertilizers (manure, green manure crops, straw), which contributed to yield increase and improvement of potato tuber quality indicators. It has been proven that the use of small-scale machinery combined with organic farming practices ensures economic feasibility, environmental safety, and increased labor productivity under the conditions of Western Polissia.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1889

To cite this article:
Kirchuk, R., Zabrodotska, L., & Ferenc, R. (2025). Potatoes Home Gardening Featureson Using Attachable Equipment of Two-Wheel Tractor. *Agricultural Machines*, *51*, 34-47. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1889

УДК 631.319.07

ОСОБЛИВОСТІ ВИРОЩУВАННЯ КАРТОПЛІ НА ПРИСАДИБНИХ ДІЛЯНКАХ З ОБГРУНТУВАННЯМ СИСТЕМИ НАВІСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДО МОТОБЛОКУ

Р. В. Кірчук*, Л. Ю. Забродоцька, Р. Ференц
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
картопля,
присадибні ділянки,
енергетичний засіб,
навісне обладнання,
гребеневий спосіб,
врожайність,
органічні добрива.

Історія публікації:
Отримано 23.07.2025
Затверджено 01.10.2025

Автор для листування:
kirchukruslan@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто особливості вирощування картоплі на присадибних ділянках із використанням мотоблоків та спеціалізованого навісного обладнання. Проведено аналіз сучасних агротехнологій, зокрема голландського гребеневого способу посадки, та обґрунтовано їх адаптацію для умов малих господарств. Подано характеристику різних типів навісних знарядь (плугів, підгортачів, картоплесаджалок, фрез, картоплекопалок тощо), визначено вимоги до потужності мотоблоку залежно від площі та типу ґрунту. Наведено результати досліджень ефективності застосування органічних добрив (гній, сидерати, солома), які сприяли підвищенню врожайності та поліпшенню якісних показників бульб картоплі. Доведено, що використання малогабаритної техніки у поєднанні з органічними агротехнічними заходами забезпечує економічну доцільність, екологічну безпеку та підвищення продуктивності праці в умовах Західного Полісся.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1889

Цитувати цю статтю:
Кірчук, Р. В., Забродоцька Л. Ю., & Ференц, Р. В. (2025). Особливості вирощування картоплі на присадибних ділянках з обгрунтуванням системи навісного обладнання до мотоблоку. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 34-47. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1889

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

За даним Мінагрополітики значна частина товарів, що експортується, а саме 40%, припадає на продукцію агропромислового сектору. А це означає, що і історично, і нині - сільське господарство залишається основою економіки держави. Темпи нарощування виробництва продукції агропромислового комплексу спостерігались останнім часом. До 2022р. ріст складав 12%. Основу експорту, традиційно, формують зернові і олійні культури (понад 80% обсягів). Також є зростання продукції плодівництва та ягід на 11% і переробки овочів - на 22% *(Ковальова, 2019)*.

Агровиробництвом займаються господарства різних розмірів і форм власності, від агрохолдингів до дрібних фермерів. Як показує ряд досліджень, останніми роками збільшується роль присадибних господарств у виробництві продукції сільського господарства *(Сокальський,2012; Ковальчук, 2019)*. Їх частина в об'ємі валового виробництва продукції становила 45,9 % у 2013р.

Для прикладу, виробництво картоплі в Україні зосереджено переважно в приватних господарів, а не агрохолдингах. Наочно це відображено на діаграмі (рис.1) *(Черненко,2020)*.

Сільське господарство – давній вид діяльності людини, який ментально притаманний українцям. На сьогодні, у сільськогосподарському виробництві працює близько половини населення світу. У розвинутих країнах цей показник становить 2…9% від загальної кількості населення, у країнах, що розвиваються, – 60…75%. В Україні на селі працюють 15,4% економічно активного населення.

Рис.1 – Діаграма валового виробництва картоплі в Україні

Незважаючи на те, що у світі спостерігається тенденція до скорочення працівників у сільському господарстві, ця сфера діяльності забезпечує значну зайнятість населення *(Campos & Ortiz, 2020)*.

Продуктивність праці у агровиробництві напряму залежить від механізації і автоматизації цієї галузі. Якщо ринок сільськогосподарської техніки для фермерів та великих господарств насичений продукцією, то номенклатура сільськогосподарських знарядь для невеликих господарств та присадибних ділянок значно менша. Окрім того, вартість сучасної техніки, яка перенасичена засобами мехатроніки, доступна лише фінансово потужним організаціям та фірмам, що не можна сказати про дрібних господарників. Тому питання аналізу ринку сільськогосподарських знарядь для невеликих господарств та присадибних ділянок є актуальним, а формування цілісної системи їх конструювання і використання є важливим і своєчасним *(Пахольчук & Доманський, 2009; H.De Jong et al, 2011; Мельник et al, 2010)*.

Мета дослідження – дослідити та систематизувати пропозиції щодо сільськогосподарських знарядь для присадибних ділянок, розробити концепцію їх системного проектування та застосування, обґрунтувати можливість використання малогабаритної техніки, як такої, що є доступнішою у експлуатації.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для дослідження та узагальнення можливості формування єдиної концепції використання спеціалізованих сільськогосподарських знарядь в умовах дрібних присадибних господарств, застосовувались методи системного аналізу маркетингових даних, техніко-економічне обґрунтування та синтез нової узагальненої схеми малогабаритних сільськогосподарських знарядь. Також використані методики розрахунку типових елементів конструкцій машин, зокрема ґрунтообробних робочих та підкопуючи робочих органів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Голландська технологія вирощування картоплі - це інтенсивний метод, спрямований на промислове виробництво. Вона передбачає використання високоякісного насіннєвого матеріалу, посадку у високі гребені, точне внесення добрив і захист від хвороб, а також створення широких міжрядь (до 75 см) та механізовану посадку.

Основні аспекти голландської технології: високоякісний насіннєвий матеріал; формуфання та посадка у гребені; механізована обробка; збір врожаю залежно від призначення картоплі (насіннєва або для споживання).

Перевагами голландської технології є: збільшення міжрядної відстані покращує циркуляцію повітря та доступ поживних речовин до рослин; формування гребенів сприяє кращому прогріванню ґрунту, захисту бульб від сонячних опіків та полегшує збирання врожаю; мінімізація механічного обробітку міжрядь зменшує пошкодження кореневої системи; збільшення відстані між рослинами сприяє кращому освітленню кущів сонячним світлом та зменшує застій вологи; висока врожайність та покращена якість бульб *(Смакота, 2015)*.

Для отримання максимального врожаю рекомендується використовувати якісний насіннєвий матеріал та дотримуватися всіх агротехнічних вимог. Важливо забезпечити рослини достатньою кількістю вологи та захистити їх від шкідників та хвороб. Голландська технологія підходить як для великих фермерських господарств, так і для невеликих присадибних ділянок. Різниця в промисловій і домашній культивації полягає в тому, що в першому варіанті використовують великогабаритну техніку, а на присадибній ділянці все робиться вручну або з використанням мотоблоку.

Глибина закладення картоплі – 6-8 см. Між бульбами лишається по 30 см, а між рядами – по 70-75 см. Таким чином, на квадратний метр доведеться по 6-8 картоплин, а кожен кущик буде освітлений сонцем, і після дощу у землі не застоюватиметься волога (рис.2).

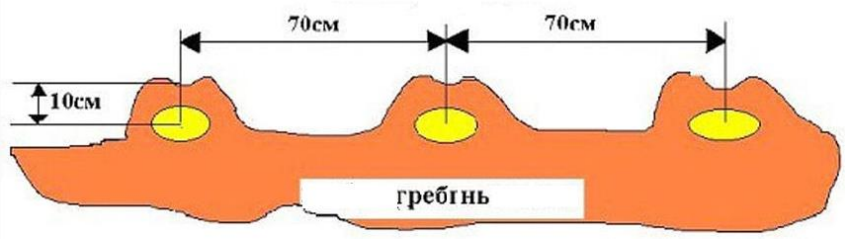


Рис. 2 - Схема посадки та глибина закладення бульб

Важливим етапом вирощування картоплі є гребенеутворення. Все тому, що від якості і вчасності формування гребенів залежить чистота картопляного поля, структура ґрунту в зоні бульбоутворення, величина і навіть якість врожаю.

Гребені формують перед сходами (приблизно на 10-14-й день після посадки, коли бульби утворять мичку кореневої системи і закріпляться у ґрунті). Їхня висота має бути близько 18-22 см.

Посадку у гребені легко механізувати: для цього використовують мотокультиватори із спеціальними насадками. Садять бульби за допомогою одного з пристроїв: підгортач, плуг, картоплесаджалка.

При виборі пристосування для посадки картоплі треба враховувати плюси та мінуси використовуваних насадок для цього виду робіт.

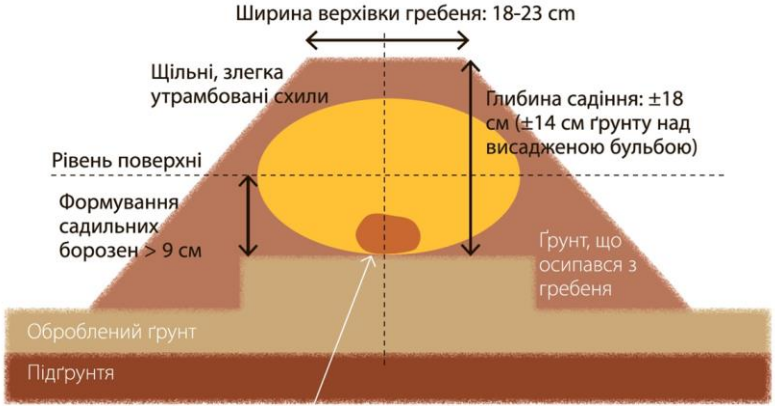


Рис.3 – Схема формування гребеня картоплі

Процес вирощування картоплі на невеликих присадибних ділянках може бути значно полегшене посадкою картоплі мотоблоком. Трудомісткість посадки одна із найвищих серед городніх робіт. На 5-ти сотках посадка картоплі під лопату займе цілий день, а правильна посадка картоплі мотоблоком скоротить її до кількох годин.

Рис.4 – Гребеневий спосіб посадки картоплі

Для виконання, крім самого мотоблока, треба обзавестися додатковим навісним обладнанням: ґрунтозачіпними - сталевими колесами, подовжувачами для коліс, підгортачем однорядним або дворядним, зчіпкою універсальною, фрезою.

Мотоблоки – універсальна багатофункціональна техніка. Це говорить про те, що вона підійде для виконання будь-яких операцій, пов'язаних із вирощуванням картоплі. При виборі техніки потрібно врахувати розміри площ, що обробляються - від цього залежить вибір потужності техніки.

Діапазон потужностей мотоблоків різних моделей коливається в межах від 2,57 кВт до 7,36 кВт. При виборі потужності агрегату в першу чергу слід звертати увагу на розмір площі ділянки, що обробляється. Якщо вона рівна 15 ар, то потрібний агрегат від 2,57 кВт до 2,94 кВт із шириною захвату близько 0,6 м. При обробці землі площею 20-30 ар знадобиться мотоблок потужністю 3,31-3,68 кВт, а ширина захвату повинна бути 0,8 м. Для площі 50 ар взагалі треба агрегат потужністю 4,41-5,15 кВт, а ширина захвату - не менше 0,9 м. Мотоблоки потужністю 7,36 кВт і шириною захвату 1 м відмінно підходять для обробки ділянок 1 га і вище, але не більше 4 га. Великі площі бажано не обробляти мотоблоком, це буде надто складно. Мотоблоки, як і будь-яка техніка, підпорядковується закономірності - чим більша потужність, тим більша витрата палива.

Вибір потужності є найбільш відповідальною задачею, що виникає в процесі створення тягового приводу мобільних агрегатів і транспортних систем, в тому числі і мотоблоків. Основною вимогою і критерієм вибору двигуна є відповідність його потужності умовам технологічного процесу робочих машин, агрегатів і установок.

Основний обробіток ґрунту є найбільш енергоємною технологічною операцією, тому потужність тягового двигуна слід обирати з умови забезпечення необхідного тягового зусилля на зчіпці

мотоблока F для виконання оранки важких (F_B), середніх (F_C) або легких ($F_Л$) ґрунтів.

При цьому:

$$F = K \cdot a \cdot b, \tag{1}$$

де a,b – відповідно, глибина оранки і ширина захвату плуга, м;

K – питомий опір ґрунту, кПа. Приймається: $K_B = 90кПа$; $K_C = 60кПа$; $K_Л = 30кПа$.

В приватних підсобних господарствах в основному застосовуються плуги з характеристикою плужних корпусів $b/a = 1,2\ldots1,5$. Оранка ґрунту виконується на глибину $a = 10,15,18і20см$. Як правило застосовують плуги з шириною захвату $b = 18см$, тоді приймаючи глибину підкопу пласта $a = 15$ см, визначається значення тягових зусиль для оранки різних ґрунтів: $F_B = 2,43кН$, $F_C = 1,62кН$, $F_Л = 0,81кН$.

Для реалізації тягових зусиль необхідно, щоб при оранці ґрунту зчіпна вага $G = mg$ мотоблока масою m була певної величини, залежно від характеристики ґрунту. При цьому:

$$G = F/\left(\lambda \cdot \varphi_З - \xi \cdot f\right), \tag{2}$$

де λ - коефіцієнт навантаження коліс мотоблока;

$\varphi_З$ - коефіцієнт зчеплення коліс з ґрунтом;

ξ - коефіцієнт, що враховує внутрішні втрати в ходовій системі;

f - коефіцієнт опору перекочування коліс.

Для мотоблоків з шинами $\lambda = 1$; $\varphi_З = 0,5\ldots0,7$; $\xi = 1$ і $f = 0,10\ldots0,12$ та зчіпна вага $G_B = 4,05кН$; $G_C = 2,70кН$; $G_Л = 1,35кН$. Для мотоблоків з металевими колесами, що мають ґрунтозацепи $G_B = 2,05кН$; $G_C = 1,80кН$; $G_Л = 0,90кН$. Тобто, при застосування металевих коліс зчіпна вага G може бути меншої величини.

Корисна потужність тягового двигуна мотоблоку визначається за рівнянням:

$$P = \frac{K_З\left(F - f \cdot G\right) \cdot V}{\eta_Р \cdot \eta_Б \cdot \eta_К}, (кВт) \tag{3}$$

де $K_З = 1,1\ldots1,2$ - коефіцієнт запасу, що враховує динамічні режими з підвищеним моментом;

F - тягове зусилля, що визначається залежно від властивостей ґрунту, кН;

G - зчіпна вага, приймається з врахуванням властивостей ґрунту, кН;

V - швидкість руху мотоблоку при оранці, м/с;

$\eta_Р$ - ККД редуктора;

$\eta_Б = 0,93$ - коефіцієнт, що враховує втрати на пробуксовування;

$\eta_К = 0,95$ - коефіцієнт, що враховує втрати на подолання опору коченню.

Величина $\eta = \eta_Р \cdot \eta_Б \cdot \eta_К$ отримала назву тягового ККД агрегату. При розрахунках приймається $\eta = 0,74\ldots0,76$. Для точних розрахунків корисної потужності за рівнянням (3) тяговий ККД визначається з урахуванням реальної компоновки механічної передачі мотоблока, типу редуктора, можливості використання додаткової ланцюгової передачі, та ін. Швидкість руху мотоблока V приймається у відповідності з діапазоном швидкостей, що встановлені на основі досліджень та спостережень за роботою мобільних агрегатів, які керуються операторами чоловічої та жіночої статі: $V = 0,3;0,6;0,9;1,2$ та $V = 1,08;2,16;3,24;4,32$.

На рис. 5 наведені графіки корисної потужності $P = f\left(V\right)$ тягових двигунів мотоблоків за результатами розрахунків при $\eta = 0,75$; $K_З = 1,05$ для легких ґрунтів, $K_З = 1,1$ для середніх ґрунтів і $K_З = 1,2$ для важких ґрунтів. Графіки потужності (рис. 5.) можуть бути використані на практиці для визначення розрахункової потужності тягових двигунів приводу мотоблоків, що призначені для

обробки ґрунтів з різними характеристиками за питомим опором.

За величиною розрахункової потужності P з каталогу обирається двигун з найближчою номінальною потужністю P_H та з більшою номінальною частотою обертання n_H. У такому випадку є більш високий ККД та менші габарити.

Важливим параметром при виборі двигуна крім ККД є показник якості приводу, що визначається масою двигуна:

$$q = G_Д \big/ P_{Розр}, (кг/кВт), \quad (4)$$

де $G_Д$ - маса двигуна за паспортом, кг;

$P_{Розр}$ - розрахункова потужність, кВт.

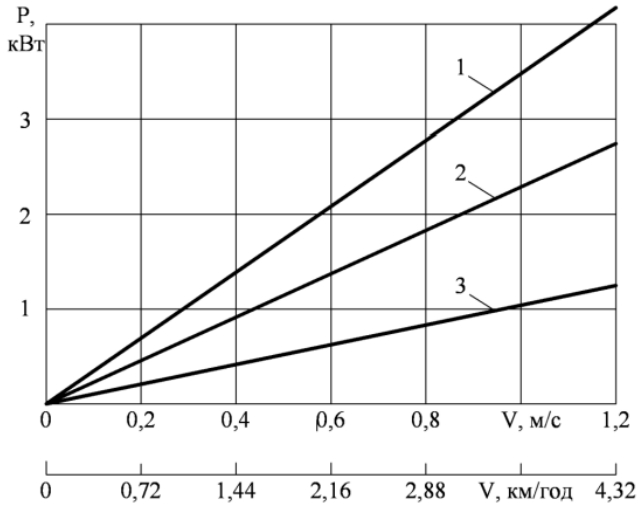


Рис.5 – Графіки корисної потужності тягового двигуна мотоблока при оранці ґрунтів: 1-важких, $K_B = 90кПа$; 2-середніх, $K_C = 60кПа$; 3-легких, $K_Л = 30кПа$.

Розрахункова потужність двигуна визначається за рівнянням:

$$P_{Розр} = P_H \cdot K_\omega \approx M_H \cdot \omega_{max}, \quad (5)$$

де M_H - номінальний момент двигуна, Нм.

Для аналізу доцільності застосування мотоблоку в якості енергетичного засобу та системи навісного обладнання для вирощування картоплі проводились дослідження в період 2023-2025рр. Була застосована гребенева технологія вирощування надранніх, середньостиглих та пізніх сортів картоплі. Зокрема використовували сорти: «Коломбо», «30-денка», «Рів'єра», «Белла роса», «Гранада», «Тайфун», які є районованими для зони Західного Полісся.

Полегшити працю та скоротити час роботи допоможе використання мотоблоку з навісним обладнанням . Існує кілька способів посадки картоплі мотоблоком – вони залежать від навісного обладнання (рис.6). Посадку проводять однорядним, дворядним або дисковим підгортачем, картоплесаджалкою або плугом. Вибір способу посадки залежить від показників ділянки.

Рис.6 – Набір навісного обладнання для вирощування картоплі з використанням мотоблоку

Перший етап вирощування картоплі - підготовка ґрунту. Вона повинна бути пухкою та добре удобреною органічними або мінеральними добривами. Для основного обробітку ґрунту було використано відвальний плуг та фрези з шириною захвату 1,2 м (рис.7, рис.8).

Рис.7 - Плуг лемішний

Рис.8 – Фрези 4-ох секційні

На мотоблок встановлюють сталеві колеса з ґрунтозачепами для кращого зчеплення із землею (рис.9, рис.10). Можна працювати і на гумових колесах, але вони пробуксовують, особливо якщо мотоблок йде по ухилу - доведеться прикладати зусилля, щоб штовхати його. Сталеві колеса зариваються в землю і самі тягнуть мотоблок, до того ж вони розпушують ґрунт.

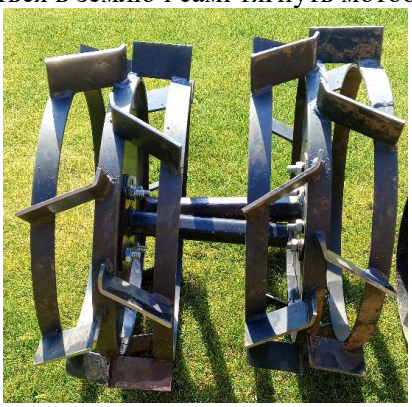


Рис. 9 – Ґрунтозачепи для оранки мотоблоком

Рис.10 – Ґрунтозачепи для формування борозн

Посадка, з використанням мотоблоку, здійснюється декількома способами – картоплесаджалкою, або ж комплектом для посадки картоплі. Позаду на мотоблок навішують підгортач (окучник). Підгортач типу «Стріла» (рис.10) має розсувні лопаті - це дозволяє збільшувати або зменшувати ширину борозен. При першому проході нарізаються борозни. Для якісного нарізання доцільно застосовувати маркер.

Рис.11 – Підгортач «Стріла -2»

Рис.12 – Нарізання борозн

Бульби викладають у борозни вручну. Далі необхідно засипати картоплю землею. Для цього застосовується формувач гребенів (рис.13). Колеса направляють у борозни - так, аби не пошкодити картоплю, а підгортач піде строго посередині гребеня, засипаючи борозну. Формувач гребенів слід оснастити направляючими виступами, аби уникнути втрати стійкості в процесі руху агрегату.

Рис.13 – Формувач гребенів картоплі

Рис.14 – Форми борозн для вирощування картоплі гребеневим способом

З іншого боку, задля загортання висаджених бульб та формування гребенів можна застосовувати і огортач «Стріла-2», попередньо виконавши переналаштування, як показано на рис.15.

Рис. 15 – Формування гребенів за допомогою підгортача «Стріла-2»

Рис.16 – Сходи картоплі на гребенях

Зручність такої посадки полягає в тому, що борозни виходять ідеально рівні. Колесо, що йде борозною, може вильнути, але в зчіпці з одним з підгортачів, який теж йде борозною, рух виходить стійким, немов мотоблок йде рейками. Таку посадку можна регулювати за висотою і зробити борозни потрібної глибини. Більше того, бульби картоплі, після закладення їх у ґрунт, розташовуються всередині гребенів, і вони прогріваються набагато швидше, ніж у рівному ґрунті, оскільки промені сонця на них потрапляють не тільки зверху, а й збоку. Отже, картоплю можна посадити раніше й раніше зібрати врожай. До того ж у прогрітому гребені картопля утворює потужніші столони і нарощують хорошу кореневу систему.

Повноцінний розвиток бульб можливий при підсипанні ґрунту - підгортанні. Це дозволяє захистити їх від впливу сонячного світла, від псування шкідниками, забезпечити нормальний газообмін та засвоєння поживних речовин. Терміни підгортання картоплі мотоблоком залежать від способу посадки, часу появи сходів, типу ґрунту та інших факторів. Підсипку ґрунту здійснюють за допомогою підгортача. Він може бути дисковим чи стрілоподібним. Для підгортання картоплі підходить мотоблок і невеликої потужності.

Картоплю також потрібно захищати від шкідників та періодично підгодовувати. Для цього використовується таке навісне обладнання як мотопомпи для обприскування, їжаки для закладення добрив та ін.

Живлення сходів картоплі, боротьбу з бурянами можна виконувати мотоблоком, попередньо обладнавши його однорядними фрезами, які встановлюються замість грунтозачепів (рис.17). Позаду мотоблока, на зчіпку навішується огортач з максимально розсунутими крилами.

Рис.17 – Однорядні фрези бля обробітку міжряддя

Рис.18 – Живлення в процесі вегетації картоплі перед міжрядним обробітком задля знищення бур'янів

Копання картоплі - один із найтрудомісткіших процесів. Спростити його можна за допомогою застосування картоплекопалок для мотоблоків. Вони бувають двох типів:

- стрілчасті (універсальні, віялові): зовні нагадують перевернуту і злегка зігнуту лопату із привареними лозинами. Гострим кінцем пристрій підриває ґрунт, який разом із бульбами подається на зуби. Земля прокидається крізь лозини, а картопля скочується на бік. Підходять для викопування часнику, цибулі, моркви та інших коренеплодів;
- грохотні (вібраційні): складаються з лемеша та грат, закріплених на колесах. Бульби разом із ґрунтів підриваються, подаються на ґрати, де звільняються від залишків ґрунту.

Картоплекопалка типу «Дельфін» (рис.19), яку ще називають стрілчастою (вієрною) лапою, нагадує лопату з привареними прутами. Випускається такий вид картоплекопалок у кількох виконаннях:

- картоплекопалка універсальна;
- картоплекопалка для мотокультиватора;
- картоплекопалка для мотоблоку;
- картоплекопалка для мотоблока посилена.

Принцип роботи наступний. Картоплекопалка підриває гострим кінцем ґрунт посередині рядка, і бульби картоплі потрапляють на прути. Картоплекопалка типу Дельфін найпростіша в модельному ряду копалок. Має такі переваги: просте встановлення на мотоблок, широкий спектр застосування, висока швидкість роботи, невисокі вимоги до чистоти ділянки, доступна ціна.

Рис. 19 – Викопування картоплі віярним копачем типу «Дельфін»

Для копання картоплі, особливо на важких ґрунтах, використовуються мотоблоки середньої та великої потужності. На невеликих ділянках можна обійтись легкими.

Окрім того встановлено в процесі досліджень і недоліки: мінімальна ширина захоплення - до 20 см, високі втрати врожаю – до 15%, під час копання може ушкоджувати частину бульб. На великих площах (понад 50 ар) витрата палива та фізичних сил буде високою.

Насамперед важливо підготувати картопляне поле до збирання врожаю (рис.20), особливо для використання віярниї копачів типу «Дельіфн» (рис.21). Адже наявність значної кількості рослинних залишків, картоплиння призводить до забивання копачки та погіршення процесу сепарації картопляного вороху.

Рис.20 – Підготовка картопляного поля до копання віярною копачкою

Рис.21 – Забивання рослинних залишків сепаруючих прутів

Таким чином, проведені дослідження використання запропонованого навісного обладнання та використання мотоблоку в якості енегретичного засобу доводять свою ефективність при використанні гребеневого способу вирощування картоплі різних сортів в умовах Західного Полісся *(Хоменко, 2015)*.

Основним критерієм, за яким оцінюється ефективність агротехнічних заходів є урожайність вирощуваних сільськогосподарських культур. Для бідних на гумус є досить актуальним внесення органічних добрив.

Таблиця 1 - Урожайність картоплі в залежності від виду добрив, т/га

№	Зміст варіанту	2019р.	2020р.	2021р.	Середнє	+/- до контролю
1	Без добрив (контроль)	23,1	26,3	25,8	25,1	-
2	Сидерати 20т/га	27,8	30,1	29,7	29,2	4.1
3	Солома 5 т/га	24.9	27.2	26.6	26.2	1.1
4	Гній 60 т/га	28,1	32,6	31,3	30,7	5.6

Аналіз літературних джерел та урожайності картоплі показує, що в середньому за роки досліджень отримано істотні прибавки на всіх варіантах досліду *(Olle, 2016)*. Приріст урожаю від внесення гною в нормі 60 т/га становив 5,6 т/га, від приорювання сидерату 4,1 т/га. Найменший приріст урожаю картоплі отримали при внесенні соломи – 1,1 т/га. Отримані результати свідчать про високу ефективність застосування всіх видів добрив під картоплю.

Оцінка урожайності показує, що застосування органічних добрив дає збільшення питомої вагу великої фракції картоплі 80 г і зменшує питому вагу дрібної фракції 30 г. При внесенні гною питома вага фракції 80 г збільшилась на 10%, при внесенні сидератів на 6% а при внесенні соломи на 4% порівняно з контрольним варіантом. І навпаки, дрібна фракція картоплі 30 г зменшилась на варіанті з внесенням гною на 16%, з використанням сидерату на 9%, з внесенням соломи на 6% порівняно з контрольним варіантом.

Органічні добрива, як видно, позитивно впливають на структуру урожаю картоплі (Соколова et al, 2018; *B.Speiser et al, 2017*). Однак збільшення урожайності сільськогосподарських культур при проведенні різних агро-технічних заходів не завжди супроводжується підвищенням його якісних характеристик. Це особливо відносить до картоплі. Часто це призводить до отримання урожаю гарного, але гіршої якості і навпаки.

В зібраних бульбах картоплі визначали вміст крохмалю, як основного показника в якості картоплі та вміст сухої речовини і нітратів (табл.2). Аналіз даних вказує, що внесення органічних добрив сприяло підвищенню вмісту крохмалю в бульбах картоплі. Найбільше він підвищився на варіанті з внесенням соломи на 3,1%, на варіанті з сидератами на 2,5% і на варіанті з гноєм на 2,4%.

Вміст сухої речовини в картоплі змінювався інакше. Найбільше зросла на варіанті з гноєм на 3,7%, тоді на варіанті з внесенням соломи на 1,9% і з внесенням сидератів - на 1,5%. При застосуванні сидератів вміст нітратів дещо знизився.

Таблиця 2 - Якісні показники бульб картоплі в залежності від виду добрив

№ варіанту	Зміст варіанту	Крохмаль, %	Суха речовина, %	Нітрати, мг/кг
1	Без добрив – контроль	22,5	24,9	116
2	Сидерати 20т/га	20,5	26,4	110
3	Солома 5 т/га	25,6	26,8	156
4	Гній 60т/га	24,9	28,6	152

Враховуючи отримані результати доцільно зробити пропозицію виробникам картоплі в умовах Західного Полісся в якості органічного добрива пропонується використовувати редьку олійну на сидерат, що забезпечує урожайність зеленої маси в межах 20 т/га. Це дає можливість на 4,1 т/га збільшити урожайність картоплі і підвищити вміст крохмалю в бульбах на 2,5%.

ВИСНОВКИ

Вирощування картоплі на присадибних ділянках навіть невеликої площі є цілком доцільним як з економічної, так і з екологічної точки зору. Особливо цінним є те, що власноруч вирощена картопля дозволяє контролювати якість кінцевого продукту. Вона не міститиме залишків хімікатів, що часто застосовуються у промисловому сільському господарстві для пришвидшення росту чи захисту від шкідників.

Ще більшої ваги набуває вирощування картоплі за органічними принципами. Це передбачає відмову від синтетичних добрив і пестицидів на користь натуральних засобів, таких як перегній, компост, деревна зола чи настої рослин. Замість хімічного захисту від шкідників і хвороб використовують природні методи: прополювання, сівозміну, біологічні засоби, а також висаджування рослин-компаньйонів. Усе це дозволяє не лише отримати екологічно чистий урожай, а й зберегти родючість ґрунту, зробити його живим і здоровим на довгі роки.

Органічне вирощування потребує більш уважного й відповідального ставлення до кожного етапу - від підготовки ґрунту до збирання врожаю. Але в умовах невеликої ділянки це цілком

здійсненно, адже масштаби дають змогу обробляти землю вручну, ретельно доглядати за рослинами та вчасно реагувати на можливі проблеми.

У сучасному приватному господарстві мотоблок дедалі частіше стає незамінним помічником, особливо на присадибних ділянках з невеликою площею. Використання мотоблоку особливо виправдане тоді, коли власник ділянки самостійно вирощує основні сільськогосподарські культури, зокрема картоплю, моркву, буряк, кукурудзу або зернові. За допомогою правильно підібраного навісного обладнання мотоблок може виконувати до десятка функцій: оранку, культивацію, боронування, посадку, підгортання, прополювання, збирання врожаю, а також транспортування вантажів або заготовку кормів.

Однак ефективність роботи мотоблоку безпосередньо залежить від правильного вибору навісного обладнання, яке підбирається відповідно до типу ґрунтів, особливостей вирощуваних культур і обсягу робіт. Важливо також враховувати потужність мотоблоку: малопотужні моделі (до 6 кінських сил) можуть не впоратись із важким ґрунтом або великим навантаженням. Відповідно, більш універсальним рішенням є агрегати середнього або важкого класу - від 7 до 12 к.с., до яких можна приєднувати ширший асортимент навіски. Не менш важливе й питання сумісності: навісне обладнання повинно підходити до конкретної моделі мотоблоку за типом кріплення, шириною захвату та глибиною обробітку. Ще один критерій вибору - умови експлуатації. Якщо ділянка має складний рельєф або обмежена у просторі, варто звертати увагу на маневреність мотоблока та компактність навісного обладнання. У таких випадках краще підходить легше або багатофункціональне навісне обладнання з регульованою шириною захвату.

Зрештою, доцільність застосування мотоблоку полягає не лише у фізичній економії зусиль, а й у можливості зробити господарювання більш системним, ефективним і незалежним. Це особливо важливо для тих, хто прагне вести натуральне або органічне землеробство, адже вчасний і якісний обробіток землі - запорука здорового врожаю без зайвого втручання хімії.

Не менш важливою є й соціальна складова. Праця на землі приносить моральне задоволення, сприяє зниженню стресу і зміцненню родинних зв'язків, якщо до неї долучаються члени сім'ї. Це також спосіб зберегти сільськогосподарські традиції, передати досвід наступним поколінням і підтримувати зв'язок з рідною землею.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Bernhard Speiser et al. (2017). Organic potatoes: Cultivating quality – step by step. *FiBL & Organic Research Centre.* https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1717-potatoes.pdf
2. Hielke De Jong, Walter De Jong, Joseph B. Sieczka. (2011). *The Complete Book of Potatoes: What Every Grower and Gardener Needs to Know. Timber Press,* 258 pages.
3. Hugo Campos, Oscar Ortiz. (2020). The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind. *Springer. Lima, Peru (eBook)* https://doi.org/10.1007/978-3-030-2868
4. Margit Olle. (2016). Organic Cultivation of Vegetables and Potatoes. *CreateSpace Independent Publishing Platform. May 7.* 132 pages.
5. Ковальова Д. (2019). Сільське господарство залишається одним із ключових рушіїв української економіки. *Прес-служба Мінагрополітики// Інформаційно-аналітичний портал АПК України.* Retrieved August, 23, 2019, from https://agro.me.gov.ua/ua/news/silske-gospodarstvo-zalishayetsya-odnim-iz-klyuchovih-rushiyiv-ukrayinskoyi-ekonomiki-kovalova
6. Ковальчук Т. Вирощування картоплі в руках аматорів. (2019). *Агробізнес сьогодні*: Retrieved June, 6, 2019, from http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/14041-vyroshchuvannia-kartopli-v-rukakh-amatoriv.html
7. Мельник С., Пашковський А., Суліма Л. (2010). *Прогресивні технології вирощування і зберігання картоплі.* Видавництво Рута. 216с.
8. Пахольчук В., Доманський А. (2009). Інноваційні напрями розвитку галузі картоплярства на Волині. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Ґжицького Том 11 № 1(40).* с. 208-212. http://ir.znau.edu.ua/handle/123456789/9278
9. Пахольчук, В. (2006). Картопля. *Насінництво : Науково-виробничий журнал. - №5.* - с. 14-15.

10. Смакота Я. Технологія вирощування картоплі: способи та особливості. (2015). *AgroAPP*. Retrieved April, 4, 2025, from https://agroapp.com.ua/uk/blog/texnologiya-viroshhuvannya-kartopli-sposobi-ta-osoblivosti/

11. Соколова О., Поліщук М., Пахольчук В. (2018)/ Необхідність та особливості органічного виробництва картоплі. *Органічне виробництво і продовольча безпека : зб. доп. учасн. VI Міжнар. наук.-практ. конф. – Житомир.* с.184–189.

12. Сокальський С. (2012). *Економічна ефективність виробництва картоплі : регіональний аспект : монографія.* Житомир, 224 с.

13. Хоменко І. (2015). Елементи технології вирощування картоплі на основі органічного землеробства в умовах Полісся України. *(ВКН-839): Немішаєве.* 20с.

14. Черненко Д. (2020). Роль господарств населення у виробництві продукції тваринництва. *Ефективна економіка – № 3.* Retrieved May, 1, 2020, from http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3924

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR FORECASTING, ADJUSTMENT, AND CONTROL OF AIRLIFT SAPROPEL EXTRACTION MACHINES

S. Khomych*, I. Tsyz, R. Khlopetskyi, S. Yukhymchuk, I. Zakharchuk

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
AM
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
system,
forecasting,
adjustment,
control,
machine,
device,
working process

Article history:
Received 08.08.2025
Accepted 10.10.2025

Corresponding author:*
smhh@ukr.net

ABSTRACT

The article presents an analytical overview demonstrating the feasibility of using pneumatic (airlift) sapropel extraction machines designed to obtain organic sapropel raw material – a fundamental component in the production of fertilizers for organic farming. The section State of the Art and Problem Statement highlights the shortcomings of the existing mechanical adjustment and control systems of such machines, which are often inefficient and prone to operational failures. Since pneumatic sapropel extraction systems have proven to be energy-efficient and environmentally sustainable in obtaining organic raw materials and are currently undergoing active modernization, a comprehensive automated system was proposed as the result of this research. The developed system simultaneously performs several functions — it forecasts, adjusts, and controls the machine's operating process. The system determines and configures the optimal technological parameters of the workflow and automatically monitors, modifies, and manages them depending on the unpredictable characteristics and properties of the sapropel deposit. It also forecasts potential changes in the operating process and structural loads that may lead to machine failure, thereby preventing such occurrences. The paper presents a block diagram illustrating the sequence of processes for forecasting, adjustment, and control of airlift sapropel extraction machines, as well as the layout of information and control devices that implement the operational process. The proposed system will increase the efficiency of machine operation, ensure uniform extraction of sapropel layers, and provide high-quality raw material with minimal impact on the aquatic ecosystem.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1899

To cite this article:
Khomych, S., Tsyz, I., Khlopetskyi, R., Yukhymchuk, S., & Zakharchuk O. (2025). Development of an Automated System for Forecasting, Adjustment, and Control of Airlift Sapropel Extraction Machines. *Agricultural Machines*, *51*, 48-55. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1899

УДК 631.6: 626.8: 681.5

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ, НАЛАШТУВАННЯ І УПРАВЛІННЯ ЕРЛІФТНИХ САПРОПЕЛЕДОБУВНИХ МАШИН

С.М. Хомич*, І.Є. Цизь, Р.А. Хлопецький, С.Ф. Юхимчук, І.В. Захарчук

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
система
прогнозування,
налаштування,
управління,
машина,
засіб,
робочий процес

Історія публікації:
Отримано 08.08.2025
Затверджено 10.10.2025

Автор для листування:
smhh@ukr.net

АНОТАЦІЯ

У матеріалах статті представлено проаналізовану інформацію де вказано доцільність застосування пневматичних (ерліфтних) сапропеледобувних машин, які призначені для отримання органічної сапропелвої сировини, що є базовим елементом при виробництві добрив для ведення органічного землеробства у сільському господарству. В розділі стан питання і постановка проблеми висвітлено проблематику, механічної системи налаштування і управління робочим процесом машини, яка є малоефективною та часто призводить до втрати роботоздатності. Оскільки пневматичні сапропеледобувні засоби зарекомендували себе, як енегроефективні та екологоощодні у отриманні органічної сапропелевої сировини та перебувають на стадії вдосконалень, то результатом їх модернізації було запропоновано комплексну автоматизовану систему, яка одночасно виконує кілька функцій, а саме прогнозує, налаштовує і управляє робочим процесом машини. Система підбирає та налаштовує технологічні значення найефективніших параметрів робочого процесу і автоматично контролює, змінює і управляє ними в залежності від непередбачуваних характеристик і властивостей розроблюваного родовища а також передбачає зміни робочого процесу і навантаження на конструкцію машини, які можуть призвести до виходу її з ладу та унеможливлює дане явище. У роботі наведена схема блоків, за допомогою якої виконуються комплекс процесів прогнозування, налаштування і управління ерліфтними сапропеледобувними машинами та схема розміщення інформаційно-контролюючих пристроїв, що реалізовують робочий процес. Дана система підвищить ефективність виконання робочого процесу машини, дозволить рівномірно розробляти шари покладів сапропелю і добувати якісну сировину з мінімальним впливом на порушення екосистеми водного об'єкта.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1899

Цитувати цю статтю:
Хомич, С.М., Цизь, І.Є., Хлопецький, Р.А., Юхимчук, С.Ф., & Захарчук, О.В. (2025). Розробка системи автоматизованого прогнозування, налаштування і управління ерліфтних сапропеледобувних машин. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 48-55. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1889

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На території України зосереджено близько 10% прісноводних озер Європи *(Хільчевский 2022)*. Більшість з цих озер піддаються евтрофії (тобто старіють і втрачають можливість самофункціонування). Дані озера заповнені природніми відкладенням, переважно органічного типу. Ці природні накопичення (поклади, корисні копалини) являються сапропелями, що є цінним сировинним матеріалом, який застосовують у будівельній галузі, медицині, сільському господарстві тощо.

З кожним роком процеси накопичення сапропелів у водоймах зростають, і як наслідок озера перетворюються на чагарники та болота. Тільки на території Західного Полісся України таких водойм є більше 80, проте з року в рік їх кількість збільшується.

Згідно інформації, (*Програма дій, 2000*), припинити інтенсивну евтрофікацію озер дозоляє лише людське втручання у природу за допомогою науково-обґрунтованих технологій, машин та засобів. Тому, розробка заходів із протидії природного евтрофіювання прісноводних озер є досить актуальною для сьогодення, а обґрунтування доцільності використання нових технологій і машин для добування є своєчасною.

Варто зазначити, що кожне евтрофійоване озеро має індивідуальні властивості, це спричиняє проблеми розробки покладів та передбачає нестабільний робочий процес відновлювальних робіт, тому дослідження стану водного об’єкта, складання карти родовища за умовами розташування, визначення властивостей сапропелів є першочерговим етапом перед початком добувного процесу.

З відомих різновидів сапропелів (*Цизь, 2023; Мольчак, 1998, Електронний ресурс)*, найефективнішими є органічні, здебільшого вони приносять користь в сільському господарстві, їх використовують для вдосконалення біогенного родючого шару ґрунту (*Цизь, 2023*), та у якості добрив. Добрива на основі органічних сапропелі знайшли своє застосування на малопродуктивних і виснажених землях вони стабілізують або збільшують вміст гумусу, що відновлює родючість ґрунту (*Мольчак, 1998; Шевчук, 2012*). Для виготовлення таких добрив необхідно застосовувати лише оброблені органічні сапропелі з вмістом органіки понад 60%. Однак існує проблема у забезпеченні сільського господарства таким сапропелем, вона пов’язана із складністю технології їх добування з підводних родовищ та невизначеністю енергоефективної технології обробки.

До існуючих новітніх машин і засобів, які добувають органічні сапропелі (сировину) для сільського господарства та, які забезпечують найменші енергетичні затрати з найбільшими показниками продуктивності і якості отриманої сировини є ерліфтні (пневматичні) добувні засоби, що розробляють родовища з під шару води (*Хомич, 2014*). Сюди ж слід віднести і пневматичне трубопровідне обладнання для транспортування добутих покладів до берегової лінії. Дані машини мають просту конструкцію, та є найбільш перспективним з точки зору мінімізації енергетичних витрат на отримання сапропелевої сировини для добрив (*Хомич, 2017*). Забезпечують виконання технологічного процесу за найменшого впливу на порушення екосистеми водного об’єкта та найбільшої якості отриманої сировини.

Що стосується якості сировини, то дані машини здатні добувати сапропелі у природному стані із збереженням поживно-цінних мікроелементів для ґрунту, тобто стані при якому озерні поклади зневоднюються та обробляється з найменшими затратами. Тому, вдосконалення даних машин і обладнання є перспективою у отримані високоефективних альтернативних добрив. простоти технології і конструкції машини

Принцип роботи ерліфних засобів заснований на використанні енергії стисненого повітряного потоку, а різновиди конструкцій та технологій відрізняються між собою змішувачами (робочими органами) та способами розробки родовищ.

Так як геометричні параметри різновидів конструкцій є науково обґрунтованими, а їх робочий процес залежить від зміни технологічних параметрів (глибини залягання, глибини розробки, робочого тиску, структури руху суміші у піднімальному трубопроводі, властивостей сапропелю, властивостей родовища, способу переміщення, відхиленні від горизонталі, тощо) (*Хомич, 2017*), то для високопродуктивного режиму роботи необхідно запропонувати автоматизовану систему управління та швидкого налаштування режимних параметрів робочого процесу машини з прогнозуванням продуктивності і енергетичних витрат, яка могла б забезпечити отримання якірної сировини в непередбачуваних умовах та запобігти проблемам і загрозам.

Мета дослідження – розробка системи автоматизованого прогнозування, налаштування і управління робочим процесом ерліфтних сапропеледобувних машинах для отримання якісної сировини, збільшення продуктивності та унеможливлення поломок за непередбачуваних характеристик і властивостей розроблюваного родовища.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Оскільки пневматичні сапропеледобувні машини перебувають на стадії випробувань то в умовах їх налаштувань та підборі раціональних конструктивних параметрів машини, необхідно максимально точно забезпечити виконання робочого процесу. Це досить складно відтворити механічним, зв'язком між робочими органами та механічною ланкою системи управління.

Ступінь складності виконання робочого процесу при сталих конструктивно-геометричних параметрах машини, в першу чергу залежить від швидкості підбору технологічних показників, що формують робочий процес; властивостей матеріалу, які можуть відрізнятись з глибиною та площею розміщення і параметрів родовища; нерівномірності розташування шарів за глибиною розробки; якістю та призначення отриманої сировини, тощо.

Для налаштування ефективного та безперервного режиму роботи пневматичних сапропеледобувних машин і забезпечення його стабільності, необхідно створювати нові та модернізувати існуючі автоматичні системи управлення, які можуть в процесі роботи корегувати і налаштовувати робочий процес на максимально продуктивний, передбачати і унеможливлювати перевантаження машини та одночасно прогнозувати і попереджати про загрози і поломки. Що стосується пневматичних (ерліфтних) сапропеледобувних машин, то подібні системи, в них взагалі відсутні, машини оснащені лише механічними чи гідравлічними органами керування з запобіжними пристроями.

Тому розробка системи автоматичного управління, прогнозування, налаштування, контролю і керування машиною з елементами діагностування, та засобами безпеки є досить своєчасною.

Для формування автоматизованої системи використовували синтез подібних процесів, а для оцінки її роботоздатності значення з запропонованих залежностей.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В реальних умовах роботи коригування робочого процесу відбувається механічним регулюванням експлуатаційних показників машини та зміною положення робочих органів і обладнання, тому перехід на автоматизований процес дасть можливість зменшити час на налаштувальні операції та швидко переналаштуватись на новий режим роботи. При цьому потрібно дотримуватись взаємопропорційності між конструктивними параметрами висоти (довжини) пристрою, тиском та глибиною розробки покладів, таким чином, щоб забезпечувати норму об'ємного повітревмісту, яка рекомендується в межах $0{,}2\ldots0{,}3<\varphi_n<0{,}6\ldots0{,}8$ (*Хомич, 2014*), а з розрахункових міркувань оцінюється пропорційним відношенням об'єму повітря V_n у повітресапропелевій суміші об'ємом V.

$$\varphi_n = V_n / V, \text{ м}^3 \quad (1)$$

Це важливо, для того щоб за рахунок зміни геометричних параметрів пристрою та режимних параметрів робочого процесу забезпечувати поршневу (снарядну, пробкову) (*Хомич, 2014; Кононенко 2009*), тобто максимально продуктивну, структуру руху висхідного потоку суміші з повітря та органічного сапропелю.

Для забезпечення високопродуктивного виду структури повітросапропелевої суміші необхідно дотримуватись параметрів відносного занурення, яке має забезпечуватись автоматичним зануренням пристрою та збільшення його висоти, за збільшення робочого тиску подачі повітря до робочого органу, згідно поглиблених умов розташування підводного родовища. Або ж автоматично зменшувати зону зануренням пристрою і його довжину, якщо розміщення середнього шару сапропелю знаходиться на мінімальній відстані від водного дзеркала та зменшення робочого тиску подачі повітря до робочого органу, згідно прогнозованих умов розташування сапропелю. Тут варто враховувати і показники відхилення пристрою від горизонталі на кут не більше 10°. Для поршневого виду структури висхідного руху у піднімаючому трубопроводі показник відносного занурення повинен становити $0{,}4<\alpha_з<1{,}0$ та оцінюватись залежністю згідно (рис. 1):

$$\alpha_з = \frac{H}{H+h} = \frac{h_в + h_c + h_n}{h_з + h_m + h_p}, \quad (2)$$

де h – геометрична висота розташування пристрою над поверхнею води, м;
H – глибина добування сапропелю, м;
$h_з$ – висота змішувача м;
h_m – довжина піднімального трубопроводу радіусом r , м;
h_p – висота розташування вивідного рукава над піднімальним трубопроводом, м;
$h_в$ – товщина водного дзеркала водойми, м;
h_c – товщина шару сапропелю з під якого ведеться добування, м;
h_n – товщина шару пелогену, м
$H_Σ$ – габаритний розмір пристрою, м.

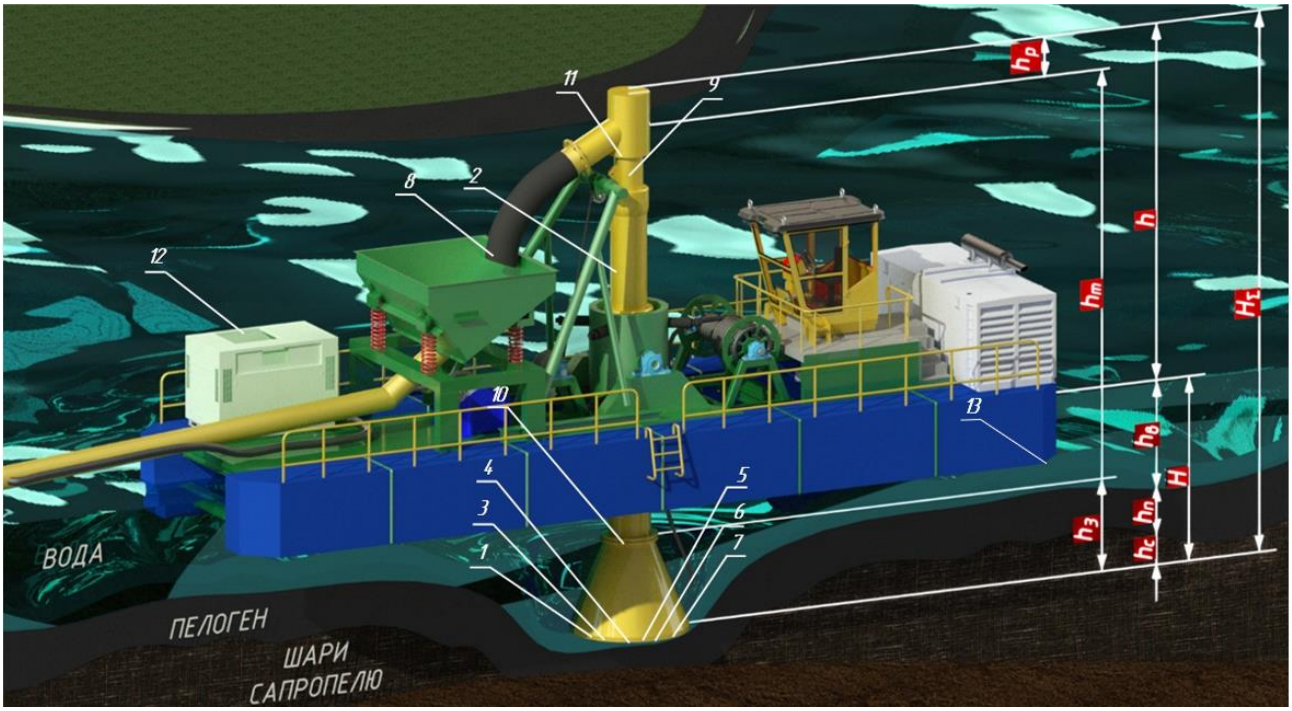


Рис. 1 – Схема ерліфтного засобу для добування сапропелю із зонами розміщення інформаційної апаратури: 1 – для втрат повітря у змішувачі, 2 – для зміни режиму руху у піднімальному трубопроводі, 3 – для глибини розробки, 4, 5, 6, 7, – для визначення в'язкості, щільності, липкості, вологості сапропелів, 8 – для визначення продуктивності, 9 – для відхилення від горизонту, 10, 11 – для визначення початкового та кінцевого повітревмісту, 12 – для подачі стиснутого повітря, 13 – для сканування рельєфу дна

Однак, для забезпечення усталеного робочого процесу за рекомендованого повітревмісту та відносного занурення слід враховувати і контролювати глибину розміщення покладів та сумарну геометричну висоту (довжину) добувного засобу, що описується залежністю (3). Оскільки глибина добування залежить від глибини розміщення середнього шару покладів, яка є нерівномірною.

$$h + H = h_з + h_m + h_p = h + h_в + h_c + h_n = H_Σ, \quad (3)$$

За рахунок непередбачуваних властивостей родовища, де поклади розміщені пошарово і мають неоднакову глибину залягання та товщину шару, слід прагнути до рівномірного видобування шарів покладів органічного сапропелю. Це в свою чергу призводить до корегування (збільшення та зменшення) глибини занурення засобу залежно від товщини шару. Справитись з такою проблемою без автоматизації робочого процесу та прогнозування режиму розробки досить складно, тому така проблема призводить до добування не якісної сапропелевої сировини.

Також важливу роль відіграє і спосіб переміщенні засобу (траншейний, воронковий, папільонажний, змішаний) тут розробку можна проводити за вертикально розміщеного засобу з

максимальним відхилення від горизонту 10º. Збільшення кута нахилу викликає можливість виходу повітря із змішувача в середовище родовища та втрати функціонування пристрою.

Слід зазначити, що механічне керування ерліфтною системо може привести до неправильно підібраних параметрів робочого процесу машини та призвести до виходу її з ладу. Так наприклад за недостатнього повітревмісту може утворитись явище «захлинання» пристрою (*Хомич, 2014)*, цей процес уособлює обвал покладів у піднімальному трубопроводі і втрату транспортування матеріалу. При збільшеному повітревмісту є ризик виходу повітря за межі корпусу змішувача або ж утворенні іншого режиму руху за якого знизиться продуктивність. При розробці покладів за збільшених глибин необхідно враховувати збільшення повітревмісту, а при розробці нерівномірних шарів постійно опускати та піднімати пристрій. Тому автоматизація ерліфтного засобу та процесу добування органічного сапропелю є досить своєчасною.

