

О. А. БУРЛАКА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2296-7234

Б. В. СТУПАК

здобувач ступеня доктора філософії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0009-8015-2605

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРНОВОЇ КОВШОВОЇ НОРІЇ З ГРАВІТАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВИМ РОЗВАНТАЖЕННЯМ. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ

Наведено результати досліджень щодо оцінки якості транспортування та розвантаження зерна різноманітних сільськогосподарських культур норіями ковшового типу. Оціночними показниками визначено ступінь прямого та зворотного сипу зерна, ступінь механічного пошкодження та компресійного травмування зерна, питомі витрати енергії на транспортування зерна, матеріалоемність конструкції норії та ін. Експериментальні дослідження та виробничі випробування норії з модернізованими ківшами проведена на прикладі норії типу НФ (норія Фадеєва). Дані ковшові крутонахилені чи вертикально розташовані норії використовуються в комплексах виробничих ліній по очищенню та сепарації насіннєвого матеріалу основних сільськогосподарських культур. Відповідно одним з головних пріоритетів щодо визначення параметрів транспортування та розвантаження насіння сільськогосподарських культур є мінімізація механічного пошкодження та компресійного руйнування зерна. Обидва фактори впливають на відсоток проростання насіння, що є домінуючим фактором в даному випадку. Попередніми конструкційними розрахунками, компоувальними схемами та технологічними, просторовими, технічними обмеженнями було запропоновано до експериментальної перевірки та випробування два типу ківшів: ківш № 1 – є базовим варіантом норії типу НФ-1, має кут стінки висипання 43° ; ківш № 2 – експериментальний удосконалений нами за результатами графоаналітичних методів – відповідно має кут стінки висипання 30° . Швидкість транспортування зерна ковшовою стрічною була обрана дискретно, з урахуванням технічних характеристик енергетичного приводу такої стрічки, і складала 0,64 м/с і 0,76 м/с відповідно.

Експериментально доведено, що найбільш ефективним для норії типу НФ-1 є гравітаційно-відцентровий режим розвантаження, цей режим дозволяє максимально використовувати об'єм ковша, оскільки відцентрова сила сприяє попередньому перерозподілу зерна, пришвидшеному звільненню місткості ковша, що безпосередньо підвищує продуктивність та мінімізує просип насіння в шахту норії при розвантаженні. При швидкостях 0,76 м/с відцентрова сила створює необхідний інерційний «підпір», який виштовхує зерно з ковша раніше, ніж воно почне падати під дією власної ваги. Цей режим забезпечує стабільну траєкторію викиду, що мінімізує удари зерна об внутрішні стінки головки норії.

Використання експериментального ковша № 2 з розвантажувальною полицею 30° та спеціальним дном при роботі у гравітаційно-відцентровому режимі дозволило: для соняшнику: подолати парусність насіння та спрямувати його чітко у викидне вікно; для пшениці та сої: забезпечити стабільний виліт маси без «затирання» зерна між ковшем та стінкою шахти.

Щодо продуктивності транспортування зерна норією – на прикладі соняшнику встановлено, що підвищення швидкості з 0,64 м/с до 0,76 м/с збільшує продуктивність з 1,4 т/год до 2,28 т/год (на 62%), такий режим досягається завдяки крацюму наповненню ківшів та чіткій траєкторії вильоту, яка виключає затори в головці норії. Найвища продуктивність НФ-1 зафіксована при транспортуванні та гравітаційно-відцентровому розвантаженні сої 4,78 т/год., та пшениці озимої – 5,29 т/год., відповідно, завдяки їхній високій насипній щільності. При цьому норія НФ-1, обладнана експериментальними ківшами № 2, демонструє стабільний потік без критичного зростання енерговитрат.

Ключові слова: норія, ківш, гравітаційно-відцентрове розвантаження, просипання зерна, сільськогосподарські культури, продуктивність.



O. A. BURLAKA

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-2296-7234

B. V. STUPAK

Postgraduate Student
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0009-8015-2605

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GRAIN BUCKET CONVEYOR WITH GRAVITY-CENTRIFUGAL UNLOADING. THEORETICAL ASPECTS AND EXPERIMENTAL TESTS

The results of research on the assessment of the quality of transportation and unloading of grain from various agricultural crops using bucket-type elevators are presented. The assessment indicators determine the degree of direct and reverse grain flow, the degree of mechanical damage and compression injury to the grain, the specific energy consumption for grain transportation, the material intensity of the elevator structure, etc. Experimental research and production tests of elevators with modernised buckets were carried out using the NF type elevator (Fadeev elevator) as an example. These steeply inclined or vertically positioned bucket elevators are used in production line complexes for cleaning and separating seed material from major agricultural crops. Accordingly, one of the main priorities in determining the parameters for transporting and unloading agricultural seeds is to minimise mechanical damage and compression destruction of the grain. Both of these factors affect the germination rate of the seeds, which is the dominant factor in this case. Based on preliminary design calculations, layout diagrams, and technological, spatial, and technical limitations, two types of buckets were proposed for experimental verification and testing: bucket No. 1 is the basic version of the NF-1 type bucket elevator, with a discharge wall angle of 43°; bucket No. 2 – experimental, improved by us based on the results of graphical analysis methods – has a discharge wall angle of 30°. The speed of grain transportation by the bucket belt was selected discretely, taking into account the technical characteristics of the power drive of such a belt, and amounted to 0.64 m/s and 0.76 m/s, respectively.

It has been experimentally proven that the