Так як, межі головних закономірних параметрів є досить великі, то для їх оптимального підбору необхідно автоматизувати робочі органи і автоматично регулювати технологічні параметри робочого процесу та за допомогою збору даних від кожного робочого вузла машини забезпечити добування якісної сировини за високопродуктивного робочого процесу. Також необхідно відштовхуватись від сталих вихідних даних конструкції забірного пристрою, наприклад діаметру піднімального трубопроводу, висоти змішувача, кількості робочих органів висоти зумпфу тощо. Збір даних повинен проводитись за допомогою встановлених давачів та покажчиків, а пульт керування повинен їх генерувати та давати потрібні завдання.

До апаратури, яка може здійснювати передачу даних та керувати сапропеледобувною машиною слід віднести, автоматичні запобіжники, манометри, приймачі, датчики завдань і сигналів, аналізатори, термометри, механізмами рівня (врівноваження), аерометри, навігатори, глибиноміри, контролери, регулятори, реле, покажчики тощо. Дані механізми можуть працювати в комплексі та мати спільні завдання.

Запропоновані пристрої та апаратура при взаємодії одна з одною формує автоматичну систему управління робочими процесом машини, і одночасно виконує функції прогнозування і діагностування, забезпечуючи безперервний робочий процес машини з передбаченням і попередженням перевантажень та поломок. Пропоновані зонами розміщення апаратури та приймачів системи автоматизованого прогнозування, налаштування і управління зображені на (рис. 1).

Так наприклад для забезпечення оптимального робочого процесу, сигнали системи налаштування в робочому режимі та режимі пуску, попереджатимуть робочий процес про збільшення глибини добування, підвищення густини і щільності залягання сапропелів, зменшення або збільшення об’ємної маси, тощо. Сигнали та апаратура для виконавчого процесу передбачають та попереджають про навантаження на піднімальний трубопровід, допустимі норми відхилення пристрою від вертикалі, робочий тиск в системі.

З іншої сторони передані сигнали та завдання будуть автоматично переналаштовувати робочий процес на ефективні режими роботи. Такі процеси можна назвати попереджувально-діагностичними, через те що, апаратура передбачатиме ймовірні перевантаження машини, що призводять до несправностей, та автоматично ліквідовуватиме їх переналаштувавшись на кращий робочий режим. Попередження будуть стосуватись, втрат повітря у змішувачі, узгодження відносного занурення, зміни повітревмісту у змішувачі та піднімальному трубопроводі, зміну режиму руху у піднімальному трубопроводі, збільшенні чи зменшенні глибини розробки, зниження чи підвищення в’язкості, щільності, липкості, вологості сапропелів тощо, які в кінцевому результаті також будуть відображатись на продуктивності машини. Відповідно конструктивні параметри приствою пов’язані з продуктивністю будуть мати стабільні значення та не піддаватись коригуванню.

Дані відповідних параметрів будуть прогнозувати кількість наробітку машини за зміну робочого часу, містити налаштувально-діагностичні процеси, обирати та регулювати ефективні параметри і режими роботи, запобігати зношенню і спрацюванню робочих і допоміжних органів. При цьому також відбуватиметься контроль добування якісного сировинного матеріалу для сільського господарства та забезпечуватимуться сприятливі фактори, які забезпечуватимуть мінімальні екологічні наслідки для природи.

В такому випадку для швидкого переналаштування, стабілізації чи прогнозування робочого процесу буде функціонувати програмно-технічний комплекс, який складається з блоків (рис. 2).

Задані та передбачувані вихідні параметри будуть спрямовувати команди та сигнали у відповідні блоки, які будуть передавати їх через апаратуру до кожного вузла (агрегату) і навпаки. Останні будуть отримувати наказ, виконувати поставлене завдання та генерувати нові передбачувані завдання чи стабілізувати процес.

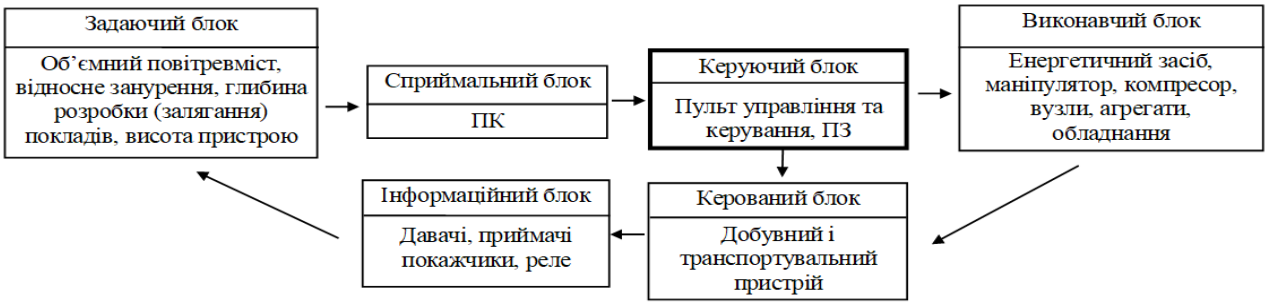


Рис. 2 – Структурна схема взаємодії блоків автоматичного прогнозування, налаштування і управління ерліфтними сапропеледобувними машинами

За запропонованою схемою буде функціонувати програмне забезпечення сформоване на основі багатокритеріальної оцінки та розрахункових конструктивно-технологічних параметрів робочого процесу добувної машини.

Відповідно інформаційні датчики будуть розміщуватись у робочих зонах та вузлах виконавчого і керованого блоку, передаватимуть завдання через задаючий блок до сприймального та інформуватимуть і встановлюватимуть оптимальні режим робочого процесу добувного засобу. За рахунок даного автоматизованого процесу відбуватиметься добування якісної сапропелевої сировини та унеможливлюватимуться поломки машини.

ВИСНОВКИ

На сьогодні застосування ерліфтних машин при добуванні органічного типу сапропелю, для сільського господарства являється високоефективним способом розробки родовищ. Вдосконалення таких машин спрямоване на розвиток автоматизованих процесів налаштування, управління, прогнозування. Представлений програмно-технічний комплексу покращить роботу машини та зменшить затрати часу на підготовчі процеси за рахунок швидкого налаштування та переналаштування робочого процесу розробки підводних родовищ сапропелів у непередбачуваних умовах їх залягання та розташування.

Дана система підвищить ефективність робочого процесу машини дозволить рівномірно розробляти шари покладів сапропелю і добувати якісну сировину з мінімальним впливом на порушення екосистеми водного об'єкта.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Хільчевский В.К. (2022) Особливості гідрографії Європи: річки, озера, водосховища // (Features of the hydrography of Europe: rivers, lakes, reservoirs) Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. № 4(66). DOI: https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.1
2. Програма дій «Порядок денний на XXI століття» («AGENDA 21»): ухвалена конференцією ООН з навколишнього середовища і розвитку в Ріоде-Жанейро (Саміт «Планета Земля» 1992 р.). Agenda for the 21st Century (AGENDA 21): adopted by the UN Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro (Earth Summit 1992). – Kyiv: Intelsfera, 2000. – 360 p.
3. Цизь, І.Є., Дідух, В.Ф., Голій, О.В., Хвесик, В.О., & Голій, В.О. (2023). Дослідження впливу сапропелю природної вологості на урожайність сої за екстремальної нестачі вологи (Study of the effect of natural humidity of sapropel on the growth of soybeans under extreme moisture shortage). Сільськогосподарські машини, 49, 22-30. https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1013
4. Мольчак Я.О. (1998) Деградація ґрунтів та шляхи підвищення їх родючості / М.М. Мельнійчук, І.В. Андрощук, В.М Заремба. Soil degradation and ways to increase their fertility – Настир'я. – С. 230.

5. Шевчук М.Й. (1996) Сапропелі України: Запаси, якість та перспективи використання / Sapropels of Ukraine: Reserves, quality and prospects for use / ААНУ, Інститут грунтознавства і агрохімії ім. О.Н. Соколовського. - Надстир'я, 1996. - 383 с
6. Хомич С.М. (2014) Обгрунтування параметрів забірного пристрою засобу для добування сапропелю Justification of the parameters of the intake device for sapropel extraction дис. ... к.т.н.: 05.05.11. Тернопіль. – С 190 с.
7. Хомич С.М. (2017) Технологічні основи пневматичного добування озерного сапропелю Technological basics of pneumatic extraction of lake sapropel / С.М. Хомич, І.Є. Цизь, В.А. Павлік // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Накук. журнал. - Вип. 1.(8) – Луцьк. С. 144-149.
8. Кононенко А.П. (2009) Експериментальні підтвердження впливу виду структури водоповітряного потоку на енергоємність ерліфта / Experimental confirmation of the influence of the type of water-air flow structure on the energy intensity of airlift // Вісник СДУ. Суми: –. – С. 34-42.
9. Електронний ресурс https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/19628-rezerv-deshevoi-orhaniky-sapropel.html

SOIL CONSERVATION – CONSERVATION OF THE FUTURE: AN AGROECOLOGICAL STUDY OF THE BEREZNE REGION

I. Myskovets*
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
soil resources,
agroecological assessment,
soil degradation,
fertility,
soil conservation

Article history:
Received 08.08.2025
Accepted 01.10.2025

****Corresponding author:***
myskovetsiryna@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

The article examines the agroecological condition of land resources in the Berezne territorial community of Rivne region within the context of current challenges to sustainable land use. Under the conditions of intensified agricultural production in Polissia, particularly in the Berezne region, anthropogenic pressure on land resources is increasing. This leads to a number of negative environmental consequences, including reduced soil fertility, intensified erosion processes, salinization, pollution, depletion of the organo-mineral composition, and disruption of the natural balance of ecosystems. Within the scope of this study, the natural and geographical conditions of the area were analyzed, soil types were identified, and their main properties were characterized. Special attention was given to identifying factors causing soil degradation, among which water erosion, disruption of crop rotation, excessive use of mineral fertilizers, and land drainage play a leading role. The assessment of soil fertility allowed the identification of potential ecological risks that threaten the sustainable functioning of the region's agroecosystem. The relevance of the chosen topic is driven by the growing anthropogenic load on soil resources, which leads to the disruption of their natural balance, decreased productivity, and loss of ecosystem functions. The aim of the study is to analyze the current state of land resources in the Berezne territorial community, identify the main ecological challenges, and develop effective recommendations for their conservation and rational use. The object of the study includes both natural and anthropogenic processes that cause qualitative changes in soils. The subject of the study comprises quantitative and qualitative characteristics of the area's soil cover. Based on the results, directions for the conservation and restoration of soil resources to ensure sustainable agricultural use were substantiated, including the implementation of environmentally sound farming methods, agroforestry and land reclamation, organic fertilization, and anti-erosion measures. The results of the study may serve as a foundation for further applied research and the development of effective soil protection strategies as a key factor in ensuring environmental safety, preserving biodiversity, and maintaining the socio-economic stability of the region..

DOI: 10.36910/acm.vi51.1888

To cite this article:
Myskovets, I. (2025). Soil conservation – conservation of the future: an agroecological study of the berezne region**.** *Agricultural Machines*, *51*, 56-63. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1888

УДК 631.319.07

ЗБЕРЕЖЕННЯ ҐРУНТІВ – ЗБЕРЕЖЕННЯ МАЙБУТНЬОГО: АГРОЕКОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БЕРЕЗНІВЩИНИ

І.Я. Мисковець*
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
ґрунтові ресурси,
агроекологічна оцінка,
деградація ґрунтів,
родючість,
охорона ґрунтів

Історія публікації:
Отримано 08.08.2025
Затверджено 01.10.2025

****Автор для листування:***
myskovetsiryna@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто агроекологічний стан земельних ресурсів Березнівської територіальної громади Рівненської області в контексті сучасних викликів сталого землекористування. За сучасних тенденцій розвитку аграрного сектору на Поліссі, зокрема в Березнівському регіоні, зростає антропогенний тиск на земельні ресурси. Це спричиняє низку екологічних наслідків, зокрема зниження родючості, активізацію ерозійних процесів, засолення, забруднення, виснаження органо-мінерального складу, а також порушення природної рівноваги екосистем. У межах даного дослідження проаналізовано природно-географічні умови території, визначено типи ґрунтів та охарактеризовано їх основні властивості. Особливу увагу приділено виявленню чинників, що зумовлюють деградацію ґрунтового покриву, серед яких провідну роль відіграють водна ерозія, порушення сівозмін, та осушення земель. Оцінка родючості ґрунтів виявила потенційні екологічні ризики, що становлять загрозу для сталого функціонування агросфери регіону. Актуальність обраної теми зумовлена зростаючим антропогенним навантаженням на ґрунтові ресурси, що призводить до порушення їх природної рівноваги, зниження продуктивності та втрати екосистемних функцій. Метою дослідження є аналіз стану земельних ресурсів Березнівської територіальної громади в умовах сьогодення, виявлення основних екологічних викликів та розробка дієвих рекомендацій їх збереження й ефективного використання. Об'єктом дослідження є як природні процеси, так і антропогенні процеси, що зумовлюють зміни ґрунтів. Предметом дослідження є характеристики ґрунтового покриву території як кількісні, так і якісні. За результатами дослідження обґрунтовано напрями збереження і відновлення земельних ресурсів для забезпечення сталого агровикористання, серед яких: запровадження екологічно обґрунтованих методів землеробства, агролісомеліорація, органічне удобрення та протиерозійні заходи. Результати дослідження можуть слугувати підґрунтям для подальших прикладних розвідок і розробки ефективних стратегій охорони ґрунтів як важливого чинника екологічної безпеки, збереження біорізноманіття та підтримання соціально-економічної стабільності регіону.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1888

Цитувати цю статтю:
Мисковець, І.Я. (2025). Збереження ґрунтів – збереження майбутнього: агроекологічне дослідження березнівщини. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 56-63. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1888

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ґрунти виступають ключовим ресурсом для сільськогосподарського виробництва та важливим елементом екосистеми, який гарантує продовольчу безпеку, збереження біорізноманіття і водний баланс. В умовах сільськогосподарської діяльності на Поліссі, зокрема на території Березнівщини, спостерігається зростаючий тиск на земельні ресурси, що призводить до погіршення їх родючості, ерозійних процесів, засолення, забруднення, виснаження мінеральних і органічних запасів та інших проявів деградації (*Berezhnja et al., 2022).*

У наукових джерелах, присвячених агроекологічним проблемам Полісся, наголошується на вразливості ґрунтів (дерново-підзолистих), характерних для Березнівщини, до порушення як водного режиму, так і повітряного режиму та зниження гумусу. Найбільшою загрозою для довкілля є забруднення ґрунтів радіонуклідами, а також важкими металами та патогенами. В Україні тривалий час домінувала незбалансована та ресурсовитратна модель землеробства, що негативно вплинула на родючість ґрунтів. За останні 20 років, за даними Центру управління родючістю ґрунтів, рівень гумусу зменшився на 0,5 %, і ця тенденція зберігається. Обмежене в Україні внесення добрив як органічних, так і мінеральних, зокрема на території Березнівської громади, не забезпечує відновлення деградованих ґрунтів. Рівень врожайності переважно досягається за рахунок виснаження природного потенціалу ґрунтів, що супроводжується поступовим зниженням їх продуктивності та агрофізичних властивостей. Подальше ігнорування цього процесу є неприпустимим, адже це лише поглибить існуючу проблему. Згідно з останніми агрохімічними дослідженнями, більшість українських ґрунтів мають рівень гумусу або середній, або підвищений. Проте, у порівнянні з попередньою агрохімічною паспортизацією (2013–2018 рр.), показник середньозваженого рівня гумусу знизився на 0,04 %, а в Поліській зоні – на 0,05 %, що є найвищим показником втрат. Особливо низький рівень гумусу спостерігається в ґрунтах піщаних та супіщаних, які переважають саме на території Полісся. Найбільше таких ґрунтів зосереджено у Волинській (82 %), Житомирській (60,7 %), Чернігівській (42,1 %) та Рівненській (40,5 %) областях (*Puzniak et al., 2022)*.

Загалом стан використання та охорони земельних ресурсів оцінюється як незадовільний і демонструє стійкість до погіршення. Для покращення їхнього стану необхідне першочергове впровадження добрив (органічних) і меліорантів, а також збільшення посівних площ з багаторічними травами і сидератами. Рівень фосфору у ґрунтах України здебільшого є несприятливим для отримання стабільних врожаїв, оскільки у всіх зонах спостерігається дефіцит фосфору. Калієм ґрунти забезпечені краще, хоча їх рівень низький і середній у 33,8 % орних земель, особливо на ґрунтах піщаних і супіщаних Полісся та Лісостепу. Натомість ґрунти південного Лісостепу і Степу з високим рівнем калію. Загалом, площі, які мають низький рівень фосфору та калію зростають, тоді як з високим — зменшуються (***Marchuk,*** *2023)*.

Березнівська територіальна громада Рівненської області — типовий поліський регіон, де поєднуються природні й антропогенні чинники утворення ґрунтів. Березнівщина охоплює територію Поліської природної зони, яка характеризується переважанням ґрунтів дерново-підзолистих, торфово-болотних та лучних ґрунтів. Внаслідок активного господарського освоєння ці ґрунти зазнають антропогенного навантаження. Оцінка ґрунтів цієї території є надзвичайно важливою для визначення їхнього потенціалу, а також розробки заходів збереження та сталого використання.

Попри наявність окремих досліджень у галузі агроекології, локальні особливості ґрунтового покриву та екологічні загрози, що виникають внаслідок діяльності на території Березнівщини, залишаються недостатньо вивченими. Це обумовлює необхідність комплексного дослідження стану ґрунтів регіону, аналізу чинників їх деградації та розробки обґрунтованих заходів збереження і відновлення. Особливо актуальними є впровадження ґрунтозахисних технологій, екологічно безпечного землекористування та систематичного моніторингу ґрунтового стану.

Отже, ключова проблема дослідження полягає у створенні агроекологічного підходу до збереження ґрунтів Березнівщини з урахуванням природно-кліматичних умов та сучасних практик землекористування.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У процесі дослідження використано підхід, який поєднує традиційні ґрунтознавчі, картографічні, агроекологічні та статистичні методи. Матеріалами дослідження слугували відкриті дані **Державної**

служби України з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастру) щодо земельних ресурсів Березнівської територіальної громади, статистичні матеріали Рівненського обласного управління сільського господарства; наукові праці з питань охорони ґрунтів, агроекології та сталого землекористування. Дослідження проводилися за методами, визначеними нормативним документом - Методикою проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення. Дані дослідження оброблялися з використанням **елементів статистичного аналізу** та графічної візуалізації даних (таблиці, діаграми). Застосування комплексу методів дало змогу всебічно охарактеризувати ґрунтові ресурси Березнівщини, оцінити їхній агроекологічний стан в умовах сьогодення і розробити практичні рекомендації збереження й відновлення ґрунтів.

Метою дослідження був аналіз стану земельних ресурсів Березнівщини в умовах сьогодення, виявлення основних екологічних загроз та формулювання рекомендацій їх збереження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Березнівська територіальна громада займає східну частину Рівненської області. Клімат Березнівщини – помірно-континентальний. Рельєф - рівнинний. Досліджувана територія займає південний сектор Поліської низовини. На території Українського кристалічного щита, де кристалічна основа подекуди виходить на денну поверхню, розташована Клесівська низовина — переважно заболочена територія з поодинокими скелястими підвищеннями та гранітними виходами, зокрема поблизу села Маринин. У цій місцевості також поширені форми рельєфу як яружні, так і балкові. Західну частину території займає Костопільська низовина. Березнівщина багата на поверхневі води: річки, озера, болота та ставки. Густота річкової сітки 0,3 км території. Найбільша річка Случ.

У земельному фонді територіальної громади сільськогосподарські угіддя становлять 61,9%, лісовкриті площі – 93,4%, забудовані землі – 2,9%, води – 3,4% (рис. 1.) (*Buslenko & Brechko, 2023).*

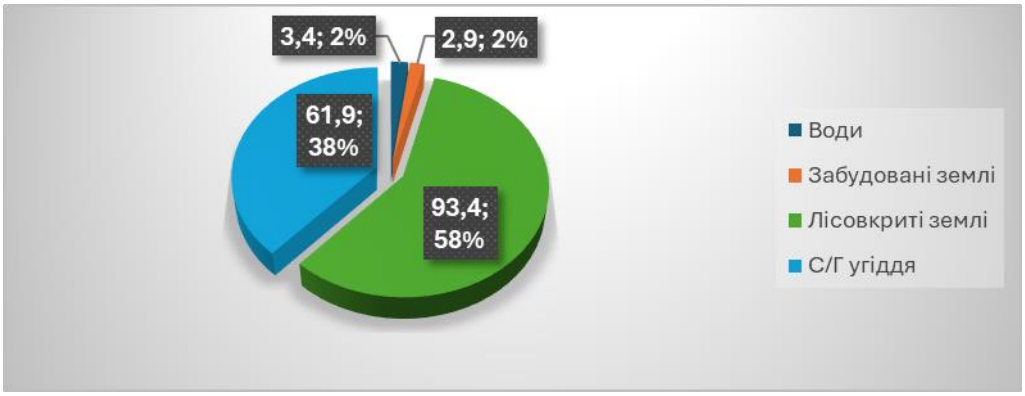


Рис. 1 – Земельний фонд за видами використання Березнівської територіальної громади (*Buslenko & Brechko, 2023)*

У складі аграрних земель частка ріллі становить 33,2%, пасовища займають 5,1%, сіножаті – 6,5%, багаторічні насадження – 0,4% (рис.2.) (*Buslenko & Brechko, 2023).* Ґрунтовий покрив території, як і всієї Поліської зони, представлений переважно грунтами дерново-підзолистими, дерново-оглеєними, лучними, а також грунтами лучно-чорноземними та торфово-болотними. Найбільшу частку сільськогосподарських угідь займають грунти дерново-підзолисті глеєві осушені– 6491,0 га (15,02%), дерново-підзолисті на піщаних відкладах – 5968,4га (13,81%), заплавні дернові глеєві осушені – 5576,6 (12,91%) та грунти дерново-підзолисті глеєві – 4343,6 га (10,05%). Для сільськогосподарської діяльності важливою та актуальною є агроекологічна оцінка ґрунтів, що включає визначення рівня легкогідролізного азоту, фосфору і калію, запасів гумусу та характеристик ґрунтового розчину *(Gamayunova & Sydiakina, 2023).*Обстеження сільськогосподарських угідь дозволяє надати реальну оцінку їх агрохімічного стану.

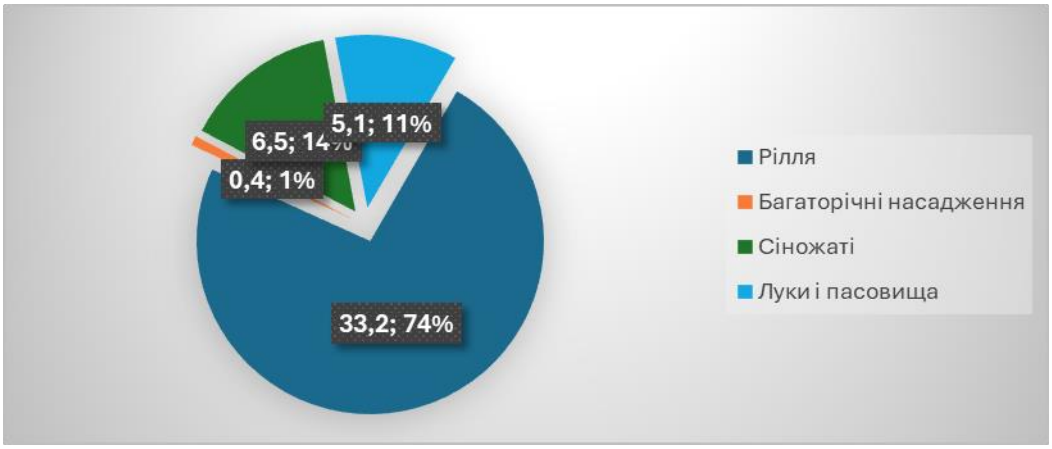


Рис. 2 – Типологія сільськогосподарських земель Березнівської територіальної громади (*Buslenko & Brechko, 2023).*

Згідно з проведеними дослідженнями ґрунтового покриву Березнівської територіальної громади, порівняно з попереднім циклом агрохімічного обстеження відбувся перерозподіл площ за рівнями родючісті. Зокрема, площі з підвищеним, низьким та високим рівнями зменшилися відповідно на 8,3 %, 7,0 % та 3,5 %, тоді як площі зі середнім рівнем збільшилися на 18,8 %. Водночас середньозважений показник рівня гумусу залишився стабільним 2,5 %, що відповідає середньому рівню для регіону (рис. 3).

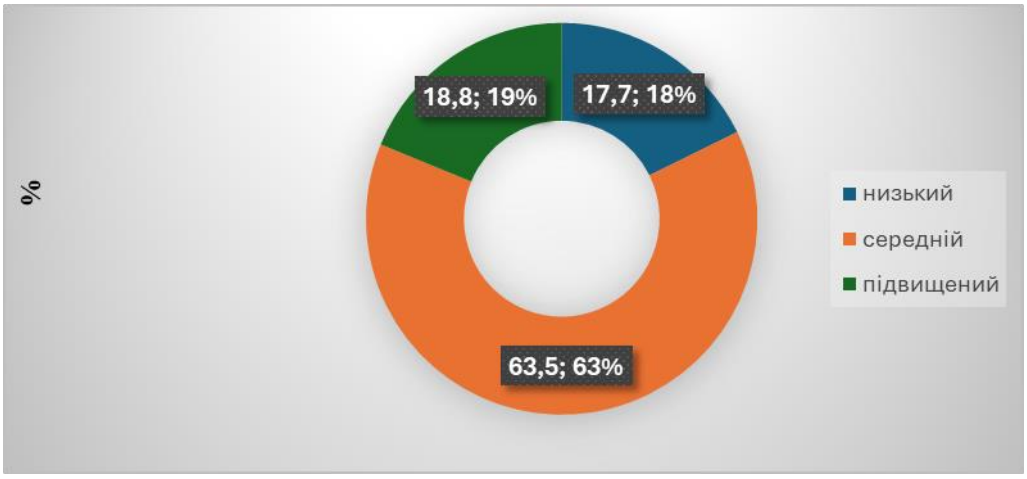


Рис. 3 – Розподіл ґрунтів за рівнем гумусу

За типами ґрунтів та рівнем кислотності їх розподіл виглядає наступним чином: з сильнокислою (pH_{KCl} менше 4,5) – 20,0 %, середньокислою (pH_{KCl} від 4,6 до 5,0) – 26,3 %, слабокислою (pH_{KCl} 5,1–5,5) – 15,8 %, близькою до нейтральної (pH_{KCl} від 5,6 до 6,0) – 13,7 %, нейтральною (pH_{KCl} від 6,1 до 7,0) – 20,0 % та слаболужною (pH_{KCl} від 7,1 до 7,5) – 4,2 % характеристикою ґрунтового розчину (рис. 4.).

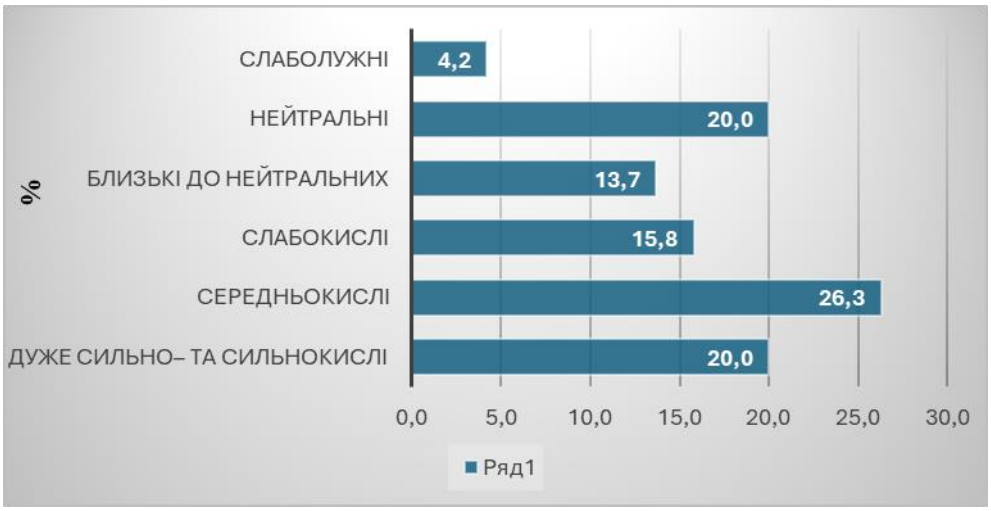


Рис.4 – Розподіл ґрунтів за кислотністю (р H_{KCl})

Дослідження земельних ресурсів показали, що за рівнем легко гідролізованого азоту ґрунти розподілилися таким чином: з дуже низьким вмістом (до 101 мг/кг) — 31,6 %, низьким (від 101 до 150 мг/кг) — 44,2 %, середнім (від 151 до 200 мг/кг) — 10,5 % та підвищеним (понад 200 мг/кг) — 13,7 % (рис. 5). Середньозважений рівень легкогідролізного азоту залишився стабільним і становить 103 мг/кг ґрунту. Таку стабілізацію обумовлено збільшенням мінеральних добрив, зокрема азотних, у порівнянні з періодом 2013–2018 років — з 12,1 кг/га до 72,2 кг/*га.*

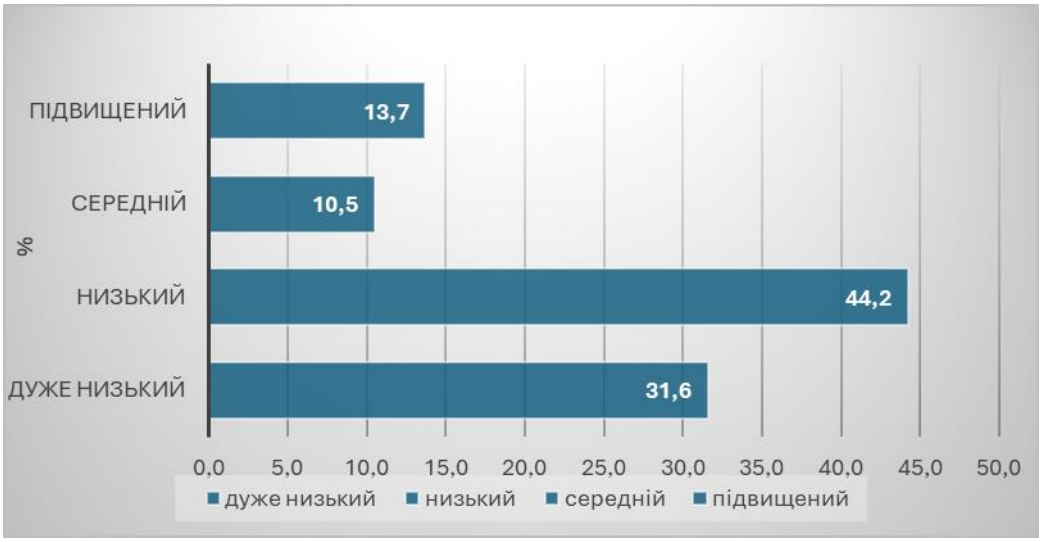


Рис. 5 – Розподіл ґрунтів за рівнем легко гідролізованого азоту

У порівнянні з попереднім туром обстеження середньозважений показник сполук фосфору зріс на 6 одиниць. Обсяги внесення мінеральних добрив на посівні площі зросли з 1,5 кг/га до 17,4 кг/га. Що стосується перерозподілу площ між двома турами обстежень, то площі з високим, низьким та дуже низьким рівнем фосфору зменшилися на 10,5; 3,1 та 1,1 % відповідно, а з середнім – збільшилися на 14,7 % (рис. 6).

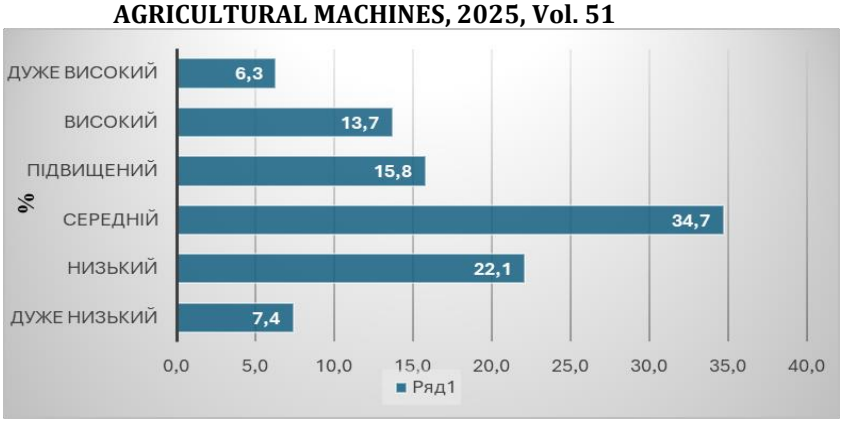


Рис. 6 – Розподіл ґрунтів за рівнем фосфору

В ґрунтах загальний рівень калію коливається від 0,5 до 3,0 %, що перевищує рівень азоту і фосфору у 10–15 разів. Торфові ґрунти мають найменший рівень калію (від 0,03 до 0,15%) . Ґрунти за рівнем калію розподілилися наступним чином: з дуже низьким вмістом (менше 41 мг/кг) – 44,2 %, низьким (від 41 до 80 мг/кг) – 42,1 %, середнім (від 81 до 120 мг/кг) – 9,5 % та підвищеним (від 121 до 170 мг/кг) – 4,2 % (рис. 7). Аналіз динаміки калію в ґрунтах показує зростання на 4 одиниці. Значне збільшення калійних добрив — з 1,9 до 18,9 кг/га — вплинуло на цей процес. Також відбувся перерозподіл площ: площі з високим та підвищеним рівнями калію зменшилися на 2,1 % та 1,1 % відповідно, тоді як площі з низьким рівнем збільшилися на 3,2 %.

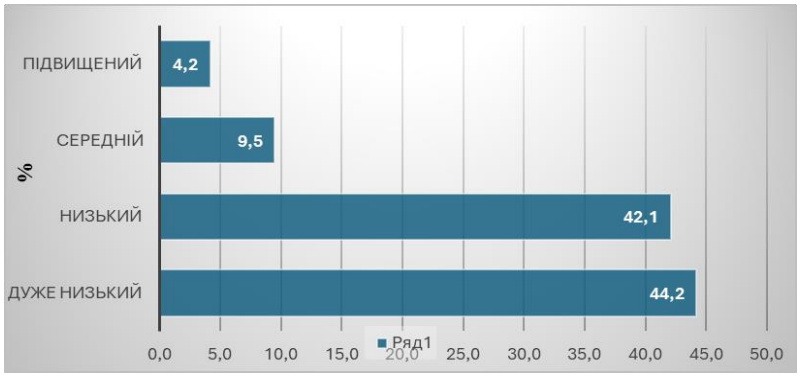


Рис. 7 – Розподіл ґрунтів за рівнем калію

Мікроелементи забезпечують правильний перебіг фізіолого-біологічних процесів у рослинах та беруть участь у синтезі хлорофілу, що сприяє підвищенню ефективності фотосинтезу. Крім того, їх присутність підвищує стійкість рослин до захворювань і несприятливих зовнішніх факторів, таких як нестача вологи в ґрунті чи коливання температури *(Kravchuk,2021).* Забезпеченість ґрунтів рухомим марганцем вказує на підвищений клас забезпеченості та відповідає вмісту у 2024 році на рівні 18,2 мг/кг та 11,9 мг/кг у 2018 році. Середньозважений рівень сполук бору становить 0,74 мг/кг ґрунту, що відповідає дуже високому ступеню забезпеченості цим елементом. За результатами обстеження ґрунтів, розподіл за рівнем сірки був таким: дуже низький (менше 3,1 мг/кг) — 56,8 %, низький (від 3,1 до 6,0 мг/кг) — 29,5 %, середній (від 6,1 до 9,0 мг/кг) — 10,5 % та підвищений (9,1–12,0 мг/кг) — 3,2 %. Варто також зазначити, що досліджені ґрунти характеризуються низьким та дуже низьким забезпеченням цинком і міддю, тоді як забезпеченість кобальтом є високою — 0,25 мг/кг ґрунту.

Дані досліджень підтвердили, що протягом п’ятирічного періоду в зразках ґрунту з моніторингових ділянок не виявлено залишкових кількостей пестицидів. Загальний рівень забруднення рухомими формами важких металів не перевищує встановлені гранично допустимі концентрації та відповідає показникам агрохімічної паспортизації. Середній еколого-агрохімічний індекс становить 33 бали, що відповідає родючості на рівні 13,5 ц/га зернових одиниць.

Для природних і техногенних територій характерний регресивно-акумулятивний розподіл важких металів таким чином: концентрація вища в гумусному шарі й різко зменшується в глибших горизонтах. На цей перерозподіл впливають такі чинники, як гранулометричний склад, кислотність, вміст органіки, катіонна ємність і дренаж.

Таким чином, забезпечити високу ефективність сільськогосподарського виробництва є неможливим без впровадження сучасних систем удобрення та комплексних ґрунтозахисних заходів. Це дозволить підтримувати збалансований та бездефіцитний рівень поживних елементів у ґрунті, сприятиме збереженню його родючості, підвищенню врожайності сільськогосподарських культур і стійкості агроекосистем до негативних зовнішніх факторів.

ВИСНОВКИ

Аналізування отриманих результатів основних показників макроелементів у ґрунтах обстеженої території вказує на низьку природну родючість ґрунтів Березнівської територіальної громади. Водночас варто зауважити, що потрібно зосередити увагу на ґрунтовідновлюючих процесах господарської діяльності. Для забезпечення азотного живлення слід впроваджувати біологізацію землеробства, що сприятиме ефективному засвоєнню біологічного азоту та одночасному оптимізованому використанню мінеральних добрив. Поліпшення фосфатного режиму ґрунтів можливо досягти шляхом внесення фосфорних добрив у поєднанні з біологічними препаратами, що підвищують їхню ефективність та підтримують ґрунтову біоту. Обов'язковими заходами є застосування мікроелементних добрив, що містять мідь та цинк шляхом основного та позакореневого внесення. Агротехнічні заходи боротьби із забрудненням ґрунтів важкими металами включають вапнування та внесення органічних добрив. Завдяки вапнуванню вдається у декілька раз зменшити вміст свинцю в сільськогосподарських культурах, які вирощують на забруднених ґрунтах. Вапно найбільш ефективне на ґрунтах, забруднених кадмієм. Обстеження сільськогосподарських угідь дозволяє надати реальну оцінку їх агрохімічного стану.

Для покращення показників ґрунтів слід розглядати раціональне застосування як мінеральних добрив, так і органічних добрив, впровадження біологізації землеробства, дотримання сівозмін та технологій вирощування сільськогосподарських культур в умовах сьогодення, як ключові складові системи землеробства.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Berezhniak, Ye. M., Naumovska, O. I., & Berezhniak, M. F. (2022). *Degradation processes in soils of Ukraine and their negative consequences for the environment*. Biological Systems: Theory and Innovation, *12*(3–4), Article 014. https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014
2. Kravchuk, N. N., Kropyvnytskyi, R. B., Zhuravel, S. V., Klymenko, T. V., & Trembitska, O. I. (2021). *Soil protective technologies as an important component of agricultural biologization in the conditions of the Central Polissia of Ukraine*. E3S Web of Conferences, *254*, Article 05012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125405012
3. Puzniak, O., Hrynchyshyn, N., Datsko, T., Andruszczak, S., & Hulko, B. (2022). Consequences of the long-term fertilization system use on physical and microbiological soil status in the Western Polissia of Ukraine. *Agriculture*, *12*(11), 1955. https://doi.org/10.3390/agriculture12111955
4. Gamayunova, V., & Sydiakina, O. (2023). The problem of nitrogen in modern agriculture. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, 27*(3), 46–61. https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2023.46
5. Buslenko, V., & Brechko, O. (2023, November). *Ecological assessment of the land resources structure in Rivne region*. In Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference (pp. 45–49). Kyiv: NULES of Ukraine. https://dglib.nubip.edu.ua
6. Marchuk, I. (2023). Актуальні питання збереження родючості ґрунтів України (*Topical Issues of Preserving Soil Fertility in Ukraine). Аграрна наука Західного Полісся: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Інноваційний розвиток землеробства на засадах еколого-економічної збалансованості», м. Рівне, 2023* (с. 25–27). Інститут сільського господарства Західного Полісся НААН України. https://www.isg.rv.ua/images/files/konferen/2023/materialy_konferencii_23_st.pdf

HYDRO-JET METHOD FOR SCOTS PINE NEEDLE SEPARATION FOR INTEGRATED PROCESSING

A. Herasymchuk, O. Tkachuk, V. Volianskyi, V. Bondar

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
hydro-jet method,
hydraulic jet,
Scots pine needles,
needle separation,
theoretical justification

Article history:
Received 28.07.2025
Accepted 10.10.2025

****Corresponding author:***
alexgop2017@gmail.com

ABSTRACT

The article presents a novel approach to the separation of Scots pine (Pinus sylvestris) needles from branches using a hydraulic jet, which ensures the preservation of needle structure for further integrated processing. The relevance of the study is driven by the need to utilize forestry by-products, particularly pine needles, as a source of biologically active compounds, essential oils, extracts, and cellulose-containing raw materials for the production of natural textile fibers.

A conceptual design of the unit has been developed, combining the processes of jet formation, branch feeding, needle separation, and collection. The proposed unit can be implemented in both mobile and stationary configurations, making it adaptable to various logging conditions.

Based on hydrodynamic analysis, the relationship between the key parameters – pressure before the nozzle, fluid flow rate, nozzle diameter, and the distance to the target – has been established. A theoretical model was constructed to calculate the minimum pressure required for effective needle detachment, taking into account gravitational acceleration and turbulent jet expansion. It was shown that the most efficient action zone is located within the compact part of the jet.

The hydro-jet method offers several advantages, including high process speed, simultaneous cleaning of the needles, energy efficiency, and structural simplicity. The technology aligns well with the principles of sustainable natural resource management and can become an effective component in the zero-waste processing chain of coniferous biomass.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1886

To cite this article:
Herasymchuk, A., Tkachuk, O., Volianskyi, V., & Bondar V. (2025). Hydro-jet method for scots pine needle separation for integrated processing. *Agricultural Machines*, *51*, 64-72. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1886

УДК 630*1

ГІДРОСТРУМИННИЙ СПОСІБ ВІДДІЛЕННЯ ХВОЇ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПЕРЕРОБКИ

О.П. Герасимчук, О.Л.Ткачук, В.О. Волянський, В.Н. Бондар

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
гідроструминний спосіб,
гідравлічний струмінь,
хвоя сосни звичайної,
відділення хвої,
теоретичне обґрунтування

Історія публікації:
Отримано 28.07.2025
Затверджено 10.10.2025

Автор для листування:*
alexgop2017@gmail.com

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто новий підхід до відділення хвої сосни звичайної від гілок на основі гідравлічного струменя, що дозволяє забезпечити збереження структури хвої для подальшої комплексної переробки. Актуальність роботи зумовлена потребою у використанні побічної продуктів лісового господарства, зокрема хвої, як джерела біологічно активних речовин, ефірних олій, екстрактів і целюлозовмісної сировини для виробництва текстильного волокна.

Розроблено принципову схему установки, в якій поєднано процеси формування гідравлічного струменя, подачі гілок, відділення хвої та її збору. Установка може бути реалізована як у мобільному, так і в стаціонарному виконанні, що дозволяє адаптувати її до різних умов заготівлі.

На основі гідродинамічного аналізу встановлено зв'язок між основними параметрами: тиском перед соплом, витратою рідини, діаметром отвору сопла та відстанню до об'єкта впливу. Побудовано теоретичну модель, яка дозволяє розрахувати мінімальний тиск для ефективного відривання хвої, враховуючи гравітаційне прискорення та турбулентне розширення струменя. Показано, що зона найбільш ефективної дії розташована в межах компактної частини струменя.

Гідроструминний спосіб має низку переваг: високу швидкість процесу, можливість одночасного очищення хвої, енергоефективність та конструктивну простоту. Технологія добре вписується в концепцію раціонального природокористування та може стати ефективним елементом ланцюга безвідходної переробки хвойної біомаси.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1886

Цитувати цю статтю:
Герасимчук, О.П., Ткачук, О.Л., Волянський, В.О., Бондар, В.Н. (2025). Гідроструминний спосіб відділення хвої сосни звичайної для комплексної переробки. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 64-72. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1886

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Повне використання побічних продуктів лісозаготівлі є актуальною екологічною та економічною проблемою. Під час рубок головного користування і рубок формування та оздоровлення лісів у насадженнях сосни звичайної значна частина біомаси припадає на гілки та хвою (до 30% маси крони) (*Герасимчук та ін., 2025*). Традиційно хвоя після лісозаготівлі або спалюється що є екологічно небезпечним, або залишається перегнивати на лісосіці, що призводить до втрати цінних ресурсів (*Герасимчук та ін., 2024, Герасимчук та ін., 2025*). Така практика не лише підвищує пожежну небезпеку, але й є причиною втрати потенційної сировини для багатьох галузей господарства. Хвоя сосни багата на біологічно активні речовини та целюлозу, завдяки чому її широко застосовують у медицині та косметології, для отримання екстрактів і ефірних олій, виробництва добрив, палива, целюлози та наноцелюлози (*Mahapatra, 2022, Herasymchuk & Tkachuk, 2023)*. Окрім того, хвоя розглядається як перспективний ресурс для виробництва натуральних текстильних волокон, відомих як «лісова вовна» (*Forest Wool, d.n., Tkachuk &Gerasymchuk, 2023)*. Концепція отримання текстильного волокна з хвої сосни була відзначена на міжнародному рівні. Зокрема, проект переробки хвої «Forest Wool» отримав премію Green Product Award за інноваційність та далекоглядність (*Forest Wool, d.n.).*

Незважаючи на значний потенціал, на сьогодні відсутні промислово ефективні технології масового отримання текстильного волокна з хвої. Ранні спроби реалізації такого виробництва не набули розвитку – наприклад, запатентована у США технологія отримання хвойного волокна не була впроваджена в промисловість (*John, 1890*). Основна перешкода – складність та енергоємність процесів збирання і переробки хвої. Хвою необхідно відокремити від гілок та очистити від домішок деревини й кори, які негативно впливають на якість кінцевого продукту. Відділення хвої ускладнене міцним кріпленням хвоїнок до гілок і їхньою гнучкістю. Для ефективного відділення потрібні спеціальні методи та обладнання (*Герасимчук та ін., 2025, Ткачук та ін., 2025)*.

Нині відомо кілька підходів до відокремлення хвої від гілок крони. Запропоновані механічні способи (наприклад, оббивання хвойної лапки), пневмомеханічні (комбіноване струшування із продувом повітрям), електрогідравлічні (ударні хвилі від розряду у воді), методи на основі високочастотного поля та кріогенні (заморожування з наступним струшуванням). Кожен із цих способів має обмеження. Механічні способи можуть пошкоджувати хвою, подрібнюючи голки, а також змішувати їх з трісками деревини. Пневматичні та пневмомеханічні методи потребують значної енергії на створення повітряного потоку і також спричиняють втрати хвої. Електрогідравлічний метод потребує складної апаратури і генераторів напруги. Високочастотні методи можуть послабити кріплення хвої, проте їх застосування в умовах реального виробництва обмежене. Кріогенний спосіб надто дорогий і енерговитратний (*Герасимчук та ін., 2022, Herasymchuk & Tkachuk, 2023, Герасимчук та ін., 2025)*.

Одним з перспективних підходів є пневмотермічний спосіб, запропонований в останні роки. Він полягає у тому, що гілки з хвоєю підсушують за підвищеної температурі, після чого хвоя відділяється вакуумним пневмотранспортом і збирається у контейнер. Дослідження продемонстрували принципову можливість реалізації пневмотермічного методу та його енергоефективність порівняно з механічним. Зокрема, сушіння за температури 80°С протягом 90 хв. з наступним вакуумним відсмоктуванням дозволяє суттєво знизити силу, необхідну для відривання хвої. Було обґрунтовано режими роботи мобільної установки для пневмотермічного відокремлення хвої: експериментально встановлено, що за вищевказаних параметрів сушіння зусилля відривання знижується настільки, що вакуумне відсмоктування ефективно відділяє хвою (*Ткачук та ін., 2022, Герасимчук & Ткачук, 2023, Герасимчук та ін., 2024*).

Попри успішність цієї технології, її впровадження потребує витрат енергії на сушіння, крім того під час сушіння відбувається інтенсивна втрата біологічно активних речовин, що не дає змогу застосовувати цей спосіб в комплексній технології переробки хвої (*Герасимчук та ін., 2025, Ткачук та ін., 2025*). Таким чином, пошук альтернативних методів відділення хвої залишається актуальним завданням.

Виходячи з аналізу сучасного стану питання, можна означити потребу в новому способі відділення хвої, який би забезпечив відокремлення хвої від гілок без її пошкодження для подальшої комплексної переробки з метою виробництва хвойного екстракту, ефірної олії та отримання

текстильного волокна (*Герасимчук та ін., 2025*). Такий спосіб має бути придатним до використання безпосередньо на лісосіці або на проміжному пункті переробки, щоб максимально скоротити втрати хвої під час транспортування і зберегти її якість для подальшої переробки.

Мета дослідження – розробка принципової схеми та теоретичне обґрунтування нового способу відокремлення хвої від гілок сосни звичайної за допомогою гідравлічного струменя, що дозволить зберегти цілісність та якість хвої для подальшої комплексної переробки (отримання екстракту, ефірної олії та текстильного волокна).

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження має теоретичний характер і базується на аналізі силових та гідродинамічних факторів, що впливають на процес відділення хвої водяним струменем.

Для моделювання впливу гідравлічного струменя на вузол кріплення хвої застосовано теоретичні основи гідродинаміки. Зокрема, для визначення швидкості витікання води з сопла використовували спрощену формулу Торрічеллі, що отримана на основі рівняння Бернуллі:

$$\upsilon_0 = \varphi\sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \tag{1}$$

де φ – коефіцієнт швидкості витікання рідини з отвору. p – тиск перед струменеформуючим соплом, Па, ρ – питома маса рідини, кг/м^3.

Для силових параметрів дії струменя на хвою використано закони механіки.

Силу, яку струмінь може прикласти до хвоїнки, визначали на основі залежності, що отримана із закону збереження імпульсу:

$$F = M \cdot \upsilon, \tag{2}$$

де M – масова витрата води через сопло, кг/с, υ – швидкість струменя, м/с.

Також при розробці принципової схеми установки використано метод синтезу, а для оцінки її переваг та недоліків у порівнянні з установками інших принципів дії – метод аналізу

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Для реалізації гідроструминного способу відділення хвої нами запропоновано установку, принципова схема якої наведена на **рис. 1**. У верхній частині установки розташована планка із соплами 1, що формують вертикальні струмені води для відділення хвої з хвойної лапки 2. Під зоною дії струменів проходить транспортер з перфорованою стрічкою 3, що має отвори діаметром та виконує функції транспортування лапки й одночасно пропускання хвої з водою. Безпосередньо під транспортером установлено збірник хвої 4, в який потрапляє вода разом із відокремленою хвоєю. Очищені від хвої гілки, транспортуються в збірник 5 і далі використовуються для виробництва тріски іншої переробки.

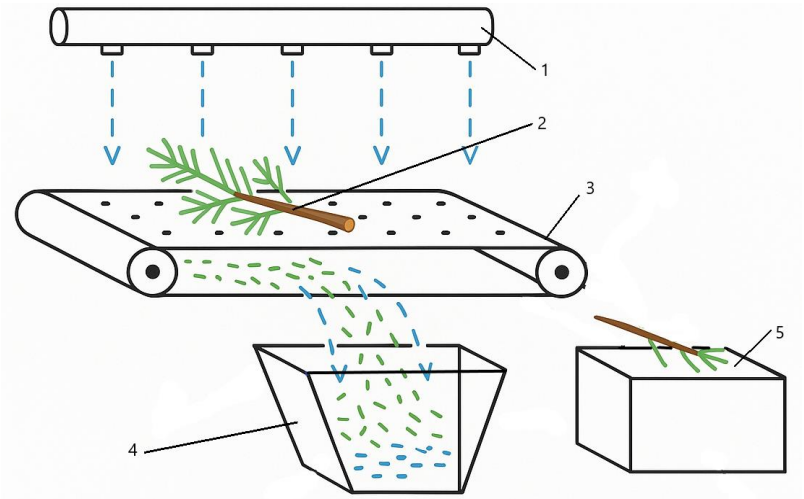


Рис. 1 – Принципова схема установки для відділення хвої гідравлічним струменем: 1 – планка із соплами; 2 – хвойна лапка; 3 – транспортер з перфорованою стрічкою; 4 – збірник хвої; 5 – збірник очищених гілок

Така компоновка дає змогу реалізувати всі основні операції – гідроструминне відділення, транспортування та накопичення хвої та очищених гілок, що спрощує обслуговування, зменшує габарити установки та забезпечує безперервне відділення хвої. Для забезпечення відділення хвої від гілок і уникнення її руйнування важливо правильно підібрати відстань від сопел до транспортера, тиск і витрату води через струменеформуючі сопла.

Потік води, що виходить із сопла установки для відділення хвої, є гідравлічним струменем у класичному розумінні – не обмеженим твердими стінками та структурно подібним до інших гідравлічних струменів (пожежних, фонтанних тощо). Струмінь має компактну зону L_K, в межах якої розподіл швидкостей є рівномірним, що забезпечує максимальну концентрацію енергії на малій площі дії (**рис. 2**). Після компактної зони відбувається змикання турбулентних шарів на осі струменя починається зона розширення L_B.

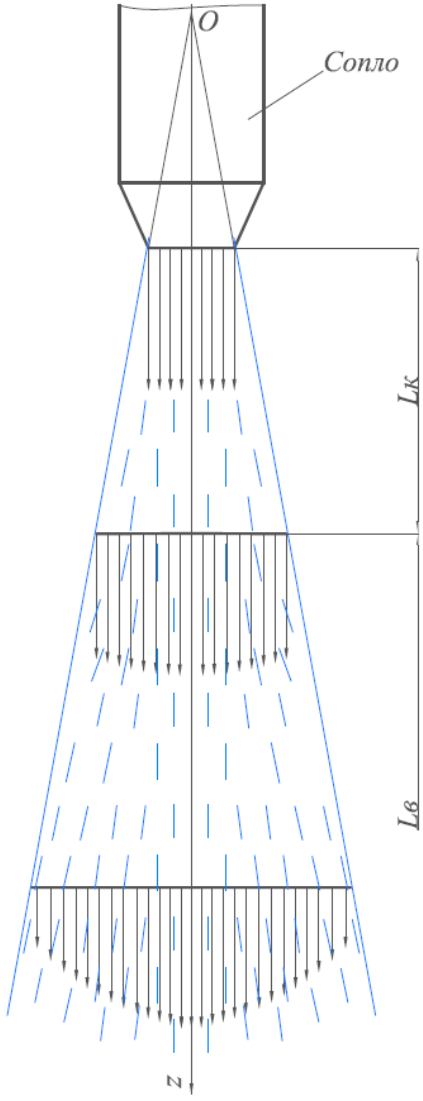


Рис. 2 – Гідравлічний струмінь, що формується соплом установки

Компактна частина гідравлічного струменя формується доти, доки зсувні турбулентні шари, що розростаються симетрично від периферії, не змикаються на осі. Без дії гравітації ця точка настає на відстані (*Pope, 2000*):

$$L_{K_0} = C \cdot d_o \ , \tag{3}$$

де $C = 6 \pm 1$ – емпірична стала, отримана з класичних вимірювань потенційного ядра.

Підвищена інерція ядра гідравлічного струменя сповільнює його руйнування, ефективний коефіцієнт розширення зменшується, і компактна зона продовжується ще на відстань ΔH:

$$L_K = L_{K_0} + \Delta H \,. \tag{4}$$

Щоб оцінити ΔH виходимо з рівняння руху центру ядра. Початкова швидкість у перерізі сопла дорівнює υ_0 і визначається за формулою (1). Далі центр прискорюється за законом $\upsilon(t) = \upsilon_0 + gt$, де g – прискорення вільного падіння м/с^2, t – час руху струменя, с.

Час, необхідний зсувному турбулентному шару, щоб пройти половину діаметра (*Pope, 2000*) $t_c = \dfrac{L_{K_O}}{\upsilon_0}$.

За наявності прискорення за цей же зсувний турбулентний шар проходить відстань:

$$L_K = \upsilon_0 t_c + \frac{g t_c^2}{2} = L_{K_0} + \frac{g}{2}\left(\frac{L_{K_0}}{\upsilon_0}\right)^2 . \tag{5}$$

Отже , з врахуванням (4) отримаємо:

$$\Delta H = \frac{g}{2}\left(\frac{L_{K_0}}{\upsilon_0}\right)^2 . \tag{6}$$

Розкриємо вираз через безрозмірний критерій Фруда $F_r = \dfrac{\upsilon_0}{\sqrt{g d_0}}$. Підставивши (3) в (6) отримаємо:

$$\Delta H = \frac{C^2}{2}\frac{d_0}{F_r^2}, \qquad \frac{\Delta H}{L_K} = \frac{C}{2F_r^2} / \tag{7}$$

Таким чином, подовження компактної зони гідравлічного струменя обернено пропорційне квадрату критерію Фруда. За великих вихідних швидкостях гідравлічного струменя ($F_r > 10$) ним можна нехтувати, тоді як за невеликих швидкостей або великих діаметрів компактна зона гідравлічного струменя може значно подовжуватися.

Саме в межах компактної зони гідравлічного струменя відбувається найбільш ефективна його дія на хвойну лапку та відділення хвої від гілок. В цій зоні доцільно розміщувати зону контакту струменя з гілкою для досягнення максимального ефекту відокремлення хвої. Тобто, відстань від планки з соплами до перфорованої стрічки транспортера (див. **рис. 1**) не повинна перевищувати величини компактної зони дії гідравлічного струменя.

Витрату через сопло можна визначити (*Придатко, Ковальчук, 2023*):

$$Q_0 = \upsilon_0 S_c = \varepsilon \upsilon_0 S \,, \tag{8}$$

де S_c, S – площа стиснутого перерізу струменя та отвору сопла відповідно, м^2, ε – коефіцієнт стиску.

Коли сопло повернене вниз, сила тяжіння прискорює частини рідини, що рухаються в струмені, і осьова швидкість зростає за законом:

$$\upsilon(z) = \sqrt{\upsilon_0 + 2gz} \,. \tag{9}$$

де z – вертикальна координата, направлена вниз, м.

Після проходження компактної зони S_K , турбулентні вихори захоплюють навколишнє повітря, що впливає на осьову швидкість у сторону зменшення та оцінюється фактором (*Wright, White & Alexander, 2013*):

$$\chi(z) = \frac{1}{1 + 2\alpha z / d_0}, \tag{10}$$

де $\alpha \approx 0{,}07$ – емпіричний коефіцієнт для круглого струменя.

Ефективна швидкість на осі гідравлічного струменя безпосередньо перед ударом по хвої:

$$\upsilon_{ef}(z) = \upsilon(z)\chi(z), \tag{11}$$

Відповідний гідродинамічний тиск:

$$p(z) = \frac{\rho \upsilon_{ef}^2(z)}{2} \,. \tag{12}$$

Проекцію однієї хвойної голки на площину, перпендикулярну до струменя, позначену S_X Сила, що розвивається струменем, становить:

$$F(z) = C_1 p(z) S_X . \quad (13)$$

де C_1 – безрозмірний коефіцієнт передавання імпульсу (*Wright, White & Alexander, 2013*).

Підставивши (1), (9)-(12) у (13), отримаємо:

$$F(z) = \frac{\rho C_1 S_X}{2} \frac{\upsilon_0 + 2gz}{(1 + 2\alpha z / d_0)^2} . \quad (14)$$

Правило відділення хвої від гілок сформулюється як нерівність

$$F(z) \geq F_X , \quad (15)$$

де F_X – експериментально визначене мінімальне зусилля, потрібне для відділення хвої.

Прирівнюючи (14) з 15) і врахувавши (1) отримуємо рівняння мінімального робочого тиску як функцію відстані від сопла до шару хвої (перфорованої стрічки транспортера):

$$p_{\min}(z) = \frac{F_X (1 + 2\alpha z / d_0)^2 - \rho C_1 S_X g z}{C_1 S_X \varphi^2} . \quad (16)$$

Сила (14) містить два протилежні тренди: доданок $2gz$ у чисельнику щораз збільшує кінетичну енергію частинок, тоді як знаменник $1 + 2\alpha z / d_0$ зменшує швидкість через захоплення турбулентними вихорами навколишнього повітря. Шукаючі максимум функції (14) за z (диференціюванням за безрозмірною змінною $\lambda = z / d_0$, одержуємо оптимальну відстань від планки з соплами до перфорованої стрічки транспортера:

$$L^* = d_0 \frac{g d_0 - 2\alpha \upsilon_0^2}{2\alpha g} / \quad (17)$$

Якщо початкова швидкість велика настільки, що $gd < 2\alpha\upsilon_0^2$, чисельник формули (17) від'ємний і максимум зміщується в межу $L \to 0$; тобто сопла потрібно встановлювати якомога ближче до голок.

Знаючи L^*, підставляють його у (16) та можна отримати мінімальний тиск $p_{\min}$. Далі за формулою формулами (1)та (8) визначити необхідну швидкість витікання рідини з сопла υ_0 та витрату Q_0. Так як планка із соплами містить N однакових сопел з однаковими параметрами, то сумарна подача насоса повинна забезпечити NQ_0 за тиску не нижче ніж $p_{\min}$.

Таким чином зв'язок «тиск – витрата – відстань» визначається рівняннями (14)–(17): тиск і діаметр сопла задають вихідну швидкість; швидкість разом із гравітаційним приростом і турбулентними втратами формує динамічний тиск, що діє на хвою. Відстань, за якої цей тиск, з урахуванням площі проєкції та коефіцієнта імпульсу, дорівнює зусиллю відривання, є оптимальною, а відповідний тиск – мінімально допустимим для забезпечення відділення хвої.

Запропонований спосіб відділення хвої може бути реалізована в наступним чином. У вигляді мобільної установки на лісосіці, що працює безпосередньо під час заготівлі. Наприклад, це може бути навісне обладнання на харвестер або форвардер: спеціальна камера, куди подаються зрізані гілки, де вони обробляються, а хвоя збирається у бак. Другий спосіб – стаціонарна лінія, встановлена на деревообробному підприємстві або проміжному складі. Туди привозять хвойну лапку, яку пропускають через установку з гідравлічними струменями. Обидва способи мають свої переваги. Мобільний спосіб дозволяє одразу в лісі виділяти хвою, запобігаючи її втратами і зменшуючи витати на транспортування. Стаціонарний – може забезпечити вищу продуктивність і кращий контроль параметрів, проте вимагає транспортування хвойної лапки до установки. Вибір способу залежить від умов: за великих обсягів лісозаготівлі (наприклад під час рубок головного користування) доцільно мати пересувний комплекс, а за централізованому зборі – стаціонарний.

Гідроструменевий спосіб має переваги над механічним і пневмомеханічним впливом. Однією з головних переваг цього способу є висока швидкість процесу: струмінь може практично миттєво збивати хвою, тому очистити гілку можна за секунди. Для порівняння, у пневмотермічному методі лише сушка займає десятки хвилин. Ще одна перевага – охолоджувальний і очищувальний ефект: вода змочує хвою, змиває пил, ґрунт і інші забруднення. Це важливо, якщо хвоя піде на екстракцію –

чиста сировина дасть якісніший екстракт з меншим вмістом небажаних домішок. Механічний спосіб не забезпечують такого очищення.

Енергоефективність гідроструминного відділення потенційно висока. Сучасні насосні установки мають коефіцієнт корисної дії більше 80%. При багаторазовому використанні води втрати на її мінімальні. Тому витрати енергії на один кілограм відокремленої хвої є нижчими, ніж при механічному або пневмотермічному способах. До того ж, установка відносно проста за конструкцією. Це дешевше у виробництві, ніж вакуумно-сушильна установка чи кріогенна система. Вода як робоче середовище безпечна, нетоксична, недорога і легкодоступна. За умови фільтрації система потребує відносно невеликої її кількості в замкненому циклі.

Водночас, є і можливі обмеження методу. Робота з водою означає, що отримана хвоя буде вологою – її потрібно або негайно переробляти (наприклад, на екстракт чи ефірну олії), або сушити перед зберіганням чи для виробництва волокна. Це додає стадію сушіння, але на відміну від пневмотермічного методу, сушити доведеться вже відокремлену хвою, яку легше і рівномірніше висушити в сушарці, ніж на гілках. Ще один особливістю є робота за від'ємних температур, коли вода в системі може замерзати. Це ускладнює використання мобільних установок в зимових умовах на лісосіці.

ВИСНОВКИ

У статті запропоновано новий спосіб відділення хвої сосни звичайної від гілок за допомогою гідравлічного струменя, що забезпечує збереження цілісності та якості сировини для подальшої комплексної переробки. Розроблено принципову схему установки, що поєднує процеси формування струменя, транспортування гілок, відділення хвої та її збору. Конструкція є придатною як для стаціонарного, так і для мобільного використання, що дозволяє адаптувати технологію до різних умов лісозаготівлі.

У ході дослідження теоретично встановлено зв'язок між ключовими параметрами процесу – тиском, витратою води, швидкістю струменя, діаметром сопел та відстанню до зони контакту з гілками. Отримані аналітичні залежності дозволяють визначати мінімально необхідні гідродинамічні характеристики для забезпечення ефективного відділення хвої без її механічного пошкодження. Це дає змогу гнучко налаштовувати роботу установки відповідно до конкретних умов експлуатації.

Гідроструминна технологія має ряд важливих переваг порівняно з відомими методами: високу швидкість процесу, можливість очищення хвої під час відокремлення, енергоефективність та технологічну простоту. Разом з тим, вона може бути обмеженою в застосуванні за низьких температур.

Запропонований спосіб відокремлення хвої може бути ефективним елементом у структурі безвідходної переробки хвойної біомаси, забезпечуючи підвищення ресурсної ефективності лісозаготівель та відповідність сучасним екологічним підходам у лісовому господарстві.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Forest Wool/Pine needle fiber (d.n.). Retrieved May 12, 2024, from. https://www.gp-award.com/en/produkte/Forest-Wool

John B. N. Berry. (1890). Process of making pine needle fiber. *Specification forming part of Letters Patent* No. 437,555. https://patents.google.com/patent/US437555A/e

Herasymchuk,O., & Tkachuk,O. (2023). Regarding the question of obtaining natural textile fibers from pine needles. In *The V-th International Symposium Creativity. Technology*. Marketing. 31 March, Chișinău, Republic of Moldova, from- Chișinău: Tehnica-UTM, 2023. 203-209. https://fd.utm.md/wp-content/uploads/sites/37/2023/11/Simpozion-CTM-2023.pdf

Mahapatra, N. N. (2022). Processing of pine needles (perul) fibers in textile industries. *Dyes & Chemicals, Fibres and Yarns*. https://textilevaluechain.in/news-insights/fibres-yarns-news/processing-of-pine-needles-perul-fibers-in-textile-industries/

Pope, S. B. (2000). Turbulent flows. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511840531.

Wright, D., White, R., & Alexander, T. (2013). Impact force of high-pressure waterjets. I *Proceedings of the WJTA Conference* (pp. 11-18).

Герасимчук, О.П., Ткачук,О.Л. (2023). Обґрунтування режиму роботи пневмотермічної мобільної установки для відокремлення хвої сосни звичайної. *Сільськогосподарські машини*, 49, 75-80. / URL: https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1025 .

Герасимчук, О. П., Ткачук, О. Л., Пуць, В. С., & Охремов, А. І. (2024). Отримання текстильного волокна з хвої за допомогою машини для м'яття з гідравлічним притисканням. *Наукові нотатки*, *77*, 120–124. https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.77.19.

Герасимчук, О. П., Ткачук, О. Л., & Волянський, В. О. (2025). Впровадження комплексних машинно-технологічних систем для заготівлі та переробки хвої сосни звичайної. *Наукові нотатки, 81*, 133–140. https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.20.

Придатко, В., & Ковальчук, О. (2023). Основи гідравліки та водопостачання [навчальний посібник]. СПОЛОМ. https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/12222/1/гідравліка%20посібник.pdf/

Tkachuk O.L., Gerasymchuk O.P. (2023). Perspective technologies of obtaining natural textile fibers from pine needles. *Якість та безпечність товарів: [матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції, Луцьк, 28 квітня 2023*. Луцьк, Україна (с. 183-185). https://drive.google.com/file/d/1rADR7tuZmsrwRRmnqYIV_ynN9AXXu6kr/view.

Ткачук О., Герасимчук О. (2021). Стан та перспективи застосування деревної целюлози для виробництва хімічних волокон. *IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 202*1, Khmelnytskyi,Ukraine, (pp. 204-205).

Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., & Резнікова,В.В. (2022). Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон. *Сільськогосподарські машини*, 48, 67-73. https://doi.org/10.36910/acm.vi48.842

Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., & Бичук, В. В. (2025). Отримання волокна з відходів виробництва хвойного екстракту і ефірної олії. *Якість та безпечність товарів: [матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції, Луцьк, 16 квітня 2025. Луцьк, Україна (с. 180-181).* https://ndekc.lviv.ua/pdf/250625.pdf#page=180

THERMOTECHNICAL PROCESSES OF CONVERSION OF OIL FLAX STEM INTO TRUST

V. Didukh[1]*, T. Shchur[2]

[1]Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[2]State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
separation technology, oil flax, soil, rolls, stems, moisture, movement, trust.

Article history:
Received 31.07.2025
Accepted 22.08.2025

Corresponding author:
V_Didukh@ukr.net

ABSTRACT

A detailed analysis of the process of transforming straw stalks into trusts was carried out, taking into account natural factors during the period of harvesting oilseed flax. An attempt to resume cotton cultivation in the territories of the Southern regions as the main raw material for the production of smokeless gunpowder indicates the need for research with other fiber-rich agricultural crops. These include oil flax, which in the conditions of climate change is ideal for growing in Western Polesie both for seeds and within 10 c/ha of short unoriented fiber. The quality of the fiber largely depends on the condition of the stalk, harvesting technology, natural and climatic conditions and the conditions of aging of the stalks on the flax field. It is also important to take into account the availability of technical support to create conditions for the transformation of stalks into trust. It has been established that the effective process of transforming oil flax stalks into trust depends on the presence of moisture and positive temperatures. Therefore, it is necessary to explore different options for harvesting technologies and, in the absence of atmospheric moisture in conditions of global warming, to ensure its movement from the soil by cutting the stems at a height of 30-50 mm. For this purpose, an improved separate harvesting technology is proposed, when the stems in the early yellow ripeness phase are cut with a rotary mower. After separating the seeds, it is important to consider the condition of the stalks. If the swaths are threshed with a combine harvester, then the stalks are partially destroyed and fiber loss is possible. When using other technical means such as a picker-thresher, the integrity of the stalks is preserved. Accordingly, the loss of both seeds and fiber will be minimal. Thermophysical processes when placing whole stems in rolls placed in a longitudinal plane on the soil surface are substantiated. Rational density parameters of such rolls are established as the basis of the accelerated process of converting oil flax stems into trust.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1885

To cite this article:
Didukh, V., & Shchur, T. (2025). Thermotechnical processes of conversion of oil flax stem into trust. *Agricultural Machines*, *51*, 73-82. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1885

УДК 631.16:536, 641

ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ ПЕРЕТВОРЕННЯ СТЕБЕЛ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО У ТРЕСТУ

В.Ф. Дідух*, Т.Г. Щур

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
роздільна технологія, льон олійний, ґрунт, валки, стебла, волога, переміщення, треста.

Історія публікації:
Отримано 30.07.2025
Затверджено 22.08.2025

Автор для листування:
Didukh_V@ukr.net

АНОТАЦІЯ

Проведено детальний аналіз процесу перетворення стебел соломи у тресту з врахуванням природних чинників у період збирання льону олійного. Спроба відновлення вирощування бавовни на територіях Південних областей, як основної сировини для виробництва бездимного пороху вказує на необхідність проведення досліджень з іншими лубоволокнистими сільськогосподарськими культурами. До таких відноситься льон олійний, який в умовах зміни клімату ідеально підходить для вирощування у Західному Поліссі як на насіння, так і у межах 10 ц/га короткого неорієнтованого волокна. Якість волокна значною мірою залежить від стану стеблостою, технології збирання, природо-кліматичних умов та умов вилежування стебел на льонищі. Важливо також враховувати наявність технічного забезпечення для створення умов для перетворення стебел у тресту. Встановлено, що ефективний процес перетворення стебел льону олійного у тресту залежить від наявності вологи та плюсових температур. Тому, необхідно дослідити різні варіанти технологій збирання а, за відсутності атмосферної вологи в умовах глобального потепління, забезпечити переміщення з ґрунту за рахунок зрізання стеблостою на висоті 30-50 мм. Для цього запропоновано удосконалену роздільну технологію збирання, коли стеблостій у фазі ранньо-жовтої стиглості зрізують роторною косаркою. Після відділення насіння, важливо враховувати стан стебел. Якщо валки обмолочувати зернозбиральним комбайном, тоді стебла частково руйнуються та можлива втрата волокна. При застосовуванні інших технічних засобів типу підбирач – молотарка, цілісність стебел зберігається. Відповідно втрати як насіння, так і волокна будуть мінімальними. Обґрунтовано теплофізичні процеси при розміщенні цілих стебел у валках, розміщених у поздовжній площині на поверхні ґрунту. Встановлені раціональні параметри щільності таких валків, як основи прискореного процесу перетворення стебел льону олійного у тресту.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1885

Цитувати цю статтю:
Дідух, В.Ф., & Щур, Т.Г. (2025). Теплотехнічні процеси перетворення стебел льону олійного у тресту. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 73-82. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1885

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Пошук шляхів отримання сировини для виробництва бездимного пороху у вигляді натурального волокна призвів до активізації спроб розпочати вирощування бавовнику на Півдні держави (*Agroportal, 2025; Kurkul, 2025)*. Висновки про перспективність її вирощування можна буде зробити не раніше, ніж через п'ять років. Адже, зміна кліматичних умов призвела збільшення територій, на яких вирощування сільськогосподарських культур без поливу, є неможливим, в тому числі, бавовнику.

Орієнтування у сільськогосподарському виробництві лише на зернові може призвести до подальшої деградації ґрунтів *(аналітична зап. кол. авт., 2018; Гаврилюк В.А та ін., 2021)*. Серед рекомендованих заходів, для зниження даного процесу на окремих територіях пропонується введення у сівозміни сільськогосподарських культур, які сприяють стабілізації біоекологічних функцій у родючому шарі. До таких відносять льон олійний із значним продуктивним резервом у вигляді стеблової частини врожаю для отримання короткого неорієнтованого волокна *(Рудік Н., 2020; Папроцький Р., 2021; Yaheliuk S et al., 2020).* Таке волокно потребують різні галузі, в тому числі військова, при виробництві бездимного пороху. З іншої сторони, наявне у стеблах волокно у деякій мірі гальмує поширення посівів льону олійного, через проблеми у процесах збирання прямим комбайнуванням і подальшою утилізацією залишків обмолоту. Підвищення ефективності вирощування льону олійного залежить від вибору раціональної технології його збирання та напрямків використання стеблової маси *(Ягелюк С., Дідух В., 2020; Шувар А., Войтович. О., 2012).* Для отриманні високоякісного волокна з льону олійного, аналогічно до стебел льону – довгунця, їх необхідно перетворити у тресту. Глибокі дослідження, даного явища, не проводились. Зміна клімату *(Wilson L. et al., 2021)* через нестачу вологи призводить до втрат врожаю більшості сільськогосподарських культур. Нестача вологи негативно впливає і на льон олійний не зважаючи на те, що його відносять до посухостійких культур. Тому, площі посівів у державі постійно коливаються. Їх збільшення можливе за рахунок Північних регіонів *(Arias P. et al., 2021)*. На даних територіях необхідно реалізувати роздільну удосконалену технологію збирання з можливістю отримання окрім насіння короткого неорієнтованого волокна.

Теплофізичні процеси, які відбуваються під впливом навколишнього середовища, призводять до зміни теплофізичних характеристик матеріалів, які широко представленні у науковій літературі *(Федоров В. та ін., 2014; Обертюх Р., 2010).* До основних теплофізичних характеристик відносять - теплоємність, теплопровідність і температуропровідність. Значення даних властивостей залежить від багатьох технологічних та інших факторів, пов'язаних з параметрами навколишнього середовища: температурою і вологістю, часу їх впливу на оброблюваний об'єкт.

Перетворення стебел соломи у тресту пов'язано з явищем перенесенням тепла і маси в системі: ґрунт – стебла у валках – навколишнє середовище. При цьому ґрунт і стебла є капілярно - пористими тілами, для яких перенесення тепла і маси визначається різницею потенціалів. При дослідженні даної системи важливо враховувати, що рух вологи у ґрунті це складний процес, який включає переміщення води у різних формах (рідкій, газоподібній, зв'язній) під впливом різних факторів, один з яких наявність на поверхні ґрунту рослинних матеріалів *(Обертюх Р., 2010)*.

Існують різні твердження відносно того, що виступає потенціалом волого перенесення у ґрунті. Найбільш загальним прийнято називати водний потенціал, який забезпечує рух рідини між двома точками і залежить від багатьох складових тисків, як внутрішніх, так і зовнішніх. Для оцінки передачі ґрунтової вологи до стебел у валках можна скористатись потенціалом перенесення вологи аналогічно тепловому потенціалу *(Дідур В., Стручаєв М, 2008)*. Тоді, у стані термодинамічної рівноваги відповідно до умов, розпочинається розподіл вологи у тілі або системі тіл. Збільшення загальної маси вологи у зоні контакту ґрунт – стебла льону олійного у валку приведе до того, що волога буде розподілятися по всьому об'єму валка. При цьому потенціалом вологоперенесення виступає деяка функція вологовмісту і зовнішніх параметрів. Відомі дослідження з розподілу теплових потенціалів і тепловмісту (ентальпії) пояснюють явище вологоперенесення в системі контактуючих

між собою двох тіл. Отже, подальші дослідження для оцінки процесів перетворення стебел льону олійного у тресту, які дозволять їх коригувати при отриманні високоякісного короткого волокна, є актуальними.

Мета дослідження – дослідити процес отримання трести льону олійного з врахуванням аналізу переміщення вологи при контакті двох тіл у системі ґрунт – стебла – навколишнє середовище.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Процес переміщення вологи з ґрунту до стебел льону олійного, які рівномірно розміщенні вдовж валка, можливе за мінімальної відстані між ними. Дане явище досягається шляхом зрізання стеблостою роторною косаркою на мінімальній висоті 30-50 мм *(Didukh V et al., 2024; Бадак М., Дідух В., 2025),* (**рис. 1**).

Рис. 1 – Валки утворенні роторною косаркою при зрізанні стеблостою на висоті 30-50 мм

Для визначення ефективності отримання короткого неорієнтованого волокна при перетворені стебел льону олійного використовували сорти Лірина та Атант сезону 2024 року.

При дослідженні процесів вологопереміщення використовували моделі зміни валків (рис. 2) з врахуванням втрати вологості стебел у природних умовах через кожні 10 днів. Для встановлення вологості у відсотках (вологовмісту кг/кг с. р.), відбирали зразки стебел, які досушували до абсолютно сухого значення у лабораторних умовах за стандартною методикою. За отриманими

значеннями будували криві сушіння. Також, у місцях відбору зразків стебел відбирали проби ґрунту у поверхневому шарі глибиною 50 мм для встановлення його вологовмісту.

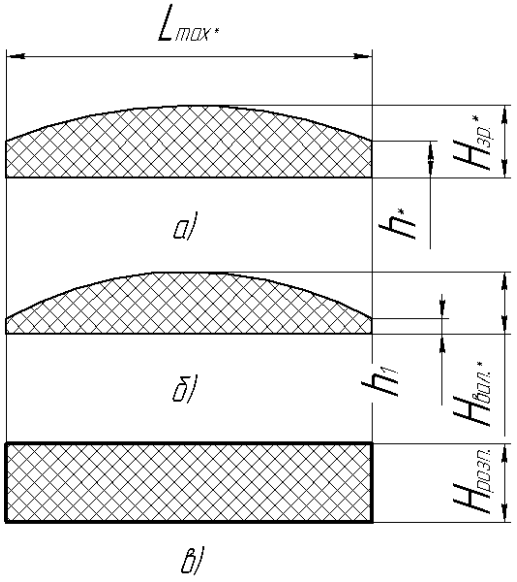


Рис. 2 – Моделі валків у процесі перетворення стебел у тресту: а – свіжозрізаний стеблостій; б – після 10-денного вилежування; в – після розпушування до щільності 90-100кг/м^3

Для визначення маообмінного градуса ^{0}М важливо врахувати умови переміщення вологи до поверхні. Таке переміщення відбувається за рахунок дії капілярних сил. Важливо, що поверхневий натяг води, дозволяє її утримуватися у площині контакту з валками. Як відомо, вода може переходити з грунту в атмосферу лише у вигляді пари. Цьому сприяють достатньо високі середньодобові температури навколишнього середовища у межах 20^{0}С у період перетворення стебел соломи льону у тресту. Капілярну пористість $\mathcal{E}_n$ у % від обєму *г/см^3* визначали за формулою:

$$\varepsilon_n = W_{кап.} \cdot \rho, \tag{1}$$

Необхідність визначення масообмінного градуса ^{0}М повязано з тим, що потенціалом перенесення пароподібної вологи у вологому повітрі є хімічний потенціал, який являється функцією температури і парціального тиску пари. При цьому, в області гігроскопічного стану хімічний потенціал можна також виразити через вологовміст і температуру тіла. В той же час, у області волого стану тіла, хімічний потенціал не може бути потенціалом перенесення, так як він є величиною постійною. Таким чином, даний підхід у встановленні потенціалу вологоперенесення

вологи від грунту до стебел у валках є величина $\Theta\ (u,\ T)$. Тобто, його значення залежить від інтенсивності переміення вологи по капілярах у грунті до поверні на якій розміщенні валки.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Потенціал вологоперенесення при постійній температурі і вологоємності є лінійною функцією вологовмісту матеріалу. Розмірність питомої вологоємкості – кг/кг ^{0}М, де ^{0}М – массообмінний (вологообмінний) градус. Тому, вираз для визначення вологовмісту з врахуванням вологообмінного градуса Θ має вигляд:

$$u = c_m \theta, \tag{2}$$

де c_m – питома вологоємність тіла. кг/кг с.р.

Шкала потенціалу вологоперенесення аналогічна шкалам Цельсія в області позитивних температур. Тому, вологоперенесення від одного тіла да іншого відбувається коли є різниця

потенціалів. У випадку контакту двох тіл через деякий час, наступає термодинамічна рівновага ($\Theta_1 = \Theta_2$).

Із формули (2) виходить, що у такому випадку:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{c_{m1}}{c_{m2}}, \tag{3}$$

тобто відношення питомих вологомісткостей пропорційно їх вологоємкостям. Це означає, що після отримання тілом певної кількості вологи, вона рівномірно розподілиться за об'ємом тіла.

Кількість вологи $\Delta M_в$, яка переміститься від одного тіла до іншого, у випадку їх контакту з різними потенціалами, визначатиметься за формулою:

$$\Delta M_в = M_0 \cdot u = c_m \cdot M_0 \cdot (\theta_2 - \theta_1),\ldots \tag{4}$$

де Θ_1 *і* Θ_2 – потенціали вологоперенесення до початку вологообміну і по його завершенню;
M_0 – маса абсолютно сухого тіла

Якщо питому волоємність перемножити

на масу абсолютно сухого тіла, то отримаємо вологоємність $C_m = c_m$

$$C_m = c_m M_0 = c_m \cdot \rho_0 \cdot V_0, \tag{5}$$

Для цього, щоб використати вказані залежності необхідно мати експериментальну шкалу потенціалу вологоперенесення Θ. При дослідженні потенціалів вологоперенесення капілярно - пористих тіл залежно від вологовмісту використовують фільтрувальний папір у якості еталонного тіла, так як він має значну гігроскопічність та швидко поглинає вологу (максимальний сорбційний вміст при $t = 25^0C$ знаходиться у межах 0,28 кг/кг).

Графічна інтерпретація процесу переміщення вологи двох тіл (торфу і фільтрувального паперу), представлена на рис. 2.

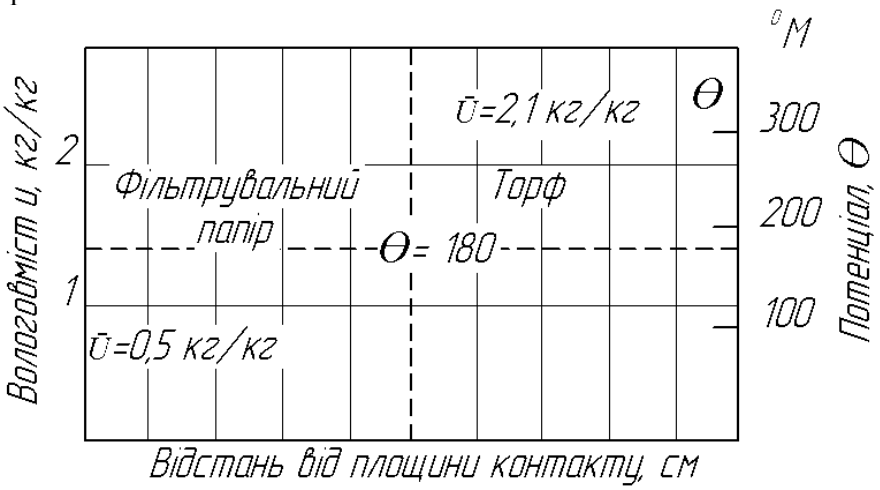


Рис.2 – Визначення масообмінного градусу ^0M при сталій температурі

З певними наближеннями (наявність у стеблах льону олійного до 25% короткого неорієнтованого волокна, структури ґрунту близької до структури торфу з вологовмістом $U_{гр.} = 2,1$ *кг/кг),* при сталій температурі 25^0C, основним значенням потенціалу перенесення буде значення $\Theta = 180^0M$.

З іншої сторони, в області гігроскопічного стану та коливання добових температур, визначальний вплив на потенціал вологоперенесення матиме вологість навколишнього середовища φ. Тоді, потенціал вологоперенесення Θ залежно від величини φ знаходитиметься у межах $0 < \Theta < 100$ ^0M.

Приведений теоретичний аналіз, у повній мірі, можна використовувати у дослідженнях при застосуванні удосконаленої роздільної технології збирання льону олійного. Зрізання стеблостою на висоті 30 – 50 мм, забезпечує контакт ґрунту з стеблами у валках, як двох тіл

з різною вологоємністю. Стеблостій зрізують у фазі ранньо – жовтої стиглості, коли вологість стебел ще дорівнює 50 - 55 % (рис. 3) і визріє 70 відсотків насіннєвих коробочок. Висока вологість не сприяє рівномірному визріванню коробочок через інтенсивне їх вологозабезпечення, так як коренева система стебел льону олійного проникає у ґрунт не менше 1м. Після зрізання стеблостою, вже через 10 днів вологість стебел знижується до значення у $W_{к.} \approx 15,0\%$, тобто вони за класифікацією сільськогосподарських матеріалів, вважаються сухими. Але, для перетворення стебел і тресту, визначальним параметром є вологість, яка необхідна для життєдіяльності пектиноруйнівним бактеріям. Їх присутність сприяє процесам визрівання волокна, набуття високих якостей, які визначають його подальше використання. Встановлення зміни вологості стебел у процесі перетворення їх у тресту проводили шляхом відбору проб і висушування їх до абсолютно сухого значення (табл. 1) згідно ДСТУ 4138-2002.

Таблиця 1 - Зміна маси зразків стебел

Зміна маси стебел льону олійного при перетворені у тресту				
Сорт	Вага тари, г	Вага зразка, г	Вага після сушіння, г	
			20 хв.	40 хв.
22.07.2024				
Лірина	19,2	22,32	20,66	20,64
Атлант	19,2	21,98	20,46	20,45
02.08.2024				
Лірина	19,2	22,44	20,70	20,68
Атлант	19,2	22,26	20,83	20,83
12.08.2024				
Лірина	19,2	22,47	21,64	21,62
Атлант	19,1	23,73	22,91	22,90

Трьох разовий контроль вологості стебел при вилежуванні вказує на стабільну їх вологість. Тому, масоперенесення вологи з ґрунту необхідне для лише життєдіяльності пектиноруйнівним бактеріям. Ефект масоперенесення у вигляді вологи підтверджується незначним зростанням

вологості стебел, яке зображено на рис. 3 у вигляді вертикальних стрілок ($АА_1$ і $ББ_1$) у дні розпушування валків і зміни маси згідно дат (табл. 1). Розпушування валків передбачає зменшення їх щільності до 90 кг/м^3. Така щільність забезпечує рівномірний доступ температури навколишнього середовища до стебел у валках.

Аналіз кривої сушіння (рис. 3) вказує на типову поведінку стебел льону олійного, аналогічну більшості вологих сільськогосподарських матеріалів. Теорія сушіння відносить сільськогосподарські матеріали до групи колоїдних капілярно-пористих тіл, для яких, з точки зору кінетики процесу, характерні три періоди: прогріву, постійної та падаючої швидкості сушіння.

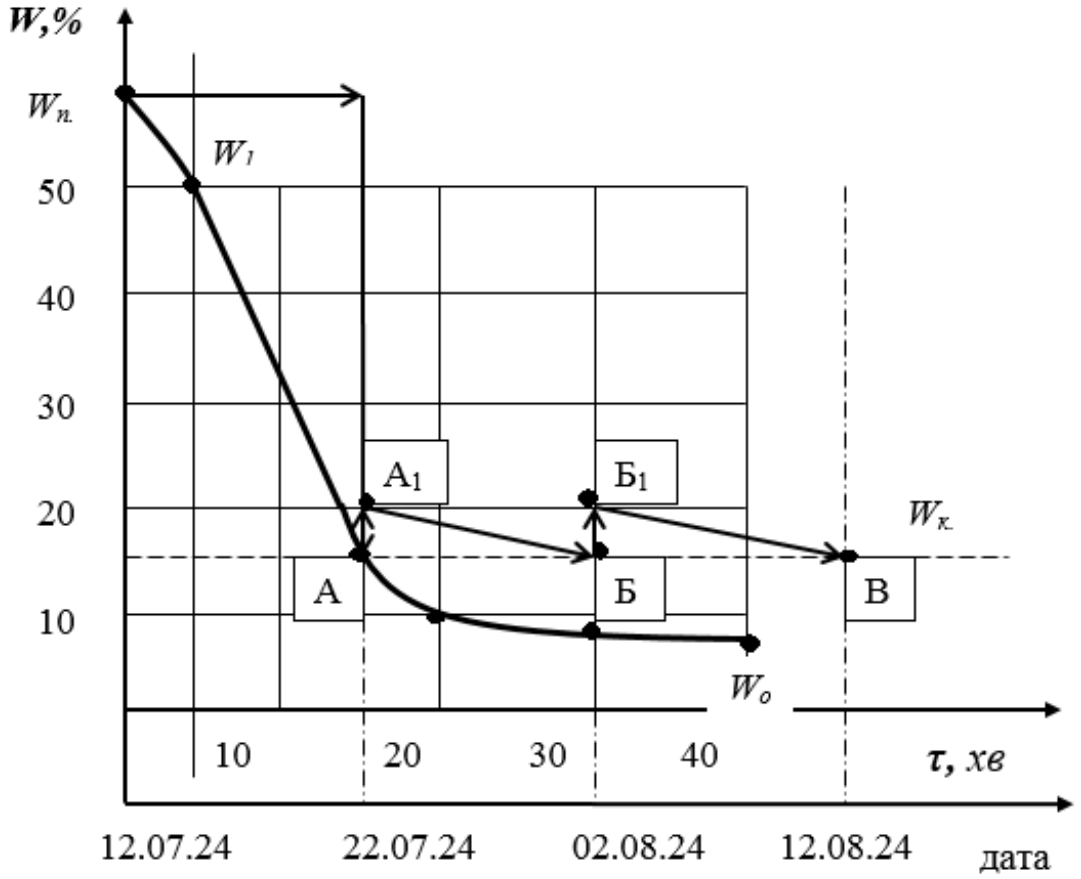


Рис. 3 – Узагальнена крива сушіння стебел льону олійного та моделювання підвищення їх вологості при контакті з ґрунтом

В реальних умовах дослідження середня початкова вологість вказаних сортів льону олійного склала 16,45 % (22.07.2024 р.), 14,12% (2.08.2024 р.), а кінцеве значення вологості готової трести, на момент завершення процесу, 12.08.2024 р. – 12,86%. З врахуванням приведених даних визначено масообмінний градус для стебел льону (табл. 2).

Аналіз масообмінного градуса стебел льону олійного з врахуванням їх вологості вказує, що після 10 діб вилежування його потенціал перевищує потенціал ґрунту, прийнятий у 180^0М. Відповідно при контакті стебел у валках з ґрунтом, відбуватиметься інтенсивне переміщення вологи з ґрунту до стебел. Та

лише у початковий період, після зрізання стеблостою, такого переміщення не буде.

Таблиця 2 - Результати розрахунку масообмінного градусу θ для стебел льону олійного

№ п/п	Вологість		Волого-вміст, u, кг/кг	Масо-обмінний градус, $\theta^0 M$
	$W_{від.}$, %	$W_{абс}$, %		
1	55,67	125,58	1,25	41
2	16,45	19,69	0,20	215
3	14,12	16,44	0,16	313
4	12,86	14,76	0,15	333

Практичним результатом перетворення стебел льону олійного у тресту за період 28 діб з трьохразовим розпушуванням валків представлено на рис. 4

Рис. 4 – Виділене волокно дослідних сортів

За оцінкою фахівців з легкої промисловості отримане волокно є високої якості, придатне для виробництва текстилю і целюлози. Відповідно, таке волокна можна довести до стану для виготовлення нітроцелюлози, як сировини виробництва бездимного пороху.

ВИСНОВКИ

Таким чином, отримати високоякісну тресту в умовах глобального потепління та відсутності випадання опадів, можна за місячний період часу. При цьому необхідно здійснити не менше трьох піднімань (відрив) валків від поверхні поля з частковим їх розпушуванням (зменшенням щільності). Дана умова диктується низьким зрізом стеблостою за відсутність стерні, що призводить до інтенсивного ущільнення валків і часткового приростання бур'янами. З іншої сторони, виникнення контакту між поверхнею ґрунту і валками з стебел, розміщених у поздовжній площині, сприяє переміщенню ґрунтової вологи, необхідної для розвитку та життєдіяльності пектиноруйнівних бактерій, від яких залежить якість отриманого короткого неорієнтованого волокна. Аналіз взаємодії ґрунту і стебел льону олійного у валках, як двох тіл з різною вологоємкість показав, що переміщення вологи з ґрунту не відбувається лише перші 10 діб, за високого вологовмісту стебел. У подальшому падіння вологості стебел збільшує їх масообмінний градус, що викликає потенціал вологоперенення вологи. Якість отриманого короткого неорієнтованого волокна підтверджена фахівцями легкої промисловості з врахуванням стандартних вимог.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Agrohjrtal. Червень 24, 2025 Перспективи вирощування бавовнику в Україні: названо урожай і витрати. https://agroportal.ua/news/rastenievodstvo/perspektivi-viroshchuvannya-bavovnika-v-ukrajini-nazvano-urozhaynist-i-vitrati.

Kurkul. Січень 29, 2025 Пів мільйона за вхід або чи вигідна нам українська бавовна. https://kurkul.com/spetsproekty/1697-piv-milyona--za-vhid-abo-chi-vigidna-nam-ukrayinska-bavovna.

Ґрунтові ресурси Волинської області: стан, резерви продуктивної здатності. (2018) (аналітична записка) /укладачі: колектив авторів. Харків: «Стиль-Іздат», 58с.

Гаврилюк В.А., Бортнік А.М., Бортнік Т.П. (2021). Наукові основи управління продуктивними і екологічними функціями осушуваних та техногенно-деградованих ґрунтів Західного Полісся. : монографія Луцьк: ПП Іванюк В.П., 119 с.

Рудік Н.М. (2020). Економічний потенціал вирощування льону олійного в Україні. Агросвіт –№ 2. – с. 61–68. DOI: 10.32702/2306_6792.2020.2.61.

Папроцький Р. (2021). Особливості вирощування льону олійного. Інтерв'ю з Романом Папроцьким. Ж-л «Агроном» №4(74) https://www.agrilab.ua/osoblyvosti-vyroshhuvannya-olijnogo-lonu-interv-yu-z-romanom-paprotskym/.

Yaheliuk S., Didukh V., Busnyuk V., Boyko G., Shubalyi O. (2020). Optimization on efficient combustion process of small-sized fuel rolls made of oleaginous flax residues / V. Didukh, V. Busnyuk, G. Boyko, O. Shubalyi // INMATEH – Agricultural engineering. Vol. 62, No. 3/2020, Bucharest, p. 361-https://doi.org/10.35633/inmateh-62-38.

Ягелюк С.В., Дідух В.Ф. (2020). Концептуальна модель технологій переробки стебел льону. Зб. наук. статей «Сільськогосподарські машини». Луцьк – 2020. - №44. - с.155-164. DOI: https://doi.org/10.36910/acm.vi44.

Шувар А.М., Войтович О.П. (2012). Оцінка способів збирання льону олійного (Evaluation of oilseed flax harvesting methods). Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, № 17, С. 149-153.

Wilson, L., New, S., Daron, J., Golding, N. (2021). Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office.

Arias, P. A. et al. (2021).Technical Summary. in Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. Masson-Delmotte, V. et al.) (Cambridge University Press. In Press, 2021).

Федоров В.Г., Скарбовійчук О.М., Кепко О.І., Кравчук П.О. (2014). Теплофізичні характеристики продуктів і матеріалів АПК . Довідник. Умань.: Редакційно видавничий відділ Уманського НУС, 352 с.

Обертюх Р.Р. (2010). Теоретичні основи теплотехніки. Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 165 с.

Дідур В.А., Стручаєв М.І. (2008). Теплотехніка, теплопостачання і використання теплоти в сільському господарстві За заг. ред. В.А. Дідура. Київ.: Аграрна освіта, 233с.

Didukh V., Yaheliuk S., Bodak V., Bodak M., Yaheliuk O. (2024). Pulling device for harvesting of Oleaginous Flax. Bulgarian Journal of Agricultural Science. Vol. 30, No 3. P. 539–546.

Бодак М. В., Дідух В. Ф. (2025). Експериментальні дослідження процесу підбирання валків з стебел льону. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. № 46. С. 212–219. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-1.

THE ESSENCE OF METHODS FOR CALCULATING DIMENSIONAL CHAINS IN DESIGNING DETAILS OF AGRICULTURAL MACHINERY

L. Zabrodotska*, R. Kirchuk, R.Ferenc

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
part,
interchangeability,
dimensional chain,
link,
tolerance.

Article history:
Received 15.08.2025
Accepted 01.10.2025

***Corresponding author:**
zabrodotskalyudmila@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

The quality of machine and mechanism performance largely depends on the quality of manufacturing of parts and the assembly process. The assembly process, both after the direct production of components and after their restoration during repair, is based on the development of design and technological documentation, an essential element of which is the calculation of dimensional chains. The existing interstate, national, and industry regulatory documents define the procedure and rules for calculating dimensional chains. In Ukraine, when developing a technological assembly process at the design stage, interstate standards such as GOST 16319-80 and GOST 16320-80 are used. During the assembly stage, technological and design solutions are applied to achieve the required dimensional accuracy, which often leads to additional technological operations and costs. However, it is possible to reduce the total assembly error and the number of technological operations already at the design stage (Cherkashyna, 2013). GOST 16320-80 establishes methods for calculating dimensional chains using various approaches to achieve the accuracy of the closing link, in particular: the method of complete interchangeability, the method of partial interchangeability (probabilistic method), the method of group interchangeability (selective assembly), the fitting method, and the adjustment method. This article discusses the essence of calculating dimensional chains using the methods of partial and group interchangeability in the manufacture of agricultural machinery parts.

DOI: 10.36910/acm.vi50.1902

To cite this article:
Zabrodotska, L., Kirchuk, R, & Ferenc, R. (2025). The essence of methods for calculating dimensional chains in designing details of agricultural machinery. *Agricultural Machines*, *51*, 83-90. https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1902

УДК 681.322

СУТНІСТЬ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Л.Ю. Забродоцька*, Р.В. Кірчук, Р.В. Ференц

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
деталь,
взаємозаміна,
розмірний ланцюг,
ланка,
допуск.

Історія публікації:
Отримано 15.08.2025
Затверджено 01.10.2025

Автор для листування:*
zabrodotskalyudmila@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

Якість роботи машин та механізмів в значній степені залежать від якості виготовлення деталей та процесу складання. Процес складання як після безпосереднього виготовлення деталей, так і після процесів їх відновлення при ремонті], базується на розробці конструкторської і технологічної документації, обов'язковим елементом яких є розрахунок розмірних ланцюгів. Існуючи міждержавні, національні, галузеві нормативні документи регламентують порядок, правила розрахунку розмірних ланцюгів . В Україні, при розробці технологічного процесу складання на етапі конструювання використовуються міждержавні стандарти: ГОСТ 16319-80; ГОСТ 16320-80, а на етапі складання використовують технологічні та конструкторські рішення для досягнення необхідної розмірної точності, що потребує додаткових технологічних операцій та витрат. Але зменшення сумарної похибки складання та зменшення технологічних операцій можливо на етапі конструювання (Черкашина, 2013). ГОСТ 16320-80 встановлює методи розрахунку розмірних ланцюгів з використанням різних методів досягнення точності замикаючої ланки, зокрема: метод повної взаємозамінності; метод неповної взаємозамінності (ймовірнісний метод); метод групової взаємозамінності (селективної збірки); метод пригону; метод регулювання. У статті розглянуто сутність розрахунку розмірних ланцюгів методами неповної та групової взаємозаміни при виготовленні деталей сільськогосподарських машин.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1902

Цитувати цю статтю:
Забродоцька, Л. Ю., Кірчук, Р. В., & Ференц, Р. В. (2025). Сутність методів розрахунку розмірних ланцюгів при проектуванні деталей сільськогосподарських машин. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 83-90. https://doi.org/acm.vi51.1902

STATE OF THE ART AND PROBLEM STATEMENT

The method of complete interchangeability (maximum–minimum method) is an interchangeability approach in which the required accuracy of the closing link of a dimensional chain is ensured when any link can be included in or replaced within the chain without selection or dimensional adjustment. In this method, components are assembled without fitting. For any combination of part dimensions manufactured within the specified tolerances, the value of the closing link does not go beyond the established limits. The dimensional chain is calculated using the maximum–minimum method.

This method of calculation is typically used in individual and small-batch production; when the tolerance of the closing link is small and the number of constituent links is limited; or when the tolerance of the closing link is relatively large.

The advantages of the method include simplicity and cost-effectiveness of assembly, simplified organization of assembly processes, the possibility of extensive inter-plant cooperation, and a simplified spare-parts supply system. The disadvantages include higher product manufacturing costs, since the tolerances of the constituent links are smaller than those obtained using other methods.

The method of partial interchangeability (probabilistic method) ensures the required accuracy of the closing link not for all assemblies but for a predetermined proportion of them. To meet technical requirements in this case, additional processing operations are introduced. Parts are assembled, as a rule, without fitting, adjustment, or selection; however, in a small number of assemblies (the quantity is predetermined), the value of the closing link exceeds the established limits. The dimensional chains are calculated using a probabilistic approach. This method is applied in serial and mass production, when the tolerance of the closing link is small and the number of constituent links is relatively large.

The advantages of the partial interchangeability method are the same as those of the complete interchangeability method. The manufacturing cost is significantly lower due to the expansion of the tolerance fields of the constituent links (compared with complete interchangeability). The disadvantage of the method is the need to employ highly skilled workers to fit certain parts in those assemblies where the closing link exceeds the specified limits.

The method of group interchangeability (selective assembly) is a method in which the required accuracy of the closing link of a dimensional chain is ensured by including in it constituent links that belong to one of the groups into which they have been previously sorted. The pre-sorted parts are assembled without fitting, and the required value of the closing link is thus achieved. This method is used in mass and large-scale production for dimensional chains with a small number of links.

The advantage of this method lies in the possibility of achieving high accuracy of the closing link with economically feasible tolerance fields of the constituent links. The disadvantages include the presence of unfinished production (“excess parts”), additional costs for pre-sorting the parts into groups, increased complexity of the assembly organization, and difficulties in spare-parts supply management.

The fitting method is a technique in which the required accuracy of the closing link of a dimensional chain is achieved by modifying a special (compensating) link included in the chain through the removal of a material layer. The amount of material to be removed is determined after preliminary assembly and measurement. The calculation of the dimensional chain is performed using either the maximum–minimum method or the probabilistic method. This method is applied primarily in individual production.

The advantage of this method lies in the fact that economically feasible tolerances can be assigned to all constituent links. The disadvantages include a significant increase in assembly cost and a decrease in labor productivity during assembly, as well as difficulties in spare-parts supply.

The adjustment method ensures the accuracy of the closing link of a dimensional chain by changing the compensating link without removing any material. This method is widely used in all types of production when a high degree of accuracy of the closing link is required.

The advantages of the adjustment method include the possibility of regulating the dimension of the closing link to achieve the required accuracy, the ability to compensate for wear during operation, and the possibility of assigning economically feasible tolerance fields to the constituent dimensions. The disadvantages are the increased complexity of the assembly unit design and greater difficulty in assembly processes *(Prykhodko, 2021; Deribo et al., 2024; Rud et al., 2008; Tsvirkun et al., 2022).*

MATERIALS AND METHODS

The maximum–minimum method guarantees the complete absence of defective products (technological failures), requires less information about the constituent links, and therefore involves lower computational complexity. However, this method allows for any, often undesirable, combination of the extreme dimensional values of the chain's constituent links. The probability of such combinations occurring during the machining of workpieces is low; nevertheless, it necessitates the assignment of tighter tolerances for technological dimensions *(Ivanov, 2013).*

The probabilistic method eliminates this drawback. It takes into account the regularities in the distribution of machining dimensional deviations. The tolerances calculated by this method do not include excessive accuracy reserves, which allows for a reduction in machining costs.

At the same time, the probabilistic method permits the possibility of defects, is more complex (requiring a greater amount of information about the constituent links), and therefore is more labor-intensive.

The choice of method for solving technological dimensional chains depends on the number of constituent links (n) in the chain. When the number of links is $n \leq 4$, the calculation is performed using the maximum–minimum method. In cases where $n \geq 5$, the probabilistic method is applied.

RESULTS AND DISCUSSION

The method of group interchangeability (selective assembly) is mainly used for dimensional chains consisting of three constituent links and for assembly joints that are not subject to disassembly and reassembly during the operation of the product but are instead replaced as a complete unit — for example, plunger pairs or rolling bearings.

When calculating tolerances and limit deviations for the dimensions of the constituent links of a dimensional chain, the accuracy of the closing link, ensured by the method of group interchangeability, is determined using the following formulas:

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{n_j} \delta_j + \sum_{i=1}^{n_q} \delta_q = \sum_{i=1}^{n_i} \delta_i \,, \tag{1}$$

where δ_{Δ} – is the tolerance of the closing link; δ_j – is the tolerance of the increasing links; δ_q – is the tolerance of the decreasing links; δ_i – is the tolerance of any constituent link.

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{n_j} \Delta_{0j} - \sum_{i=1}^{n_q} \Delta_{0q} \,, \tag{2}$$

where $\Delta_{0\Delta}$ – is the coordinate of the midpoint of the tolerance field of the closing link; Δ_{0j} – is

the coordinate of the midpoint of the tolerance field of the increasing links; Δ_{0q} – is the coordinate of the midpoint of the tolerance field of the decreasing links.

Let us consider the following case. The dimensional chain consists of two constituent links, and the initial equation has the form:

$$A_{\Delta} = A_j - A_q, \tag{3}$$

where A_{Δ}, A_j, A_q – are the nominal dimensions of the closing, increasing, and decreasing links, respectively..

To satisfy the above conditions, it is necessary to assign tolerances for A_j і A_q in such a way that

$$\delta_{\Delta} = \delta_j - \delta_q \quad \text{і} \quad \delta_j = \delta_q$$

Then, such values of Δ_{0j} і Δ_{0q}, re selected so that condition (2) is satisfied. The limit deviations of the links A_j і A_q are determined according to the following formulas:

$$\left.\begin{aligned} \Delta_{bj} &= \Delta_{0j} + \frac{\delta_j}{2}; \\ \Delta_{нj} &= \Delta_{0j} - \frac{\delta_j}{2}; \\ \Delta_{bq} &= \Delta_{0q} + \frac{\delta_q}{2}; \\ \Delta_{нq} &= \Delta_{0q} - \frac{\delta_q}{2} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

This completes the constructive calculation.

Since the tolerances δ_j і δ_q obtained during the calculation are difficult to maintain under actual production conditions, they must be increased by *k* times.

To achieve this, the following conditions must be met:

$$\delta_j' = m\delta_j \quad \text{і} \quad \delta_q' = m\delta_q, \tag{5}$$

where δ_j' і δ_q' – are the production tolerances..

The tolerances of the constituent links are increased by the same factor by which the constructive tolerances were enlarged; accordingly, the production tolerance of the closing link is determined as follows:

$$\delta_{\Delta}' = m\delta_{\Delta}. \tag{6}$$

The number of groups into which the finished parts must be sorted will also be equal to *k* and is determined by the following formula:

$$m = \frac{\delta_{\Delta}'}{\delta_{\Delta}} = \frac{\delta_j' + \delta_q'}{\delta_{\Delta}}. \tag{7}$$

The limit deviations of the links A_j і A_q for each group are determined as follows:

a) for the first group, the limit deviations of the links A_j і A_q are taken to be equal to the

calculated values.

$$\left.\begin{aligned} \Delta_{bj(1)} = \Delta_{bj};\ \ \Delta_{нj(1)} = \Delta_{нj};\\ \Delta_{bq(1)} = \Delta_{bq};\ \ \Delta_{нq(1)} = \Delta_{нq}. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

б) for the subsequent groups, the limit deviations of each next group are obtained by adding the calculated constructive tolerances δ_j or δ_q depending on which link (increasing or decreasing) the deviations are being determined for.

For the *p*-th group:

$$\left.\begin{aligned} \Delta_{bj(n)} = \Delta_{bj(n-1)} + \delta_j;\ \ \Delta_{нj(n)} = \Delta_{нj(n-1)} + \delta_j;\\ \Delta_{bq(n)} = \Delta_{bq(n-1)} + \delta_q;\ \ \Delta_{нq(n)} = \Delta_{нq(n-1)} + \delta_q. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

In practice, during the manufacturing of parts, dimensional scatter occurs as a result of technological factors, followed by the random nature of dimensional combinations of the parts during assembly.

Using probabilistic estimates, it can be observed that if a small or very small risk (probability) of interchangeability violation during assembly is allowed, the tolerances of the constituent parts can be expanded.

If, in the calculation of dimensional chains, economic analysis indicates the need to apply a system of overlapping tolerances based on the random combination of parts, the tolerances should be determined statistically to control the proportion of defective parts within an acceptable level. The statistical determination of tolerances defines the amount by which tolerances may be increased, based on an acceptable degree of risk that only a small fraction of defective parts will be produced.

The calculation of statistical tolerances of the links in a dimensional chain is based on the application of probability theory theorems. Let us consider one of the summation methods — the method of independent scalar quantities. When summing independent scalar random quantities, the conclusions of several theorems are applied.

If x_1, x_2, …, x_j, …, x_k are independent random variables with corresponding means M_1, M_2, …, M_j, …, M_k and variances σ_1^2, σ_2^2, …, σ_j^2, …, σ_k^2 і якщо a_1, a_2, …, a_j, …, a_k є 2 are constant coefficients, while *y* represents a linear combination of these variables x_j:

$$y = a_1x_1 \pm \ ... \ \pm a_jx_j \pm \ ... \ \pm a_kx_k, \quad (9)$$

then y is also a random variable that possesses the following properties:

1) $M_k = a_1M_1 \pm a_2M_2 \pm ... \ a_kM_k$;

2) $\sigma_y^2 = a_1^2\sigma_1^2 \pm a_2^2\sigma_2^2 \pm ... \ a_k^2\sigma_k^2$;

3) If each random variable x_1, x_2, …, x_k follows the normal distribution law, then y also follows a normal distribution law.

According to these conclusions, when determining the tolerance of the closing dimension under an arbitrary distribution law, a relative dispersion coefficient *k* is introduced.

The coefficient *k* characterizes the deviation of the distribution of dimensional-chain tolerances from the Gaussian (normal) distribution. For the normal distribution, $k = 1$; for the triangular (Simpson) distribution, $k = 1,22$.

The range of the distribution of *y* measures the dispersion of the linear combination of

random variables x_j.

The range of deviations of the dimensions of the corresponding links, expressed by the values R_1, R_2, …, R_k represents the respective tolerances that determine the qualitative characteristics of the deviations., The value R_y is the tolerance that defines the qualitative characteristic of the closing link in the dimensional-chain system.. The mean values M_1, M_2, …, M_k correspond to the nominal dimensions of the links in the dimensional chain M_y – while $\bar{y}$ corresponds to the nominal dimension of the closing link.. The standard deviation σ_y y is used as a measure of dispersion, since for the normal distribution law R_y, $6\sigma_y = R_y$. Similarly, σ_1, σ_2, …, σ_k will respectively be the estimates of R_1, R_2, …, R_k. The number of tolerances in the dimensional chain is denoted by *m*, which corresponds to *m* distributions of part deviations. From the above equation for determining the tolerance of the closing-link dimension, we obtain:

$$TA_\Delta = \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (TA_j)^2} \,. \tag{10}$$

For the tolerance of the closing-link dimension under an arbitrary distribution law, a relative dispersion coefficient *k* is introduced, and the previous equation takes the following form:

$$TA_\Delta = \frac{1}{k_\Delta} \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (TA_j)^2 k_j^2} \,. \tag{11}$$

By applying transformation procedures to the obtained equations, we derive an equation for calculating the tolerances of the constituent links of the dimensional chain based on a given tolerance of the closing link. For example, let us compare the tolerances of the constituent links TA_j in a dimensional chain consisting of four links, calculated using the method of complete interchangeability and the probabilistic (theoretical–statistical) method, under the condition $TA_\Delta = 4TA_j$.

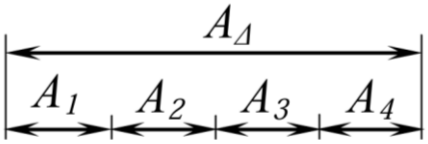


Fig. – Dimensional chain diagram

Calculation by the maximum–minimum method with additive tolerances:

$$TA_\Delta = 4TA_j \,,$$

from which it follows that

$$TA_j = \frac{TA_\Delta}{4}$$

The calculation performed using the theoretical–probabilistic method with random variables of overlapping tolerances gives:

$$TA_\Delta = \sqrt{4(TA_j)} = 2TA_j$$

from which it follows that

$$TA_j = TA_\Delta / 2 \,.$$

CONCLUSIONS

In the case of selective assembly (for clearance and interference fits), the maximum clearances and interferences are reduced, while the minimum ones are increased. As the number of sorting groups increases, these values approach the mean clearance or interference for the given fit, making the joint more stable and durable.

The application of the probabilistic method for calculating the dimensional chain makes it possible to use the tolerances of the constituent links two grades coarser, which is of great importance for achieving the required machining accuracy of parts in various assembly unit designs.

From the comparison of both calculations using the method of partial interchangeability, it follows that applying the theoretical–probabilistic calculation allows, with the same closing-link tolerance $TA\Delta$, to double the tolerance of the constituent links with a risk probability of only 0.27%.

In agricultural machine building, such a small level of risk is considered negligible, and machines are therefore designed taking this risk into account.

REFERENCES

Cherkashyna, O. S. (2013). *Normatyvne zabezpechennia rozrakhunku rozmirnykh lantsyuhiv pry skladanni z termichnym vplyvom* [Regulatory support of calculation of dimensional chains in assembling with thermal influence]. Tekhnolohichnyi audyt ta rezervy vyrobnytstva, *5(4(13))*, 55–57. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2013.18298

Prykhodko, V. P. (2021). *Rozmirne modeliuvannia ta analiz tekhnolohichnykh protsesiv* [Dimensional modeling and analysis of technological processes]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/38826/1/RMA_TP_21.pdf

Deribo, O. V., & Repinskyi, S. V. (2024). *Rozmirno-tochnisne modeliuvannia konstruktsii ta tekhnolohichnykh protsesiv* [Dimensional and precise modeling of structures and technological processes]. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Deribo_2024_105.pdf

Rud, V. D., Herasymchuk, O. O., & Markova, T. P. (2008). *Rozmirno-tochnisnyi analiz konstruktsii ta tekhnolohii* [Dimensional and precision analysis of structures and technologies]. Lutsk: RVV LDTU.

Tsvirkun, L. O., & Omelchenko, O. V. (2022). *Vzaiemozaminist, standartyzatsiia i tekhnichni vymiriuvannia* [Interchangeability, standardization, and technical measurements]. Kryvyi Rih: DonNUET. Retrieved from http://elibrary.donnuet.edu.ua/2591/1/2022_NP_Tsvirkun_Omelchenko_Vzaemozaminist.pdf

Ivanov, H. O. (2013). *Rozrakhunky rozmirnykh lantsyuhiv metodamy maksimumu-minimumu ta ymovirnym* [Calculating of the dimensional chains by the high-low and probabilistic methods]. Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomoria, *4(74)*, 165–171. Retrieved from https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1541/1/n74v4r2013t1ivanov.pdf

INFLUENCE OF FOREST VEGETATION ON VORSKLA AND PSEL RIVERS MEANDERING

V. Volianskyi, A. Herasymchuk, T. Volianskyi, V. Bondar

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
river meandering,
floodplain forests,
bank afforestation,
erosion risk,
channel stabilization

Article history:
Received 28.07.2025
Accepted 15.10.2025

****Corresponding author:***
alexgop2017@gmail.com

ABSTRACT

Floodplain forests perform important ecological and hydrological functions, especially in regions with limited forest coverage. This study examines the impact of riparian vegetation on the development of river meanders along the Vorskla and Psel Rivers. An analysis of current floodplain conditions was conducted, including the proportion of forest, meadow, and agricultural lands, topographical and hydrological features, and the density and type of vegetation. Based on satellite image interpretation, morphometric measurements, and spatial modeling, a correlation was established between meander morphology (belt width, bend angle, development coefficient) and forestation along the riverbanks. Meanders show greater development in segments with deforested banks, where the meander belt is considerably wider compared to forested stretches. Conversely, dense riparian vegetation, particularly willow shrubs, increases flow resistance, reduces stream velocity, and traps sediment, effectively mitigating bank erosion. It was found that floodplain forests serve both filtering and channel-shaping functions. Practical recommendations are proposed for afforestation of erosion-prone riparian areas to enhance channel stability. The study underscores the importance of maintaining vegetative buffers along meandering rivers and suggests afforestation as a nature-based solution for channel protection. The results are applicable in watershed management, ecological restoration, and river landscape planning to ensure sustainable river system functioning under modern anthropogenic pressure and climate variability.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1884

To cite this article:
Volianskyi, V., Herasymchuk, A., Volianskyi, T., & Bondar, V. (2025). Influence of Forest Vegetation on Vorskla and Psel Rivers Meandering. *Agricultural Machines*, *51*, 91-98. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1884

УДК 630*1

ВПЛИВ ЛІСОВОЇ РОСЛИННОСТІ НА МЕАНДРУВАННЯ РІЧОК ВОРСКЛА І ПСЕЛ

В.О. Волянський, О.П. Герасимчук, Т.В. Волянський, В.Н. Бондар

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
меандрування річок,
заплавні ліси,
залісеність берегів,
ерозійна небезпека,
стабілізація русел

Історія публікації:
Отримано 28.07.2025
Затверджено 15.10.2025

Автор для листування:*
alexgop2017@gmail.com

АНОТАЦІЯ

Заплавні ліси відіграють важливу екологічну та гідрологічну роль, особливо на малолісних територіях. У статті проаналізовано вплив лісової рослинності на розвиток меандрів річок Ворскла і Псел. Проведено аналіз сучасного стану заплав: вивчено частку лісових, лучних і сільськогосподарських угідь, особливості рельєфу, гідрологічний режим, густоту та тип рослинності. За результатами дешифрування супутникових знімків, морфометричних вимірювань і просторового моделювання виявлено залежність між морфологією меандрів (ширина поясу, кут розвороту, коефіцієнт розвитку) та залісенням берегової зони. Найбільшого розвитку меандри досягають у ділянках із незалісненими берегами. У таких місцях ширина поясу меандрування суттєво перевищує аналогічні параметри у заліснених відрізках. Навпаки, густі прируслові насадження, особливо верболози, формують ефективну гідравлічну шорсткість, зменшують швидкість потоку та акумулюють піщані наноси, знижуючи ризик розмивів. Визначено, що заплавні ліси виконують як фільтрувальну, так і руслоутворюючу функцію. Запропоновано комплекс практичних заходів із заліснення ерозійнонебезпечних ділянок заплави з метою стабілізації русел. Зроблено висновок про доцільність створення водоохоронних насаджень на поворотах річок та в місцях інтенсивної руслової динаміки. Результати можуть бути використані у водоохоронному плануванні, відновленні екосистем і під час інтегрованого управління водозбірними басейнами.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1884

Цитувати цю статтю:
Волянський, В.О., Герасимчук, О.П., Волянський, Т.В., & Бондар, В.Н. (2025). Вплив лісової рослинності на меандрування річок Ворскла і Псел. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 91-98. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1884

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На малолісних територіях, до яких належить і район наших досліджень, більшість лісових насаджень оцінюються насамперед з погляду виконання ними екологічних функцій (*Ткач, 1999*).

В минулому заплавні насадження Ворскли та Псла служили джерелом деревини, в даний час вони все більше використовуються як водоохоронно-захисні та рекреаційні *(Ткач, Волянський, & Зятьков, 1991*).

Маючи різне розміщення та склад, заплавні насадження відрізняються між собою за господарською цінністю та захисними функціями.

Особливе значення мають лісові насадження прируслової заплави. На сьогодні заплава затоплюється значно рідше, а за невеликих розливів затоплюється лише частково.

Прируслова частина заплави завжди піддається впливу повені. Береги русла постійно перебувають під впливом потоку води і потребують закріплення та стабілізації. Основна увага має бути звернена на залісення саме цієї частини заплави.

В залежності від конфігурації берега (увігнутий, опуклий, прямолінійний) змінюються і функції лісової рослинності, що росте на ньому.

Дерева та чагарники на увігнутому березі оберігають його від розмивів, зміцнюють ґрунт кореневою системою. Необхідність у цьому існує цілий рік, найбільша небезпека розмивів настає під час весняних повеней. На увігнутих берегах річки нижня межа захисної смуги повинна плавно опускатися в русло як можна нижче – до межі можливого зростання стійких до затоплення чагарникових верб.

На високих берегах, що підмиваються, не слід допускати зростання крупномірних дерев, які під своєю вагою можуть обвалюватися у воду, руйнуючи берег і засмічуючи русло. Зона сколювання берега повинна бути зайнята чагарниковою рослинністю.

На випуклих берегах переважає процес перевідкладення трансформованих водним потоком частинок. Лісові насадження несуть тут основне навантаження здебільшого під час повеней. Їх межа має поширюватися від меженного урізу води на ширину молодих прируслових відкладень.

Прируслові насадження закріплюють піщані наноси не дозволяючи їх змивання і перенесення в центральну заплаву. Деревна рослинність збільшує шорсткість поверхні і значно знижує швидкість потоку у повінь.

У прирусловій заплаві верболози густиною 10-40 тисяч штук на гектар здатні за одну повінь акумулювати 3-5 тисяч тон піску на 1 га. Фракції піску діаметром 0,11 мм і більше відкладаються на відстані до 25 м від узлісся верболозу. На луках такі алювіальні відкладення відносяться на відстань до 500 м від заплавного берега. Таким чином насадження верби значно скорочують відстань проникнення піщаних відкладень, що має важливе значення для захисту від занесення піском сільськогосподарських та інших угідь.

Протиерозійна роль заплавних лісів особливо проявляється нижче поворотів течії на річках вільного меандрування. У покритій лісом заплаві відбувається зниження швидкості потоку води в 10-25 разів за рахунок високої шорсткості та формування зон гідравлічного підпору. Зменшуючи швидкість течії водного потоку в заплаві і збільшуючи її в руслі, ліс попереджує утворення мілин та перекатів. Таким чином ліс виконує і руслоутворюючу функцію (*Волянський, 1991*).

Здатність прируслових лісів акумулювати піщані наноси залежить, головним чином, не від повноти, а від їх густоти та розвитку підліску. Основна кількість наносів потрапляє в русло і заплаву через притоки, балки, яри, з прилеглих схилів, а також внаслідок руйнування прируслової заплави.

Виходячи із цього, в першу чергу, заліснюватись мають найбільш ерозійнонебезпечні ділянки.

Основні масиви лісу повинні зосереджуватися в басейнах малих річок, а не по берегах головних річок. Зараз 85–90% стоку формується за межами заборонених смуг вздовж річок, тому вони не мають ефективного впливу на сконцентровані потоки, що проходять транзитом повз заборонені зони. Важливими є всі ліси, що ростуть у межах водозбору річки.

Заплавні ліси несуть подвійне навантаження, захищаючи заплаву від негативного впливу як руслових потоків, так і від потоків води, що надходять з верхніх ділянок гідрографічної мережі.

Під час танення снігу на схилах твердий поверхневий стік потрапляє у заплаву з прилеглих до неї полів сільськогосподарського користування. Поглинання цих потоків та осадження ґрунтових частинок виконують насадження притерасного пониження та центральної заплави.

Заплавні ліси є також природними фільтрами. Вони покращують якість води, запобігають попаданню пестицидів у річкові води (*Volianskyi, Herasymchuk, & Volianskyi, 2025*).

Ліси вздовж річок покращують мікроклімат для риби завдяки поліпшенню якості води та її температурного режиму. Зелені насадження вздовж річок є зоною відпочинку населення, у зв'язку з цим вони несуть додаткове рекреаційне навантаження.

Глобальні дослідження підтверджують, що наявність густої рослинності на берегах здатна сповільнювати розвиток меандрів річки до десяти разів (*Ielpi, Lapôtre, Gibling, & Boyce, 2022*). Навпаки, масова вирубка заплавних лісів може призвести до різкого прискорення руслової ерозії: показано, що видалення понад половини заплавного лісу (≈30% прибережного покриву) збільшує швидкість розмиву берегів більш ніж на 23% (*Horton et al., 2017*).

Таким чином, можна відзначити, що заплавні ліси через їх особливе місцезнаходження виконують різноманітні функції та є незамінною складовою заплавного ландшафту.

Мета дослідження – визначити вплив заліснення заплавних берегів на процеси меандрування русел річок Ворскла і Псел та обґрунтувати першочергові заходи щодо заліснення найбільш ерозійно небезпечних ділянок..

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження проводилося на середніх річках лісостепової зони України – Ворсклі та Пслі. Заплава річки Ворскла переважно однобічна (ліворуч від русла); правий берег Ворскли здебільшого підвищений і крутий. Ширина заплави збільшується вниз за течією: від 2–2,5 км у верхів'ї, 3–3,5 км – у середній течії до 5–6 км у нижній течії. За характером рельєфу для меандруючих річок, до яких належить Ворскла, типовою є сегментна заплава. Для неї характерними є дугоподібні гриви та сухі або зайняті озерами пониження, що виникли в результаті змішення меандр і блукання русла по дну долини. Центральна частина заплави та притерасне пониження мають більш вирівняний рельєф порівняно з прирусловою частиною, поверхня якої хвиляста.

Річка Псел є більшою за Ворсклу і має широку заплаву. Заплава Псла двостороння або лівостороння. В середній частині течії ширина заплави Псла дорівнює 3,0-3,5 км, нижче за течією вона досягає 4,6 км і на нижніх течії – 7,0 км. Заплава Псла розчленована численними старими затоками, які перетворилися на заплавні озера і зарості водної рослинності. Псел має сегментний тип заплави. Рельєф заплави Псла більш хвилястий порівняно з рельєфом заплави Ворскли. Тут більш виражений прирусловий вал, утворений потужною течією під час повеней, центральна заплава також має значну кількість мікропідвищень.

Для аналізу структури заплавних земель та руслових процесів використано топографічні карти масштабу 1:25 000. Просторові показники заплави (площа лісів, луків, боліт, орних земель тощо) визначалися планіметрично за картографічними матеріалами.

Основними параметрами для характеристики меандрування русел обрані: коефіцієнт розвитку вигину (S/λ), ширина поясу меандрування (B), кута розвороту вигину (α).

Використано методи кореляційно-регресійний аналіз. Зокрема, побудовано регресійні залежності ширини поясу меандрування (B) від коефіцієнта розвитку вигину S/λ) для кожної річки. Усі розрахунки виконано в програмному середовищі MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Сформована структура заплавних земель річки Ворскла є результатом динамічних гідрологічних умов та інтенсивної господарської діяльності на цих землях. У теперішній час роль екологічних факторів у формуванні структури заплави дуже сильно нівелюється постійно зростаючим використанням її земель у сільськогосподарському виробництві, проведенням у зв'язку з цим меліоративних робіт. Велике значення має збільшення водозабору, вода річки використовується як джерело гідроенергії, для зрошення та водоспоживання.

Внаслідок господарської діяльності людини структура заплавних земель не тільки Ворскли, а й її приток зазнала суттєвих змін. Спостерігається значне рекреаційне навантаження, в багатьох місцях у заплаві близько до річки створені бази відпочинку.

Заплавні луки багато в чому зобов'язані своїм виникненням антропогенній діяльності, що знищила раніше існуючі на їх місці заплавні ліси, однак вважати, що заплави лісової та лісостепової зони у минулому були суцільно заліснені, в даний час було б безпідставно.

Проведений аналіз структури заплавних земель річки Ворскла показує, що площа лісових насаджень в заплаві становить від 17,2% до 35,2% від загальної площі.

Середня лісистість заплави Ворскли становить 26,5%. Основна частина заплавних земель знаходиться під луками (59,1%). Значна частина заплави Ворскли заболочена, середній показник – 12,1%, найбільше заболочена заплава у верхній частині течії, де на болота припадає 35,1% площі заплави.

Частина земель заплави (2,0%) розорані. Не дивлячись на те, що це незначна кількість, все ж оранка заплавних земель небажана, так як може привести до швидкого їх змивання під час повеней.

Лісові масиви хоч і не становлять основу заплавних земель, усе ж відіграють незамінну роль у структурі заплавного ландшафту.

Ліси знаходяться переважно в центральній заплаві, береги річки заліснені в середньому на 30,6%. Недостатня залісненість прируслової заплави сприяє інтенсивному розвитку процесів меандрування. В результаті цього відбувається руйнування і переформування площі, що входить у смугу меандрування.

Притерасне пониження, як правило, заболочене. У сільському господарстві ця частина заплави без додаткової осушувальної меліорації ефективно використовуватись не може.

Як показує аналіз існуючих насаджень вільхи чорної в притерасних пониженнях заплав річок, ця порода може успішно зростати у даних умовах без проведення додаткових витрат на осушувальні роботи.

З метою оптимізації структури заплавних земель Ворскли необхідно подальше їх заліснення. Лісові насадження слід створювати на ділянках, де вони б максимальною мірою виконували свої екологічні функції або їх вирощування було б найбільш економічно вигідним.

Визначальними у формуванні структури заплавних земель річки Псел є ті ж фактори, що і в заплаві Ворскли. Псел використовується як джерело для водопостачання, зрошення та водного транспорту в нижній течії,

Заплава річки Псел використовується в сільськогосподарському виробництві, спостерігається велике рекреаційне навантаження.

Заплавні луки займають у середньому 63,3% площі заплавних земель річки Псел. Відсоток лісових насаджень у структурі заплавних земель на різних ділянках течії сильно не змінюється та знаходиться в межах від 16,7% до 24,8%. Середня лісистість заплави річки Псел складає 19,9%.

Велика площа знаходиться під болотами, на них припадає 16,8% від загальної площі заплави. Місцями заболоченість заплави доходить до 37,2%.

Характер розташування лісових насаджень у заплаві річки Псел подібний їх розташуванню у заплаві Ворскли.

Береги річки Псел в середньому заліснені на 46,2%, найбільш заліснені вони в нижній частині течії річки, де лісові насадження знаходяться переважно у прирусловій заплаві. Також слід відмітити, що наявні ділянки заплави, де протягом багатьох кілометрів заліснені береги становлять 12,2-19,6%. Таким чином береги Псла не стабілізовані та необхідні подальші роботи з їхнього заліснення.

Як і на Ворсклі, у заплаві річки Псел слід проводити лісогосподарські роботи з оптимізації структури заплавного ландшафту, що полягають у правильному та раціональному розміщенні створюваних лісових насаджень.

Меандрування пов’язане з руйнуванням берегів, їх наступним відновленням за рахунок відкладення донних наносів та утворенням мулу, що формується завислими наносами, тобто з формуванням заплави,

Меандрування можливе тільки на річках із сприятливими умовами для його появи, а саме – з добре вираженою повінню, що забезпечує винос наносів у заплаву, і за відсутності стиснення планових деформацій схилами річкової долини або виходами порід, що важко розмиваються в межах її дна. Фактором, що обмежує розвиток процесу меандрування може бути лісова рослинність.

Кожен вигин (меандр) річки у своєму розвитку проходить три послідовні стадії: синусоїдоподібну, адаптації і зрілості.

У початковій стадії розвитку вигин має форму, близьку до синусоїди, з відносно стійким кроком та кутом розвороту біля 90-120° (**рис. 1**). Коефіцієнт розвитку вигину (S/λ) знаходиться в межах від одиниці до двох. Основні планові деформації русла зводяться до сповзання вигинів вниз по річці без істотної та закономірної зміни їх вигляду. Швидкість деформування на цій стадії розвитку вигинів зростає зі збільшенням кута розвороту вигину (α).

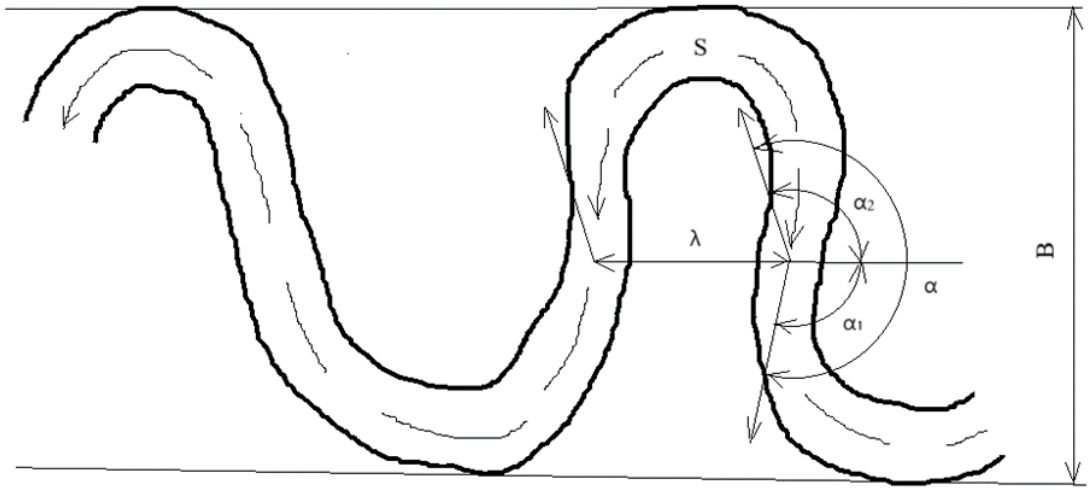


Рис. 1 – Морфологічні параметру вигину річки: λ – крок вигину; S – довжина вигину; α_1 – кут входу; α_2 – кут виходу; B – ширина поясу меандрувння.

Спочатку розвинуті синусоїдоподібні вигини пертворюються в S-подібну звивину. У результаті розвороту вершин двох суміжних вигинів, звернених до одного і того ж схилу долини зближуються, зменшується їх крок λ, коефіцієнт розвитку $2 < S/\lambda > 3$, збільшується ширина поясу меандрування B.

З досягненням кута розвороту α близького до 200°, настає деяке уповільнення розвитку вигину, що характерно для стадії адаптації.

Подальший розвиток вигину може призвести до його випрямлення в повінь. Перешийок між вершинами двох суміжних вигинів звужується і на кінцевій стадії їх розвитку проривається. Після цього починається розвиток нових вигинів, а колишні перетворюються у старорічища.

Вільно меандруюча річка має менш упорядкований вигляд, ніж річка з бічним типом руслового процесу або сповзаючими вигинами. Це зумовлено тим, що на вільно меандруючій річці можуть розташовуватися вигини, що знаходяться в різних стадіях розвитку.

Загальний хід руслового процесу при вільному меандруванні ускладнюється тим, що розвиток суміжних вигинів має великий взаємний вплив. Він особливо сильно проявляється під час прориву перешийків петель русла. Внаслідок такого прориву змінюється напрямок планових переміщень русла на суміжних з ним ділянках річки та створюються передумови до розвитку нових вигинів там, де до цього існували вигини, що пройшли попередні стадії розвитку. Таким чином, не всі вигини в річці проходять повні цикли розвитку, що завершуються проривом перешийків.

Процес вільного меандрування внаслідок своєї руйнівної дії на прируслову заплаву є небажаним. Велике значення для запобігання розвитку розмиву берегів має їх заліснення.

Дослідження розвитку процесу меандрування у заплавах Ворскли і Псла показало, що загальна лісистість заплави не має суттєвого впливу на меандрування. Першочергове значення тут має характер і ступінь заліснення берегів русла.

Аналіз експериментального матеріалу дав можливість встановити взаємозв'язок між коефіцієнтом розвитку вигину (S/λ) та шириною поясу меандрування (B), який описується наступними рівняннями:

для річки Ворскла

$$B = 263 + 642 \cdot \ln\left(S/\lambda\right);$$

для річки Псел

$$B = 459 + 490 \cdot \ln\left(S/\lambda\right).$$

Процес меандрування в заплавах Ворскли і Псла найбільше розвинений на ділянках з незалісненими берегами. Параметри S/λ, B, α мають найменше значення на ділянках, де русло заліснене з обох сторін. Ділянки з одностороннім залісненням берегів русла мають вищі значення цих параметрів порівняно із суцільним залісненням, але ця різниця незначна. Це означає, що навіть одностороннє заліснення берегів русла, в першу чергу ерозійнонебезпечних ділянок, дозволить знизити меандрування. Ділянки з незалісненими берегами русла мають кількісні показники S/λ, B, α, які значно відрізняються від таких показників в умовах суцільного і одностороннього заліснення берегів русла.

Пояс меандрування русла – це зона, що найбільш інтенсивно піддається впливу руслових потоків. Саме тут рельєф заплави має найбільш мінливий характер. Практично всі старорічища русла знаходяться в межах його поясу меандрування.

В цій зоні під час повені відкладається найбільша кількість наносів. Таким чином, пояс меандрування русла відрізняється своєю нестабільністю внаслідок постійної зміни рельєфу та конфігурації його земель, обумовлених утворенням нових відкладів, розмивів берегів, проривів перешийків вигинів та виникненням старорічищ.

В таких умовах виникають труднощі з веденням постійного та довгострокового як сільського, так і лісового господарства. Ця зона є зоною ризикованого землеробства. Тому зменшення її розмірів всіляко сприяє більш ефективному використанню заплавних земель.

В заплаві Ворскли середня ширина поясу меандрування на ділянках з незалісненими берегами на 156 м ширша, ніж на заліснених ділянках. На річці Псел ця різниця дорівнює 146 м. Псел має більш потужну течію, процеси меандрування на ньому більш розвинені, ніж на Ворсклі.

На Ворсклі незаліснені береги становлять 69,4%, на Пслі – 53,8%. На цих ділянках порівняно з ділянками заліснених берегів у перерахунку на всю довжину річок під пояс меандрування попадає 4894 га на Ворсклі і 5436 га на Пслі. Отже, існує необхідність у подальшому залісненні берегів річок Ворскла і Псел.

В умовах заплав річок Ворскла і Псел лісові насадження не становлять завершену систему захисних насаджень. Одним із шляхів підвищення екологічних функцій заплавних лісів є визначення місць першочергового їх створення. Прируслова частина заплави має бути заліснена в першу чергу і повністю. Захисні смуги створюються вздовж обох берегів річок, по головному руслу і по всіх рукавах. Вони мають повторювати вигини русла, але мати більші радіуси заокруглення, ніж русло. Таким чином захисні смуги зменшують звивистість річки.

Весь комплекс насаджень у заплавах річок крім прируслових лісових смуг повинен також включати насадження навколо заплавних водойм; ґрунтозахисні насадження на конусах виносів яружно-балкових систем, що впадають у заплаву; поперечні лісові смуги на безлісих ділянках; смуги кольматуючого призначення; берегові насадження на корінних берегах долини. В доповнення до існуючих лісів у заплавах річок Ворскла і Псел на конкретних ділянках потрібно запроектувати необхідні тут насадження. Таким чином буде отримана оптимальна лісистість. Виконання цього завдання має здійснюватися поетапно, починаючи із заліснення прируслової частини заплави.

ВИСНОВКИ

Річки Ворскла і Псел відносяться до річок з меандруючим типом русел. В досліджені встановлено залежність між коефіцієнтом розвитку вигину (S/λ) та шириною поясу меандрування русла (B) для цтих річок

В заплаві Ворскли середня ширина поясу меандрування на ділянках з незалісненими берегами на 156 м ширша, ніж на заліснених ділянках, на річці Псел ця різниця становить 146 м.

Середня лісистість заплави річки Ворскла становить 26,5%, залісненість берегів – 30,6%, на річці Псел ці показники відповідно рівні 19,9% та 46,2%.

Дослідження розвитку процесу меадрування в заплавах Ворскли і Псла показало, що існуюча загальна лісистість заплави не має істотного впливу на меадрування. Першочергове значення тут має характер та ступінь заліснення берегів русла. Меандрування найбільш розвинене на ділянках з незалісненими берегами.

Мінімально необхідна лісистість заплави передбачає повне заліснення її прируслової частини. В умовах заплав річок Ворскла і Псел лісові насадження не являють собою завершеної системи захисних насаджень. Одним із шляхів підвищення екологічних функцій заплавних лісів є визначення місць першочергового їх створення.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Horton, A. J., Constantine, J. A., Hales, T. C., Goossens, B., Bruford, M. W., & Lazarus, E. D. (2017). Modification of river meandering by tropical deforestation. Geology, 45(6), 511–514. https://doi.org/10.1130/G38740.1.

Ielpi, A., Lapôtre, M. G. A., Gibling, M. R., & Boyce, C. K. (2022). The impact of vegetation on meandering rivers. Nature Reviews Earth & Environment, 3(3), 165–178. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00249-6.

Ткач, В. П. (1999). Заплавні ліси України (*Floodplain forests of Ukraine*). Харків: Право. 368

Ткач, В. П., Волянський, В. О., & Зятьков, Л. Л. (1991). Стан лісів у заплавах рік Псел і Ворскла (*State of forests in the floodplains of the Psel and Vorskla rivers*). Лісівництво і агролісомеліорація, (82), 14–18.

Волянський, В. О. (1991). Особливості розвитку процесів меандрування на річках Ворскла і Псел (*Peculiarities of the meandering processes on the Vorskla and Psel rivers*). Проблеми раціонального використання, охорони та відтворення природно-ресурсного потенціалу Української РСР: Тези доповідей І республік. наук. конф., Чернівці, 117.

Волянський, В. О., Герасимчук, О. П., Волянський, Т. В. (2025). Лісорослинні умови в заплавах річок Псел і Ворскла (*Forest growing conditions in the floodplains of the Psel and Vorskla rivers*). Наукові нотатки, (81), 113–116. https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/article/view/1801.

THEORETICAL STUDY OF THE TRACTION RESISTANCE OF A TILLAGE IMPLEMENT FOR DEEP SOIL CULTIVATION

I. Tsiz*, V. Holii, T. Tsyz, A. Kovalchuk, B. Pastushok

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
soil hardness,
deep fluffing,
cutting a hole
traction resistance,
buckling resistance

Article history:
Received 07.07.2025
Accepted 01.10.2025

**Corresponding author:*
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

The main measure to eliminate the negative impact of soil compaction is their deep loosening. Studies of soil hardness have revealed significant fluctuations in the depth of occurrence of compacted layers even in conditions of small land plots. Known designs of deep subsoilers provide for continuous cultivation of subsoil layers to a depth equal to the maximum value of the depth of the plow sole on the entire field. The design of devices for changing the depth of travel of the working bodies of deep subsoilers does not allow changing the depth of cultivation in real time based on soil hardness cartograms. We have proposed to switch to the principle of destroying the integrity of the compacted layer by cutting holes with a tubular working body. A machine design has been developed to implement this method of cultivation. The purpose of the study is to theoretically establish the traction resistance of such a machine and substantiate the design parameters of its working body. A dependence was obtained that allows us to assess the influence of such parameters as the diameter of the tooth, the number of teeth on the disk and the distance between the disks on the energy costs during the operation of the machine. Based on the analysis of the graphs constructed according to this dependence, it was established that to achieve a specific traction resistance of 5 kN, it is advisable to install from 6 to 8 teeth on one disk. In this case, the diameter of the tooth should not be more than 0.03 m, and the distance between the disks on the rotor should not be less than 0.3 m. Testing the working body (tooth) for resistance to deflection when it is buried in soil with a hardness of $P_{cp} = 40$ kg/cm^2 revealed that for a tooth 0.5 m long, a section in the form of a sector of a ring with an outer diameter of 0.03 m, a sector angle of 200^0 and a ring wall thickness of 0.004 m will ensure stability.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1883

To cite this article:
Tsiz, I., Holii, V., Tsyz, T., Kovalchuk, A., & Pastushok, B. (2025). Theoretical Study of the Traction Resistance of a Tillage Implement for Deep Soil Cultivation. *Agricultural Machines*, *51*, 99-106. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1883

УДК 631.3

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ОПОРУ ЗНАРЯДДЯ ДЛЯ ГЛИБОКОГО ОБРОБІТКУ ҐРУНТУ

І.Є. Цизь*, В.О Голій, Т.П. Цизь, А.П. Ковальчук, Б.П. Пастушок
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
твердість ґрунту,
глибоке розпушення,
вирізання отвору,
тяговий опір,
стійкість до прогину

Історія публікації:
Отримано 07.07.2025
Затверджено 01.10.2025

****Автор для листування:***
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

Основним заходом із усунення негативного впливу переущільнення ґрунтів є глибоке їх розпушення. Дослідження твердості ґрунтів виявили значні коливання глибини залягання переущільнених шарів в умовах навіть невеликих за площею земельних ділянок. Відомі конструкції глибокорозпушувачів передбачають суцільний обробіток підорних шарів на глибину, що рівна максимальним значенню глибини розташування плужної підошви на усьому полі. Конструкція пристроїв для зміни глибини ходу робочих органів глибокорозпушувачів не дозволяє здійснювати зміну глибини обробітку у режимі реального часу на основі картограм твердості ґрунтів. Нами запропоновано перейти до принципу руйнування цілісності переущільного шару шляхом прорізання отворів трубчастим робочим органом. Розроблено конструкцію машини для реалізації такого способу обробітку. Мета дослідження – теоретично встановити тягового опір такої машини та обґрунтувати конструктивні параметри його робочого органу. Отримано залежність, яка дозволяє оцінити вплив таких параметрів як діаметр зуба, кількість зубів на диску та віддалі між дисками на енергетичні затрати під час роботи машини. На основі аналізу графіків побудованих за цією залежністю встановлено, що для досягнення питомого тягового опору на рівні 5 кН доцільно встановлювати на одному диску від 6 до 8 зубів. При цьому діаметр зуба не повинен бути більшим за 0,03 м, а віддаль між дисками на роторі не повинна бути меншою від 0,3 м. Перевірка робочого органу (зуба) на стійкість проти прогинів при його заглибленні у ґрунт з твердістю $P_{гр} = 40$ кг/см^2 виявила, що для зуба довжиною 0,5 м переріз у вигляді сектора кільця із зовнішнім діаметром 0,03 м, кутом сектора 200^0 та товщиною стінки кільця 0,004 м стійкість буде забезпечена.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1883

Цитувати цю статтю:
Цизь, І.Є., Голій, В.О., Цизь, Т.П., Ковальчук, А.П., & Пастушок, Б.П. (2025). Теоретичне дослідження тягового опору знаряддя для глибокого обробітку ґрунту. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 99-106. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1883

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Численні дослідження науковців виявили, що понад 40 % ґрунтів в Україні є переущільненими [1]. Сумарний вплив твердості ґрунтів на реалізацію сортового потенціалу сільськогосподарських культур досліджені академіком Медведєвим В.В. *(Медведєв, 2003; Медведєв, 2004; Медведєв, 2010)*. Встановлено, що переущільнення ґрунту не сприяє нормальному росту і розвитку сільськогосподарських культур через широке коло факторів основних із яких є значний вплив ущільненого шару на проникнення кореневої системи рослин у нижні шари *(Бромот, n.d., Гаврилов, 2015)*.

Основним заходом із усунення впливу такого негативного явища є глибоке розпушення ґрунту. Для реалізації цього заходу використовуються чизельні культиватори та глибокорозпушувачі. Основним робочим органом таких знарядь є лапа. Від форми лапи залежить і результат, що буде досягнуто під час розпушення ґрунту.

Аналіз та узагальнення конструкцій робочих органів знаряддь для глибокого розпушення ґрунту вказує, що за основним конструктивним ознаками та виконуваними функціями їх можна об'єднати у 3 групи *(Цизь & Голій, 2024a)*. До першої можна віднести лапи, які не виносять на поверхню розпушений шар ґрунту і зберігають непорушеним поверхневий рослинний шар. Вони отримали назву «zero-mix» у глибокорозпушувачах фірми Bednar *(Bednar, n.d.)*. До другої групи належать робочі органи, які забезпечують винесення на поверхню поля дрібноструктурної фракції ґрунту та у більшості виробників називаються параболічними *(Цизь & Голій, 2024b)*. До третьої групи належать робочі органи із розпушуючою полицею тієї чи іншої форми *(Цизь & Голій, 2024b)*. Такі робочі органи також не здійснюють переміщення розпушеного ґрунту на поверхню.

У той же час комплексні дослідження твердості ґрунтів виявили значні коливання глибини залягання переущільнених шарів в умовах навіть невеликих за площею земельних ділянок *(Цизь & Голій, 2024)*. Описані конструкції глибокорозпушувачів передбачають суцільне розпушення підорних шарів на глибину, що рівна максимальним значенню глибини розташування плужної підошви на усьому полі та, як результат, характеризуються високими енергетичним затратами на одиницю обробленої площі. У більшості випадків зміну глибини ходу їх робочих органів здійснюють шляхом регулюванням положення опорних коліс із затратою певного часу та ручної праці. Така конструкція не дозволяє здійснювати зміну глибини обробітку у режимі реального часу на основі картограм твердості ґрунтів *(Голій, & Цизь, 2024)*.

Для вирішення такої проблеми ми пропонуємо перейти до принципу руйнування цілісності переущільного шару шляхом прорізання отворів трубчастим робочим органом та винесення вирізаного ґрунту на поверхню поля. Завдяки цьому утворюватимуться проміжки у для проникнення кореневої системи рослин у нижні горизонти ґрунту, буде інтенсифіковано газообмін та покращиться водний режим ґрунту. З часом порожнини будуть заповнені ґрунтом завдяки природнім процесам формування його структури, і відбуватиметься процес зворотній до ущільнення.

Для реалізації такого принципу розпушення переущільнених шарів гранту нами розроблена конструкція машини для диференційованого за глибиною обробітку ґрунту. Детальний опис конструкції та роботи такої машини наведений у публікації *(Голій, 2025)*. Але для перевірки роботоздатності такого рішення потрібно провести теоретичні та експериментальні дослідження та обґрунтування.

Мета дослідження – теоретично встановити тяговий опір запропонованої конструкції машини для диференційованого за глибиною обробітку ґрунту та обґрунтувати конструктивні параметри його робочого органу.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Основою запропонованої конструкції машини є ротор з дисками на яких шарнірно закріплені трубчасті зуби (робочі органи). Обертання ротора здійснюється завдяки прикладеному до його осі обертання тяговому зусиллю енергетичного засобу (трактора). Тому ротор здійснює плоский рух, який являє собою сукупність неперервних обертань навколо миттєвого центра швидкостей. Аналогічно до плоского руху веденого приводного колеса обертанню ротора чинить опір пара сил, яка спричинена опором заглибленню трубчастих зубів та їх виглибленню. Для встановлення залежності необхідного тягового зусилля для виконання обробітку від конструктивних параметрів машини розглянемо розрахункову схему наведену на **рис. 1.** При цьому вважатимемо що рух є рівномірним та прямолінійним. Тобто виконання обробітку здійснюється в усталеному режимі.

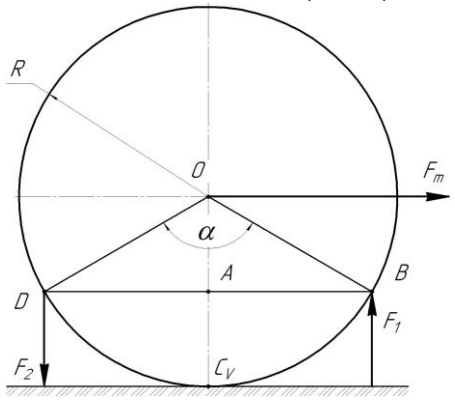


Рис. 1 - Схема дії сил на ротор у його плоскому русі

За вказаних умов на основі аналізу наведеної схеми запишемо умову рівноваги моментів сил відносно миттєвого центра швидкостей C_V

$$\sum_{i=1}^{n} M_{C_v}(F_i) = F_m \cdot OC_V - F_1 \cdot AB - F_2 \cdot DA = 0, \quad (1)$$

де F_m - тягове зусилля трактора необхідне для переборення опору від роботи одного диска знаряддя, Н; OC_V - плече моменту сили F_m відносно точки C_V, м; F_1 - сила опору проникненню робочого органу у ґрунт, Н; AB - плече моменту сили F_1 відносно точки C_V, м; F_2 - сила опору вийманню (виглибленню) робочого органу з ґрунту, Н; DA - плече моменту сили F_2 відносно точки C_V, м.

Із **рис. 1** видно, що

$$cos\angle OBA = \frac{AB}{OB}. \quad (2)$$

Оскільки $OB = R$, а $\angle OBA = 90^0 - \alpha / 2$ то отримаємо

$$AB = DA = R \cdot sin(\alpha / 2), \quad (3)$$

У свою чергу величина кута α залежатиме від кількості зубів n закріплених на диску та визначатиметься залежністю

$$\alpha = 360 / n, \quad (4)$$

Експериментальні дослідження твердості ґрунту показують, що опір проникненню деформатора у грунт може досягати $P_{гр} = 40$ кг/см^2, що у одиницях СІ складає $P_{гр} = 3923$ кПа *(Цизь & Голій, 2024b)*. Дослідження зусилля опору вийманню деформатора з ґрунту показали, що дане зусилля складає близько 50 % від зусилля опору проникнення робочого органу. У такому випадку для кругового перерізу зуба діаметром d зусилля опору проникненню та опору вийманню робочого органу складе

$$F_1 = \frac{P_{гр} \cdot \pi \cdot d^2}{4}, \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{P_{гр} \cdot \pi \cdot d^2}{8}. \quad (6)$$

Зважаючи, що $OC_V = R$ з урахуванням (4)-(6) із (1) отримаємо

$$F_m = \frac{3 \cdot P_{гр} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot sin(180 / n)}{8}. \quad (7)$$

Отриманий вираз (7) дозволяє оцінити тяговий опір одного диска. Проте знаряддя має обладнуватись кількістю m яка залежатиме від сумарної ширини захвату машини $B_м$ та віддалі між сусідніми дисками b

$$m = B_м / b. \quad (8)$$

Тоді сумарний тяговий опір складатиме

$$F_M = \frac{3 \cdot P_{гр} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot B_м \cdot \sin(180 / n)}{8 \cdot b}. \quad (9)$$

Отримана формула не враховує тертя яке виникає на поверхні зуба у процесі їх переміщення у ґрунту, зусилля на перекочування опорних колі, а також ряд інших факторів. Але вона дозволяє оцінити вплив таких параметрів як діаметр зуба d , кількість зубів на диску n та віддалі між дисками b на енергетичні затрати під час роботи знаряддя. Для аналізу цього впливу за формулою (9) побудовані графічні залежності (**рис. 2**) для питомого тягового опору, що припадає на 1 м ширини захвату машини.

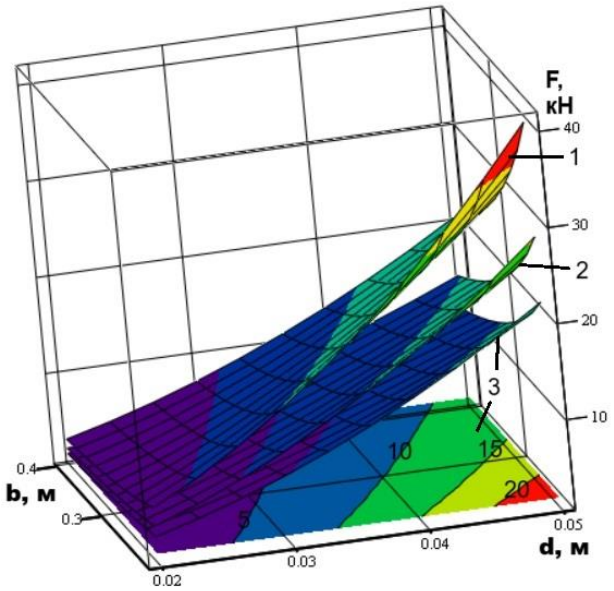


Рис. 2. Графічні залежності питомого тягового опору знаряддя побудовані за формулою (9):
1 - $n = 4$; 2 - $n = 6$; 3 - $n = 8$

Із наведених на **рис. 2** графіків видно, що питомий тяговий опір машини для диференційованого за глибиною обробітку ґрунту може змінюватись від 5 до 40 кН. Для досягнення зменшення тягового опору доцільно збільшувати кількість зубів n на одному диску від 6 до 8 штук. При цьому діаметр зуба d не повинен бути більшим за 0,03 м, а віддаль між дисками на роторі не повинна бути меншою від $b = 0,3$ м.

Проведемо також розрахунок трубчастого зуба на стійкість від прогинів під час його заглиблення у ґрунт. Оскільки розташування шарів ґрунту із твердістю, що перевищує допустимі межі знаходиться, як правило, на глибині 0,2-0,4 м то і розрахунок проведемо для випадку коли обробіток здійснюватиметься на максимальну глибину у 0,4 м. У такому випадку довжина зуба машини з урахуванням зазору між диском та поверхнею поля і трозміру шарнірного кріплення зуба, складатиме 0,50 м.

Для забезпечення повного виглиблення робочого органу із ґрунту при куті повороту шарнірного його кріплення на кут $\leq 90^0$ від крайнього нижнього положення приймемо загальний діаметр диска рівним 1 м.

Для спрощення розрахунку розглянемо робочий орган із радіусом кривизні рівним нескінченності. Встановлення геометричних розмірів перерізу робочого органу здійснимо на основі умови стійкості стиснутого шарнірно закріпленого стержня. Розрахункову схему, що відповідає закріпленню робочого органу проектованого знаряддя на початку його заглиблення у ґрунту наведена на **рис. 3**.

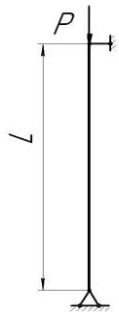


Рис. 3 - Схема навантаження робочого органу (зуба)

Для виготовлення зуба обираємо Ст3. Стискаюче навантаження рівне силі опору проникненню робочого органу тому $P = F_1$, яке при розрахунку за формулою (5) для діаметру зуба $d = 0,03$ м складе $P = 2771,6$ Н.

Як уже зазначалось поперечний переріз зуба має форму сектора кільця. Для розрахунку геометричних характеристик перерізу скористаємось схемою наведеною на **рис. 4**.

Рис. 4 - Схема до розрахунку геометричних характеристик перерізу зуба

Площу поперечного перерізу встановимо за формулою для сектора круга

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} - \frac{\pi \cdot (d-h)^2}{4} \cdot \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} = \frac{\varphi}{8} \cdot \left(2hd - h^2\right). \quad (10)$$

де φ - центральний кут кільця сектора перерізу зуба, радіани; h - товщина стінки трубчастого пальця, м.

Для визначення моменту інерції скористаємось відомою формулою для моменту інерції сектора круга *(Писаренко та ін., 2004)*

$$J_z = \frac{d^4}{128} \cdot \left[(\beta - \alpha) - \frac{\sin 2\beta - \sin 2\alpha}{2} \right], \quad (11)$$

де α - кут від осі Z до початку сектора круга, який для розглядуваного випадку $\alpha = 0$; β - кут від осі Z до кінця сектора круга, який для розглядуваного випадку $\beta = \frac{\varphi}{2}$, радіан.

Для розрахунку моменту інерції сектора кільця вважатимемо, що визначаємо момент інерції сектора круга із центральним отвором діаметром $d - h$. Тоді отримаємо

$$J_z = \frac{d^4}{128} \cdot \left[\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin\varphi}{2} \right] - \frac{(d-h)^4}{128} \cdot \left[\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin\varphi}{2} \right] = \frac{(\varphi - \sin\varphi)}{256} \cdot \left(d^4 - (d-h)^4\right). \quad (12)$$

На основі (10) та (12) отримаємо формулу для радіусу інерції перерізу

$$i = \sqrt{\frac{J_z}{F}} = \sqrt{\frac{(\varphi - sin\varphi)\cdot\left(d^4 - (d-h)^4\right)}{32\cdot\varphi\cdot\left(2hd - h^2\right)}}, \quad (13)$$

Для розглядуваної схеми закріплення стержня зведена довжина складе,

$$l_{зв} = \upsilon \cdot L = L, \quad (14)$$

де υ - коефіцієнт зведення довжини, який для розглядуваного випадку $\upsilon = 1$ *(Писаренко та ін., 2004)*; L - довжина робочого органу (зуба), м.

Тоді гнучкість робочого органу (зуба) становитиме

$$\lambda = \frac{l_{зв}}{i} = \sqrt{\frac{L^2\cdot(\varphi - sin\varphi)\cdot\left(d^4 - (d-h)^4\right)}{32\cdot\varphi\cdot\left(2hd - h^2\right)}}. \quad (15)$$

У першій спробі товщину стінки приймемо $h = 0{,}004$ м, а центральний кут кільця сектора перерізу зуба $\varphi = 200^0$, що у радіанах складе $\varphi = \frac{\pi\cdot 200}{180} = 1{,}1$ радіан. Врахувавши обрані значення $L = 0{,}5$ м та $d = 0{,}03$ м отримаємо

$$\lambda = \sqrt{\frac{0{,}5^2\cdot(1{,}1 - sin\,1{,}1)\cdot\left(0{,}03^4 - (0{,}03 - 0{,}004)^4\right)}{32\cdot 1{,}1\cdot\left(2\cdot 0{,}004\cdot 0{,}03 - 0{,}004^2\right)}} = 0{,}0015.$$

За отриманим значенням гнучкості обираємо коефіцієнт зменшення основного допустимого напруження 0,99 *(Писаренко та ін., 2004)*.

Тоді

$$[\sigma_{ст}] = \varphi\cdot[\sigma_{-}] = 0{,}99\cdot 160 = 158{,}4 \text{ МПа}. \quad (16)$$

де $[\sigma_{-}] = 160$ МПа – основне допустиме напруження на стиск матеріалу зуба.

$$\sigma = \frac{P}{S} = \frac{P}{\frac{\varphi}{8}\cdot\left(2hd - h^2\right)} = \frac{2771{,}6}{\frac{1{,}1}{8}\cdot\left(2\cdot 0.004\cdot 0.03 - 0{,}004^2\right)} = 89{,}99 \text{ МПа}$$

Оскільки $\sigma = 89{,}99$ МПа $< 158{,}4$ МПа то за обраних конструктивних параметрів зуба його стійкість забезпечена.

ВИСНОВКИ

На основі теоретичних досліджень тягового опору запропонованої конструкції машини для диференційованого за глибиною обробітку ґрунту встановлено, що її питомий тяговий опір може змінюватись від 5 до 40 кН. Для досягнення зменшення тягового опору доцільно забезпечувати кількість зубів n на одному диску від 6 до 8 штук. При цьому діаметр зуба d не повинен бути більшим за 0,03 м, а віддаль між дисками на роторі не повинна бути меншою від $b = 0{,}3$ м.

Перевірка робочого органу (зуба) на стійкість проти прогинів при його заглибленні у ґрунт з твердістю $P_{гр} = 40$ кг/см^2 виявила, що для зуба довжиною $L = 0{,}5$ м із перерізом у вигляді сектора кільця із зовнішнім діаметром $d = 0{,}03$ м, кутом сектора $\varphi = 200^0$ та товщиною стінки кільця $h = 0{,}004$ м стійкість забезпечена.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Медведєв, В.В. (2003). Наукові підходи до оцінювання якості ґрунтів регіонів (на прикладі України) (*Scientific approaches to assessing the quality of regional soils (using the example of Ukraine)*. *Сб. научн. трудов «Страны и регионы на пути к сбалансированному развитию»*, 62–64. Київ.

Медведєв, В.В. (2004). Проблеми охорони ґрунтів (Problems of soil protection). *Вісник аграрної науки*, *№1*, 53-57.

Медведєв, В.В. (2010). Твердість ґрунту як критерій для обґрунтування технологій і технічних засобів з його обробітку (Soil hardness as a criterion for justifying technologies and technical means for its cultivation). *Вісник аграрної науки*, *№4*, 14-18.

Бромот, І. Глибокорозпушувач. Навіщо він мені потрібен *(Deep conditioner. Why do I need him)*. Retrieved April

28, 2024, from https://traktorist.ua/articles/883-glibokorozpushuvachi--vse-scho-treba-znati-pro-nih.

Гаврилов, С. (2015). Проблема плужної підошви у ґрунті та шляхи її вирішення (*The problem of the plow sole in the soil and ways to solve it)*. *Пропозиція*, *№10*, 70-73.

Цизь, І.Є. & Голій, В.О. (2024a). Обґрунтування конструкції та дослідження тягового опору робочого органу знаряддя для глибокого розпушення ґрунту (Substantiation of the design and study of the traction resistance of the working body of the tool for deep soil loosening). *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, №1(22), 337-348.

Bednar (n.d.). *Terraland TN* . Retrieved April 27, 2024, from https://www.bednar.com/en/terraland-tn/.

Цизь, І.Є. & Голій, В.О. (2024b). Результати дослідження твердості ґрунту полів ДПЕДГ «ЕЛІТА» (Results of research of soil hardness of fields SEERF «Elita»). *Сільськогосподарські машини*, 50, 25-36.

Голій, О. & Цизь, І. (2024) Аналітичний огляд конструкцій машин для глибокого розпушення ґрунту (Analytical review of designs of machines for deep soil loosening). *Матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології агропромислового виробництва»,* 72-74.

Голій, О.В. (2025). Машина для диференційованого за глибиною обробітку ґрунту (A machine for soil cultivation differentiated by depth). *Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції*, 58-61.

Писаренко, Г.С. Квітка,. О.Л. & Уманський Є.С. (2004). *Опір матеріалів (Materials resistance)* . Київ: Вища шк.

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF THE WORKING PROCESS OF A SPIRAL-TYPE CUTTER FOR SAPROPEL EXTRACTION

R. Khlopetskyi*, V Didukh, S. Khomych, I. Tsyz

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
AM
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
technological systems analysis,
sapropel,
Archimedes' spiral,
mathematical modeling,
material transportation,
working body,
rheological properties,
similarity coefficient

Article history:
Received 08.09.2025
Accepted 10.10.2025

Corresponding author:*
vl80k.600@gmail.com

ABSTRACT

The article presents an analytical overview demonstrating the feasibility of using pneumatic (airlift) sapropel extraction machines designed to obtain organic sapropel raw material – a fundamental component in the production of fertilizers for organic farming. The section State of the Art and Problem Statement highlights the shortcomings of the existing mechanical adjustment and control systems of such machines, which are often inefficient and prone to operational failures. Since pneumatic sapropel extraction systems have proven to be energy-efficient and environmentally sustainable in obtaining organic raw materials and are currently undergoing active modernization, a comprehensive automated system was proposed as the result of this research. The developed system simultaneously performs several functions – it forecasts, adjusts, and controls the machine's operating process. The system determines and configures the optimal technological parameters of the workflow and automatically monitors, modifies, and manages them depending on the unpredictable characteristics and properties of the sapropel deposit. It also forecasts potential changes in the operating process and structural loads that may lead to machine failure, thereby preventing such occurrences. The paper presents a block diagram illustrating the sequence of processes for forecasting, adjustment, and control of airlift sapropel extraction machines, as well as the layout of information and control devices that implement the operational process. The proposed system will increase the efficiency of machine operation, ensure uniform extraction of sapropel layers, and provide high-quality raw material with minimal impact on the aquatic ecosystem.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1942

To cite this article:
Khlopetskyi, R., Didukh, V, Khomych, S., & Tsyz, I. (2025). Mathematical Modeling and Optimization of the Working Process of a Spiral-Type Cutter for Sapropel Extraction. *Agricultural Machines*, *51*, 107-116. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1942

УДК 631.6: 626.8: 681.5

ОБГРУНТУВАННЯ КІНЕМАТИКИ РОБОЧОГО ОРГАНУ ФРЕЗЕРНОЇ СИСТЕМИ ДОБУВАННЯ САПРОПЕЛЮ

Р.А. Хлопецький*, В.Ф. Дідух, С.М. Хомич, І.Є. Цизь

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
аналіз технологічних систем, сапропель, спіраль Архімеда, математичне моделювання, транспортування матеріалу, робочий орган, реологічні властивості, коефіцієнт подібності

Історія публікації:
Отримано 08.09.2025
Затверджено 10.10.2025

****Автор для листування:***
vl80k.600@gmail.com

АНОТАЦІЯ

У статті представлено результати аналітичного дослідження руху матеріальної точки по поверхні спіралі Архімеда, яке використано як основу для побудови математичної моделі робочого процесу транспортування сапропелю спіральним робочим органом. Робота спрямована на обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів спіральних систем, що застосовуються у технологічних засобах для добування та переміщення сапропелевої маси з дна водойм. У процесі дослідження виконано аналітичний опис кінематичних залежностей для руху частинок в'язкопластичного середовища вздовж спіральної траєкторії, визначено вплив геометричних параметрів спіралі, кутової швидкості обертання та сил опору на характер переміщення матеріалу. Запропонована модель може бути адаптована для аналізу процесів транспортування інших вологих і в'язких матеріалів (мулу, торфу, осадів стічних вод, волокнистих сумішей) шляхом введення коефіцієнта матеріальної подібності, який враховує густину, вологість і реологічні властивості середовища. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні робочих органів машин для добування сапропелю, а також у системному аналізі технологічних процесів, де необхідне моделювання руху частинок у спіральних каналах або гвинтових транспортерах.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1942

Цитувати цю статтю:
Хлопецький, Р.А., Дідух, В.Ф., Хомич, С.М., & Цизь, І.Є. (2025). Обгрунтування кінематики робочого органу фрезерної системи добування сапропелю. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 107-116. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1942

STATE OF THE ART AND ANALYSIS OF PUBLICATIONS

One of the promising directions in improving technologies for extraction and processing of organic bottom sediments is the use of spiral conveying systems, particularly working bodies in the form of an Archimedes spiral (Molchak, 1998; Shevchuk, 2012). Such designs ensure stable movement of viscoplastic materials in a confined environment and are energy-efficient due to the combination of transport, dosing, and partial dewatering functions. Modern developments in the field of hydromechanized sapropel extraction indicate the need for a deeper theoretical analysis of the process of particle movement along curved surfaces, which determines the productivity and stability of the extraction equipment (Didukh, 2016).

Given the increasing demand for environmentally safe fertilizers and the rational use of natural resources, the issue of effective extraction and transportation of lake sapropels – valuable organic raw materials for agricultural production – is becoming particularly relevant (Tsyz, 2020; Khomych, 2021). The development of technological systems for sapropel extraction requires consideration of their physical-mechanical and rheological properties, as well as the construction of models describing the kinematics and dynamics of material movement during transportation.

An analysis of scientific publications shows an insufficient number of theoretical works devoted to modeling the motion of a material point along a spiral surface, especially under the action of Archimedes' buoyant force in an aquatic environment (Khlopetskyi, 2024). Most studies focus on the constructive aspects of conveyors or hydraulic systems, but lack a systematic approach to the mathematical description of the working process of a spiral mechanism that moves viscous material along its axis (Tsyz et al., 2025).

The mechanization of sapropel extraction and feed processes has been studied in the works of Tsyz I.Ye., Didukh V.F., and Khomych S.M. (2025), where the authors analyzed the operating process of a pneumo-mechanical device for sapropel extraction. They established the relationship between the transport velocity of the mixture and the parameters of bubble lifting, emphasizing the feasibility of automated air supply regulation and pipeline inclination angle adjustment to stabilize system productivity.

Didukh V.F., Tsyz I.Ye., and Holii O.V. (2023) investigated the influence of natural-moisture sapropel on soybean yield under moisture deficit conditions, emphasizing the importance of preparing raw materials of proper consistency for subsequent agrotechnological use. These works outlined the range of technological and technical problems related to sapropel transportation from the extraction site to the accumulation zone.

Earlier, Didukh (2016) studied the dynamics of the excavation process of lake sapropels from under a water layer, describing the nature of force interactions between the intake device and sapropel mass and demonstrating the influence of the working body's entry angle into the deposit on the stability of the hydraulic system.

However, in most studies, the research focuses either on the structural aspects of machines or on experimental efficiency indicators, without systematic mathematical modeling of particle motion in spiral or screw channels (Tsyz & Didukh, 2023; Khomych, 2021). This creates a scientific gap in understanding the kinematics and dynamics of material flow in spiral working bodies.

Constructing an analytical model of particle motion along an Archimedes spiral will allow obtaining generalized dependencies between the spiral's geometric parameters, rotation frequency, resistance forces, and energy consumption of the process.

Introducing a coefficient of material similarity makes it possible to adapt the model for other types of viscous and fibrous materials – such as sludge, peat, wastewater sediments, or technical pastes – thus increasing the universality of the results for analyzing technological systems of various purposes.

ESEARCH PURPOSE AND OBJECTIVES

The purpose of the study is to develop a mathematical model of the motion of a viscoplastic material particle along the surface of an Archimedes spiral, taking into account the geometric and kinematic parameters of the working body used for sapropel transportation.

To achieve this goal, the following objectives were set:

– to analyze the physical and mechanical properties of sapropel as an object of transportation;

– to construct analytical dependencies describing the trajectory of a material point moving along a spiral under the influence of hydrostatic and frictional forces;

– to determine the influence of the spiral's geometric parameters on the uniformity of motion and the efficiency of transportation;

– to justify the applicability of the obtained model to other types of viscous media by introducing a material similarity coefficient.

Additionally, the research aims to design a system for automated forecasting, adjustment, and control of the working process in airlift-type sapropel extraction machines, in order to obtain high-quality raw material, increase productivity, and prevent equipment failures under unpredictable deposit characteristics and material properties.

MATERIALS AND METHODS

To study the process of sapropel transportation within the spiral working body, an analytical approach was applied using methods of mathematical modeling of a material point moving along the curved surface of an Archimedes spiral.

A blade in the form of a spiral sector rotating in a vertical plane with a constant angular velocity was considered. At the initial moment, a material point of mass *m* is located on the inner surface of the spiral and is subjected to gravitational force, sliding friction, and the buoyant force of Archimedes, which is proportional to the difference between the densities of sapropel and water. The friction coefficient is determined experimentally, depending on the moisture content and consistency of the sapropel mass.

The mathematical model of particle motion is described by a system of differential equations that accounts for changes in coordinates in a polar system and the action of buoyant force. To ensure the stability of the solution, the model was implemented numerically using the Runge–Kutta method of the 4th order. Calculations were performed in the MathLab environment, which made it possible to obtain graphical dependencies of:

– the angular position of the particle over time;

– relative angular velocity;

– trajectory of particle movement in absolute coordinates.

The input parameters of the model included the geometric characteristics of the spiral (radius, pitch, inclination angle), sapropel density, water density, friction coefficient, and rotational frequency of the working body. Parameters were determined considering typical sapropel extraction conditions of medium moisture content at depths of 3–5 meters.

To evaluate the influence of design parameters on transportation efficiency, dimensionless similarity coefficients were used, allowing the generalization of results for other types of viscoplastic media such as sludge, wastewater sediments, or peat suspensions.

The obtained dependencies made it possible to estimate the effect of rotation frequency on the stability of material point motion: a stable regime is achieved when the rotation frequency of the spiral working body increases from 15 to 25 rpm, which corresponds to experimental observations of effective sapropel mass movement.

The proposed approach can be applied for the calibration of parameters of similar transport systems when processing other natural materials using the coefficient of material similarity.

RESULTS AND DISCUSSION

Problem formulation.

A planar curve lying in a vertical plane, given in polar coordinates by its graph $r = r(\varphi)$ with $\frac{dr}{d\varphi} \le 0$ for $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$, rotates in its plane clockwise with constant angular velocity ω. At the initial time $t = 0$, a material point of mass m is placed at some point of the curve and is initially at rest with respect to an absolute inertial frame. The coefficient of sliding friction between the point and the curve is μ. Gravitational acceleration is *g*.

The point is also subjected to the Archimedes buoyant force proportional to the weight of the displaced fluid, i.e.

$$F_b = \rho_w \cdot g \cdot V ,$$

where ρ_s is the density of sapropel (the particle/material), ρ_w is the density of water, and V is the displaced volume (so that $m = \rho_s V$).

Required: derive the equations of motion of the material point on the rotating curve.

Notation recap:

- $r(\varphi)$: polar equation of the curve, vertical plane;
- ω: constant angular speed of the curve (clockwise);
- m, μ, g : mass, friction coefficient, gravity;
- ρ_s, ρ_w, V : sapropel density, water density, displaced volume;
- $F_b = \rho_w \cdot g \cdot V$ (buoyancy).

Remark: it is often convenient to write the effective weight acting downward as

$$W_{eff} = (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot V = m \cdot g \cdot (1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}),$$

while retaining F_b explicitly when projecting forces along the curve's tangent/normal.

SOLUTION OF THE PROBLEM

We assume that the material point does not detach from the curve; therefore we analyze its motion in a non-inertial reference frame rigidly attached to the given curve. The origin of this frame is placed at a fixed point *O*. Since the trajectory is specified in polar coordinates, we introduce the standard orthonormal basis vectors e_r and e_φ, directed along the radius vector of the point and perpendicular to it in the direction of increasing polar angle φ, respectively (see Fig. 1).

According to (Tsyz et al., 2023), the kinematic relations for the polar basis are:

$$\dot{e_r} = \dot{\varphi} e_\varphi,$$

$$\dot{e_\varphi} = -\dot{\varphi} e_r.$$

In addition, we introduce the unit vectors of the natural (Frenet) frame along the trajectory: the tangent *t* and the normal *n* (the normal points toward the center of curvature, i.e., in the direction of greatest concavity of the path). These vectors are related to e_r and e_φ by:

$$t = \frac{\partial r / \partial \varphi}{\left\| \partial r / \partial \varphi \right\|},$$

$$n = \frac{Jt}{|| Jt ||},$$

where $r = r(\varphi)\mathbf{e}_r$ is the position vector of the point on the curve, and *J* is the planar rotation by $+\pi/2$ (the Jacobian operator that maps a vector to one rotated by 90˚in the positive sense), i.e. $J \cdot e_r = e_\varphi$ and $J \cdot e_\varphi = -e_r$.

Equivalently, using scalar components (prime denotes differentiation with respect to the variable indicated in the subscript), we can write

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = r'_\varphi \cdot e_r + r(\varphi) \cdot e_\varphi,$$

$$t = \frac{r'_\varphi \cdot e_r + r \cdot e_\varphi}{\sqrt{(r'_\varphi)^2 + r^2}},$$

$$n = \frac{-r \cdot e_r + r'_\varphi \cdot e_\varphi}{\sqrt{(r'_\varphi)^2 + r^2}}$$

Here $r'_\varphi \equiv \frac{dr}{d\varphi}$. These relations will be used to project forces (gravity reduced by buoyancy, friction) and the non-inertial terms due to rotation with angular speed ω onto *t* and *n* when deriving the equations of motion.

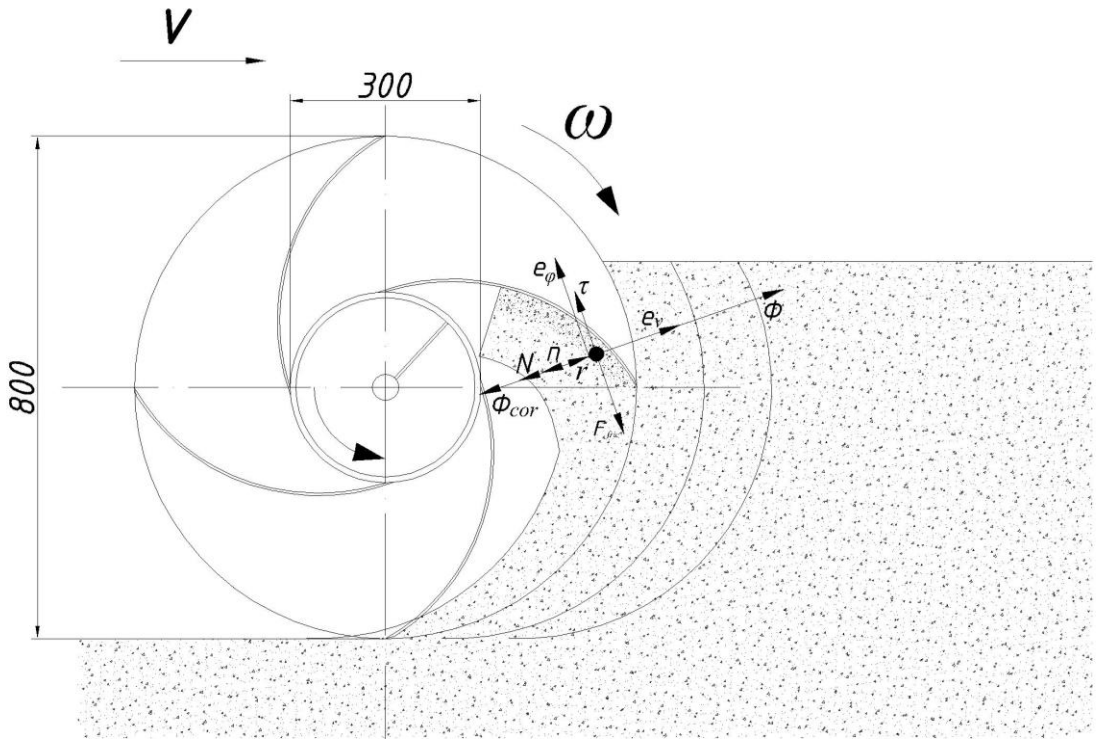


Figure 1 – Diagram of the forces acting on a material point moving along a curved surface

RESULTS AND DISCUSSION

Problem solution. We assume that the material point does not detach from the curve; therefore, we consider its motion in a non-inertial reference frame rigidly attached to the given curve. The origin of this frame is placed at a fixed point *O*. Since the trajectory is specified in polar coordinates, we introduce the unit orthogonal vectors e_r and e_φ, directed, respectively, along the radius vector of the point and perpendicular to it in the direction of increasing polar angle φ (see Fig. 1).

According to (Tsyz et al., 2023), $\dot{e}_r = \dot{\varphi} e_\varphi$, $\dot{e}_r = -\dot{\varphi} e_\varphi$. In addition, we introduce the unit vectors of the natural (Frenet) frame: the normal *n*, directed toward the greatest concavity of the trajectory, and the tangent *t*. These vectors are related to e_r and e_φ by

$$t = \frac{\partial r / \partial \varphi}{\left\| \partial r / \partial \varphi \right\|},$$

$$n = \frac{Jt}{\| Jt \|},$$

where *J* is the Jacobian (rotation by +π/2); primes denote derivatives with respect to the variable shown in the subscript, i.e., $r'_\varphi \equiv \frac{dr}{d\varphi}$.

Figure 1. Scheme of the forces acting on a material point moving along a curvilinear surface.

The relative velocity of the material point, by definition (Molchak et al., 1998), is

$$v_{rel} = \dot{s} \cdot t \tag{1}$$

where $\dot{\varphi}$ is the time derivative of the polar angle φ that specifies the position of the material point along its trajectory.

According to (1) and definition (Molchak et al., 1998), the relative acceleration of the material point is

$$a_{rel} = \ddot{s} \cdot t + \frac{\dot{s} \cdot 2}{\rho} \cdot n \tag{2}$$

where $\kappa = 1/\rho$ is the curvature and ρ is the radius of curvature of the trajectory.

The transport (convective) acceleration (i.e., the acceleration due to the rotation of the coordinate system together with the curve) for the material point equals

$$a_{tr} = -\omega \cdot (\omega \cdot r) \tag{3}$$

and is directed toward the center O of rotation, since the angular acceleration of the frame rigidly attached to the curve is zero under the problem statement $(\dot{\omega} = 0, \alpha = 0)$.

The Coriolis acceleration of the material point is computed taking into account that the transport angular velocity vector is ω (per the problem statement). Hence, by definition (Molchak et al., 1998), the Coriolis acceleration is

$$a_{cor} = 2\omega \cdot v_{rel} \tag{4}$$

Thus, according to (3) and (4) and D'Alembert's principle (Molchak et al., 1998), the corresponding inertia forces are:

$$\begin{aligned} F_{tr} &= -m \cdot a_{tr}, \\ F_{cor} &= -m \cdot a_{cor}. \end{aligned} \tag{5}$$

In addition to the inertia forces (5), the material point is acted upon by the normal reaction of the constraint (the curve):

$$N = N \cdot n, \tag{6}$$

the sliding friction force, which, by Coulomb's law (Molchak et al., 1998), is taken as

$$T = -\mu \cdot N \cdot t, \tag{7}$$

and the weight and Archimedes buoyant force, whose resultant in the chosen non-inertial frame has the form

$$P = (m \cdot g - \rho_w \cdot g \cdot V) \cdot (-e_y), \tag{8}$$

where m is the mass of the point, g is gravitational acceleration, ρ_ω is water density, and V is the displaced volume (so that $m = \rho_s \cdot V$, ρ_s being the sapropel density).

According to Newton's second law (Molchak et al., 1998) written in the non-inertial frame, the relative acceleration of the material point is proportional to the vector sum of active forces, constraint reactions, and inertia forces, i.e.,

$$m \cdot a_{rel} = P + T + N + F_{tr} + F_{cor}. \tag{9}$$

We write vector equality (9) in projections onto the axes of the natural frame *(t, n)*. To this end, we take the scalar product of (9) first with t and then with n, using the relations

$$t \cdot t = 1, n \cdot n = 1, t \cdot n = 0, a_{rel} \cdot t = \ddot{s}, a_{rel} \cdot n = \frac{\dot{s}^2}{\rho}$$

$$a_{tr} \cdot t = a_{tr,t}, a_{tr} \cdot n = a_{tr,n}, a_{cor} \cdot t = a_{cor,t}, a_{cor} \cdot n = a_{cor,n}$$

$$P \cdot t = P_t, P \cdot n = P_n$$

In this way we obtain the equation of relative motion along the curve $s = s(\varphi)$:

$$m\ddot{s} = Pt - \mu N sgn(\dot{s}) - m a_{tr,t} - m a_{cor,t}. \tag{10}$$

where

$$N = P_n - m \cdot a_{tr,n} - m \cdot a_{cor,n} + m\frac{\dot{s}^2}{\rho}. \tag{11}$$

$$a_{tr,t} = -\omega^2 r \frac{r'}{\sqrt{(r')^2 + r^2}}, a_{tr,n} = +\omega^2 r \frac{r}{\sqrt{(r')^2 + r^2}}.$$

If the material point is placed on the curve with zero initial absolute velocity, then the initial conditions, given the adopted directions of φ and the frame's angular velocity ω, are

$$s(0) = s_0, \dot{s}(0) = 0. \quad (12)$$

Equation (10) must be solved under the non-separation condition $N \geq 0$, i.e., the material point does not detach from the curve surface.

The differential equation (10) is nonlinear with variable coefficients; therefore, numerical methods are used. Since (10) contains a discontinuous function $sgn(\dot{s})$ (from Coulomb friction), to ensure stability a fixed-step scheme is required. Hence, the fourth-order Runge-Kutta method is optimal.

Implementation of the problem in the MATLAB environment, taking into account the assumed and theoretically obtained parameters, confirmed the feasibility of the proposed working process of the extracting organ. However, achieving the desired transport of sapropel along the Archimedes spiral is possible when the cutter's rotation frequency is increased from the proposed 15 min^{-1} to 20 min^{-1}, while a stable operating regime is achieved at 25 min^{-1}, which is allowed by the proposed standards.

The solution of the mathematical model made it possible to obtain the following graphical dependencies: the angular position of the point on the cutter blade versus time (Fig. 2), the relative angular velocity with respect to the blade (Fig. 3), and the trajectory of the point in absolute coordinates (Fig. 4).

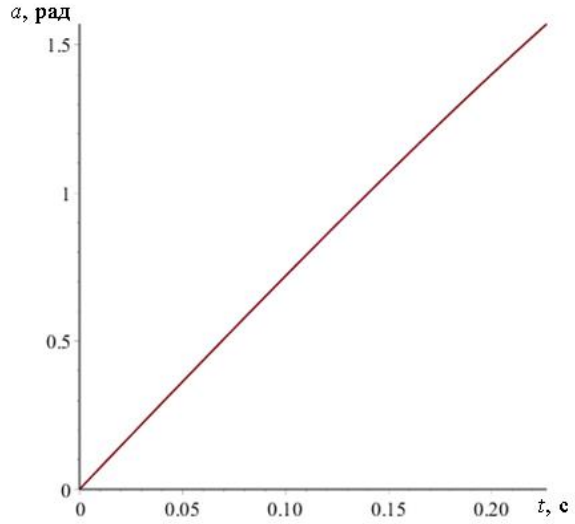


Figure 2 – Angular position of the point on the cutter blade as a function of time.

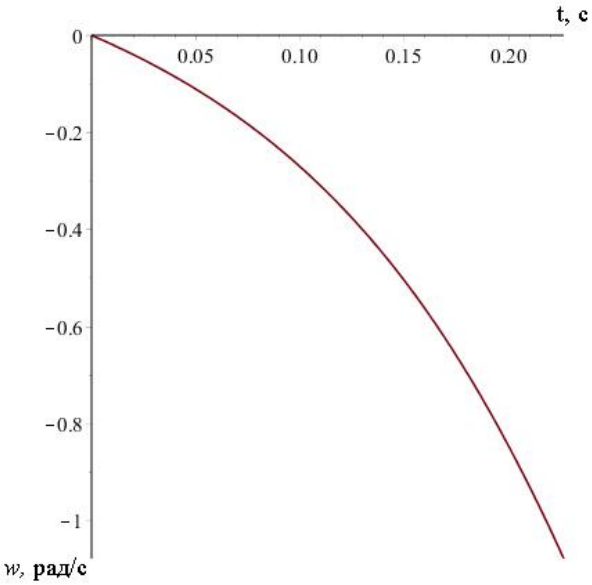


Figure 3 – Relative angular velocity of the point with respect to the cutter blade.

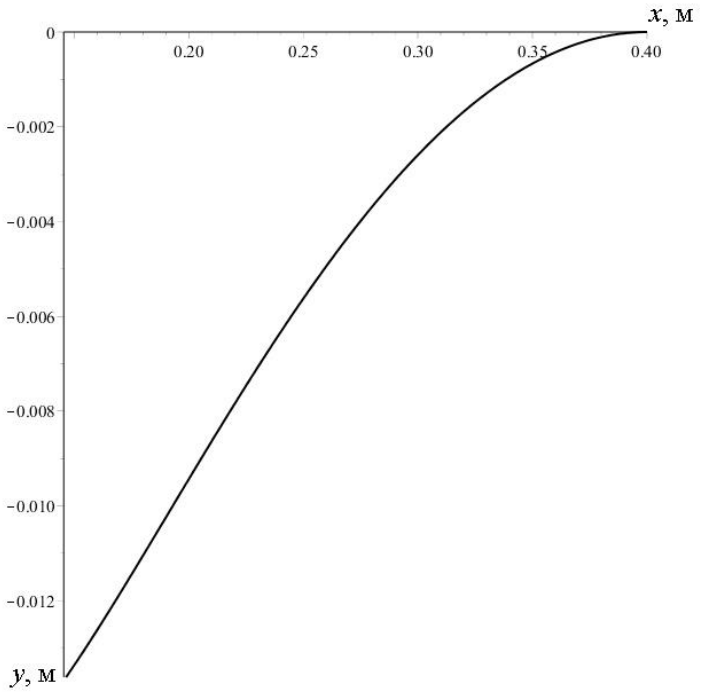


Figure 4 – Trajectory of the point in absolute coordinates.

To generalize the research results and transfer the obtained dependencies to other types of viscoplastic media, a **material similarity coefficient** k_m was introduced. It accounts for the physico-mechanical parameters of the processed material. The coefficient is defined as the ratio of density, moisture content, and rheological characteristics of the studied material to the corresponding parameters of sapropel:

$$K_m = \frac{\rho_m}{\rho_s} \cdot \frac{\mu_m}{\mu_s} \cdot \frac{W_m}{W_s} \tag{13}$$

where: ρ_m, ρ_s – density of the material and sapropel, kg/m³;

μ_m, μ_s – dynamic viscosity of the material and sapropel, Pa·s;

W_m, W_s – moisture content of the material and sapropel, %.

The obtained coefficient k_m makes it possible to **scale the kinematic and energy parameters** of the transportation process described by the mathematical model. For example, for **natural-moisture silt** ($\rho = 1300$ kg/m³, $\mu = 60$ Pa·s, $W = 75\%$), the coefficient $K_m \approx 1{,}12$. In contrast, for a **peat suspension** ($\rho = 1100$ kg/m³, $\mu = 45$ Pa·s, $W = 70\%$), $k_m \approx 0{,}89$. This indicates that transporting such materials in a spiral working body requires only minor adjustment of the cutter rotation speed (within ±10%) to ensure stable movement of the mass.

Thus, the **material similarity coefficient** can be used to determine the operating modes of machines employed for extraction, dewatering, or conveying of viscous organic materials, as well as in the modeling and design of other screw-type transport systems.

CONCLUSIONS

1. An analytical model of the motion of a material particle along the surface of an Archimedean spiral was developed, taking into account friction forces, buoyancy, and hydrostatic resistance in a water environment.
2. It was established that a stable mode of sapropel mass transportation is achieved at the rotational speed of the spiral working organ of 20–25 min^{-1}, which corresponds to the conditions of uniform material movement without segregation.
3. A material similarity coefficient K_m was proposed, which allows the mathematical model to be adapted to different viscoplastic media (such as silt, peat, technical pastes, etc.).

4. The model confirms the possibility of optimizing the structural parameters of the spiral cutter without the need for multiple large-scale field experiments, which significantly reduces the scope of full-scale testing.
5. The obtained results can be used for the design of energy-efficient screw-type transportation systems for natural organic masses with adjustable feed rates.

REFERENCES

1. Khilchevskyi, V. K. (2022). Features of the hydrography of Europe: Rivers, lakes, reservoirs. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 4(66). https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.1
2. United Nations. (1992). *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development*. Rio de Janeiro Earth Summit. (Ukrainian translation: Kyiv: Intelsfera, 2000). *(in Ukrainian)*
3. Tsyz, I. Ye., Didukh, V. F., Holii, O. V., Khvesyk, V. O., & Holii, V. O. (2023). Study of the effect of natural humidity of sapropel on the growth of soybeans under extreme moisture shortage. *Agricultural Machinery*, 49, 22–30. https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1013 *(in Ukrainian)*
4. Molchak, Ya. O., Melniichuk, M. M., Androshchuk, I. V., & Zaremba, V. M. (1998). *Soil degradation and ways to increase soil fertility*. Nastyrya. *(in Ukrainian)*
5. Shevchuk, M. Y. (1996). *Sapropels of Ukraine: Reserves, quality and prospects for use*. Institute of Soil Science and Agrochemistry, NAAS of Ukraine. Nadstyria. *(in Ukrainian)*
6. Khomych, S. M. (2014). *Justification of the parameters of the intake device for sapropel extraction* (Candidate of Technical Sciences dissertation, 05.05.11). Ternopil, Ukraine. *(in Ukrainian)*
7. Khomych, S. M., Tsyz, I. Ye., & Pavlik, V. A. (2017). Technological basics of pneumatic extraction of lake sapropel. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(8), 144–149. *(in Ukrainian)*
8. Kononenko, A. P. (2009). Experimental confirmation of the influence of the type of water-air flow structure on the energy intensity of airlift. *Bulletin of SSU*, 34–42. *(in Ukrainian)*
9. Sapropel as an available organic fertilizer. (n.d.). *AgroBusiness Today*. Retrieved from https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/19628-rezerv-deshevoi-orhaniky-sapropel.html *(in Ukrainian)*

RESEARCH ON SAPROPEL DEHYDRATION IN A SCREW PRESS WITH A SELF-CLEANING FILTER

I. Tsiz[1*], V. Didukh[1], S. Khomych[1], O. Holii[2]

[1]Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
[2]SEERF «ELITA», Rokiny, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
sapropel moisture,
dehydration methods,
screw press,
self-cleaning filter,
regression equation

Article history:
Received
Accepted

[*]***Corresponding author:***
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

The formation of sapropel deposits ensures their humidity within 92–98%. To achieve a minimum level of profitability from the use of sapropel, it is necessary to reduce its humidity to 60–70%. Therefore, the process of dewatering the extracted sapropel is the most important stage of processing the extracted deposits. Convective drying, as the most common method of dewatering wet agricultural materials, is very energy-intensive. Among the methods of dewatering materials that involve the use of various kinds of mechanical energy, only cake filtration in presses with a limited chamber volume and the use of gravity during dehydration in pipes made of geotextile materials can be effective for dewatering sapropel. But when using a screw press, the question arises of the effective operation of the filter in which the liquid is separated from the solid. To solve this problem, we have proposed a press design with a self-cleaning filter. Therefore, the purpose of this work is to study the influence of the design parameters of a screw press with a self-cleaning filter on the process of sapropel dehydration. To obtain mathematical models of the studied process in the form of regression equations, the mathematical method of experimental design was applied. Analysis of the obtained equations and graphical dependencies showed that the design of a screw press with a self-cleaning filter is workable and provides a decrease in the humidity of sapropel samples from 92.2% to 80.0-82.0%. It was established that the rational parameters of such a press are the frequency of rotation of the screw shaft $n = 300$ *rpm, the compression force of the pressure plate spring* $F = 550$ *N, the gap between the filter rings* $\Delta = 0,4$ *mm and the length of the filter* $L = 0,9$ *m. With such values, the press productivity will be* $Q = 0,15 - 0,20$ *kg/s, and the humidity of the dehydrated sapropel -* $W = 80,0 - 82,0$ *%.*

DOI: 10.36910/acm.vi51.1880

To cite this article:
Tsiz, I., Didukh, V., Khomych, S., & Holii, O. (2025). Potatoes Research on Sapropel Dehydration in a Screw Press with a Self-Cleaning Filter. *Agricultural Machines*, *51*, 117-125. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1880

УДК 631.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНЕВОДНЕННЯ САПРОПЕЛЮ У ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ ІЗ САМООЧИСНИМ ФІЛЬТРОМ

І.Є. Цизь[1*], В.Ф. Дідух[1], С.М. Хомич[1], О.В. Голій[2]

[1]Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
[2] ДПЕДГ «Еліта», Рокині, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
AM
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
вологість сапропелю, методи зневоднення, шнековий прес, самоочисний фільтр, рівняння регресії

Історія публікації:
Отримано
Затверджено

*[*]**Автор для листування:***
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

Формування покладів сапропелю забезпечує їх вологість у межах 92–98 %. Для досягнення мінімального рівня рентабельності від використання сапропелю необхідно знизити його вологість до 60–70 %. Тому процес зневоднення добутого сапропелю є найважливішим етапом обробки добутих покладів. Конвективне сушіння, як найбільш поширений метод зневоднення вологих сільськогосподарських матеріалів, є дуже енергозатратним. Серед методів зневоднення матеріалів які передбачають використанням різного роду механічної енергії лише фільтрація кеку у пресах із обмеженим об'ємом камери та використання сили земного тяжіння під час зневоднення у трубах із геотекстильних матеріалів можуть бути ефективним для зневоднення сапропелю. Але за використання шнекового преса виникає питання із ефективною роботою фільтра у якому відбувається відділення рідини від твердої речовини. Для вирішення такої проблеми нами запропонована конструкція преса із самоочисним фільтром. Тому метою даної роботи є дослідження впливу конструктивних параметрів шнекового преса із самоочисним фільтром на процес зневоднення сапропелю. Для отримання математичних моделей досліджуваного процесу у вигляді рівнянь регресії було застосовано математичний метод планування експерименту. Аналіз отриманих рівнянь та графічних залежностей показав, що конструкція шнекового преса із самоочисним фільтром є роботоздатною і забезпечує зниження вологості зразків сапропелю із 92,2 % до 80,0-82,0%. Встановлено, що раціональним параметрами роботи такого преса є частота обертання валу шнека $n = 300$ *об/хв., зусилля стиску пружини притискної пластини* $F = 550$ *Н, зазор між кільцями фільтра* $\Delta = 0,4$ *мм та довжина фільтра* $L = 0,9$ *м. За таких значень продуктивність преса складатиме* $Q = 0,15 - 0,20$ *кг/с, а вологість зневодненого сапропелю -* $W = 80,0 - 82,0$ *%.*

DOI: 10.36910/acm.vi51.1880

Цитувати цю статтю:
Цизь, І. Є., Дідух, В. Ф., Хомич, С. М., & Голій, О. В. (2025). Дослідження зневоднення сапропелю у шнековому пресі із самоочисним фільтром. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 117-125. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1880

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Особливість формування покладів сапропелю забезпечує їх дисперсну будову із вмістом дисперсійного середовища, тобто води, у межах 92–98%. У процесі добування, особливо з використанням гідравлічної та гідромеханізованої технологій, вміст води у добутих покладах може досягати до 99% (*Шевчук, 1996; Шевчук, 1997*). Таким чином у процесі добування ми отримуємо по суті воду із вмістом від 1% до 8 % сухої речовини. Для досягнення мінімального рівня рентабельності від використання сапропелю необхідно знизити його вологість до 60–70 %, а концентрація сухої речовини має зрости до 30–40 % тобто у 5–40 разів. Тому процес зневоднення добутого сапропелю є найважливішим етапом обробки добутих покладів, вимагає значних затрат енергії та використання відповідної техніки та технологій.

Найбільш доступним та поширеним методом зневоднення вологих сільськогосподарських матеріалів є конвективне сушіння *(Дідух, 2002; Грабовець, 2008, Mujumdar, 2006*). Проте даний спосіб вимагає значних витрат енергії та часу на одиницю видаленої вологи адже перетворення одиниці кількості вологи у пару вимагає постійної кількості енергії лише із певними відхиленнями *(Mechanical 1999, Грабовець, 2008)*. Тому зневоднення сапропелю методом сушіння доцільно використовувати для видалення тієї частки (форм) вологи, яка іншими способами не можуть бути видалені. Для сушіння такого класу матеріалів найбільшого поширення набули барабанні сушарки із різноманітним пристосуваннями, що забезпечують інтенсифікацію процесу *(Цизь, 2005; Lane, n.d.; Chen et al., 2006)*.

Для використання енергії сонячного проміння у процесі сушіння сапропелю розроблена технологічна схема обов'язковим елементом якої є проморожування добутих покладів (*Шевчук, 1996*). Завдяки дії від'ємних температур відбувається руйнування колоїдної структури сапропелю, він набуває сипкого стану і значно краще віддає вологу. Але через значні кліматичні зміни протягом останніх років не можна забезпечити тривалого впливу від'ємних температур в Україні на добуті поклади.

Також відомі та широко використовуються для зневоднення твердих матеріалів методи які передбачають використання різного роду механічної енергії. Класифікація цих методів розроблена L. Svarovsky (2000) (**рис. 1**) дає можливість проаналізувати конструкції відповідних машин з точки зору застосування їх для зневоднення сапропелю.

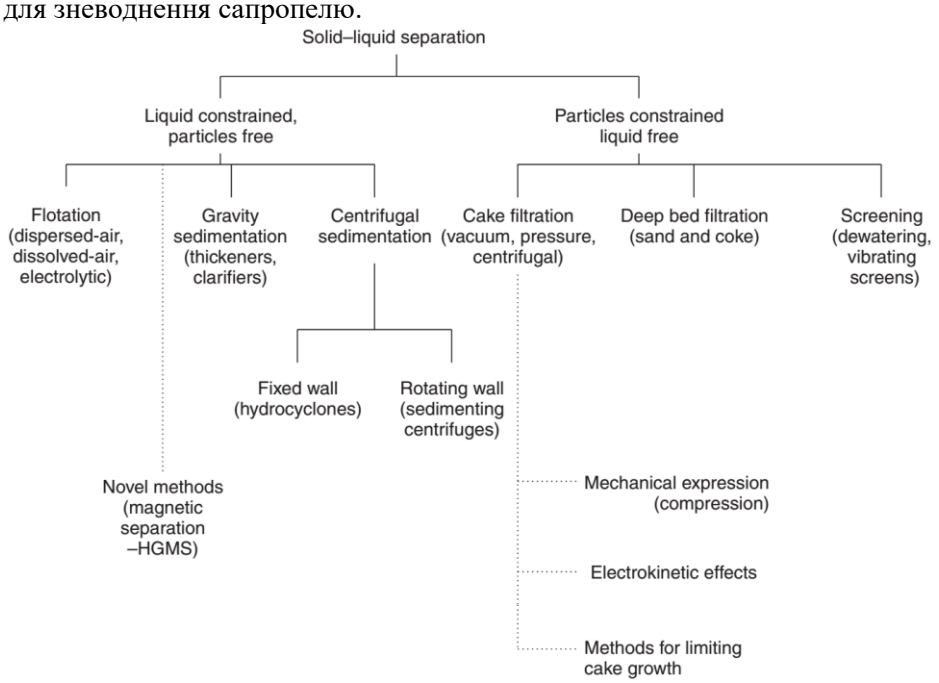


Рис.1 – Класифікація способів розділення дисперсій на фази *(Svarovsky, 2000)*

Так спосіб седиментації реалізують за гідромеханізованого добування сапропелю з метою осадження у відстійниках вільної вологи на початковому етапі зневоднення *(Шевчук, 1996; Шевчук, 1997)*. Подальше зневоднення відбувається під діє сонячної енергії за описаним раніше способом. Проте така технологія зневоднення вимагає значних площ під фільтраційні поля, допускає

змішування сапропелю із матеріалом підстилаючої поверхні, а також вимагає розпушення шару покладів для інтенсифікації вологовіддачі.

Використання впливу відцентрової сили у гідроциклонах та центрифугах описуються окремими дослідниками для зневоднення сапропелів із високим вмістом зольних компонентів, але для зневоднення органічного типу сапропелю такий спосіб не знайшов впровадження (*Шевчук, 1996*).

Найбільш широко для зневоднення сапропелю використовується фільтрація кеку у пресах із обмеженим об'ємом камери. Прикладом використання методу відтискання у промислових масштабах є використання шнекових пресів. Але під час використання шнекового преса виникає питання із ефективною роботу фільтра у якому відбувається відділення рідини від твердої речовини. Адже через вміст у органічному сапропелі понад 50 % фракції із розміром частинок 50 мкм (*Шевчук, 1996*) він здатен забивати прохідні отвори фільтрів. Відомі експериментальні дослідження фільтраційних властивостей матеріалу відділяючої камери шнекового преса для зневоднення сапропелю згідно яких встановлено, що найбільш інтенсивно вода відділяється через капрон *(Шимчук, 2008)*. Але у цих дослідженнях не наведено дані про довговічність таких фільтрувальних матеріалів.

Використання сили земного тяжіння забезпечує виділення вологи із різноманітних осадів у тому числі і сапропелів під час їх зневоднення у трубах із геотекстильних матеріалів *(Cantrell et al., 2008, Berg & Filinto, 2019).* За використання геотубів у них закачуються осади добуті земснарядом. Заповнені осадами геотуби можуть за необхідності виконувати функції гідротехнічних споруд *(Berg & Filinto, 2019)*. Під час перебування сапропелю у геотубі вода фільтрується через геотекстильний матеріал під діє сили земного тяжіння. Процес може тривати кілька місяців за мінімальної кількості затраченої енергії. У той же час для розташування геотубів необхідні значні підготовлені площі, як і у випадку використання способу седиментації.

Комбінована система зневоднення сапропелю запропонована у праці *(Грабовець, 2008)* передбачає здійснення попереднього нагріву матеріалу струмами високої частоти та наступне його зневоднення на стрічковому пресі.

Таким чином розглянуті способи та засоби для зневоднення сапропелю за умови їх енергетичної сприйнятності не забезпечують бажаної межі вологості у 70–60 %. Застосування методів сушіння із використанням штучного сушильного агенту пов'язане із значними матеріальними затратами. Тому для досягнення мінімального рівня матеріальних затрат на зневоднення сапропелю слід шукати оптимальне поєднання пристроїв для видалення вологи окремих форм зв'язку. Таким поєднанням можна вважати використання на початковому етапі зневоднення механічним стискуванням сапропелю, що дозволяє зменшити його вологість із 94 % до 72–74 %. Остаточно сапропель доцільно зневоднювати у геотубах *(Tsiz et al., 2023)*.

Для реалізації процесу механічного зневоднення сапропелю нами розроблено конструкцію шнекового преса із самоочисним фільтром. Завдяки особливостям конструкції такий фільтр дозволяє працювати із різним типами сапропелю та забезпечувати довговічність конструкції *(Цизь, 2025)*.

Мета дослідження – дослідити вплив конструктивних параметрів шнекового преса із самоочисним фільтром на процес зневоднення сапропелю.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для перевірки роботоздатності запропонованої конструкції шнекового преса із самоочисним фільтром було виготовлено експериментальну установку такого преса (**рис. 1**). На рамі 1 установки у двох підшипникових опорах 2 та 3 консольно встановлений вал 4 зі шнековою навивкою. Шнекова навивка розпочинається у зоні бункера 5 та закінчується на рівні останнього нерухомого кільця 13 самочисного фільтра 6. Самочисний фільтр складається із набору нерухомих 7 та рухомих 8 кілець, які змонтовані на шести різьбових шпильках 9. При цьому віддаль між сусідніми нерухомими кільцями змінюється ступенем стиску пружинних шайб 10 гайками 11. Завдяки цьому відбувається регулювання зазору між бічною площиною нерухомих 7 та рухомих 8 кілець. Фіксація горизонтального положення фільтра здійснюється завдяки встановленню пальців 12 останнього нерухомого кільця 13 у втулки рами 1. Осьовий отвір внутрішньої порожнини самоочисного фільтра закривається пластиною 14. У процесі роботи преса дана пластина обертається разом із валом 4, а зусилля її притискання до крайнього нерухомого кільця 13 регулюється ступенем стиску пружини 16 гвинтовим механізмом 15. Для збору рідини, яка проходить крізь фільтр передбачено лоток 17.

Привід валу 4 здійснюється від двигуна 18 через двоступінчасту пасову передачу 19. Вмикання (вимикання) установки здійснюється пультом 20.

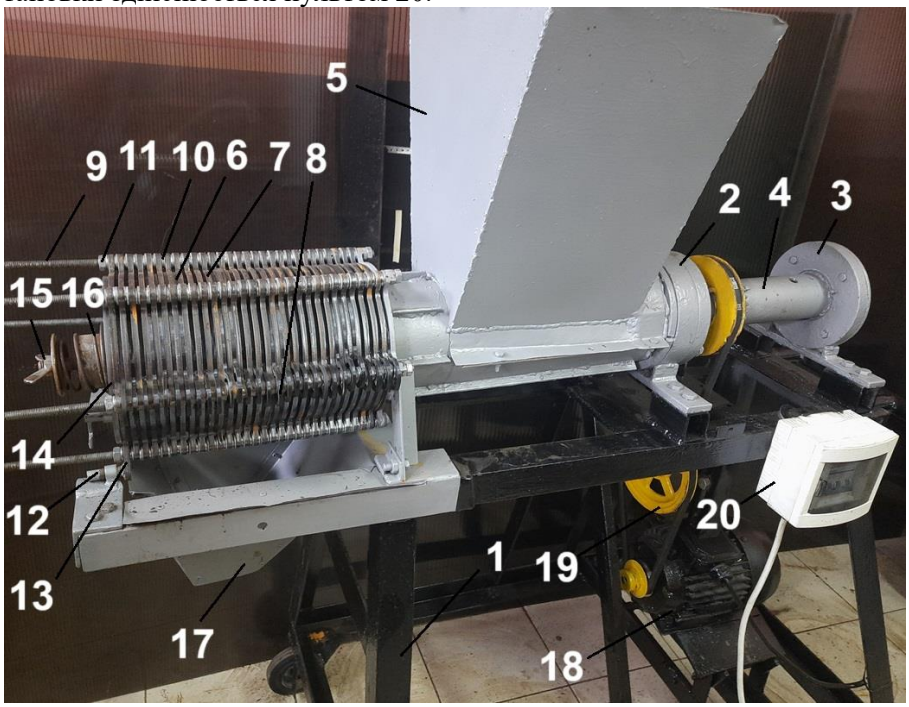


Рис. 2 - Фото експериментальної установки преса для зневоднення сапропелю

Дана конструкція експериментальної установки дозволяє досліджувати вплив таких основних конструктивних параметрів преса на процес зневоднення, як: частота обертання вала шнека, зазор між рухомими та нерухомими кільцями, довжина самоочисного фільтра та зусилля стиску пружини притискної пластини. Коло досліджуваних факторів було визначене на основі аналізу літературних джерел та попередньо проведених експериментальних і теоретичних досліджень. Значення та межі зміни факторів вплив яких досліджувався в експерименті наведено у **табл. 1**.

Таблиця 1 – Досліджувані фактори та межі їх зміни

Рівні варіювання	Фактори			
	Частота обертання вала шнека n, об/хв.	Зазор між кільцями фільтра Δ, мм	Довжина фільтра, l, м	Зусилля стиску пружини притискної пластини F, Н
Верхній (+1)	300	0,4	0,9	600
Основний (0)	250	0,3	0,6	500
Нижній (-1)	200	0,2	0,3	400

Фіксування досліджуваних факторів на визначених рівнях здійснювалось таким чином. Для зміни частоти обертання вала шнека n здійснювали встановленням шківа відповідного діаметру на валу електродвигуна. Зусилля стиску пружини визначали за коефіцієнтом жорсткості пружини та величиною її деформації. Величину сумарного зазору між рухомим кільцем та двома суміжними нерухомими встановлювали шляхом переміщення гайок 11 по шпильках 9 (див. **рис. 2**). Вимірювання отриманого значення зазору здійснювали за допомого набору щупів. Імітацію зміни довжини фільтра здійснювали шляхом кратності пропускання сапропелю через прес. Оскільки довжина фільтра установки складає 0,3 м то за дворазової обробки сапропелю пресом вважали, що довжина фільтра складає 0,6 м. Аналогічно за трикратної обробки – 0,9 м.

З метою отримання моделі процесу зневоднення сапропелю у вигляді рівняння регресії використовували математичний метод планування для чотирифакторного експерименту, який базувався на симетричному некомпозиційному плані Бокса-Бенкіна другого порядку. Функціями відгуку були вологість зневодненого сапропелю та продуктивність преса.

Зневоднення піддавали органічний сапропель добутий пневматичним способом описаним у праці (*Tsiz & Homich, 2013)* на озері Бурків Волинської обл. (51.764326, 25.125718). Вихідна вологість досліджуваних зразків сапропелю складала $W = 92,2$ %.

Для визначення вологості зневодненого сапропелю із контейнера 2 (**рис. 2**) у трьох точка за діагоналлю відбирали орієнтовно по 100 г сапропелю. Після цього відібрані проби перемішували та з отриманого зразка відбирали приблизно по 5 г сапропелю і визначали їх вологість методом висушування. Середнє значення у трьох спробах приймалось, як вологість зневодненого сапропелю за визначених планом експерименту рівнів досліджуваних факторів.

Рис. 3 – Фото процесу реалізації експерименту за таких значень досліджуваних факторів: $n = 200$ об/хв; Δ =0,4 мм; $l = 0,3$ м; $F = 300$ Н

Продуктивність пресу визначали шляхом ділення маси зневодненого сапропелю, що була накопичена протягом реалізації одного експерименту у контейнері 2 (рис. 2) на час реалізації експерименту. Усі експерименти із визначення вологості (продуктивності) за визначених планом значень факторів проводили у трикратній повторюваності.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

За отриманими у результаті експерименту значеннями вологості зневодненого сапропелю та продуктивності преса у середовищі Mathcad були розраховані коефіцієнти рівняння регресії, встановлені їх довірчі інтервали та значущість. Після вилучення незначущих коефіцієнтів перевірили гіпотезу адекватності рівнянь за критерієм Фішера. Розрахункове значення даного критерію для вологості сапропелю при дисперсії неадекватності $S_{n.}^2 = 0,425$ та дисперсії відтворюваності досліду $S_y^2 = 0,09$ становило $F^{calc} = 4,725$. Табличне значення критерію Фішера за прийнятого 5-% значущості, згідно *(Аністратенко & Федоров, 1993)*, склало:

$$F^{tab}\left(0,05; f_2; f_1\right) = 19,43, \quad (1)$$

де $f_2 = 16$ - число ступенів вільності дисперсії неадекватності; $f_1 = 2$ - число ступенів вільності дисперсії відтворюваності досліду.

Оскільки,

$$F^{calc.} = 4,725 < F^{tab}\left(0,05; f_2; f_1\right) = 19,43, \quad (2)$$

то гіпотеза адекватності рівняння регресії де функцією відгуку є вологість зневодненого сапропелю вологості підтверджується.

Розрахункове значення даного критерію для продуктивності преса при дисперсії неадекватності $S_{n.}^2 = 1,098 \times 10^{-4}$ та дисперсії відтворюваності досліду $S_y^2 = 6,4 \times 10^{-5}$ становило $F^{calc} = 1,715$. Табличне значення критерію Фішера за прийнятого 5-% значущості склало:

$$F^{tab}\left(0,05; f_2; f_1\right) = 19,43\,, \tag{3}$$

де $f_2 = 19$ - число ступенів вільності дисперсії неадекватності; $f_1 = 2$ - число ступенів вільності дисперсії відтворюваності досліду.

Оскільки,

$$F^{calc.} = 1,715 < F^{tab}\left(0,05; f_2; f_1\right) = 19,43\,, \tag{4}$$

то гіпотеза адекватності рівняння регресії де функцією відгуку є продуктивність преса підтверджується.

Після переведення факторів у натуральні величини отримали рівняння регресії (5) вологості зневодненого сапропелю та (6) – продуктивності шнекового преса. На основі рівняння (5) побудовано поверхні відгуку (**рис. 3, а-б**), а на основі рівня (6) - двомірні січення поверхні відгуку (**рис. 3, г**)

$$W = 57.88 + 0,08894 \cdot n + 1.98 \cdot \Delta + 17,05 \cdot L + 0,10563 \cdot F - 0,00022 \cdot F \cdot n - 0,065 \cdot F \cdot L +$$
$$+0.0000268 \cdot n^2 - 15.8 \cdot \Delta^2 + 6.577778 \cdot L^2 - 0.0000483 \cdot F^2\,, \tag{5}$$

$$Q = 0,0050934 \cdot n + 0,003 \cdot F - 1.22417 - 0,000002067 \cdot n^2 - 0.000002 \cdot F^2 - 0.000006 \cdot F \cdot n\,, \tag{6}$$

де W - вологість зневодненого сапропелю, %; n - частота обертання вала шнека, об/хв.; Δ - зазор між кільцями фільтра, мм; L - довжина фільтра, м; F - зусилля стиску пружини притискної пластини, Н; Q - продуктивності шнекового преса, кг/с.

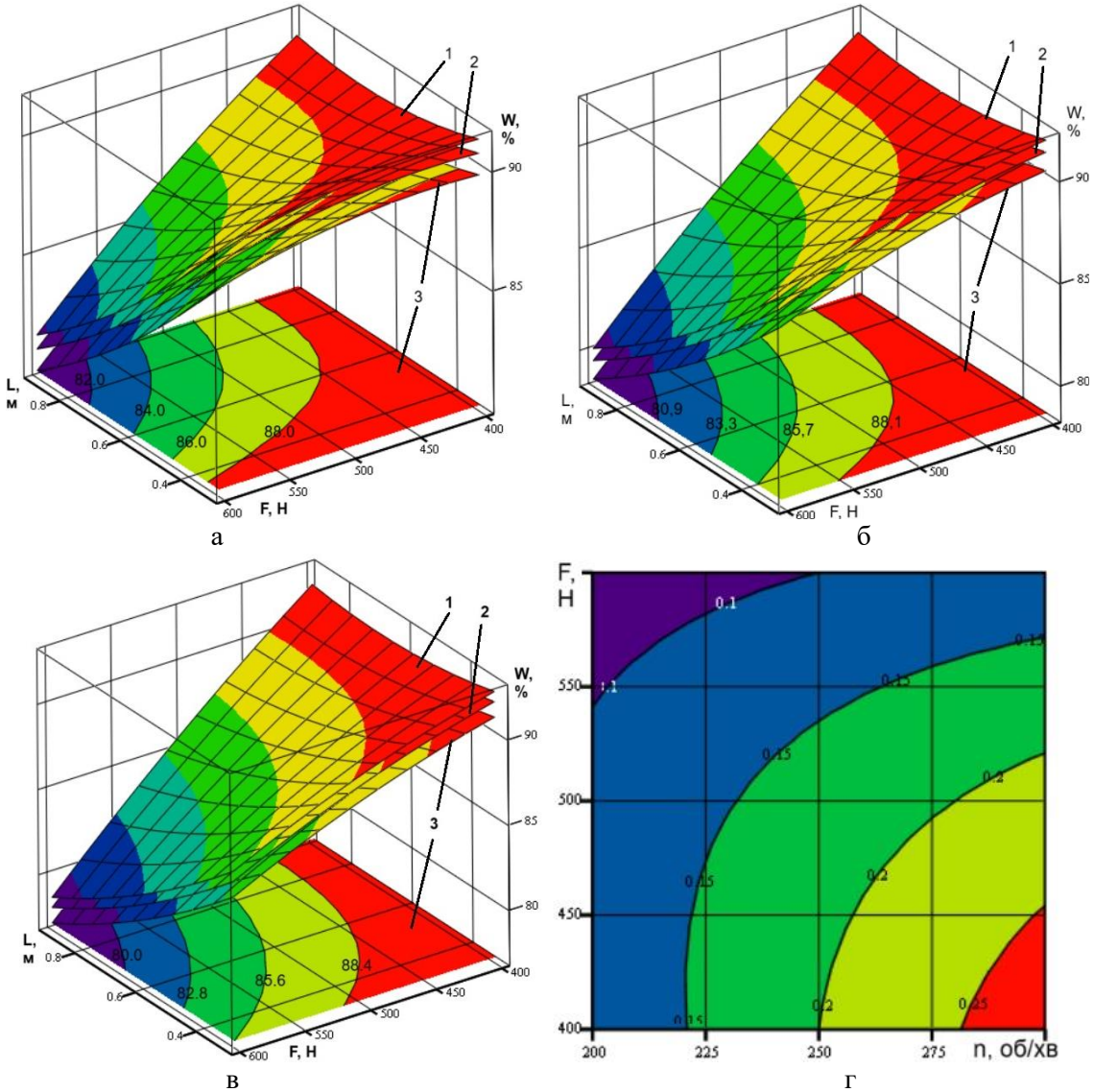


Рис. 4 – Поверхні відгуку побудовані за рівнянням (5) $L = 0,3$ м (а), $L = 0,6$ м (б), $L = 0,9$ м (б) та лінії рівня побудовані за рівнянням (6) (б): 1 - $\Delta = 0,2$ мм; 2 - $\Delta = 0,3$ мм; 3 - $\Delta = 0,4$ мм

Аналіз рівняння регресії вологості зневодненого сапропелю (5) показує, що наявний суттєвий вплив усіх досліджуваних факторів на зниження вологості сапропелю. Значущим виявились коефіцієнти регресії у парних взаємодіях між зусиллям стиску пружини притискної пластини та частотою обертання вала шнека, а також між зусиллям стиску пружини притискної пластини та довжиною фільтра. У рівнянні регресії продуктивності преса (6) незначущими виявились коефіцієнт таких факторів як зазор між кільцями фільтра та довжина фільтра. Але у даному рівнянні також значущим є коефіцієнти для парної взаємодії між зусиллям стиску пружини притискної пластини та частотою обертання вала шнека.

Форма поверхонь відгуку наведених на **рис. 4, а-в** вказує, що мінімальні значення вологості зневодненого сапропелю у $W = 80$ % досягається за частоти обертання валу шнека $n = 300$ об/хв., зазору між кільцями фільтра $\Delta = 0,4$ мм, довжини фільтра $L = 0,9$ м та зусилля стиску пружини притискної пластини $F = 600$ Н. У той же час у попередніх дослідженнях виявлено, що подальше збільшення зазору між кільцями фільтра Δ понад $0,4$ мм призводить до проходження значної кількості часток сапропелю разом із водою крізь щілини фільтра.

Аналіз графіку на рис. 4, г вказує, максимальна продуктивність шнекового преса забезпечується за частоти обертання валу шнека $n = 300$ об/хв. та зусилля стиску пружини притискної пластини $F = 400$ Н. Тобто максимальна продуктивність має місце за значення зусилля, яке відповідає мінімальній кількості видаленої вологи (максимальному значенню вологості зневодненого сапропелю). Тому для забезпечення продуктивності преса у межах $Q = 0,15 - 0,20$ кг/с за вологості зневодненого сапропелю в межах $W = 80,0 - 82,8$ % зусилля стиску пружини притискної пластини не повинно перевищувати $F = 550$ Н.

Згідно **рис. 4, а-в** такі досліджувані фактори, як довжина фільтра та частота обертання валу шнека забезпечують мінімальні значення вологості зневодненого сапропелю набуваючи максимальних значень у досліджуваному діапазоні. Проте подальше збільшення довжини фільтра забезпечуватиме мінімальний приріст виділеної вологи, оскільки в цьому випадку час перебування сапропелю у робочому просторі фільтра виходитиме за межі етапу миттєвого зменшення об'єму пор заповнених рідиною, а переходитиме у етап впливу сил опору внутрішнього в'язкого тертя *(Tsiz et al., 2023)*. Окрім цього зростатиме матеріаломісткість та затрати на виготовлення фільтра. Збільшення части обертання вал шнека понад максимальне досліджуване значення призводить до значного руйнування структури сапропелю та розмірів пор через які витискується вода, що матиме негативний вплив на процес зневоднення.

ВИСНОВКИ

Дослідження процесу зневоднення сапропелю у шнековому пресі із самоочисним фільтром підтвердила його роботоздатність та можливість забезпечити зниження вологості досліджуваних зразків із 92,2 % до 80,0-82,0%. Застосування математичного методу планування експерименту під час дослідження дозволило отримати математичні моделі зміни вологості та продуктивності у вигляді рівняння регресії.

На основі аналізу отриманих моделей та побудованих за ними графічних залежностей встановлено, що раціональним параметрами роботи шнека із самоочисним фільтром є частота обертання валу шнека $n = 300$ об/хв., зусилля стиску пружини притискної пластини $F = 550$ Н, зазор між кільцями фільтра $\Delta = 0,4$ мм та довжина фільтра $L = 0,9$ м. За таких значень продуктивність преса складатиме $Q = 0,15 - 0,20$ кг/с, а вологість зневодненого сапропелю - $W = 80,0 - 82,0$ %.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Шевчук, М.Й. (1996) *Сапропелі України: запаси якість та перспективи використання (Sapropel of Ukraine: reserves, quality and prospects for use)*. Луцьк, Надстир'я, 383с.

Шевчук, М.Й. (1997) *Агрохімічні та агроекологічні основи добування і використання озерних родовищ сапропелів в сільському господарстві (Agrochemical and agroecological foundations of extraction and use of lake sapropel deposits in agriculture)*. [Автореферат дисертації д-ра с.-г. наук], Київ.

Дідух, В.Ф. (2002) *Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів (Improving the efficiency of drying agricultural plant materials)*. Луцьк: РВВ ЛДТУ.

Грабовець, В.В. (2008). *Обґрунтування механізованої технології зневоднення озерних сапропелів (Justification of the mechanized technology of lake sapropel dehydration)*. [Дисертація канд. тех. наук]. Луцький національний технічний університет, Луцьк.

Mujumdar, A.S. (2006). *Principles, classification, and selection of dryers. Handbook of industrial drying*. Taylor & Francis Group, LLC.

Mechanical Engineering Handbook. (1999). Ed. Frank Kreith Boca Raton, CRC Press LLC.

Цизь, І.Є. (2005) *Патент України 7797 (Patent of Ukraine 7797)*. Київ: Державне патентне відомство України.

Lane. (n.d.) *Rotary drum dryer*. Retrieved July 9, 2024, from https://fertilizerindustryleader.com/rotary-drum-dryer//

Chen, G., Yue, P.L. & Mujumdar, A.S. (2006) Dewatering and Drying of Wastewater Treatment Sludge. *Handbook of Industrial Drying*. Taylor & Francis Group, LLC.

Svarovsky, L. (2000) *Solid-liquid separation*. Butterworth-Heinemann.

Шимчук, О.П. (2009). *Обґрунтування параметрів модуля для добування озерних сапропелів (Justification of module parameters for lake sapropel mining)*. [Автореферат дисертації канд. тех. наук], Тернопіль.

Cantrell, K.B., Chastain, J.P. & Moore, K.P. (2008). Gotextile filtration performance for lagoon sludges and liquid animal manures dewatering. *Transactions of the ASABE*, 51 (3), 1067-1076. https://doi.org/10.13031/2013.24526.

Berg, G. & Filinto, A.O. (2019). Adequacy of geotextile tube dewatering in three river remediation scenarios. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 234, 155-165. https://doi.org/10.2495/RBM190161.

Tsiz, I., Khomych, S., Didukh V. & Yukhymchuk, S. (2023) Study of dehydration of organic sapropel by compression method. *22nd International Scientific Conference Engineering for Rural Developmen*t. Jelgava, 173-178. https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF033/.

Цизь, І.Є. (2025) *Патент України 159650 (Patent of Ukraine 159650)*. Київ: Державне патентне відомство України.

Аністратенко, В.О. & Федоров В.Г. (1993) *Математичне планування експерименту в АПК* (Mathematical planning of experiments in the agricultural sector). Київ: Вища школа.

Tsiz, I. & Homich, S. (2013) Experimental research of working process of pneumatic intake device for sapropel extraction. *INMATEH, Agricultural Engineering*, vol. 40, No. 2, 67-72.

CALCULATIONS OF THE BALANCE OF MACROELEMENTS WHEN GROWING WINTER WHEAT IN THE CONDITIONS OF THE FG "NIVA" OF THE DUBNO DISTRICT OF THE RIVNE REGION

I. Merlenko*, M. Avgustinovich, M. Zinchuk, A. Shvorak
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
cultivation of winter wheat,
balance of macroelements,
balance intensity,
fertilizers,
soil fertility.

Article history:
Received 15.07.2025
Accepted 01.10.2025

****Corresponding author:***
im_merlenko@ukr.net

ABSTRACT

Among the branches of crop production, the most important is grain farming. It is the basis of all agricultural production. Therefore, the power of the state, the well-being of its population, and the receipt of foreign exchange largely depend on grain and its processed products. An important condition for the sustainable development of the country's agro-industrial complex is the rational use of agricultural land. Restoring soil fertility and obtaining high grain yields is impossible without the use of fertilizers. The balance of plant mineral nutrition elements is the most objective indicator of the degree of impoverishment or enrichment of the soil with certain elements. The balance of nutrients is an important characteristic that reflects the level of agricultural production. With an optimal balance of nutrients, fertilizer doses and costs are reduced and crop productivity increases. Disruption of the balance of nutrients leads not only to a decrease in soil fertility, but also to negative environmental consequences. This is especially true for nitrogen. The research was conducted in the conditions of the FG *"Niva" in the Dubno district of the Rivne region on podzolized chernozems. The paper presents calculations of the balance of macroelements in the cultivation of winter wheat. The balance of macroelements in the soil shows the balance between the intake and removal of nutrients. The results of the calculations show that in the conditions of the* FG *"Niva" there is a certain irrational use of mineral fertilizers. In order to reduce the balance of macroelements to certain norms, it is necessary to adjust the doses of mineral fertilizers, namely, it is necessary to add 5-10 kg/ha dry matter of nitrogen, 15 kg/ha dry matter of phosphorus. As for potassium, the balance calculations indicate that its application can be reduced by 25 kg/ha. In order to optimize the balance of macronutrients and humus content, we recommend applying fermented organic fertilizers - 7-10 t/ha. To verify mathematical calculations, it is necessary to conduct laboratory studies of the content of macronutrients in the soil before applying fertilizers and after harvesting.*

DOI: 10.36910/acm.vi51.1879

To cite this article:
Merlenko, I., Avgustinovich, M., Zinchuk, M., & Shvorak, A. (2025). Calculations of the Balance of Macroelements When Growing Winter Wheat in the Conditions of the FG “Niva” of the Dubno District of the Rivne Region. *Agricultural Machines*, *51*, 126-134. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1879

УДК 632.1 : 631.8

РОЗРАХУНКИ БАЛАНСУ МАКРОЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ В УМОВАХ ФГ «НИВА» ДУБЕНСЬКОГО РАЙОНУ РІВНЕНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

І.М.Мерленко*, М.Б.Августинович, М.І.Зінчук, А.М.Шворак
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
вирощування озимої пшениці,
баланс макроелементів,
інтенсивність балансу,
добрива,
родючість ґрунту.

Історія публікації:
Отримано 23.07.2025
Затверджено 01.10.2025

****Автор для листування:***
im_merlenko@ukr.net

АНОТАЦІЯ

Серед галузей рослинництва найважливішим є зернове господарство. Це основа всього сільськогосподарського виробництва. Тому від зерна та продуктів його переробки значною мірою залежить могутність держави, добробут її населення, надходження валюти.Важливою умовою сталого розвитку агропромислового комплексу країни є раціональне використання сільськогосподарських угідь. Відновлення родючості ґрунту та отримання високих урожаїв зерна неможливе без застосування добрив.Баланс елементів мінерального живлення рослин є найбільш об'єктивним показником ступеня збідніння або збагачення ґрунту певними елементами. Збалансованість поживних речовин є важливою характеристикою, яка відображає рівень сільськогосподарського виробництва. При оптимальному балансі поживних речовин зменшуються дози внесення добрив та витрати і зростає продуктивність вирощування сільськогосподарських культур. Порушення балансу поживних речовин призводить не тільки до зниження родючості ґрунту, а й до негативних екологічних наслідків. Особливо це стосується азоту. Дослідження проводили в умовах ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області на чорноземах опідзолених. В роботі представлено розрахунки балансу макроелементів при вирощуванні озимої пшениці. Баланс макроелементів в грунті показує збалансованість між надходженням та виносом елементів живлення. Результати розрахунків показують, що в умовах ФГ «Нива» є певне нераціональне використання мінеральних добрив. З метою зведення балансу макроелементів до певних норм необхідно скоригувати дози внесення мінеральних добрив, а саме необхідно додати 5-10 кг/га д.р. азоту, 15 кг/га д.р. фосфору. Що стосується калію, то розрахунки балансу вказують, що внесення його можна зменшити на 25 кг/га. З метою оптимізації балансу макроелементів та вмісту гумусу рекомендуємо вносити ферментовані органічні добрива – 7-10 т/га. Для перевірки математичних розрахунків необхідно провести лабораторні дослідження вмісту макроелементів в грунті до внесення добрив та після збору врожаю.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1879

Цитувати цю статтю:
Мерленко, І. М., Августинович, М. Б., Зінчук, М. І., & Шворак, А. М. (2025). Розрахунки балансу макроелементів при вирощуванні озимої пшениці в умовах фг «нива» дубенського району рівненської області. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 126-134. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1879

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Серед галузей рослинництва найважливішим є зернове господарство. Це основа всього сільськогосподарського виробництва. Тому від зерна та продуктів його переробки значною мірою залежить могутність держави, добробут її населення, надходження валюти. Зернове господарство формує продовольчий фонд і забезпечує тваринництво фуражним зерном, створює резервні державні запаси зерна і забезпечує продукцією на експорт.

Водночас важливою умовою сталого розвитку агропромислового комплексу країни є відновлення та раціональне використання сільськогосподарських угідь. Відновлення родючості ґрунту та отримання високих урожаїв зерна неможливе без застосування добрив.

Збалансованість поживних речовин є однією з основних характеристик, що відображають рівень сільськогосподарського виробництва. Це також є екологічною характеристикою, оскільки порушення закону повернення призводить не тільки до зниження родючості ґрунту, а й до негативних екологічних наслідків.

Для підтримки родючості ґрунту в «нормальному» стані в умовах Дубенського району необхідно щорічно вносити в середньому 12-14 т/га органічних добрив на 1 га ріллі.

Оскільки тваринництво в країні в цілому і на Рівненщині зокрема перебуває в незадовільному стані, це означає значний дефіцит органічних добрив.

Проблема посилюється тим, що її неможливо вирішити за 5-10 років такого господарювання: триває війна з рф; поголів'я великої рогатої худоби і свиней зменшується, а ціна на мінеральні добрива тільки зростає.

Тема дослідження є актуальною, оскільки за останні роки значно зросла врожайність озимої пшениці, а інтенсивність балансу макроелементів майже не досліджена, що може призвести до зменшення їх запасів у ґрунті та зниження родючості.

У зв’язку з тим, що різні сорти й гібриди сільськогосподарських культур мають неоднакові біологічні особливості розвитку і по-різному реагують на родючість ґрунту, попередники, гідротермічні умови, дози добрив, строки і способи їх застосування диференціюють залежно від запланованої врожайності на кожному полі. Чим вищий урожай заплановано і чим нижча родючість ґрунту, тим більше потрібно вносити азотних добрив *(Господаренко, 2015).*

Баланс елементів мінерального живлення рослин є найбільш об'єктивним показником ступеня збідніння або збагачення ґрунту певними елементами *(Балюк et al.,2005).*

У свій час Д. М. Прянишников підкреслював, що для одержання високих врожаїв сільськогосподарських культур у польових сівозмінах без втрат родючості ґрунту необхідно застосовувати таку систему удобрення, яка б забезпечувала компенсацію виносу з врожаями азоту і калію не нижче 70–80 %, а фосфору – 100–110 %. Проте внаслідок переходу сільськогосподарського виробництва на інтенсивні технології, застосування сучасних сортів та гібридів і, як наслідок, збільшення врожайності культур, відбувається інтенсифікація деградаційних процесів агроландшафтних систем, формуються інші агроекологічні умови, які вимагають для свого оцінювання нових критеріїв і перегляду загальноприйнятих.

Встановлено, що екологічно безпечний рівень відшкодування виносу на чорноземах азоту і калію повинен становити 70–100 %, а фосфору – 110–130 %, без зниження показників родючості *(Бердніков et al.,2010).*

Мета дослідження - розрахунок балансу макроелементів при вирощуванні озимої пшениці в умовах ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження проводили в умовах ФГ «Нива», яке знаходиться на території Привільнянської ОТГ Дубенського району Рівненської області (с.Івання).

Привільненська об'єднана територіальна громада розташована в південно-західній частині Рівненської області, на відстані 40 км від обласного центру м.Рівне та 10 км від районного центру – м.Дубно. Територія розташована в межах Кременецько-Дубнівської зандрової рівнини. За ґрунтово-меліоративним районуванням ОТГ знаходиться у північній частині Рівненського ґрунтового району, який характеризується чорноземами типовими та чорноземами опідзоленими.

Розрахунок балансу поживних речовин при вирощуванні культури проводили згідно методики *(Розрахуноінк ..., 2020).*

Баланс поживних речовин є однією з основних характеристик, які відображають рівень господарювання в сільськогосподарському виробництві. Він також є і екологічною характеристикою, оскільки порушення закону повернення призводить не лише до падіння родючості грунтів, а і до негативних екологічних наслідків.

В математичному вираженні, баланс поживних речовин являє собою різницю між статтями їх надходження та витрат під окремою культурою, на певному конкретному полі, за певний рівномірний проміжок часу.

Розрізняють загальний та ефективний баланси.

Перший включає надходження поживних речовин без урахування коефіцієнтів засвоєння рослинами, а другий - враховує ці коефіцієнти.

Статтями витрат елементів живлення є:

1) винос їх основною й побічною продукцією (наприклад - для пшениці основна продукція - зерно, а побічна солома);

2) вимивання з грунту фільтруючими водами,

3) втрати внаслідок вітрової та водної ерозії;

4) газоподібні втрати азоту.

Статті надходження поживних речовин у грунт наступні:

1) з органічними та мінеральними добривами;

2) посівним та садивним матеріалом,

3) з кореневими та поверхневими рослинними рештками,

4) атмосферними опадами, а для азоту враховується також біологічна фіксація мікроорганізмами і бобовими культурами.

Баланс елементів живлення у землеробстві (полі, сівозміні, господарстві і т.д.) характеризується наступними показниками:

баланс (+), ц;

баланс (+), кг/га;

баланс, % до виносу

інтенсивність балансу, %.

балансовий коефіцієнт використання добрив Кб.

Для визначення втрат елементів живлення використовують показники виносу поживних речовин урожаєм сільськогосподарських культур на 1 ц основної і відповідну кількість побічної продукції. Непродуктивні втрати азоту внаслідок звітрення і вимивання на чорноземних грунтах становлять у середньому 15%, а на дерново-підзолистих - 20% від азоту, внесеного з мінеральними добривами. При визначенні складових надходження елементів живлення до грунту в першу чергу враховують їх кількість, внесену з органічними і мінеральними добривами.

Розраховуючи кількість поживних речовин, внесених до грунту з органічними добривами, використовують дані агрохімічних лабораторій ДУ «Інститут охорони грунтів України» щодо вмісту азоту, фосфору і калію в гної або середні довідкові показники.

Вміст поживних речовин у мінеральних добривах беруть з довідкових даних. У балансових розрахунках враховують також надходження до грунту елементів живлення з насінням і садивним матеріалом. Розраховують дану статтю надходження на підставі норм висіву культури, що застосовують у господарстві, і вмісту азоту, фосфору та калію в насінні.

За врожайністю і вмістом макроелементів розраховують величину їх виносу господарською частиною врожаю. Використовуючи відповідні співвідношення, встановлюють вміст макроелементів в кореневих і пожнивних рештках, а далі у біомасі в цілому.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Середня врожайність озимої пшениці в господарстві становить 71 ц/га.

Баланс азоту.

Витрати макроелементів розраховуємо згідно методик.

1) Винос азоту із зерном: 71 ц/га х2=142 кг азоту/га

1.1.Отримано побічної продукції: 71 ц/га х1,5 =106,5 ц/га

1.2.Винос азоту із соломою: 106,5 ц/га х0,5 = 53,26 кг азоту/га. Поскільки солома не вивозиться за межі поля, то ми дану кількість азоту не враховуємо у вигляді втрат.

2) Вимивання з грунту фільтруючими водами (10% від кількості внесеного азоту з мінеральними добривами на чорноземі опідзоленому).:

140х0,1=14 кг/га.

3) Втрати внаслідок вітрової ерозії грунту (5% від кількості внесеного азоту з мінеральними добривами на чорноземі опідзоленому):

140х0,05=7 кг/га.

4) Газоподібні втрати азоту від 0 до 40% залежно від добрив, глибини внесення, вологості грунту, сили вітру.

Приймемо в середньому 5%:

140х0,05=7 кг/га.

ВСЬОГО ВТРАТ: 142+14+7+7 = 170 кг/га

Статті надходження азоту:

1) З органічними та мінеральними добривами:

1.1.Органічні добрива у ФГ «Нива» не застосовуються.

1.2. При вирощуванні озимої пшениці вноситься: 2 ц діамофоски (10-26-26)=20 кг/га азоту; та три підживлення в період весняного відновлення вегетації, кущіння- виходу в трубку та в період колосіння: 40+60+20 =120 кг/га.

Всього: 20+120=140 кг/га.

2) З посівним та садильним матеріалом.

Норма висіву пшениці в господарстві 140 кг/га.

З нею вноситься: 140 х 2,3/100 ≈ 3 кг/га.

3) З кореневими та поверхневими рослинними рештками.

Нетоварна частина пшениці становить:

Х = 7,1х1,4=9,94 т/га

Поверхневі й кореневі рештки:

У/ = 9,94х47/100=4,67 т/га.

З ними накопичується: 4,67х5=23 кг/га азоту.

4) З атмосферними опадами, а для азоту враховується також біологічна фіксація мікроорганізмами і бобовими культурами.

Бобові культури не вирощуються, а з атмосферними опадами надходить 10 кг/га азоту.

ВСЬОГО на 1 га надходить: 140+3+23+10=176 кг/га.

Проведемо розрахунки 5-х видів балансу.

А) баланс (+), ц

176х240-170х240 =+14,4 ц

Б) баланс (+), кг/га;

176-170 =+6 кг/га

В) баланс (), % до виносу :

6/170х100=+3,53%

Г) інтенсивність балансу, %.

I_6= 176/ 170 ×100=103,5%

Д) Кб балансовий коефіцієнт

Кб=В/Д х 100 = 170/140х100= 121%.

Баланс фосфору.

1) Витрати макроелементів розраховуємо згідно методик.

Винос фосфору із зерном: 71 ц/га х1=71 кг фосфору/га

1.1.Отримано побічної продукції: 71 ц/га х1,5 ≈106,5 ц/га

1.2.Винос фосфору із соломою: 106,5 ц/га х0,2 = 21,3 кг фосфору/га. Поскільки солома не вивозиться за межі поля, то ми дану кількість фосфору не враховуємо у вигляді втрат.

2)ВВр - втрати при вимиванні становлять біля 5% від внесених добрив (залежать від гранскладу, виду добрив, крутизни схилів полів, кількості зливових днів).

ВВр=62х0,05≈3 кг P_2O_5/га

ВСЬОГО ВТРАТ: 71+3 = 74 кг/га

Статті надходження фосфору:

1) З органічними та мінеральними добривами:

1.1.Органічні добрива у ФГ «Нива» не застосовуються.

1.2. При вирощуванні озимої пшениці вноситься:

2 ц діамофоски (10-26-26)=52 кг/га фосфору

та 0,5 ц суперфосфату простого (20%) = 10 кг/га фосфору

Всього: 52+10=62кг/га.

2)З посівним та садильним матеріалом.

Норма висіву пшениці в господарстві 140 кг/га.

З нею вноситься: 140 х 0,9/100 ≈ 1 кг/га.

З кореневими та поверхневими рослинними рештками.

Нетоварна частина пшениці становить:

Х = 7,1х1,4=9,94 т/га

Поверхневі й кореневі рештки:

У/ = 9,94х47/100=4,67 т/га.

З ними накопичується: 4,67х2 ≈ 9 кг/га фосфору.

З атмосферними опадами фосфор практично не надходить.

ВСЬОГО НА 1 ГА НАДХОДИТЬ: 62+1+9=72 кг/га.

Проведемо розрахунки 5-х видів балансу.

А) баланс (+), ц

72х240-74х240 =-4,8 ц

Б) баланс (+), кг/га;

72-74 =-2 кг/га

В) баланс (), % до виносу :

-2/74х100=-2,7%

Г) інтенсивність балансу, %.

I_6= 72/ 74 ×100=97,3%

Д) Кб балансовий коефіцієнт

Кб=В/Д х 100 = 74/62х100= 119,4%.

Баланс калію.

1) Витрати макроелементів розраховуємо згідно методик.

Винос калію із зерном: 71 ц/га х0,8≈57 кг калію/га

1.1.Отримано побічної продукції: 71 ц/га х1,5 ≈106,5 ц/га

1.2.Винос фосфору із соломою: 106,5 ц/га х1,0 = 106,5 кг калію/га. Поскільки солома не вивозиться за межі поля, то ми дану кількість калію не враховуємо у вигляді втрат.

2)ВВр - втрати при вимиванні становлять біля 5% від внесених добрив (залежать від грансклад, виду добрив, крутизни схилів полів, кількості зливових днів).

ВВр=52х0,05≈3 кг K_2O/га

ВСЬОГО ВТРАТ: 57+3 = 60 кг/га

Статті надходження калію:

1)З органічними та мінеральними добривами:

1.1.Органічні добрива у ФГ «Нива» не застосовуються.

1.2. При вирощуванні озимої пшениці вноситься:

2 ц діамофоски (10-26-26)=52 кг/га калію

Всього: 52кг/га.

2)З посівним та садильним матеріалом.

Норма висіву пшениці в господарстві 140 кг/га.

З нею вноситься: 140 х 0,8/100 ≈ 1 кг/га.

3)З кореневими та поверхневими рослинними рештками.

Нетоварна частина пшениці становить:

Х = 7,1х1,4=9,94 т/га

Поверхневі й кореневі рештки:

У/ = 9,94х47/100=4,67 т/га.

З ними накопичується: 4,67х10 ≈ 47 кг/га калію.

4)З атмосферними опадами калію надходить 5 кг/га калію

ВСЬОГО НА 1 ГА НАДХОДИТЬ: 52+1+47+5=105 кг/га.

Проведемо розрахунки 5-х видів балансу.

А) баланс (+), ц

105х240-60х240 = 108 ц

Б) баланс (+), кг/га;

105-60 =45 кг/га

В) баланс (), % до виносу :

45/60х100=75%

Г) інтенсивність балансу, %.

I_6= 105/ 60 ×100=175%

Д) Кб балансовий коефіцієнт

Кб=В/Д х 100 = 60/52х100= 115,4%.

В **табл. 1** зведено результати розрахунків балансу азоту при вирощуванні озимої пшениці в ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області на площі 240 га.

Таблиця 1 - Результати розрахунків балансу азоту при вирощуванні озимої пшениці в ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області

Види балансу азоту	Показники	Примітка
Баланс на всю площу (+-), ц;	+14,4 ц	низький
баланс (+-), кг/га;	+6 кг/га	низький
баланс (%), % до виносу	+3,53%	низький
інтенсивність балансу, %	103,5%	низький
балансовий коефіцієнт використання добрив Кб, %	121%	середній

Нині однією з проблем ефективного використання ґрунтів для переважної більшості сільськогосподарських культур, окрім бобових є дефіцит вмісту азоту.

В **табл. 2** зведено результати розрахунків балансу фосфору при вирощуванні озимої пшениці в ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області.

Таблиця 2 - Результати розрахунків балансу фосфору при вирощуванні озимої пшениці в ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області

Види балансу фосфору	Показники	Примітка
Баланс на всю площу (+-), ц;	-4,8 ц	від'ємний
баланс (+-), кг/га;	-2 кг/га	від'ємний
баланс (%), % до виносу	-2,7%	від'ємний
інтенсивність балансу, %	97,3%	низька
балансовий коефіцієнт використання добрив Кб, %	119,4%.	середній

В **табл. 3** зведено результати розрахунків балансу калію при вирощуванні озимої пшениці в ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області.

Отже, результати розрахунків показують, що в умовах ФГ «Нива» є певне нераціональне використання мінеральних добрив. З метою зведення балансу макроелементів до певних норм необхідно скоригувати норми внесення мінеральних добрив, а саме необхідно додати 5-10 кг/га д.р. азоту, 15 кг/га д.р. фосфору. Що стосується калію, то розрахунки балансу вказують, що внесення його необхідно зменшити на 25 кг/га.

Таблиця 3 - Результати розрахунків балансу калію при вирощуванні озимої пшениці в ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області

Види балансу калію	Показники	Примітка
Баланс на всю площу (+-), ц;	108 ц	дуже високий
баланс (+-), кг/га;	45 кг/га	дуже високий
баланс (%), % до виносу	75	високий

інтенсивність балансу, %	175%	дуже висока
балансовий коефіцієнт використання добрив Кб, %	115,4%	середній

В сучасних умовах при застосуванні інтенсивних технологій з внесенням значної кількості мінеральних добрив слід знайти можливості внесення органічних добрив. Рекомендуємо використовувати ферментовані органічні добрива, які виробляються на Волині *(Мерленко et al.,2023; Мерленко, 2024).*

ВИСНОВКИ

На основі даних польового досліду проведено розрахунок умовного балансу макроелементів при вирощуванні озимої пшениці.

Результати розрахунків по азоту вказують, що в господарстві дотримують його позитивний баланс (+6 кг/га та +14,4 ц на всю площу), а інтенсивність балансу становить 103,5%. Ці показники є недостатніми. Пропонуємо додати 5-10 кг/га д.р. азоту навесні в період весняного відновлення вегетації чи у фазі колосіння.

Результати розрахунків по фосфору вказують, що в господарстві отримують його негативний баланс (-2 кг/га та -4,8 ц на всю площу), а інтенсивність балансу становить 97,3% . Ці показники є дуже недостатніми. Пропонуємо додатково вносити 15 кг/га д.р. фосфору під основний обробіток грунту восени.

Результати розрахунків по калію вказують, що в господарстві отримують його позитивний баланс (+45 кг/га та +106 ц на всю площу), а інтенсивність балансу становить 175%. Ці показники є дуже високими, і в наш час - нераціональними. Пропонуємо зменшити внесення калійних добрив на 25 кг/га K_2O восени.

Для управління родючістю і визначення потреби в добривах важливого значення набуває прогнозування змін вмісту рухомих поживних речовин у грунті на запланований рівень врожайності. З метою перевірки математичних розрахунків необхідно провести лабораторні дослідження вмісту макроелементів в грунті до внесення добрив та після збору врожаю.

З метою оптимізації балансу макроелементів та вмісту гумусу рекомендуємо вносити ферментовані органічні добрива – 7-10 т/га.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Балюк С.А., Барахтян В.О., Лазебна М.Є. Методики визначення складу та властивостей ґрунтів *(Methods for determining the composition and properties of soils).* Харків : «Друкарня № 13», 2005. Кн. 2. 224 с.

Бердніков О.М., Лісовий Ю.Г., Сорока Ю.В. Баланс азоту, фосфору, калію *(Balance of nitrogen, phosphorus, potassium*) // *Біоенергетичні зрошувані агроекосистем* / За ред. Ю.О. Тараріко. Київ. ДІА, 2010. С. 48–54.

Господаренко Г.М. Система застосування добрив *(Fertilizer application system).* Київ, ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА». 2015. 332 с.

Мерленко І.М., Мерленко Н.О., Августинович М.Б., Дяків С.В. Пташиний послід: небезпечні відходи чи сировина для виготовлення цінних добрив *(Bird droppings: hazardous waste or raw material for the production of valuable fertilizers)* //*Перші практичні дії та проблемні питання реалізації Закону України «Про управління відходами»: збірка матеріалів Національного форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології»* (м. Івано-Франківськ інформації, 21–23 листопада 2023 р.). – К. : Центр екологічної освіти та, 2023. С. 137– 141. ISBN 978-617-7130-21-4.

Мерленко І.М. Можливості використання ферментованих добрив в умовах нестачі традиційних органічних добрив *(Possibilities of using fermented fertilizers in conditions of shortage of traditional organic fertilizers)*// *Талановита організатор, вчена-практик, педагог: присвячено 85-річчю від дня народження докторки біологічних наук, професорки Любові Калинівни Тараненко: матеріали круглого столу.* Київ, 16 квітня 2024 року/НААН, ННСГБ, Ін-т історії аграр. Науки, освіти та техніки. МОН України. ЗВО «ПДУ»; наук. Ред.. В.А.Вергунов. – Вінниця: ТВОРИ, 2024. - С.128-130. https://doi.org/10.31073/794A5E59-CE03-45DA-AA70-14F8996DDACF.

Розрахунок балансу поживних речовин. … UPL : https://elib.lntu.edu.ua › files › elib_upload › other .

THE COMPLEXITY OF PROJECT MANAGEMENT IN AGRICULTURAL PRODUCTION

I. Merlenko *
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
project management,
agricultural sector,
risks,
economic efficiency,
crop rotation.

Article history:
Received 14.07.2025
Accepted 01.10.2025

Corresponding author:*
im_merlenko@ukr.net

ABSTRACT

The complexity of the problem of planning and managing scientific research in the agricultural sector necessitates the improvement of existing models and methods of planning and management in the national economy of the country. Martial law creates unstable conditions for the agricultural sector, including security threats, disruption of supply chains, resource constraints and changing market conditions.This requires the adaptation of operational processes to ensure stability and continuity of activities. Agricultural enterprises are key to ensuring the country's food security. The implementation of innovative solutions in the field of management and project management will help agricultural enterprises adapt to new challenges. Agricultural production is subject to seasonal cycles, which requires the adaptation of plans for the redistribution of resources and the use of equipment. Unpredictable weather conditions can affect the implementation of the project. Natural and climatic conditions are changing rapidly, there is warming and redistribution of precipitation, the number of cataclysms is increasing (hurricanes, hail, drought, insufficient snow cover in the fields, floods, frosts in May 2025, other natural phenomena), which can cause enormous damage to crop production, horticulture and other industries). The agricultural sector is constantly developing, so it is important to take into account new technologies and innovations. Attention is growing to environmental sustainability, which requires taking into account environmental aspects in projects. The agricultural sector is one of the largest polluters of soils and atmospheric air. It is necessary to pay close attention to the norms of mineral fertilizers, especially nitrogen ones, and switch to soil cultivation technologies without turning the layer. We conducted an economic and energy analysis of crop rotation in the "Nyva" FG of the Dubno district of the Rivne region. A new crop rotation and ways to reduce costs in growing crops were proposed.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1878

To cite this article:
Merlenko, I. (2025). The Complexity of Project Management in Agricultural Production. *Agricultural Machines*, *51*, 135-146. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1878

УДК 334.72:338.43:631

СКЛАДНІСТЬ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

І.М.Мерленко*
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
управління проєктами,
аграрний сектор,
ризики,
економічна ефективність,
сівозміна.

Історія публікації:
Отримано 14.07.2025
Затверджено 01.10.2025

Автор для листування:
kirchukruslan@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

Складність проблеми планування та управління науковими дослідженнями у аграрному секторі обумовлюють необхідність удосконалення існуючих моделей і методів планування та управління в національній економіці країни. Воєнний стан створює нестабільні умови для аграрного сектора, включаючи загрози безпеці, порушення ланцюгів постачання, обмеження ресурсів і зміну ринкових умов. Це вимагає адаптації операційних процесів для забезпечення стабільності та безперервності діяльності. Аграрні підприємства є ключовими для забезпечення продовольчої безпеки країни. Впровадження інноваційних рішень у сфері управління та проєктного менеджменту допоможе аграрним підприємствам адаптуватися до нових викликів. Аграрне виробництво підпорядковане сезонним циклам, що вимагає адаптації планів перерозподілу ресурсів, використання техніки. Непередбачувані погодні умови можуть впливати на виконання проєкту. Природно-кліматичні умови швидко змінюються, відбувається потепління та перерозподіл опадів, зростає кількість катаклізмів (урагани, град, посуха, недостатній сніжний покрив на полях, повені, заморозки в травні 2025 року інші стихійні явища), які здатні завдати величезного збитку рослинництву, садівництву та іншим галузям. Аграрний сектор постійно розвивається, тому важливо враховувати нові технології та інновації. Зростає увага до екологічної стійкості, що потребує врахування екологічних аспектів у проєктах. Аграрний сектор є одним з найбільших забруднювачів грунтів та атмосферного повітря. Необхідно уважно відноситись до норм внесення мінеральних добрив, особливо азотних, та переходити до технологій обробітку грунту без перевертання пласта. Ми провели економічний та енергетичний аналіз сівозміни у ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області. Було запропоновану нову сівозміну та шляхи зниження витрат при вирощуванні сільськогосподарських культур.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1878

Цитувати цю статтю:
Мерленко, І.М. (2025). Складність управління проектами в аграрному виробництві. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 135-146. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1878

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Термін проект походить від латинського слова "Projectus" - кинутий вперед. Відомо, що проект – обмежена часовими рамками діяльність, що має визначений початок та кінець,

зазвичай обмежений датою, але також може обмежуватись фінансуванням або досягненням результатів, яка здійснюється для реалізації унікальних цілей та завдань, задля створення доданої вартості чи вигідних соціальних змін *(Мостенська & Лобунець, 2017; 32).*

На основі приведених вище визначень поняття проекту й опираючись на визначення, наведене в методичних матеріалах Всесвітнього банку навести наступне: "Проект – це комплекс взаємопов'язаних заходів, розроблених для досягнення певних цілей протягом заданого часу при встановлених ресурсних обмеженнях". Проектна тріада - (час, бюджет і зміст робіт, виділяють ще в деяких джерелах якість) є основними обмеженнями, що накладаються на проект.

Існує багато класифікацій та визначень проектів (**рис. 1**).

Складність і багатоаспектність проблеми планування та управління науковими дослідженнями у аграрному секторі обумовлюють необхідність як удосконалення існуючих моделей і методів планування та управління в національній економіці країни, так і проведення аналізу застосування відповідних методів в розвитку аграрного сектору провідних країн світу, в тому числі з урахуванням існуючих тенденцій у відповідній галузі в організаційних структурах самого різного спрямування.

Воєнний стан створює нестабільні умови для аграрного сектора, включаючи загрози безпеці, порушення ланцюгів постачання, обмеження ресурсів і зміну ринкових умов. Це вимагає адаптації операційних процесів для забезпечення стабільності та безперервності діяльності. Аграрні підприємства є ключовими для забезпечення продовольчої безпеки країни. В умовах воєнного стану важливо забезпечити ефективне управління ресурсами і виробництвом, щоб задовольнити потреби населення в продуктах харчування.

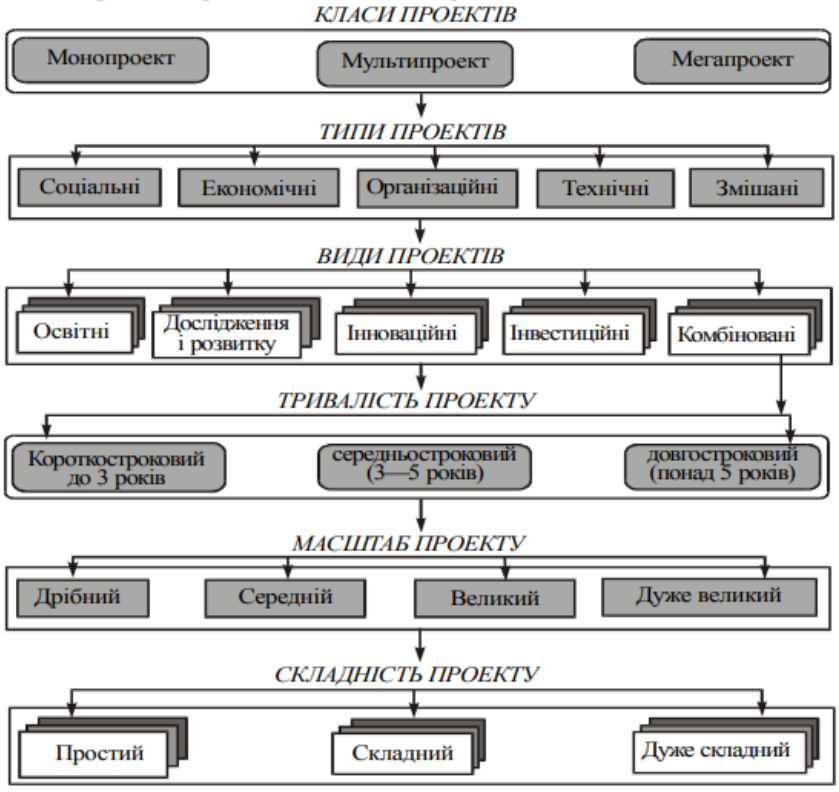


Рис. 1 – Класифікація проєктів

Особливу увагу необхідно приділити управлінню проектами в аграрному виробництві**.**

Управління в умовах підвищеної невизначеності та ризиків потребує розробки гнучких стратегій і оперативних рішень, що враховують можливі загрози та зміну обставин.

Впровадження інноваційних рішень у сфері операційного управління та проєктного менеджменту може допомогти підприємствам адаптуватися до нових викликів, підвищити ефективність і стійкість. Ефективне управління аграрними підприємствами сприяє підтримці економіки, збереженню робочих місць і розвитку місцевих громад, що особливо важливо в умовах кризи. В умовах воєнного стану аграрні підприємства повинні бути здатні швидко реагувати на зміни в середовищі, такі як перебої в постачанні, зміни законодавства та ринкових умов. Удосконалення операційного управління допоможе створити гнучкі та адаптивні системи, які можуть підтримувати стійкість бізнесу. В умовах обмежених ресурсів, таких як працівники, матеріали або фінанси, критично важливо ефективно розподіляти та використовувати доступні ресурси. Вдосконалення процесів операційного управління може сприяти підвищенню продуктивності та зменшенню витрат в сільському господарстві *(Васильков, 2015; Оптимізація, 2018).*

Мета дослідження - визначення складності та моделі управління проектами в аграрній сфері в сучасних умовах.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Дослідження проводили в умовах ФГ «Нива», яке знаходиться на території Привільнянської ОТГ Дубенського району Рівненської області (с.Івання). Використовували статистичні, розрахункові та аналітичні методи.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Аграрний сектор України зазнав значних збитків через постійні широкомасштабні російські атаки. Станом на кінець 2023 року прямі збитки і втрати становили близько 80 млрд доларів США, при цьому на кінець 2025 року непрямі втрати прогнозуються на рівні 83 млрд доларів США, насамперед через зниження врожаїв і перебої з експортом. Внаслідок того, що виробництво перемістилося до безпечніших центральних та західних регіонів країни, виник значний дефіцит переробних потужностей, що призвело до значних після збиральних втрат і фінансових труднощів для агровиробників.

Операційна діяльність є складним об’єктом управління, оскільки вона включає різні елементи та аспекти, які потребують системного підходу та ефективного керування (**рис. 2**).

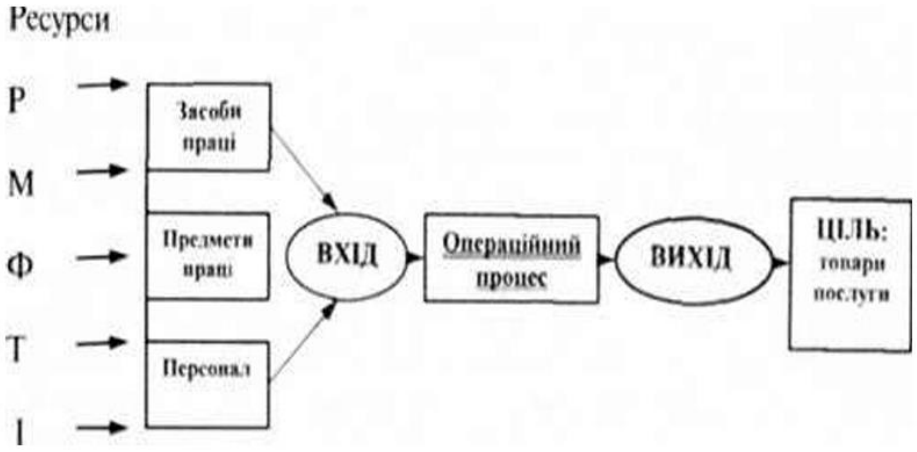


Рис. 2 - Процес операційної діяльності як об’єкт управління *(Телічко &Дідур, 2023)*

Аграрний бізнес є ключовою галуззю економіки багатьох країн, забезпечуючи продукти харчування та сировину для інших галузей промисловості.

Операційний менеджмент в аграрному бізнесі має свої специфічні особливості, зумовлені природними умовами, сезонністю, високою залежністю від кліматичних факторів, а також складністю управління біологічними процесами. Ці особливості вимагають

унікальних підходів до управління, планування та контролю, щоб забезпечити стабільність і ефективність діяльності агропідприємств. Однією з найбільших особливостей аграрного бізнесу є сильна залежність від природних умов, таких як клімат, ґрунти, опади та температура. Це створює значні виклики для операційного менеджменту, оскільки погодні умови можуть сильно впливати на врожайність, якість продукції та строки виконання сільськогосподарських робіт.

Аграрний бізнес відрізняється від багатьох інших галузей тим, що в основі його діяльності лежать біологічні процеси, які часто важко контролювати. Наприклад, зростання рослин і тварин залежить від багатьох факторів, включаючи генетичні особливості, умови середовища, догляд і харчування. Це створює додаткові складнощі для операційного менеджменту, оскільки необхідно враховувати широкий спектр біологічних і екологічних аспектів *(Білорус, 2009; Мошек, 2015; Дьяченко, 2010).*

Сучасний аграрний бізнес активно впроваджує нові технології та інновації, які допомагають підвищити продуктивність та ефективність. Серед них можна відзначити адаптивне, біологічне, точне землеробство, яке включає використання дронів, супутникових знімків та GPS для точного вимірювання та управління агротехнічними процесами та спеціальну техніку. Крім того, розвиток біотехнологій дозволяє створювати нові сорти рослин і породи тварин, стійкі до хвороб і шкідників, що підвищує врожайність та якість продукції. В аграрному бізнесі управління ланцюгами постачання має особливе значення через високу швидкість псування продукції.

Операційний менеджмент включає забезпечення ефективного зберігання, транспортування та обробки продукції, щоб зменшити втрати і забезпечити доставку свіжих продуктів до кінцевого споживача. Це вимагає координації дій між виробниками, переробниками, логістичними компаніями та роздрібними мережами. Аграрний бізнес часто відіграє важливу роль у розвитку сільських територій, створенні робочих місць і підтримці соціальної стабільності.

Операційний менеджмент в аграрному секторі включає врахування соціальних аспектів, таких як зайнятість місцевого населення, розвиток інфраструктури та забезпечення сталого розвитку територій.

Ефективне управління в цій галузі вимагає спеціалізованих знань і підходів, що дозволяють адаптуватися до змінних умов та забезпечувати стабільність і розвиток підприємств. Інновації та технології відіграють важливу роль у підвищенні ефективності аграрного бізнесу, дозволяючи оптимізувати процеси виробництва і доставки продукції, а також зменшити вплив несприятливих факторів *(Белявцева & Воробйова, 2006; Тригуба, 2023; Третяк & Душейко, 2022).*

Ефективне управління проєктами дозволяє аграрним підприємствам досягати своїх цілей, підвищувати продуктивність та конкурентоспроможність виробництва і продукції.

Основні етапи управління проєктами в аграрному виробництві:

1. Планування:

Визначення цілей та завдань проєкту.

Аналіз ризиків та можливостей.

Розробка стратегії та плану реалізації.

Визначення ресурсів (фінансових, людських, матеріальних).

Складання бюджету та графіку робіт впродовж сезону.

2. Організація:

Формування команди проєкту.

Розподіл обов'язків та відповідальності.

Забезпечення необхідних ресурсів.

Впровадження системи комунікацій та звітності.

3. Виконання:
Реалізація запланованих заходів.
Моніторинг та контроль виконання робіт.
Внесення коректив у план за необхідності.
Забезпечення якості виконання робіт.
4. Заключний етап:
Оцінка результатів проєкту.
Підготовка звітності.
Завершення проєкту та передача результатів.
Аналіз досвіду для подальших проєктів *(Управління проектами, 2018).*

Особливості управління проєктами в аграрному виробництві:

Сезонність:

Аграрне виробництво постійно підпорядковане сезонним циклам, що вимагає гнучкості та адаптації планів перерозподілу ресурсів, використання техніки. Взимку більшість підприємств практично не ведуть активної діяльності (крім переробних, а також для ремонту і обслуговування техніки).

Природні фактори:

Непередбачувані погодні умови можуть впливати на виконання проєкту, що потребує врахування ризиків та розробки планів на випадок надзвичайних ситуацій. Природно-кліматичні умови швидко змінюються, відбувається потепління та перерозподіл опадів, зростає кількість катаклізмів (запорошені бурі, град, недостатній сніжний покрив на полях, повені, заморозки в травні 2025 року інші стихійні явища), які здатні завдати колосального збитку рослинництву, садівництву та іншим галузям). Агрометеорологічні складові проектного середовища, часто є некерованою причиною технологічного ризику на різних етапах проектів вирощування сільськогосподарських культур *(Мерленко Н. & Мерленко І., 2017; Федонюк et al., 2022; Fedoniuk et al.,2020).*

Технологічні зміни:

Аграрний сектор постійно розвивається, тому важливо враховувати нові технології та інновації. Нова закордонна техніка витісняє застарілу вітчизняну чи ще навіть радянську. Використовуються нові гібриди, сорти з ГМО, ЗЗР.

Екологічні вимоги:

Зростає увага до екологічної стійкості, що потребує врахування екологічних аспектів у проєктах. Аграрний сектор є одним з найбільших забруднювачів грунтів та атмосферного повітря, в т.ч. – парниковими газами. Необхідно уважно відноситись до норм внесення мінеральних добрив, особливо азотних, та переходити до технологій обробітку грунту без перевертання пласта.

Логістика:

Ефективна логістика є важливою для забезпечення своєчасної доставки ресурсів та продукції. Після значного зростання цін на паливно-мастильні матеріали значно зросла вартість перевезень, що може бути критичним в аграрному секторі (добрива, ЗЗР, насіння, вирощена продукція).

Застосування проектного підходу до агропромислових проектів значно полегшує ведення господарювання фермерам, допомагає досягти цілей проекту та підвищує шанс забезпечення «успішності» проекту.

Зміна цін знаходяться поза контролем будь-якого фермера. Вартість сільськогосподарської продукції залежить від пропозиції товару, попиту на продукцію та вартості виробництва.

Собівартість виробництва одиниці продукції залежить від кількості понесених витрат та одержаного рівня врожаю. Ця взаємодія робить даний показник дуже змінним. Хоча виробничі витрати мають тенденцію бути менш мінливими, ніж ціни на готову продукцію

Незначна кількість агарних підприємств має в штаті посаду менеджера (управлінця). Більшість фермерів навіть не задумувались над участю в грантових програмах. Це повязано з недостатньою кількістю знань, відсутністю часу та і коштів. В середніх та дрібних господарствах, як правило, одна людина є і власником, і агрономом, і агроінженером, і механізатором. Це явище стало ще болючішим після повномасштабного вторгнення рф в Україну (мобілізація, виїзд за кордон, втрати і т.д.)

Для проектування сівозміни ми провели її аналіз **у** ФГ «Нива» Дубенського району Рівненської області.

Економічна оцінка сівозмін проводиться за такими основними показниками: вихід продукції з одиниці площі, її вартість і вихід кормопротеїнових одиниць.

В **табл. 1** показано розрахунки загальних економічних витрат при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» (2024 рік)

Таблиця 1 – Розрахунки економічних витрат при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» (2024 рік)

Культура	Площа, га	Урожайність, ц/га	Затрати на вирощування, грн/га	Затрати на вирощування на всю площу, тис. грн
Озима пшениця	240	71	30100	7224
Кукурудза	380	120	28700	10906
Ріпак	253	32	31700	8020,1
Соя	125	35	29400	3675
ВСЬОГО	998	X	X	29825,1

В **табл.2** показано статті витрат при вирощуванні с/г культур в ФГ «Нива».

Таблиця 2 - Орієнтовні витрати на 1 га за типової технології виробництва в умовах ФГ «Нива» (2024 рік), грн

Статті витрат	Культура			
	Озима пшениця	Кукурудза	Ріпак	Соя
1	2	3	4	5
Оплата праці з податком	1567	1966	2594	2600
Насіння	2300	900	756	2500
Добрива	5410	3710	3810	2115
ЗЗР	4823	5817	5335	5338
Електроенергія	55	76	65	65
Бензин	545	640	582	550
Дизпаливо	2025	2122	3879	3670
Мастильні матеріали (4%)	85	92	149	135
Амортизація	600	500	1000	1200
Ремонт основних засобів	1000	400	1000	1300
Інші матеріальні витрати та послуги	1227	850	1290	1650
Загальновиробничі (податки, аренда)	5890	7253	5950	3990
1	2	3	4	5
Всього витрат	25527	24326	26410	25113
Витрати на збут	766	729	855	850
Адміністративні	3807	3645	4435	3437

витрати				
ВСЬОГО ВИТРАТ	30100	28700	31700	29400

Найбільшу кількість витрат в сівозміні приходиться на вирощування ріпаку та озимої пшениці – понад 30 тис. грн на 1 га. В перерахунку на всю площу найбільші затрати приходяться на вирощування кукурудзи на зерно – 10,9 млн. грн.

За статтями витрат по всіх 4-х культурах найбільше витрачається на засоби захисту рослин, добрива (оз. пшениця та кукурудза) та - дизпаливо (ріпак, соя).

При вирощуванні озимої пшениці майже 18% витрачається на закупівлю добрив, при вирощуванні кукурудзи – 20,3% на ЗЗР, при вирощуванні ріпаку – 16,8% і при вирощування сої – 18,2% також на ЗЗР.

Для наглядності на **рис. 3** у вигляді діаграм показано статті витрат при вирощуванні ріпаку в ФГ «Нива».

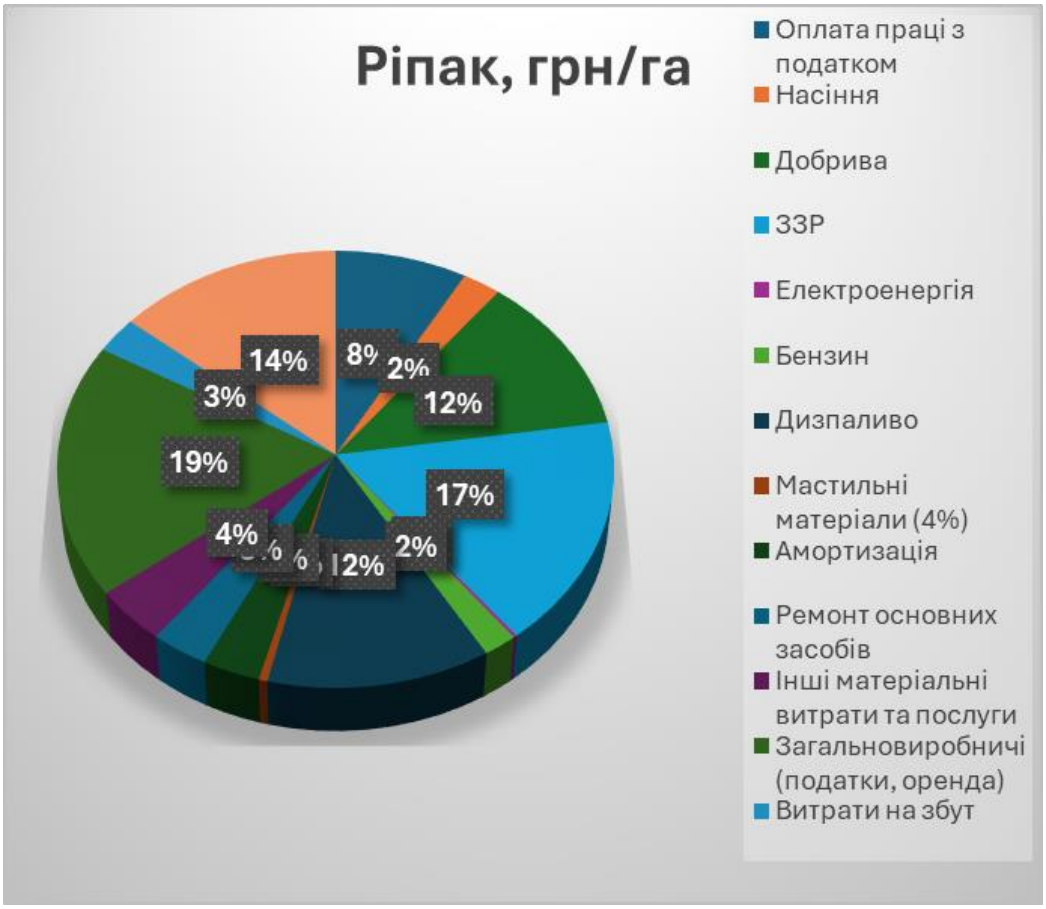


Рис. 3 - Статті витрат при вирощуванні ріпаку в ФГ «Нива».

В **табл. 3** показано результати розрахунків прибутків при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» за 2024 рік.

Найбільші надходження від реалізації з 1 га отримано при вирощуванні кукурудзи - 102,480 тис. грн грн, а найменші - 57,51 тис. грн при вирощуванні оз. пшениці.

Умовно чистий прибуток з усієї площі отримано при вирощуванні кукурудзи – трохи більше 28 млн. грн. Слід зазначити, що при вирощуванні всіх культур в 2024 році отримано прибуток в розмірі 46, 538 млн.грн.

Таблиця 3 - Розрахунки прибутків при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» (2024 рік)

Культура	Площа, га	Урожайність, ц/га	Середня ціна продукції,	Надходження від реалізації з 1 га, тис.	Надходження від реалізації з усієї	Умовно чистий прибуток

			грн/т	грн	площі, тис. грн	з усієї площі, тис. грн
Озима пшениця	240	71	8100	57,51	13802,4	6578,4
Кукурудза	380	120	8540	102,480	38 942,4	28 036,4
Ріпак	253	32	19500	62,4	15 787,2	7 767,1
Соя	125	35	17900	62,65	7 831,25	4 156,25
ВСЬОГО	998	X	X	X	**76 363,25**	**46 538,15**

Розрахунки енергетичних витрат при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» показано в **табл. 4.** Як і очікувалось, найвищими виявились затрати при вирощуванні кукурудзи – 36 ГДж/га або 13 680 ГДж на всю площу.

Найменші енергетичні витрати при вирощуванні сої – 19 ГДж/га та 2 375 ГДж на всю площу.

Таблиця 4 - Розрахунки енергетичних витрат при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» (2024 рік)

Культура	Площа, га	Затрати на вирощування, ГДж/га	Затрати на вирощування на всю площу, ГДж
Озима пшениця	240	26	6 240
Кукурудза	380	36	13 680
Ріпак	253	30	11 400
Соя	125	19	2 375
ВСЬОГО	998	X	**33 695**

В **табл. 5** показано розрахунки енергетичної ємності отриманої продукції при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива».

Як і очікувалось, найвищі показники енергоємності продукції виявились при вирощуванні кукурудзи – 181,68 та сої -108,5 ГДж/га.

Таблиця 5 - Розрахунки енергетичної ємності отриманої продукції при вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива» (2024 рік)

Культура	Площа, га	Урожайність, ц/га	Енергоємність продукції, МДж/кг	Енергоємність продукції, ГДж/га	Енергоємність продукції, на всю площу, ГДж
Озима пшениця	240	71	13,8	97,98	23515,2
Кукурудза	380	120	15,14	181,68	69038,4
Ріпак	253	32	23,5	75,2	19025,6
Соя	125	35	31	108,5	13562,5
ВСЬОГО	998	X	**X**	**X**	125141,7

В **табл. 6** показано розрахунки коефіцієнтів енергетичної ефективності (Кее) технологій вирощуванні с/г культур в умовах ФГ «Нива». Найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності отримано при вирощуванні кукурудзи та сої – більше 5, а найнижчий (1,67) при вирощуванні ріпаку. Середній коефіцієнт енергетичної ефективності по сівозміні становить 3,71.

Незважаючи на непогані показники економічної та енергетичної ефективності при вирощування с/г культур в умовах ФГ «Нива» в 2024 році, ми запропонували певні рекомендації.

По-перше, через щорічне зростання с/г угідь (взяття площ в оренду та докупівля) в господарстві не досить чітко дотримуються сівозмін, відсутня ротаційна таблиця. Через це площі полів в так званих сівозмінах дуже відрізняються.

Таблиця 6 - Розрахунки коефіцієнтів енергетичної ефективності вирощування с/г культур в умовах ФГ «Нива» (2024 рік)

Культура	Площа, га	Урожайність, ц/га	Затрати на вирощування на всю площу, ГДж	Енергоємність продукції, на всю площу, ГДж	Коефіцієнт енергетичної ефективності, Кее
Озима пшениця	240	71	6 240	23515,2	3,77
Кукурудза	380	120	13 680	69038,4	5,05
Ріпак	253	32	11 400	19025,6	1,67
Соя	125	35	2 375	13562,5	5,71
ВСЬОГО	998	X	33 695	125141,7	3,71

Після аналізу економічних та енергетичних показників існуючої сівозміни пропонуємо ввести 5-пільну сівозміну з таким чергуванням полів:

1. кукурудза;
2. кукурудза;
3.соя
4. ріпак
5. озима пшениця.

Кожне поле орієнтовно буде мати площу в 200 га.

Під ріпак вносимо досить велику кількість мінеральних добрив, тому що наступною у нас іде пшениця і під неї вже нічого не вносимо, окрім азоту. Після збирання ріпаку (зазвичай для України -в кінці травня – червень) пропонуємо посів вико-вівсяної суміші на сидерати. Це дозволить зберегти вологу в літній період і зменшити кількість бур'янів.

По-друге, з наведених даних можна зробити висновок, що затрати сукупної енергії на вирощування різних культур неоднакові і основна їх кількість припадає на пальне, добрива, пестициди. Тому треба розробляти альтернативні технології, які б давали змогу знизити ці витрати, зокрема, замінити пестициди екологічно чистими, організувати економію пального, раціональне використання добрив, заміна оранки поверхневим і нульовим обробітком, поєднання кількох технологічних операцій за один прохід агрегату, підбір сортів і гібридів, стійких проти шкідників і хвороб.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки та запропонувати певні пропозиції:

1. В сучасних умовах важливим є визначення моделі управління проектами в аграрній сфері з врахуванням всіх ризиків.

2. У штаті ФГ «Нива» відсутня посада менеджера (управлінця), що не дозволяє ефективно управляти господарством та приймати участь в грантових проектах.

3.Природно-кліматичні та грунтові умови ФГ «Нива» є досить сприятливими для вирощування більшості с/г культур. Проте, необхідно розробити контрзаходи, які стосуються змін клімату. В 2025 році через пізні заморозки було пошкоджено посіви озимої пшениці та ріпаку. Для ризику вимерзання озимих культур можуть бути такі заходи: повна відмова від озимих культур; диверсифікація озимих культур; страхування врожаю.

4. Найбільшу кількість витрат в сівозміні приходиться на вирощування ріпаку та озимої пшениці – понад 30 тис. грн на 1 га. В перерахунку на всю площу найбільші затрати приходяться на вирощування кукурудзи на зерно – 10,9 млн. грн.

5. За статтями витрат по всіх 4-х культурах найбільше витрачається на засоби захисту рослин, добрива (оз. пшениця та кукурудза) та - дизпаливо (ріпак, соя). При вирощуванні озимої пшениці майже 18% витрачається на закупівлю добрив, при вирощуванні кукурудзи – 20,3% на ЗЗР, при вирощуванні ріпаку – 16,8% і при вирощування сої – 18,2% також на ЗЗР.

6. Найбільші надходження від реалізації з 1 га отримано при вирощуванні кукурудзи - 102,480 тис. грн, а найменші - 57,51 тис. грн при вирощуванні оз. пшениці. Умовно чистий прибуток з усієї площі отримано при вирощуванні кукурудзи – трохи більше 28 млн. грн. Слід зазначити, що при вирощуванні всіх культур в 2024 році отримано прибуток в розмірі 46, 538 млн.грн.

7. Розрахунки енергетичних витрат показали, що найвищими виявились затрати при вирощуванні кукурудзи – 36 ГДж/га або 13 680 ГДж на всю площу.

Найменші енергетичні витрати при вирощуванні сої – 19 ГДж/га та 2 375 ГДж на всю площу. Найвищий коефіцієнт енергетичної ефективності отримано при вирощуванні кукурудзи та сої – більше 5, а найнижчий (1,67) при вирощуванні ріпаку. Середній коефіцієнт енергетичної ефективності по сівозміні становить 3,71.

8. Через щорічне зростання с/г угідь (взяття площ в оренду та докупівля) в господарстві не досить чітко дотримуються сівозмін, відсутня ротаційна таблиця. Через це площі полів в так званих сівозмінах дуже відрізняються за розмірами. Пропонуємо ввести 5-пільну сівозміну з таким чергуванням полів:

1.кукурудза; 2. кукурудза; 3.соя; 4. ріпак; 5. озима пшениця. Після збирання ріпаку пропонуємо посів вико-вівсяної суміші на сидерати. Це дозволить зберегти вологу в літній період і зменшити кількість бур'янів.

9. Потрібно розробляти альтернативні технології, які б давали змогу знизити енергетичні витрати, зокрема, замінити пестициди екологічно чистими, організувати економію пального, раціональне використання добрив, заміна оранки поверхневим і нульовим обробітком, поєднання кількох технологічних операцій за один прохід агрегату, підбір сортів і гібридів, стійких проти шкідників і хвороб.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Fedoniuk V., Khrystetska M., Fedoniuk M., Merlenko I., Bondarchuk S. (Федонюк В.В., Христецька М.В., Федонюк М.А., Мерленко І.М., Бондарчук С.П.) Shallowing of the Svityaz Lake in the context of regional climate change (Обміління озера Світязь в контексті регіональних кліматичних змін) / V. Fedoniuk, M. Khrystetska, M. Fedoniuk, I. Merlenko, S. Bondarchuk // *Journal of Geology, Geography and Geoecology (Вісник Дніпровського університету. Геологія. Географія.Геоекологія)*. Дніпро: 2020. № 4 (29). С. 673 – 684. DOI: https://doi.org/10.15421/112060

Білорус Т.В. Основи менеджменту *(Management Fundamentals)* : навч. посіб. К.: Атіка, 2009. 160 с.

Васильков В.Г. Організація операційної діяльності підприємства *(Organization of the company's operational activities)* : підручник / В.Г. Васильков Н.В. Василькова. К.: КНЕУ, 2015. 502 с.

Дьяченко Т.О. Основи менеджменту*(Management Fundamentals)* : навч. посібник. К.: Кондор, 2010. 176 с.

Маркетинговий менеджмент *(Marketing Management)*: Навчальний посібник /Під заг. ред. М.І. Белявцева та В.Н. Воробйова. К.: Центр навчальної літератури, 2006. 407с.

Менеджмент*(Management)*: : навч. посібник. / за ред. Г.Є. Мошека. К.: Ліра К, 2015. 550 с.

Мерленко Н.О., Мерленко І.М. Зміни погодно-кліматичних умов на прикладі території Ківерцівського НПП «Цуманська пуща» *(Changes in weather and climate conditions on the example of the territory of the Kivertsivsky National Park "Tsumanskaya Pushcha")* // *«Вплив зміни клімату на розвиток Рівненської області»: збірник тез науковопрактичної конференції.* – Рівне, 27-28 жовтня 2022 р.: Рівненська обласна організація Українського товариства охорони природи. Рівне: Видавець Олег Зень. – С. 8-11.

Мостенська Т. Л., Лобунець Т. В. Управління проектами *(Project management)* : Навчальний посібник . К., 2017. 128 с.

Оптимізація систем управління в умовах економічної глобалізації *(Optimization of management systems in the context of economic globalization)* : [колект.] монографія / за ред. Ю. Є. Петруні. Дніпро: Університет митної справи та фінансів, 2018. 182 с.

Телічко Н., Дідур Г. Модель ефективного управління земельними ресурсами в операційній діяльності аграрного підприємства на основі 81 концепції соціально-відповідального бізнесу *(A model of effective land resource management in the operational activities of an agricultural enterprise based on 81 concepts of socially responsible business). Економічний вісник Причорномор'я*, 2023. № 4. С. 45-51.

Третяк Д.Д., Душейко П.А. Теоретичні аспекти ризикменеджменту *(Theoretical aspects of risk management). Економіка та держава*, 2022. № 1, 100-107.

Тригуба В. (2023). Можливості застосування методів операційного менеджменту у забезпеченні стійкого економічного розвитку ливарних підприємств *(Possibilities of applying operational management methods in ensuring sustainable economic development of foundry enterprises). Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 3(103), 287-300.

Управління проектами в органічному аграрному ...URL: https://www.researchgate.net › publication ›

Федонюк, В. В. and Мерленко, І. М. and Федонюк, М. А. and Бондарчук, С. П. and Ковальчук, Н. С. and Вознюк, С. Т. and Fedoniuk, V. V. And Merlenko, I. M. And Fedoniuk, N. A. And Bondarchuk, S. P. and Kovalchuk, N. S. And Vozniuk, S. T. (2021). *Оцінка потенційного впливу рільництва у Рівненській області на екологічний стан атмосферного повітря (Assessment of the potential impact of agriculture in the Rivne region on the ecological state of atmospheric air).* Вісник Національного університету водного господарства та природокористування (4(96)). pp. 128-144. :http://ep3.nuwm.edu.ua/23492/ Date Deposited: 21 May 2022 08:56

NUMERICAL MODELING OF A MACHINE FOR SEPARATION AND CLEANING OF CASTOR BEAN SEEDS FROM FRUITS

E. Aliiev *, H. Tesliuk, V. Holovchenko

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
castor bean,
seed,
cleaning,
modelling,
optimization

Article history:
Received
Accepted

****Corresponding author:***
aliev@meta.ua

ABSTRACT

In modern EU strategies, the development of the bioeconomy plays an important role, aiming at the gradual replacement of petrochemical raw materials with biological ones. The agricultural sector can make a significant contribution to this process by cultivating industrial crops on low-productive lands. One of the promising crops is castor bean (Ricinus communis L.), which is suitable for technical oil production. However, its harvesting and processing are complicated due to the uneven ripening of the fruits and the lack of specialized machines.

This study proposes a new design of a machine for cleaning castor bean seeds, which combines mechanical fruit shell destruction with subsequent aerodynamic cleaning. The proposed machine integrates crushing and reverse cones with rubber linings to break the fruit shells without damaging the seeds, along with an aerodynamic cleaning system for removing light impurities. Using numerical modeling in Simcenter Star-CCM+, based on DEM and CFD methods, the interaction between the fruits and the machine's working parts as well as the separation processes were analyzed. Regression equations were developed to determine the seed separation productivity, the share of unthreshed fruits, and the content of viable seeds in the seed collector, depending on technological parameters. The optimal values are: the gap between the crushing and reverse cones – 8.6 mm; the rotation speed of the crushing cone – 291 rpm; the feed opening diameter – 98 mm; the cone axis inclination angle – 3.6°; the airflow velocity – 6 m/s; and the sieve inclination angle – 20.3°. The proposed machine ensures high-quality cleaning of castor bean seeds with minimal damage, increases productivity, and reduces dependence on manual labor, which is crucial for the industrial processing of this crop.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1853

To cite this article:
Aliiev, E., Tesliuk, H., & Holovchenko, V (2025). Numerical Modeling of a Machine for Separation and Cleaning of Castor Bean Seeds from Fruits. *Agricultural Machines*, *51*, 147-158. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853

УДК 631.363:004.94:633.853.3

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МАШИНИ ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ НАСІНИН РИЦИНИ ВІД ПЛОДІВ

Е.Б. Алієв *, Г.В. Теслюк, В.В. Головченко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
рицина,
насіння,
очищення,
моделювання,
оптимізація

Історія публікації:
Отримано
Затверджено

****Автор для листування:***
aliev@meta.ua

АНОТАЦІЯ

У сучасних стратегіях ЄС важливе місце займає розвиток біоекономіки, що передбачає поступову заміну нафтохімічної сировини біологічною. Аграрний сектор може зробити суттєвий внесок у цей процес шляхом використання технічних культур на малопродуктивних землях. Однією з перспективних культур є рицина (Ricinus communis L.), яку доцільно вирощувати для виробництва технічної олії. Однак її збирання та переробка ускладнені нерівномірним дозріванням плодів та відсутністю спеціалізованих машин.

У роботі запропоновано нову конструкцію машини для очищення насіння рицини, яка поєднує механічне руйнування плодів із подальшим аеродинамічним очищенням. Запропонована машина поєднує дробильний та зворотний конуси з гумовими футеровками для руйнування оболонок плодів без пошкодження насіння, а також систему аеродинамічного очищення для видалення легких домішок. За допомогою чисельного моделювання у середовищі Simcenter Star-CCM+ з використанням DEM та CFD методів проведено аналіз взаємодії плодів із робочими органами машини та процесів сепарації. Побудовано рівняння регресії для визначення продуктивності відокремлення насіння, частки нерозлущених плодів та вмісту ліквідного насіння у забірнику залежно від технологічних параметрів. Оптимальні значення: відстань між дробильним і зворотним конусами – 8,6 мм; частота обертання дробильного конуса – 291 об/хв; діаметр отвору подачі – 98 мм; кут нахилу осі конуса – 3,6°; швидкість повітряного потоку – 6 м/с; кут нахилу решета – 20,3°. Запропонована машина забезпечує якісне очищення насіння рицини при мінімальних пошкодженнях, підвищує продуктивність і дозволяє знизити залежність від ручної праці, що є актуальним для промислової переробки цієї культури.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1853

Цитувати цю статтю:
Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В., & Головченко, В.В. (2025). Чисельне моделювання машини для відокремлення і очищення насінин рицини від плодів. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 147-158. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У відповідності до сучасних стратегій ЄС, спрямованих на розвиток біоекономіки, промисловість має зменшити залежність від традиційної нафтохімії, орієнтуючись на сировину біологічного походження (*Janiszewska et al, 2021; Wydra et al, 2021*) Аграрний сектор, у свою чергу, може зробити суттєвий внесок у цей процес, зокрема шляхом ефективнішого використання побічних продуктів олійних культур (*Park et al, 2021; Román-Figueroa et al, 2020*). Проте розширення площ під технічними культурами створює ризики конкуренції між продовольчими і непродовольчими напрямами сільського господарства (*Gelfand et al, 2013*). Одним із шляхів розв'язання цієї проблеми може стати використання малопродуктивних земель для вирощування технічних культур, що дозволить одночасно досягати енергетичних цілей ЄС та уникнути скорочення площ під продовольчі посіви (*Von Cossel et al, 2019; D'Avino et al, 2020*). У цьому контексті актуальним є дослідження і розвиток виробничих ланцюгів, пов'язаних з культурами, що потребують мінімальних ресурсів для вирощування.

Рицина (Ricinus communis L.) є однією з перспективних непродовольчих культур (*Zanetti et al, 2013*; *Alexopoulou et al, 2015*) придатних для вирощування на бідних ґрунтах в умовах України. Досвід вирощування показує, що врожайність насіння сортів рицини може становити 1,7–1,9 т/га (Олеся), 1,8–2,2 т/га (Хортичанка), 1,6–1,8 т/га (Хортицька 3) (*Ведмедєва та ін., 2018*). Рицинову олію широко застосовують у різних сферах: для виробництва біопального, косметичних і фармацевтичних засобів, лакофарбової продукції, мастильних матеріалів для двотактних двигунів, а також у виробництві компонентів піноматеріалів для теплоізоляції (*Carrino et al, 2020; Bateni et al, 2016; Ogunniyi,* 2006). За умови створення ефективного внутрішнього ланцюга постачання, рицина може суттєво знизити залежність ЄС та України від імпорту технічних рослинних олій.

Особливістю культури є велика різноманітність дикорослих і напівкультурних форм Ricinus communis L., які демонструють значну генетичну та морфологічну мінливість, іноді досягаючи розмірів дерев (*Anjani, 2012*). Насіння рицини утворюється всередині плодів (капсул), які зібрані в китиці і дозрівають поступово, що призводить до нерівномірного дозрівання насіння (*Vallejos et al, 2011; Pari et al, 2020*). Така біологічна особливість значно ускладнює механізацію збирання. На ринку й досі відсутні спеціалізовані машини для механічного збирання рицини, тому процес здійснюється вручну, що підвищує собівартість продукції. Хоча для отримання насіннєвого матеріалу високих репродукцій ручне збирання є виправданим через невеликі обсяги (*Алієв, 2019; Алієв, 2020*), все ж виникає технічна потреба в ефективному відокремленні і очищенні насіння рицини від капсул.

Застосування стандартного обладнання для обрушення та очищення насіння інших культур (*Петраченко та ін., 2023; Теслюк, 2020; Шевчук та ін., 2018*) неприйнятне через високу ймовірність пошкодження насіння рицини. Це пов'язано з відмінностями у реологічних властивостях рицинових насінин порівняно з іншими олійними культурами. У зв'язку з цим постає актуальне завдання – розробити спеціалізовану машину для очищення насіння рицини та визначити її конструктивно-технологічні параметри.

Мета досліджень: формування наукових основ проектування та удосконалення технологічного процесу відокремлення і очищення насіння рицини шляхом чисельного моделювання механічної взаємодії плодів і насіння з робочими органами машини, з урахуванням фізико-механічних властивостей сировини та режимів обробки для забезпечення максимальної ефективності процесу при мінімальних пошкодженнях ліквідного насіння.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Машина для очищення насіння рицини (**рис. 1**) складається з основних функціональних вузлів: станини, завантажувального бункера, дробильного конуса, зворотного конуса з футеровкою, приводу, системи аеродинамічного очищення та блока керування.

Завантажувальний бункер із прутковою решіткою призначений для подачі сировини та відсіювання великих домішок. Під ним розташований зворотний конус із гумовою футеровкою, чотирма регулювальними гвинтами та зірочками, які через ланцюгову передачу забезпечують вертикальне переміщення вузла, змінюючи зазор між робочими поверхнями.

Усередині зворотного конуса змонтовано дробильний конус із ексцентриковим приводом. При обертанні та прецесії він створює нормальні і дотичні сили, які забезпечують руйнування плодів рицини, з подальшим відділенням насіння від частинок оболонок. Гумова футеровка дробильного конуса мінімізує ризик травмування насіння.

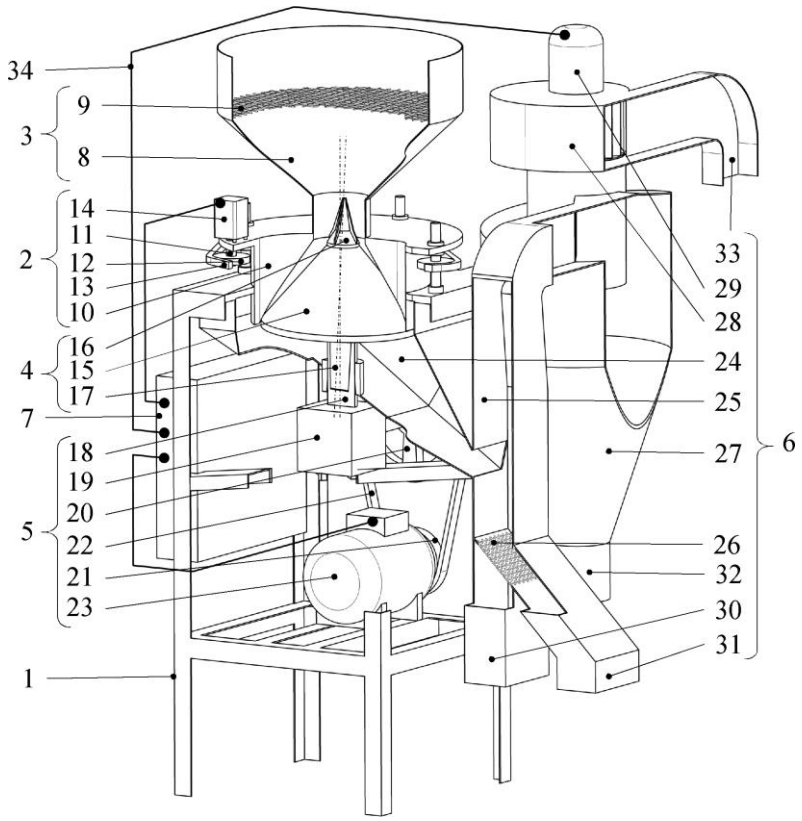


Рис. 1 – Машина для очищення насіння рицини

1 – станина; 2 – зворотній конус; 3 – завантажувальний бункер; 4 – дробильний конус; 5 – привід; 6 – система аеродинамічного очищення; 7 – блок керування; 8 – ємність; 9 – пруткова решітка; 10 – корпус із внутрішньою футеровою; 11 – регулювальний гвинт; 12 – зірочка; 13 – ланцюг; 14 – мотор-редуктор; 15 – зовнішня футеровка; 16 – розподільник; 17 – конічний вал; 18 – конусний ексцентриковий стакан-вал; 19 – кутовий редуктор; 20 – ведений шків; 21 – ведучий шків; 22 – ремінь; 23 – основний електродвигун; 24 – жолоб; 25 – пневмосепаруючий канал; 26 – решето; 27 – циклон; 28 – відцентровий вентилятор; 29 – електродвигун вентилятора; 30 – забірник насіння; 31 – забірник нерозлущених плодів; 32 – забірник частинок коробочок; 33 – забірник дрібних частинок і пилу; 34 – електричні проводи

Привід машини складається з основного електродвигуна, ремінної передачі, кутового редуктора та ексцентрикового стакана-вала, що передає обертання дробильному конусу. Окремий мотор-редуктор змінює зазор між конусами, а вентилятор з циклонним віддільником створює повітряний потік для сепарації легких домішок.

Після руйнування плодів суміш надходить у систему аеродинамічного очищення, де легкі частинки відносяться потоком повітря в циклон і накопичуються в окремих бункерах для частинок коробочок та пилу. Насіння та нерозлущені плоди потрапляють на решето, де відбувається подальше сортування: насіння проходить через отвори і надходить до забірника насіння, а залишки плодів відводяться в інший бункер.

Керування основними параметрами процесу – частотою обертання дробильного конуса, продуктивністю вентилятора та зазором між конусами – здійснюється автоматично за допомогою блока керування. Це дозволяє адаптувати машину до різних умов переробки.

Переваги конструкції:

– поєднання механічного руйнування плодів з аеродинамічним очищенням;
– точне налаштування технологічних параметрів;
– гумові футеровки для запобігання пошкодженню насіння;
– ефективний ексцентриковий механізм для інтенсивної дії на плоди;
– чітке розділення продуктів переробки (насіння, оболонки, пил);
– зручне технічне обслуговування та автоматизація процесу.

Розроблена машина забезпечує високу продуктивність та якісне очищення насіння рицини, що є актуальним для промислового виробництва.

Чисельне моделювання процесу відокремлення і очищення насінин рицини від плодів під дією робочих органів машини проведено в середовищі Simcenter Star-CCM+ із використанням детермінованого підходу дискретних елементів (DEM) у поєднанні з механікою суцільного середовища.

Для забезпечення коректного відображення геометрії, контакту та деформаційних процесів у робочій зоні було прийнято наступні сіткові моделі: генератор багатогранних комірок і поверхневої сітки. Генератор багатогранних комірок обрано як основний засіб побудови об'ємної обчислювальної сітки для забезпечення високої якості моделі при меншій кількості комірок, що важливо для складної геометрії контактної взаємодії плодів рицини з робочими органами. Генератор поверхневої сітки застосовано для попередньої оптимізації геометрії з метою рівномірного покриття поверхонь та кращої відповідності імпортованим CAD-моделям. Базовий розмір сітки 0,01 м обрано з урахуванням геометричних розмірів плодів рицини (довжина L = 14,8 ± 2,2 мм, ширина B = 13,5 ± 1,9 мм), що забезпечує достатню точність просторового опису об'єкта дослідження при помірному обчислювальному навантаженні.

В середовищі Simcenter Star-CCM+ було реалізовано комплексний підхід, що охоплює взаємодію твердих тіл, газового середовища та контактної механіки частинок. Фізичну модель побудовано на основі середніх за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса, які описують рух в'язкого стисливого газу, з урахуванням рівняння стану ідеального газу. Це дозволяє точно описувати поведінку повітряного середовища, особливо в зонах локального стиснення та прискорення повітряного потоку в робочій зоні машини. Для врахування турбулентності застосовано модель k-ε, яка є однією з найбільш універсальних та стійких до розрахункових похибок моделей, і забезпечує опис як великих, так і малих вихорів у потоці.

Для відображення руху частинок плодів рицини та продуктів їх руйнування реалізовано лагранжеву багатофазну модель, у якій кожна частинка розглядається як незалежний об'єкт із власними кінематичними та фізичними характеристиками. У цьому контексті плід рицини змодельовано як сукупність частинок дискретних елементів (DEM), з урахуванням таких моделей як постійна щільність, скупчення частинок, що дозволяє відтворити складну внутрішню структуру плодів, зокрема багатокомпонентність, різну міцність оболонки та ядра.

Для моделювання взаємодії між частинками та навколишнім середовищем застосовано багатофазну взаємодію, що включала: опір коченню для опису перекочування насіння; фазову взаємодію DEM для обміну імпульсом між фазами; модель Герца–Міндліна для розрахунку контактних сил; зчеплені частинки для врахування когезійних зв'язків; модель одиночного руйнування для визначення моменту руйнування частинки під навантаженням.

Розрахунки проводилися у нестаціонарному неявному режимі, що дало змогу враховувати зміну навантаження з часом і уникнути нестабільностей, пов'язаних із великими часовими кроками. Сила тяжіння була увімкнена як глобальний фактор, що впливає на осадження частинок, їх скупчення та вплив на ефективність подальшого очищення.

Першим етапом моделювання є дослідження процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів. Схема моделювання наведена на **рис. 2**.

В якості факторів досліджень обрано: діаметр отвору подачі D_{in} (60–140 мм), кут нахилу осі дробильного конусу γ (0–4°), частота обертання дробильного конусу n (200–400 об/хв), відстань між зворотнім і дробильним конусами δ (0–20 мм).

В результаті моделювання отримано сцену візуалізації процесу руйнування плодів рицини і відокремлення насіння і коробочок, яка представлена на **рис. 2**. На рисунку відображено динаміку контакту плодів з робочими поверхнями дробильного і зворотного конусів, де реалізується поетапне руйнування оболонки (коробочки) та вивільнення насіння. Частинки представлені у вигляді елементів моделі дискретних тіл (DEM), з чітким розмежуванням між уламками оболонок (сині субчастинки) і

ядрами насіння (червоні субчастинки). Також візуалізовано швидкість руху частинок й положення у просторі. Рисунок дає змогу наочно оцінити ефективність параметрів роботи дробарки, а також характер розподілу продуктів руйнування – що є важливим для подальшої оптимізації конструкції робочих органів і налаштування режимів подрібнення. Тому в якості критерію досліджень обрано частку нерозлущених плодів та сегментів ξ_f.

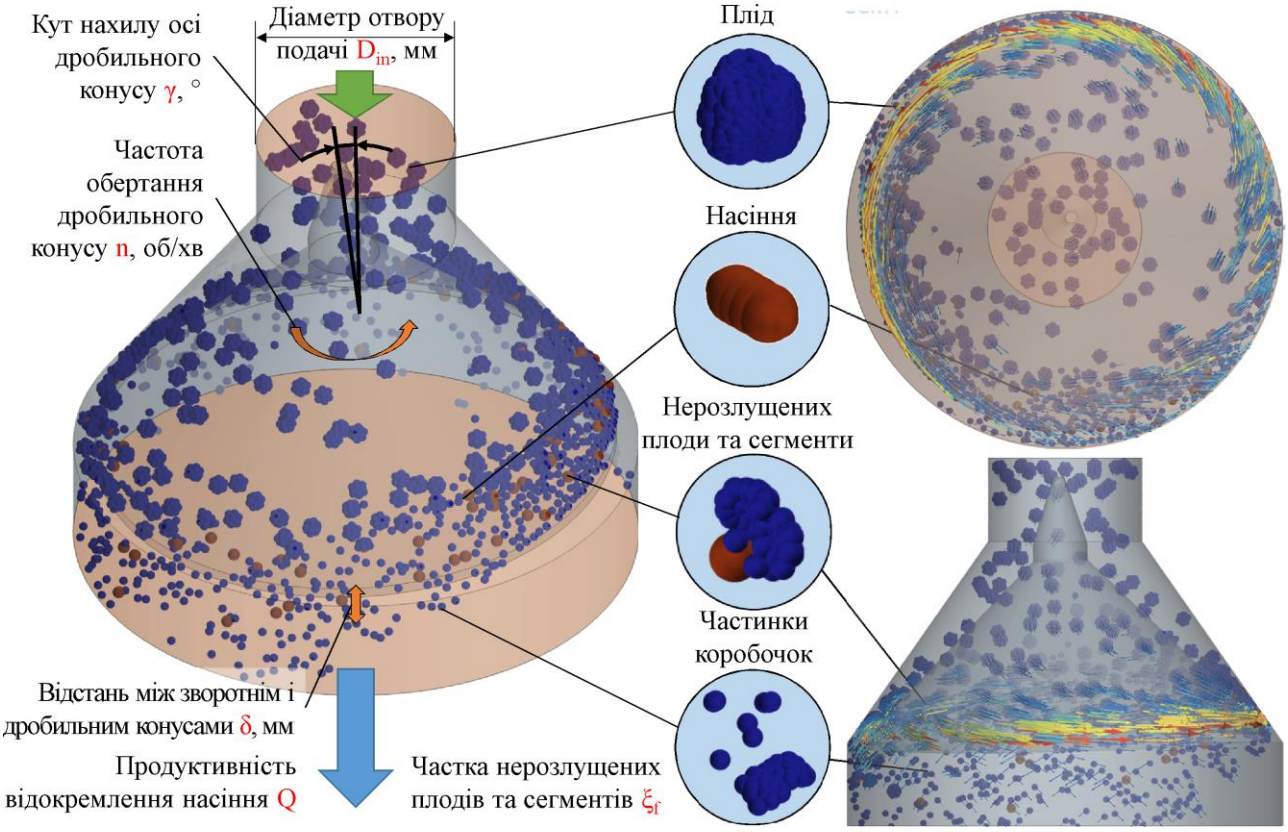


Рис. 2 – Постановка задачі чисельного моделювання процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів

Другим етапом моделювання є процес очищення насіння рицини від нерозлущених плодів, залишків оболонок та частинок коробочок, який здійснюється в системі аеродинамічного очищення. Дана система складається з пневмосепаруючого каналу з установленим у ньому решетом, а також циклона для виділення легких домішок з повітряного потоку.

Пневмосепаруючий канал виконує функцію розділення матеріалу за аеродинамічними властивостями. Потік повітря, що проходить через канал, захоплює легші фракції – оболонки, частинки коробочок, пилові включення, а важчі насінини рицини та частина нерозлущених плодів осідають. Для забезпечення оптимальних умов розділення розміри каналу вибрано 220 × 220 мм, що відповідає рекомендаціям попередніх експериментальних і теоретичних досліджень (*Кудрявцев, 2024; Kudriavtsev, 2024*). Такі габарити забезпечують достатню площу перерізу для стабілізації повітряного потоку і ефективного сепарування суміші за крупністю та питомою вагою.

Циклон призначений для уловлювання виношених з каналу дрібних частинок та пилу. Його конструктивні параметри (висота, діаметр, співвідношення між вхідним і вихідним отворами) вибрано з урахуванням рекомендацій попередніх досліджень (*Zhao et al, 2018; Wang, 2004*), що дозволяє забезпечити високий ступінь очищення повітряного потоку при мінімальних втрат насіння.

Решето в пневмосепаруючому каналі виконує додаткову функцію поділу за розмірами. Використовується прутковий тип решета, що забезпечує ефективне пропускання насіння і затримання більших фрагментів коробочок. Розмір щілини між прутками вибрано 12 мм, що є

меншим за розміри плодів і більшим за розміри насінин рицини. Це дозволяє мінімізувати втрати насіння при одночасному ефективному видаленні більших за розміром домішок.

В рамках проведення моделювання та подальших експериментальних досліджень основним конструктивним фактором, що варіюється, є кут встановлення решета β. Зміна кута в межах від 10° до 40° (згідно з кутом природного укосу), дозволяє регулювати ефективність сепарації та забезпечує оптимальний режим роботи системи аеродинамічного очищення, впливаючи на напрям і швидкість руху частинок у повітряному потоці.

Схема моделювання наведена на рис. 3. Вхідний матеріал представлений сумішшю нерозлущених плодів та сегментів, насіння і частинок коробочок.

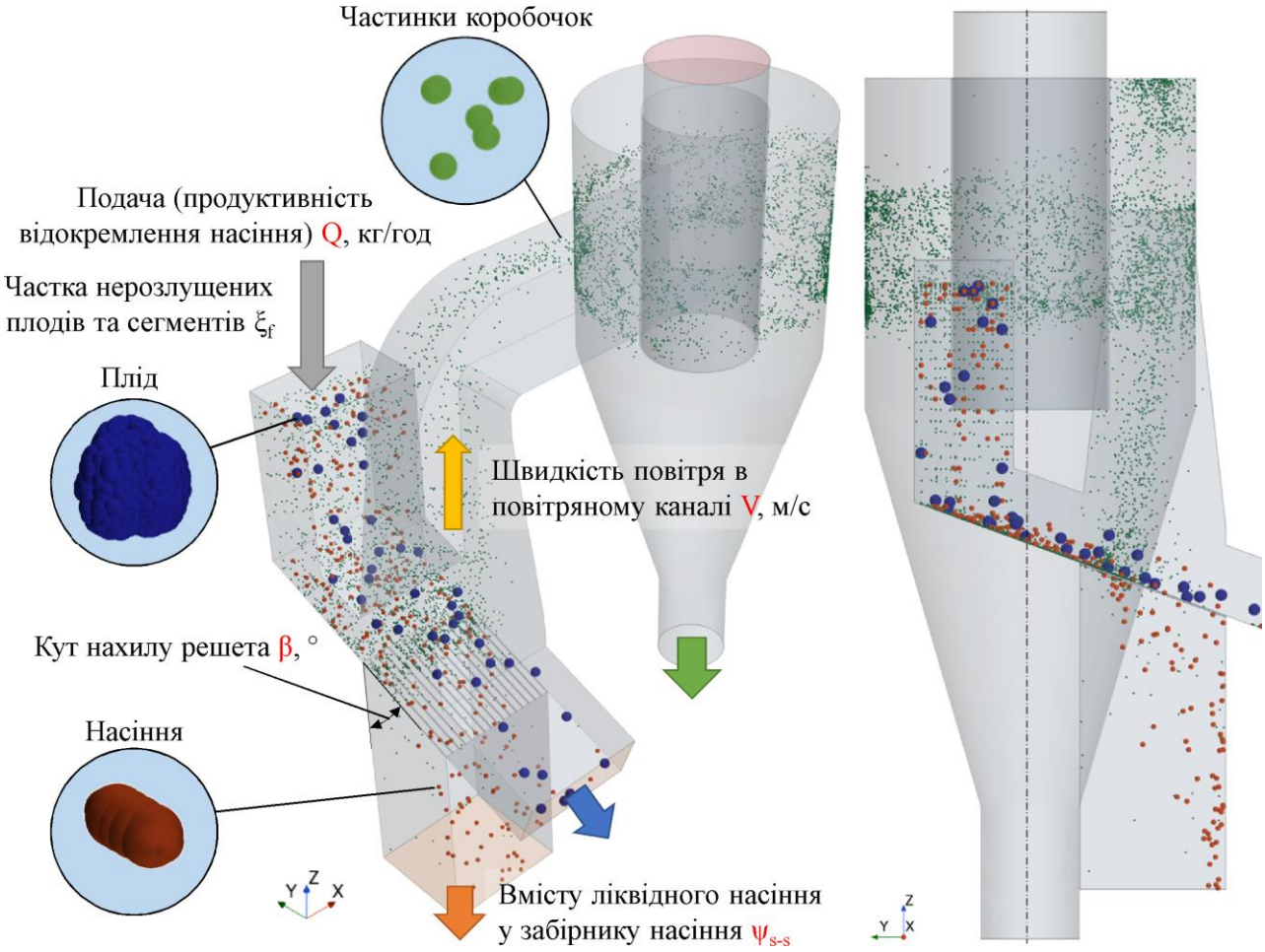


Рис. 3 – Постановка задачі чисельного моделювання процесу очищення насіння від плодів та частинок під дією повітряного потоку

За результатами першого етапу моделювання частка нерозлущених плодів та сегментів становить $\xi_f = 0{,}14$, частка насіння – $\xi_s = 0{,}61$, а частка частинок коробочок – $\xi_p = 0{,}25$. Подача (продуктивність відокремлення насіння) Q є одним із факторів дослідження. Згідно з першим етапом досліджень, значення Q знаходиться в межах від 30 кг/год до 230 кг/год. Третім фактором дослідження є швидкість повітря в пневмосепаруючому каналі V, яка варіюється в межах від 2 м/с до 6 м/с.

Критерієм дослідження є вміст ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$, який визначався в середовищі Simcenter Star-CCM+ автоматично кожні 0,1 с. Загальна тривалість моделювання становила 300 с.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У результаті чисельного моделювання із використанням програмного пакету Wolfram Cloud побудовано рівняння регресії другого порядку, що описують залежності досліджуваних критеріїв від впливових факторів.

Рівняння регресії для продуктивності відокремлення насінин Q (кг/год) подано у такій формі (**рис. 4**):

$$Q = -240{,}523 - 0{,}59051\, D_{in} + 0{,}002264\, D_{in}^2 + 2{,}36164\, n + 0{,}0013958\, D_{in}\, n - 0{,}00427722\, n^2 + 6{,}68519\, \gamma - 0{,}733333\, \gamma^2 + 1{,}59111\, \delta + 0{,}0190278\, D_{in}\, \delta + 0{,}00917222\, n\, \delta - 0{,}0602222\, \delta^2. \quad (1)$$

За критерієм Фішера $F_{(1)} = 33{,}1 > F_t(15, 66, 0.05) = 1{,}85$ рівняння (1) є статистично значущим.

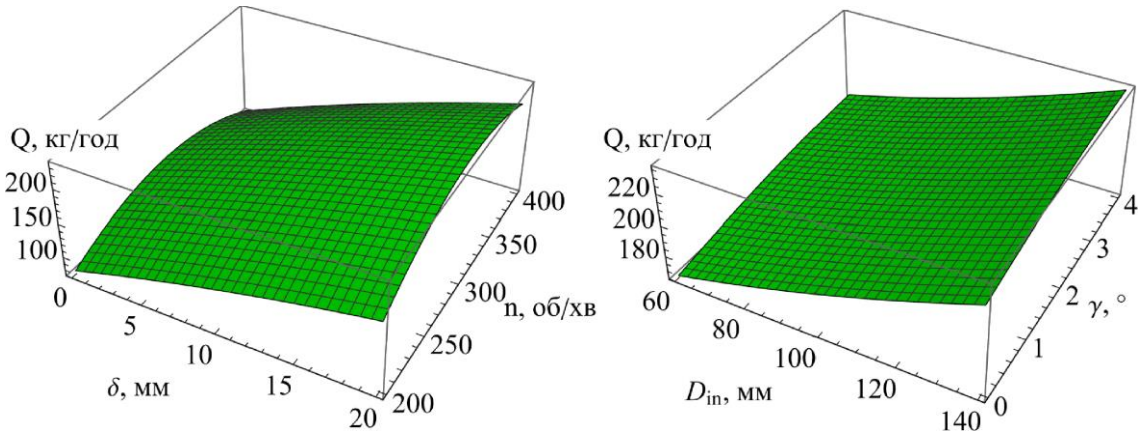


Рис. 4 – Залежність продуктивності відокремлення насінин рицини Q від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ

Залежність (1) має нелінійний характер і включає як лінійні, так і квадратичні та комбіновані (взаємодійні) члени, що відображає складну фізико-механічну природу процесу руйнування плодів і відокремлення насіння. Фізично, зменшення або надмірне збільшення діаметра отвору подачі D_{in} може впливати на рівномірність надходження плодів у робочу зону, що, у свою чергу, позначається на стабільності процесу та рівні завантаження дробильного механізму. У рівнянні лінійний коефіцієнт при D_{in} має від'ємне значення, що вказує на загальну тенденцію до зменшення продуктивності при його збільшенні, однак квадратичний додатний член свідчить про наявність точки перегину, тобто певного оптимального значення, при якому негативний вплив згладжується.

Частота обертання дробильного конуса n позитивно впливає на інтенсивність руйнування плодів, оскільки збільшується кількість контактів і зростає динамічний тиск, проте надмірне підвищення n призводить до зниження продуктивності через перевантаження системи, підвищення інерційних втрат або виникнення хаотичних рухів у робочій зоні. Це підтверджується наявністю від'ємного квадратичного члена, що обмежує зростання ефективності при надмірно високих обертах.

Кут нахилу осі дробильного конуса γ визначає геометрію розміщення плодів у зоні стиску. Його позитивний вплив пояснюється покращенням умов подачі й стиснення плодів під дією сили тяжіння та осьових зусиль. Однак при надто великому куті можливе "випадання" плодів із зони ефективної дії, що відображається негативним квадратичним коефіцієнтом.

Відстань між дробильним і зворотним конусами δ безпосередньо впливає на ступінь стиснення плоду. При збільшенні відстані зменшується контактний тиск, що зменшує ефективність руйнування оболонки плоду, але надто мала відстань призводить до надмірного стискання, що може призвести до руйнування не лише оболонки, а й самого насіння. Наявність у рівнянні як позитивного лінійного, так і негативного квадратичного члена вказує на необхідність точного регулювання цього параметра.

Для досягнення максимального значення Q = 236 кг/год необхідно узгодити параметри (δ = 20 мм, n = 320 об/хв, D_{in} = 140 мм, γ = 4 °) так, щоб забезпечити ефективне, але не надмірне стиснення

плодів, рівномірну подачу сировини, оптимальну швидкість обертання та сприятливу геометрію розміщення робочих органів.

Рівняння регресії для частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f має наступну форму (**рис. 5**):

$$\xi_f = 0{,}290644 - 0{,}00199167\ D_{in} + 0{,}000014456\ D_{in}^2 - 0{,}00124889\ n + 2{,}30741\cdot10^{-6}\ n^2 - 0{,}0278889\ \gamma + 0{,}0046852\ \gamma^2 + 0{,}014887\ \delta + 9{,}778\cdot10^{-6}\ n\ \delta - 0{,}000311111\ \gamma\ \delta - 0{,}000378704\ \delta^2. \quad (2)$$

За критерієм Фішера $F_{(2)} = 89{,}0 > F_t(15, 66, 0.05) = 1{,}85$ рівняння (2) є статистично значущим.

Форма рівняння (2) свідчить про складну нелінійну взаємодію між цими параметрами, що відображає фізичну суть процесу механічного руйнування плодів.

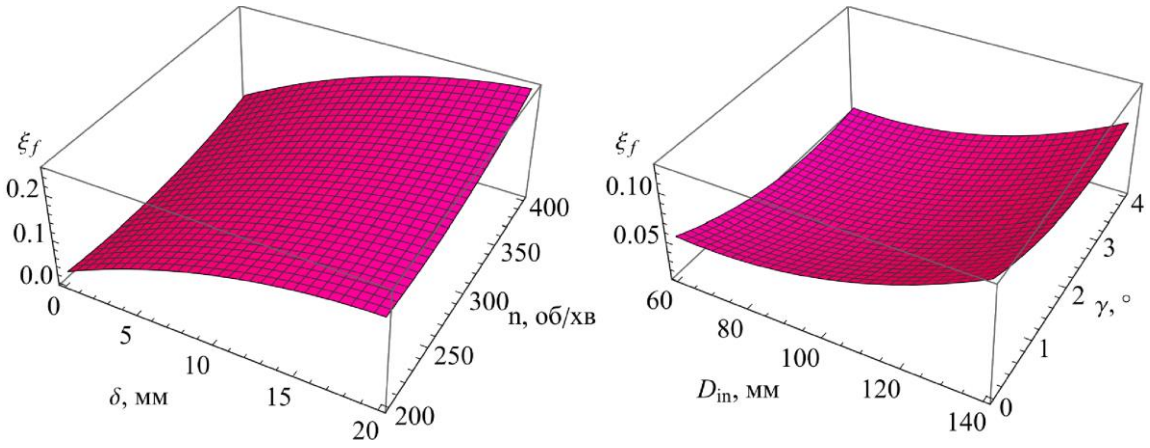


Рис. 5 – Залежність частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ

Зменшення частки нерозлущених плодів із ростом діаметра отвору подачі D_{in} пояснюється покращенням умов подавання сировини в зону стискання. Проте надмірне збільшення діаметра може призвести до зниження тиску в зоні руйнування, через що частина плодів залишається нерозлущеною – це підтверджується зміною знаку квадратичного члена. Таким чином, існує оптимальне значення $D_{in} = 69$ мм, за якого забезпечується рівномірна подача та ефективне стискання.

Частота обертання дробильного конуса n впливає на інтенсивність контакту плодів з робочими органами. При збільшенні швидкості зростає кінетична енергія взаємодії, що сприяє кращому руйнуванню оболонок плодів. Проте при надто високих обертах ($n > 271$ об/хв) може зменшитись час контакту між плодами й робочою поверхнею, або виникнути ефект "розкидання", що знижує якість розлущення. Це відображено наявністю позитивного квадратичного члена, який обмежує позитивний вплив надмірного зростання частоти.

Кут нахилу осі дробильного конуса γ визначає геометричну орієнтацію зони подрібнення відносно сили тяжіння та напрямку подачі. При збільшенні кута поліпшується обтікання та розташування плодів у робочій зоні, що сприяє кращому зминанню. Однак надто великий кут може змінити напрям зусиль таким чином, що плоди уникатимуть максимального навантаження або вислизатимуть, не руйнуючись. Тому залежність має нелінійний характер із оптимумом ($\gamma = 2{,}9°$).

Відстань між дробильним і зворотним конусами напряму визначає ступінь стиснення. Зі зростанням δ тиск між поверхнями зменшується, і відповідно зменшується ефективність руйнування оболонок плодів. Але при надто малій відстані зростає ризик блокування плодів або пошкодження самого насіння. Це підтверджується наявністю квадратичного члена з негативним коефіцієнтом, що описує наявність мінімуму частки нерозлущених плодів за оптимального значення δ.

Взаємодійні члени рівняння (наприклад, між n та δ, або між γ та δ) свідчать про те, що ефективність процесу визначається не лише окремими параметрами, а й їх поєднанням. Зокрема, оптимальне поєднання частоти обертання та відстані дозволяє забезпечити стійкий контакт і контрольований ступінь стискання, тоді як невдалі комбінації можуть погіршити умови подрібнення.

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини скористаємося умовою мінімізації частки нерозлущених плодів (сегментів) при високій продуктивності відокремлення насінин:

$$\begin{cases} Q(\delta, n, D_{in}, \gamma) \to \max, \\ \xi_f(\delta, n, D_{in}, \gamma) \to \min. \end{cases} \quad (3)$$

За допомогою Wolfram Cloud і методу мінімізації мультиплікативної цільової функції, сформованої шляхом скалярного ранжування, реалізовано ефективний підхід до багатокритеріальної оптимізації. Він полягає у зведенні задачі з кількома критеріями до однокритеріальної через побудову агрегованої функції у вигляді добутку нормалізованих значень кожного критерію з урахуванням їх вагомості. Такий підхід дозволяє одночасно мінімізувати, наприклад, енерговитрати й частку нерозлущених плодів та максимізувати вміст ліквідного насіння. Загальний вигляд функції має форму:

$$K = \frac{Q(\delta, n, D_{in}, \gamma) - Q^{min}}{Q^{max} - Q^{min}} \frac{\xi_f^{max} - \xi_f(\delta, n, D_{in}, \gamma)}{\xi_f^{max} - \xi_f^{min}} \to \max. \quad (4)$$

Вирішуючи рівняння (4) спільно з (1) і (2) отримані раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини: δ = 8,6 мм; n = 291 об/хв; D_{in} = 98 мм; γ = 3,6° → Q = 150,7 кг/год; ξ_f = 0,141.

У форматі рівняння регресії для визначення $\psi_{s\text{-}s}$ (вмісту ліквідного насіння у забірнику) подається у такому вигляді (**рис. 6**):

$$\psi_{s\text{-}s} = 0{,}593978 + 0{,}00319717\ Q - 9{,}73923 \cdot 10^{-6}\ Q^2 + 0{,}0035\ V + 0{,}00793827\ \beta - 0{,}000195062\ \beta^2. \quad (5)$$

За критерієм Фішера $F_{(5)} = 42{,}5 > F_t(10, 17, 0.05) = 2{,}54$ рівняння (5) є статистично значущим.

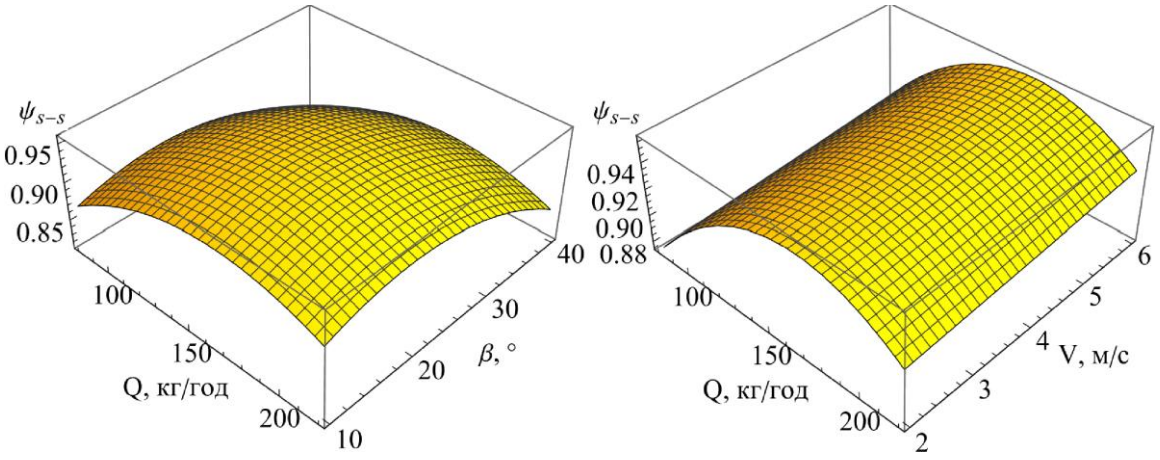


Рис. 6 – Залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$ від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q, кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V

Аналіз отриманої моделі дозволяє визначити характер впливу кожного із факторів на ефективність процесу відокремлення ліквідного насіння. Позитивний коефіцієнт при лінійному члені подачі Q свідчить про те, що збільшення продуктивності відокремлення сприяє підвищенню вмісту ліквідного насіння у забірнику. Однак наявність квадратичного члена з від'ємним коефіцієнтом вказує на існування оптимального значення подачі, при перевищенні якого ефективність процесу починає знижуватись. Це зумовлено фізичними обмеженнями: при надмірній подачі на решеті утворюється щільний шар матеріалу, що ускладнює відокремлення ліквідного насіння і призводить до його втрат разом з домішками. Вплив швидкості повітряного потоку V має виключно позитивний характер, оскільки збільшення швидкості повітря сприяє кращому видаленню легких домішок та пустих оболонок, забезпечуючи стабільні умови для просіювання ліквідного насіння через решето. Водночас вплив кута нахилу решета β проявляється як у лінійній, так і у квадратичній формі. Початкове збільшення кута нахилу покращує процес відокремлення завдяки прискоренню переміщення матеріалу і зменшенню часу перебування домішок на решеті. Однак при надмірних

значеннях кута ефективність знижується, оскільки ліквідне насіння не встигає відокремитися і потрапляє до відходів. Це відображено від'ємним коефіцієнтом при квадраті кута нахилу. Таким чином, модель враховує нелінійний характер взаємозв'язків між факторами та результативною ознакою, що відповідає фізичній суті процесу. Отримане рівняння дозволяє визначити оптимальні параметри роботи машини для забезпечення максимального вмісту ліквідного насіння у забірнику: $\psi_{s\text{-}s} = 0{,}956 \rightarrow Q = 150{,}7$ кг/год, $\beta = 20{,}3$ °, $V = 6$ м/с.

ВИСНОВКИ

Запропонована конструкція машини для очищення насіння рицини дає змогу забезпечити комплексну післяжнивну переробку плодів рицини шляхом ефективного розлущування коробочок, відокремлення насіння та високоякісного очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та частинок коробочок. Завдяки поєднанню механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення досягається підвищення якості продукції та зменшення втрат насіння. Автоматизоване регулювання положення зворотного конуса за допомогою мотор-редуктора підвищує точність налаштувань і стабільність технологічного процесу. Додаткове оснащення машини блоком керування забезпечує автоматизацію окремих функціональних вузлів, поліпшує умови експлуатації, підвищує надійність роботи та зменшує вплив людського фактора під час роботи машини.

В результаті чисельного моделювання процесу відокремлення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q (1), частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f (2) від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ. В результаті чисельного моделювання процесу очищення насіння рицини отримано залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ (5) від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q, кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V. Статистичний аналіз отриманих рівнянь регресії дав змогу оцінити внесок кожного з досліджуваних факторів у формування цільових показників роботи машини, виокремити статистично значущі параметри та побудувати достовірні аналітичні моделі процесу.

Використання методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу визначити оптимальні значення факторів ($\delta = 8{,}6$ мм; $n = 291$ об/хв; $D_{in} = 98$ мм; $\gamma = 3{,}6°$; $\beta = 20{,}3$ °; $V = 6$ м/с), за яких досягається максимальна продуктивність процесу ($Q = 150{,}7$ кг/год) при забезпеченні прийнятного рівня якості відокремлення ($\xi_f = 0{,}141$) та очищення $\psi_{s\text{-}s} = 0{,}956$. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції машини та доцільність її впровадження у виробничих умовах.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Alexopoulou, E., Papatheohari, Y., Zanetti, F., Tsiotas, K., Papamichael, I., Christou, M., Namatov, I., & Monti, A. (2015). Comparative studies on several castor (Ricinus communis L.) hybrids: Growth, yields, seed oil and biomass characterization. *Industrial Crops and Products, 75*, 8–13. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.015

Anjani, K. (2012). Castor genetic resources: A primary gene pool for exploitation. *Industrial Crops and Products, 35*(1), 1–14. DOI: 10.1016/j.indcrop.2011.06.011

Bateni, H., & Karimi, K. (2016). Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach. *Chemical Engineering Research and Design, 107*, 4–12. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.08.014

Carrino, L., Visconti, D., Fiorentino, N., & Fagnano, M. (2020). Biofuel production with castor bean: A win–win strategy for marginal land. *Agronomy, 10*(11), 1690. DOI: 10.3390/agronomy10111690

D'Avino, L., Di Bene, C., Farina, R., & Razza, F. (2020). Introduction of cardoon (Cynara cardunculus L.) in a rainfed rotation to improve soil organic carbon stock in marginal lands. *Agronomy, 10*(7), 946. DOI: 10.3390/agronomy10070946

Gelfand, I., Sahajpal, R., Zhang, X., Izaurralde, R. C., Gross, K. L., & Robertson, G. P. (2013). Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. *Nature, 493*(7433), 514–517. DOI: 10.1038/nature11811

Janiszewska, D., Olchowski, R., Nowicka, A., Zborowska, M., Marszałkiewicz, K., Shams, M., Giannakoudakis, D. A., Anastopoulos, I., & Barczak, M. (2021). Activated biochars derived from wood biomass liquefaction residues for effective removal of hazardous hexavalent chromium from aquatic environments. *GCB Bioenergy, 13*(7), 1247–1259. DOI: 10.1111/gcbb.12839

Kudriavtsev, I. (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. *Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2*(125), 47–55. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-5

Ogunniyi, D. S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource Technology, 97*(9), 1086–1091. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.03.028

Park, K., Sanjaya, S. A., Quach, T., & Cahoon, E. B. (2021). Toward sustainable production of value-added bioenergy and industrial oils in oilseed and biomass feedstocks. *GCB Bioenergy, 13*(10), 1610–1623. DOI: 10.1111/gcbb.12883

Pari, L., Latterini, F., & Stefanoni, W. (2020). Herbaceous oil crops, a review on mechanical harvesting state of the art. *Agriculture, 10*, 309. DOI: 10.3390/agriculture10080309

Román-Figueroa, C., Cea, M., Paneque, M., & González, M. E. (2020). Oil content and fatty acid composition in castor bean naturalized accessions under Mediterranean conditions in Chile. *Agronomy, 10*(8), 1145. DOI: 10.3390/agronomy10081145

Vallejos, M., Rondanini, D., & Wassner, D. F. (2011). Water relationships of castor bean (Ricinus communis L.) seeds related to final seed dry weight and physiological maturity. *European Journal of Agronomy, 35*, 93–101. DOI: 10.1016/j.eja.2011.04.003

Von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., Van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., Cosentino, S. L. et al. (2019). Marginal agricultural land low-input systems for biomass production. *Energies, 12*(16), 3123. DOI: 10.3390/en12163123

Wang, L. (2004). *Theoretical study of cyclone design* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).

Wydra, S., Hüsing, B., Köhler, J., Schwarz, A., Schirrmeister, E., & Voglhuber-Slavinsky, A. (2021). Transition to the bioeconomy – Analysis and scenarios for selected niches. *Journal of Cleaner Production, 294*, 126092. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126092

Zanetti, F., Monti, A., & Berti, M. T. (2013). Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review. *Industrial Crops and Products, 50*, 580–595 DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.08.030

Zhao, B., & Su, Y. (2018). Particle size cut performance of aerodynamic cyclone separators: Generalized modeling and characterization by correlating global cyclone dimensions. *Journal of Aerosol Science, 120*, 1–11. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2018.02.009

Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. https://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf

Алієв, Е. Б. (2020). Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 530 с.

Ведмедєва, К. В., Кавязіна, М. Ю., & Махова, Т. В. (2018). Оцінка зразків рицини за господарсько-цінними ознаками. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 26*, 39–48. https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Vedmedeva2_26.pdf

Кудрявцев, І. М. (2024). Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження аеродинамічного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях, 2*(113), 132–142. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-15

Петраченко, Д. О., Мохер, Ю. В., & Коропченко, С. П. (2023). Технологія обрушення насіння промислових конопель для малого бізнесу. *Scientific monograph.* Riga, Latvia: Baltija Publishing, 645–671. DOI: 10.30525/978-9934-26-328-6-29

Теслюк, Г. В. (2020). Обґрунтування технологічного процесу, параметрів та режимів роботи машини для виділення насіння гарбуза: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Дніпропетровськ. 147 с. https://uacademic.info/ua/document/0410U001669

Шевчук, В. В., & Сукач, О. М. (2018). Процеси і засоби для подрібнення насіння олійних культур: монографія. Львів: Львівський національний аграрний університет. 105 с. https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/558/1/Shevchuk_monograf.pdf

FORECASTING AND PREVENTING TOWER CRANE FAILURES USING AI TECHNOLOGIES UNDER WIND LOAD CONDITIONS

V. Stefanov*, I. Dzerzhinsky

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
tower crane,
accidents,
stability,
external loads,
safety system,
forecasting, artificial intelligence,
neural network

Article history:
Received 10.07.2025
Accepted 28.08.2025

Corresponding author:*
stefanov.v@kart.edu.ua

ABSTRACT

The article discusses the application of artificial intelligence technologies for forecasting and preventing tower crane failures caused by wind loads. It analyzes data processing methods from sensors measuring wind loads and their integration with crane control systems for real-time monitoring and prediction of hazardous situations. Special attention is given to the use of machine learning algorithms to process large volumes of data and identify critical parameters that could lead to an accident. The implementation of such systems allows for the timely detection of potential threats, automatic adjustment of crane operating parameters, and the adoption of necessary measures to prevent accidents. The study results confirm that the integration of AI technologies into the operation of tower cranes can significantly improve their safety and efficiency.

The issue of tower crane safety under wind loads is also examined. The shortcomings of existing protection methods are analyzed, particularly their inadequate effectiveness during strong wind gusts. An intelligent system based on adaptive neural networks is proposed for forecasting wind loads and preventing accidents. The system's operating principles and algorithms are described. The importance of timely response to changes in wind conditions to ensure the safety of the crane and personnel is emphasized. The results of the study can be used to develop modern crane control systems, improving work safety. It is noted that the risk of dangerous wind loads exists not only in areas with strong winds but also in regions with moderate climates.

Analysis of long-term observations indicates not only the existence of the problem of dangerous dynamic wind loads but also a trend towards its intensification. The problem of ensuring the stability of tower cranes under strong winds remains relevant, as the loss of dynamic stability can lead to accidents and material damage. Especially dangerous are sudden wind gusts and squalls, which can significantly increase wind loads. These short-term wind impacts, along with other factors, may cause crane overturning, creating a threat to operational safety. Therefore, it is important to develop an effective method for ensuring crane stability during dynamic wind disturbances.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1841

To cite this article:
tefanov, V., & Dzerzhinsky, I. (2025). Forecasting and preventing tower crane failures using AI technologies under wind load conditions. *Agricultural Machines*, *51*, 159-168. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1841

УДК 621.873.3

ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙ БАШТОВОГО КРАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШІ-ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

В. О.Стефанов*, І. В. Дзержинський

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
баштовий кран,
аварії,
стійкість,
зовнішні навантаження,
система безпеки,
прогнозування,
штучний інтелект,
нейронна мережа.

Історія публікації:
Отримано 10.07.2025
Затверджено 28.08.2025

****Автор для листування:***
stefanov.v@kart.edu.ua

АНОТАЦІЯ

В статті розглядається застосування технологій штучного інтелекту для прогнозування та запобігання аваріям баштових кранів, спричиненим вітровими навантаженнями. Аналізуються методи обробки даних з сенсорів, що вимірюють вітрові навантаження, та їх інтеграція з системами управління краном для реального часу моніторингу та прогнозування небезпечних ситуацій. Особливу увагу приділено використанню алгоритмів машинного навчання для обробки великих обсягів даних та визначення критичних параметрів, які можуть призвести до аварії. Впровадження таких систем дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози, автоматично коригувати робочі параметри крана та приймати необхідні заходи для запобігання аваріям. Результати дослідження підтверджують, що інтеграція ШІ-технологій у роботу баштових кранів може значно підвищити їхню безпеку та ефективність.

Розглянуто проблему безпеки експлуатації баштових кранів за вітрових навантажень. Проаналізовано недоліки існуючих методів захисту, зокрема їхню недостатню ефективність під час сильних поривів вітру. Запропоновано інтелектуальну систему на базі адаптивних нейронних мереж для прогнозування вітрових навантажень і запобігання аваріям. Описано принцип роботи системи та її алгоритми. Підкреслено важливість своєчасного реагування на зміни вітрових умов для забезпечення безпеки крана та персоналу. Результати дослідження можуть бути використані для розробки сучасних систем керування баштовими кранами, що підвищить безпеку робіт. Зазначено, що ризик небезпечних вітрових навантажень існує не лише в регіонах з сильними вітрами, а й у місцевостях з помірним кліматом. Аналіз багаторічних спостережень свідчить не тільки про наявність проблеми небезпечних динамічних вітрових навантажень, а й про тенденцію до її посилення.

Проблема забезпечення стійкості баштових кранів під сильним вітром залишається актуальною, оскільки втрата динамічної стійкості може призвести до аварій та матеріальних збитків. Особливо небезпечні раптові пориви вітру та шквали, що можуть значно збільшити вітрове навантаження. Ці короткочасні вітрові впливи, разом з іншими факторами, можуть спричинити перекидання крана, створюючи загрозу безпеці експлуатації. Тому важливо розробити ефективний метод забезпечення стійкості кранів при динамічних вітрових збуреннях.

DOI: 10.36910/acm.vi51.1841

Цитувати цю статтю:
Стефанов, В. О., Дзержинський, І. В. (2025). Прогнозування та запобігання аварій баштового крану за допомогою ші-технологій при вітрових навантаженнях. *Сільськогосподарські машини*, *51*, 159-168. https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1841

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Баштові крани відіграють важливу роль у будівництві, оскільки забезпечують підйом і переміщення вантажів як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Їх широке застосування зумовлено простотою монтажу та відсутністю просторових обмежень для ефективної роботи. У зв'язку зі збільшенням обсягів інфраструктурного будівництва та кількості використовуваних баштових кранів, питання безпеки їх експлуатації набуває особливої актуальності.

Баштові крани, як висотні споруди, вразливі до ненормованих навантажень, зокрема вітрових, що не піддаються точному прогнозуванню. Безпека їх функціонування залежить від здатності витримувати ці навантаження, які можуть призвести до втрати стійкості або падіння. Вітрове навантаження є особливо небезпечним через свою випадковість та мінливість. Раптові сильні пориви вітру можуть значно збільшити навантаження на кран, створюючи критичні ситуації. Ризик небезпечних вітрових навантажень існує не тільки в районах з сильними вітрами, а й у місцевостях з помірним кліматом через спонтанні потужні пориви вітру, які загрожують стійкості крана. Аналіз багаторічних спостережень свідчить не тільки про наявність проблеми небезпечних динамічних вітрових навантажень, а й про тенденцію до її посилення *(Pryor & Barthelmie, 2021).*

Проблема забезпечення стійкості баштових кранів у робочому стані під дією сильного вітру залишається актуальною, оскільки втрата динамічної стійкості може призвести до аварійних ситуацій та значних матеріальних збитків. Особливу небезпеку становлять раптові пориви вітру та шквали, які здатні викликати критичне збільшення вітрового навантаження, що в кілька разів перевищує середнє значення. У таких випадках сила від короткочасного вітрового впливу додається до інших факторів, що сприяють перекиданню, створюючи загрозу для безпечної експлуатації крана. Тому критично важливо розробити ефективний метод забезпечення стійкості баштових кранів у разі динамічних вітрових збурень.

В Україні, на жаль, також трапляються аварії, пов'язані з падінням баштових кранів. Один із таких випадків стався 2014 року в Харкові (Рис.1), де внаслідок падіння будівельного крану одна людина загинула та п'ятеро отримали поранення. Цей трагічний інцидент стався через сильні пориви вітру, які призвели до падіння крану на продуктові кіоски *(State Emergency Service of Ukraine, 2024)*. Такі випадки підкреслюють важливість розробки та впровадження ефективних систем безпеки для баштових кранів, які б враховували мінливість погодних умов та здатні були протистояти екстремальним вітровим навантаженням.

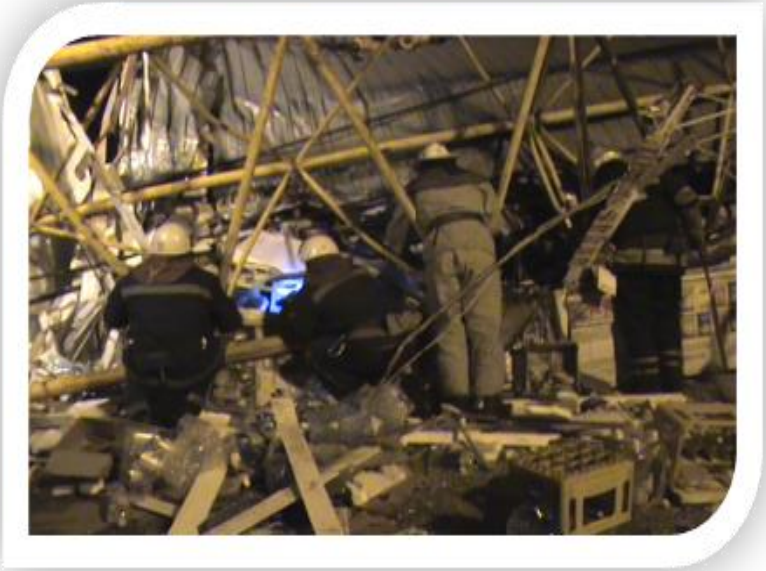


Рис. 1 – Аварія баштового крану (м. Харків 17.05.14)

В зв'язку з цим, розробка та впровадження інтелектуальних систем, здатних прогнозувати та компенсувати вплив вітрових навантажень на баштові крани, є надзвичайно актуальним завданням. Такі системи повинні базуватися на комплексному аналізі метеорологічних даних, даних про стан крана та його оточення, а також враховувати особливості конструкції та умов експлуатації. Тільки таким чином можливо забезпечити безпечну та ефективну роботу баштових кранів, мінімізувавши ризик виникнення аварійних ситуацій.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний момент активно проводяться дослідження з управління системами баштових кранів, включаючи адаптивне керування, формування команд, нейронні мережі, керування плануванням посилення та прогнозне керування моделлю. Паралельно з цим, адаптивні нейронні мережі знаходять широке застосування для контролю вібрації в різних системах. Управління на основі адаптивних нейронних мереж вирізняється високою адаптивністю та здатністю до самонавчання, що робить їх ефективними для вирішення складних завдань керування. Зазвичай існуючі методи керування складними системами розробляються на основі лінеаризованої моделі, і більшість з них потребують точного знання моделі. На відміну від цього, адаптивне нейронне керування має перевагу, яка полягає в здатності мережі самостійно налаштовувати свої параметри на основі отриманих даних, що дозволяє обходитися без точної математичної моделі об'єкта керування. Запропоновано різноманітні варіанти контролерів на основі адаптивних нейронних мереж в системах баштових кранів (*Pryor & Barthelmie, 2021; State Emergency Service of Ukraine, 2024; Sun et al., 2016; Lawrence & Singhose, 2010; Duong et al., 2012; Omar & Nayfeh, 2003; Böck & Kugi, 2014; Zhang & Jing, 2020; Wang et al., 2024; Widrow & Lehr, 1995; Zhu et al., 2019; Ebhota et al., 2018; Sutawinaya et al., 2018; Valladares et al., 2021*).

Найбільш поширені засоби контролю стійкості, такі як обмежувачі вантажопідйомності та системи вітрового захисту, мають ряд недоліків, які роблять їх недостатньо ефективними для забезпечення безпечної експлуатації кранів.

Обмежувачі вантажопідйомності, хоча і здатні запобігти перевантаженню крана, не можуть повністю гарантувати його стійкість при сильному вітрі. Ці пристрої працюють в індикаторному режимі, тобто, вони лише попереджають оператора про наближення критичної ситуації, але не вживають активних заходів для запобігання перекиданню крана. У разі перевищення номінальної вантажопідйомності, обмежувач спрацьовує та знеструмлює вантажопідйомну машину, що може призвести до зупинки роботи та втрати часу. Проте, при критичній швидкості вітру, обмежувач лише сповіщає машиніста, не впливаючи на управління краном, що може бути недостатньо для запобігання аварії.

Системи вітрового захисту, які базуються на реєстрації швидкості вітру та утриманні крана протиугінними захватами, також мають свої обмеження. Вони активуються лише після того, як швидкість вітру досягне небезпечного значення, що може бути занадто пізно для запобігання аварійній ситуації. Крім того, ці системи не враховують поривчастий характер вітру та його зміну напрямку, що може призвести до неадекватної реакції системи та недостатнього захисту крана.

Головний недолік існуючих систем захисту полягає в тому, що вони активуються вже після того, як зафіксовано небезпечні параметри вітрового навантаження. Крім того, обмежувачі вантажопідйомності не мають функції контролю стійкості до перекидання. Вирішенням цієї проблеми є використання адаптивних нейронних мереж для управління вантажопідйомними механізмами.

ВИЗНАЧЕННЯ МЕТИ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробки системи прогнозування та запобігання аваріям баштових кранів, спричиненим вітровими навантаженнями, є надзвичайно високою. Вітрові навантаження можуть значно впливати на стійкість кранів, що може призводити до аварій та матеріальних збитків. Раніше дослідження показали, що необхідно вдосконалити способи сповіщення кранівника про небезпечні умови, пов'язані з вітровими навантаженнями. Розробка інтелектуальної системи на базі адаптивних нейронних мереж, яка прогнозує вітрові навантаження та автоматично коригує роботу крана, може значно підвищити безпеку та ефективність його експлуатації.

Метою даного дослідження є розробка та впровадження системи штучного інтелекту для прогнозування та запобігання аварійним ситуаціям, спричиненим вітровими навантаженнями на баштовий кран, з метою підвищення безпеки експлуатації та зниження ризиків пошкодження обладнання і загроз для життя персоналу. Запропонована система має враховувати напрямок вітру, його змінний та випадковий характер, а також вплив шквалів на стійкість крана.

Новизна дослідження полягає у застосуванні адаптивної нейронної мережі для обробки даних про вітрове навантаження та прогнозування небезпечних ситуацій. Використання штучного інтелекту дозволить системі самонавчатися та адаптуватися до мінливих умов навколишнього середовища, що значно підвищить ефективність протидії небезпечним метеорологічним факторам. Основним завданням дослідження є розробка системи безпеки, яка забезпечуватиме динамічну стійкість баштових кранів під час раптового посилення вітру, поривчастих вітрів та екстремальних шквалів. Це передбачає розробку алгоритмів прогнозування вітрових навантажень, вибір оптимальних способів їх компенсації та впровадження інтелектуальних методів управління для запобігання втраті стійкості баштових кранів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ.

Під час дії високих вітрових навантажень, переведення баштового крана в неробоче положення є критично важливим для забезпечення безпеки. Проте, процес переведення крана в неробочий стан часто займає значний час та включає велику кількість операцій, що може становити проблему в умовах швидко змінного вітрового навантаження. Зокрема, кранівник повинен виконати низку дій, таких як опускання та звільнення вантажу, підйом гакової підвіски, розворот стріли за вітром, встановлення вантажного візка на мінімальний виліт та інші операції, що потребують часу та уваги. У складних погодних умовах, коли швидкість вітру може змінюватися дуже швидко, затримка з переведенням крана в неробочий стан може призвести до критичних ситуацій та навіть аварій. Тому, оптимізація процесу переведення крана в неробочий стан та зменшення кількості необхідних операцій є важливим завданням для забезпечення безпеки праці на будівельному майданчику.

Порядок дій кранівника під час граничних вітрових навантажень чітко регламентований інструкцією з експлуатації та поділяється на два етапи. Перший етап передбачає негайне припинення роботи та виконання першочергових дій для зменшення впливу вітру на кран. Другий етап включає підготовку крана до тривалої стоянки та забезпечення його безпеки під час шторму або при наближенні грози, зливи, снігопаду, ожеледі або туману. Важливо зазначити, що кранівник повинен суворо дотримуватися інструкції та виконувати всі необхідні дії своєчасно та чітко.

Суттєвим недоліком цього порядку дій на першому етапі є те, що при різкому посиленні вітру кранівник залишається в кабіні, що ставить його під потенційну загрозу у разі екстремальних поривів вітру. В умовах сильної бурі чи шквалу, коли вітрове навантаження може досягати критичних значень, кранівник може опинитися в зоні прямої небезпеки, адже кабіна не забезпечує достатнього захисту від можливих механічних пошкоджень або випадкового перекидання крана.

Наступним недоліком є відсутність чітких розпоряджень щодо дій у разі відсутності інформації про посилення вітру, що ускладнює реагування на непередбачувані зміни погодних умов. Відсутність точних вимог у таких ситуаціях робить систему менш ефективною в умовах непередбачуваних загроз. Інший важливий недолік полягає в тому, що при евакуації кранівника пориви вітру різної інтенсивності і повторюваності можуть становити серйозну загрозу для його безпеки. Це може ускладнити процес евакуації та підвищити ризик травмування, особливо при сильних поривах вітру. Зазначені проблеми вказують на невідповідність поточних вимог нормам промислової безпеки, тому необхідно розробити систему, яка забезпечить надійний захист не тільки кранівника, але й інших працівників будівельного майданчика під час раптового або тривалого посилення вітру, мінімізуючи ризики для їхнього життя та здоров’я.

Ключове завдання роботи – це розробка інтелектуальної системи, що інтегрується з системою керування баштового крана для своєчасного виявлення та попередження небезпечних вітрових навантажень. Для досягнення цієї мети найбільш підходящими є адаптивні нейронні мережі.

Адаптивні нейронні мережі є класом нейронних мереж, які здатні змінювати свої параметри (ваги зв'язків) в процесі навчання, підлаштовуючись під змінні умови (*Widrow & Lehr, 1995*). Історія розвитку адаптивних нейронних мереж починається з робіт зі створення персептронів наприкінці 1950-х років. Однак, справжній прорив у галузі адаптивних нейронних мереж стався у 1980-х роках, коли були розроблені алгоритми зворотного поширення помилки, що дозволило навчати багатошарові нейронні мережі. Сьогодні адаптивні нейронні мережі є потужним інструментом, який використовується в багатьох сферах, від розпізнавання образів (*Zhu et al., 2019*) та обробки сигналів (*Ebhota et al., 2018*) до керування складними системами та прогнозування (*Sutawinaya et al., 2018*). Завдяки своїй здатності до самонавчання та адаптації, вони знаходять застосування у робототехніці, медицині, фінансовій сфері та багатьох інших галузях, де потрібно обробляти великі обсяги даних та приймати рішення в умовах невизначеності.

Для збереження стійкості баштових кранів від перекидання при різкій зміні швидкості вітру пропонується спосіб стабілізації їх положення. В основі цього способу лежить алгоритм прогнозування небезпечного наростання вітрового потоку та його напрямку, який реалізується на адаптивній нейронній мережі. Ідея полягає в зборі поточної інформації про швидкості та напрямки повітряного потоку, що отримується за допомогою сучасних датчиків, таких як метеостанція MaxiMet GMX600 (Рис.2), її обробці та прогнозуванні швидкості та напрямку вітру на наступний момент часу.

Рис. 2. – Метеостанція MaxiMet GMX600 (Сенсор швидкості та напрямку вітру, температури, вологості)

У разі прогнозу неприпустимо високої швидкості пориву, це дозволить завчасно автоматично забезпечити поворот стріли або башти та стріли (в залежності від конструкції баштового крана) за вітром до виникнення критичного моменту від вітрового навантаження та заздалегідь вжити заходів з евакуації машиніста. Модель, що реалізує запропонований спосіб, містить блокування, що виключає можливе зіткнення гакової підвіски з споруджуваним об'єктом при екстреному повороті стріли.

Загальний принцип прогнозування можна зобразити графічно (Рис.3) та розглянути на прикладі прогнозу швидкості вітрового пориву. На вхідні канали нейромережі поступають дані про швидкість вітру, зафіксовані у попередні моменти часу:

$$V(t-1),\ V(t-2),\ ...,\ V(t-k). \tag{1}$$

Після обробки цих даних, на вихідному каналі з'являється інформація про швидкість вітру в найближчий момент часу $V(t+1)$. Для оцінки якості навчання нейромережі використовується поняття помилки прогнозування. Помилка визначається як різниця між фактичним (реальним) значенням швидкості вітру та значенням, яке спрогнозувала нейромережа:

$$e(t) = V(t) - V(t+1). \tag{2}$$

Чим менша помилка прогнозування, тим краще нейромережа навчилася. За умови достатнього навчання, нейромережа досягає мінімальної помилки прогнозування. Аналогічний підхід застосовується й для прогнозування напрямку вітру.

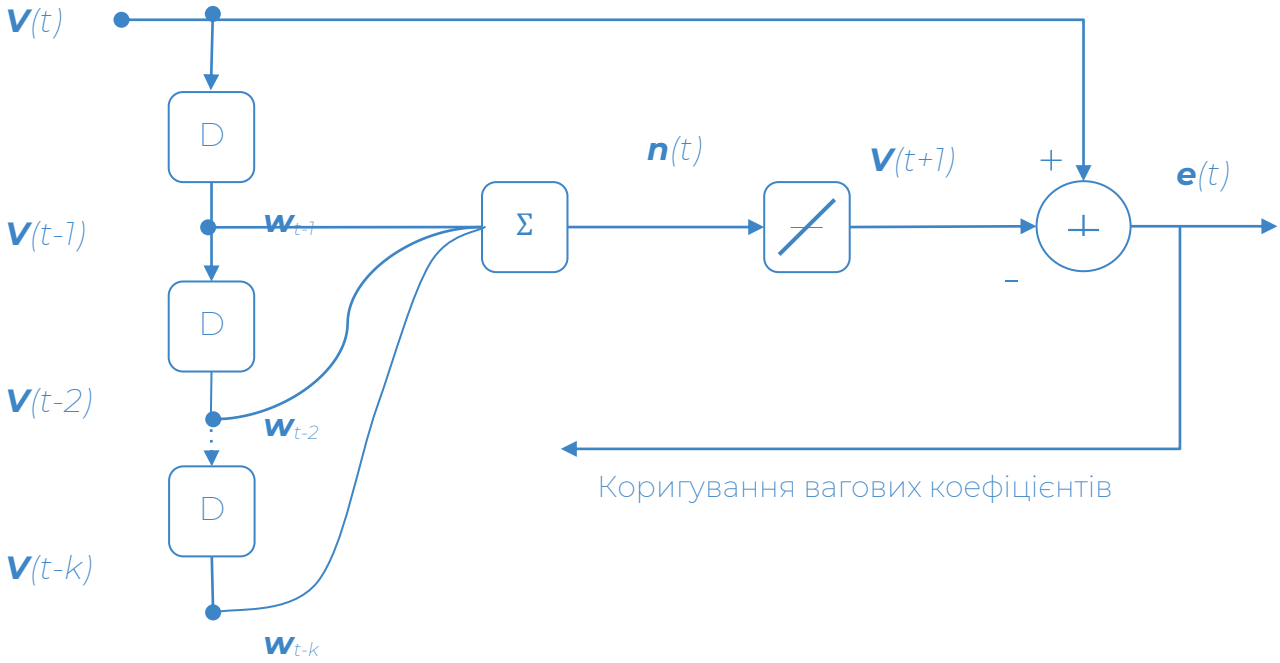


Рис. 3 – Структурна схема нейромережі прогнозування

де $V(t)$ – бажане значення швидкості вітру;
$V(t-1),...,V(t-k)$ – значення швидкостей вітру в попередні моменти часу;
$V(t+1)$ – прогнозоване значення швидкості вітру;
$w_{t-1}, w_{t-2},...,w_{t-k}$ – вагові коефіцієнти;
D – лінія затримки;
$n(t)$ – результат виваженого підсумовування вхідних даних;
$e(t)$ – помилка прогнозування.

Детальна схема роботи системи керування приводом повороту крана при вітрових навантаженнях відображена на структурній схемі (Рис.4), яка ілюструє взаємодію між різними компонентами системи.

Система прогнозування на основі нейронної мережі інтегрується з існуючою системою керування краном шляхом встановлення на програмований логічний контролер (ПЛК) модуля нейронного процесора (NPU), наприклад, NVIDIA Jetson Orin Nano Super. Цей модуль забезпечує високу продуктивність завдяки своїй здатності виконувати до 67 трильйонів операцій за секунду (Valladares et al., 2021), що дозволяє обробляти великі обсяги даних та швидко приймати рішення.

Для роботи системи прогнозування використовуються дані з метеостанції, яка включає в себе датчики напрямку та швидкості вітру, а також датчики температури та вологості. Окрім метеостанції, система також використовує дані з обмежувача навантаження крана, який включає в себе інклінометр, датчик положення стріли, датчик висоти підйому гака та датчик вильоту вантажного візка. В разі відсутності на крані систем обмежувача навантаження крана та/або метеостанції, то для роботи системи прогнозування, кран необхідно буде обладнати всіма вищезгаданими датчиками. Отримана з датчиків інформація, передається до програмованого логічного контролера, де відбувається її первинна обробка та фільтрація з метою усунення шумів та випадкових спотворень. Цей етап є критично важливим для забезпечення точності та надійності подальшого аналізу даних.

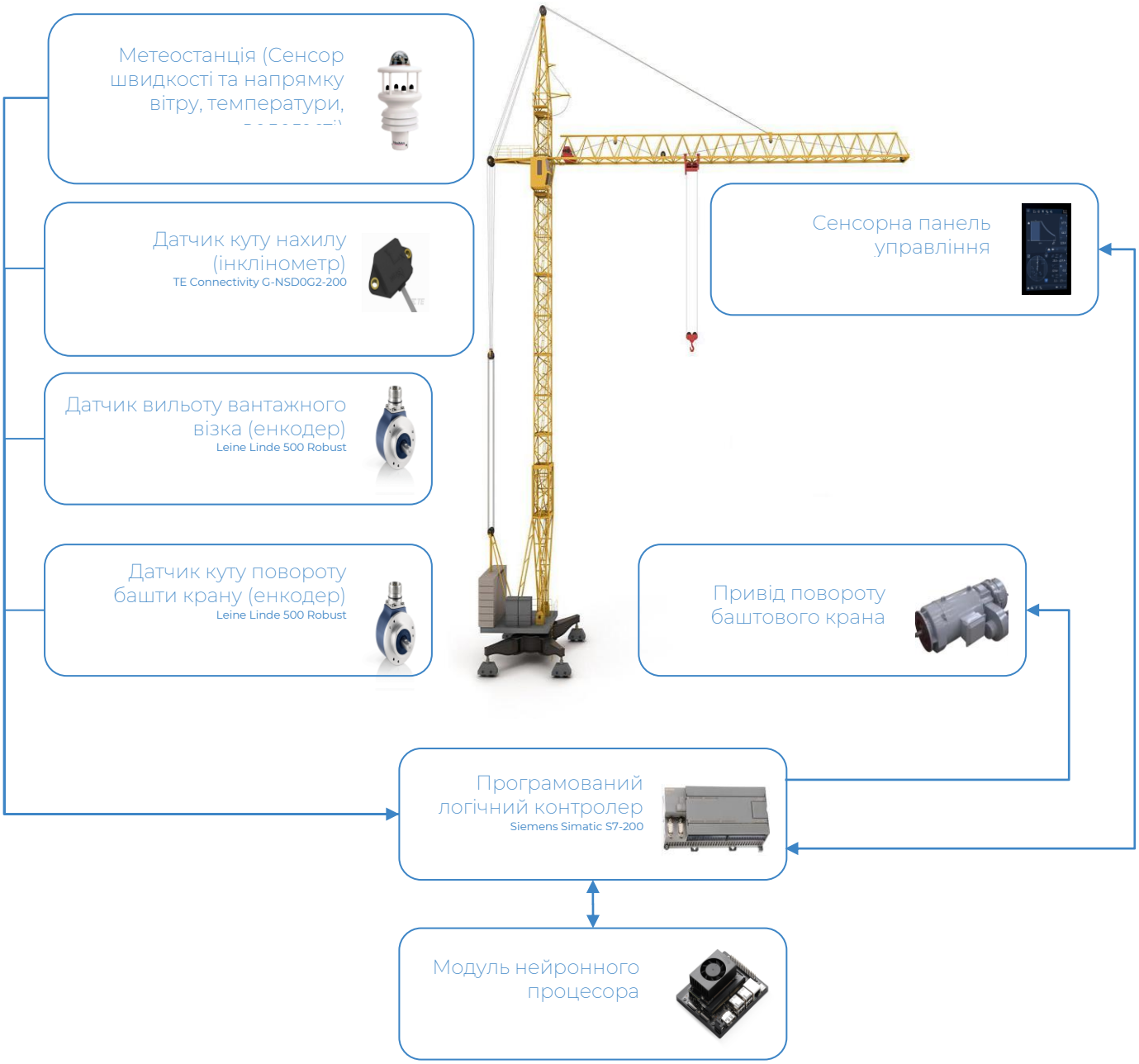


Рис. 3 – Структурна схема системи керування

Наступним етапом є застосування алгоритмів прогнозування, що базуються на нейронних мережах. Контролер, використовуючи історичні дані про вітрові режими місцевості, а також поточні значення метеорологічних параметрів, будує короткостроковий прогноз швидкості та напрямку вітру на найближчі часові інтервали. Для цього використовується модуль нейронного процесора, який забезпечує високу обчислювальну потужність, необхідну для швидкої та ефективної роботи нейронної мережі. Важливим аспектом даного алгоритму є здатність адаптуватися до локальних умов та враховувати особливості мікроклімату будівельного майданчика. Нейронна мережа, завдяки своїй здатності до навчання та адаптації, здатна виявляти складні закономірності у даних та прогнозувати зміни вітрових параметрів з високою точністю.

Таким чином, наступний етап передбачає застосування алгоритмів прогнозування на основі нейронних мереж, які будують короткостроковий прогноз швидкості та напрямку вітру, використовуючи історичні дані та поточні метеорологічні параметри. Модуль нейронного процесора забезпечує високу

обчислювальну потужність для ефективної роботи мережі. Алгоритм адаптується до локальних умов і прогнозує зміни вітрових параметрів з високою точністю. Прогностична модель ідентифікує небезпечні ситуації, автоматично генерує керуючі сигнали для зміни кута стріли та оптимізує траєкторію повороту для мінімізації навантажень. Система також попереджає оператора про небезпечні вітрові умови через візуальні або звукові сигнали, даючи змогу вжити заходів безпеки.

ВИСНОВКИ

В результаті дослідження було виявлено, що баштові крани є вразливими до ненормованих вітрових навантажень, які можуть суттєво вплинути на їхню стійкість та безпеку експлуатації. Вітрові пориви, що виникають раптово, здатні значно збільшити навантаження на конструкцію крана, що підвищує ризик аварійних ситуацій. Оскільки такі навантаження можуть виникати навіть у районах з помірним кліматом, необхідно розробляти ефективні методи прогнозування та управління цими ризиками. Впровадження інтелектуальних систем для моніторингу вітрових навантажень та автоматичного коригування роботи крана може значно підвищити безпеку та ефективність його експлуатації.

Проблема забезпечення стійкості баштових кранів під впливом зовнішніх навантажень є важливою для будівництва. Традиційні методи не враховують динамічні вітрові навантаження та нелінійні деформації конструкцій, що ускладнює оцінку стійкості. Дослідження показало, що для точної оцінки ризиків необхідно враховувати динамічні процеси, зокрема вітрові навантаження, що змінюються залежно від швидкості вітру, напрямку та інших факторів. Для вирішення цієї проблеми розроблено систему на базі штучного інтелекту, яка моніторить параметри роботи крана та навколишнього середовища, прогнозує ризики і дає рекомендації щодо коригування роботи. Методи машинного навчання дозволяють адаптувати систему до змінних умов і підвищити точність прогнозування.

Розроблена система прогнозує небезпечні ситуації, враховує динаміку вітрових навантажень і своєчасно вживає заходів для запобігання втраті стійкості крана. Завдяки адаптивним нейронним мережам система навчається на основі постійно надходящих даних, що дозволяє їй адаптуватися до умов експлуатації та підвищувати ефективність роботи. Подальші дослідження зосереджені на моделюванні навантажень та розробці автоматизованої системи контролю безпечної роботи кранів, зокрема враховуючи інші зовнішні фактори.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Pryor S. C., Barthelmie R. J. A global assessment of extreme wind speeds for wind energy applications // Nature Energy. 2021. Vol. 6. P. 268–276. DOI: https://doi.org/10.1038/s41560-020-00773-7.
2. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Надзвичайні події [Електронний ресурс]. URL: https://dsns.gov.ua/news/nadzvicaini-podiyi/20926 (дата звернення: 04.09.2024).
3. Sun N., Fang Y., Chen H., Lu B., Fu Y. Slew/translation positioning and swing suppression for 4-DOF tower cranes with parametric uncertainties: design and hardware experimentation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. P. 6407–6418.
4. Lawrence J., Singhose W. Command shaping slewing motions for tower cranes // Journal of Vibration and Acoustics. 2010. Vol. 132. Article 011002.
5. Duong S. C., Uezato E., Kinjo H., Yamamoto T. A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane // Automation in Construction. 2012. Vol. 23. P. 55–63.
6. Omar H. M., Nayfeh A. H. Gain scheduling feedback control for tower cranes // Journal of Vibration and Control. 2003. Vol. 9. P. 399–418.
7. Böck M., Kugi A. Real-time nonlinear model predictive path-following control of a laboratory tower crane // IEEE Transactions of Control Systems Technology. 2014. Vol. 22. P. 1461–1473.
8. Zhang M., Jing X. Adaptive Neural Network Control for Double-Pendulum Tower Crane Systems // 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-7670-6_8.
9. Wang K., Ma X., Li J. Neural Network-Based Adaptive Swing Suppression Control for Tower Cranes With Obstacle Avoidance // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1109/TMECH.2024.3435794.

10.Widrow B., Lehr M. A. Perceptrons, Adalines, and backpropagation // Arbib. 1995. Vol. 4. P. 719–724.
11.Zhu Q., Du B., Yan P. Boundary-weighted domain adaptive neural network for prostate MR image segmentation // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2019. Vol. 39, No. 3. P. 753–763.
12.Ebhota V. C., Isabona J., Srivastava V. M. Investigating signal power loss prediction in a metropolitan island using ADALINE and multi-layer perceptron back propagation networks // International Journal of Applied Engineering Research. 2018. Vol. 13, No. 18. P. 13409–13420.
13.Sutawinaya I. P., Astawa I. N. G. A., Hariyanti N. K. D. Comparison of Adaline and multiple linear regression methods for rainfall forecasting // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 953, No. 1. Article 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/953/1/012046.
14.Valladares S., et al. Performance evaluation of the Nvidia Jetson Nano through a real-time machine learning application // Intelligent Human Systems Integration 2021: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2021): Integrating People and Intelligent Systems, February 22–24, 2021, Palermo, Italy. Springer International Publishing, 2021.

Інформація для авторів та читачів

Усі статті, що публікуються у журналі, проходять обов'язкове рецензування, яке здійснюється за анонімною формою як для авторів, так і для рецензентів (подвійне сліпе рецензування).

Унікальність текстів публікацій перевіряється за допомогою системи пошуку ознак плагіату Unicheck.

За достовірність викладених у статті фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор (автори).

Авторські права: за авторами зберігаються усі авторські права та права на видання без обмежень.

Журнал дозволяє користувачам: читати, завантажувати, копіювати, поширювати, друкувати та посилатися на повні тексти статей за умови зазначення авторства.

***

Information for authors and readers

All the articles that are published in the Journal must be peer reviewed. It is conducted anonymous both for authors and reviewers (double blind peer review).

The uniqueness of the texts of publications is checked with using the Unicheck plagiarism signs search system.

The authors take responsibilities for the reliability of stated facts, quotations and others statements in the articles.

Author's rights: the authors retained all copyrights and publishing rights with no limited publications.

The Journal allows users: to read, download, copy, distribute type and refer to the whole articles upon conditions of affiliation.

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ВИДАННЯ

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Випуск 51

ЖУРНАЛ
«СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ»
Луцький національний технічний університет
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна
e-mail: agrmash@lutsk-ntu.com.ua
http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32

JOURNAL
«AGRICULTURAL MACHINES»
Lutsk National Technical University
75 Lvivska st., Lutsk, 43018, Ukraine
e-mail: agrmash@lutsk-ntu.com.ua
http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32

Відповідальний за випуск: І.М. Дударєв
Комп'ютерна верстка: О.М. Гапонюк

Підписано до друку 30.10.2025 р., формат 60×84/8.
Ум. друк. арк. 16,51. Наклад 100.

Друк ПП Іванюк В.П.
43021 м. Луцьк, вул. Винниченка, 65
Свідоцтво Держкомінформу України ВЛН № 31 від 04.02.2004 р.

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення, рішення № 40 від 11.01.2024 року, ідентифікатор медіа R30-02454.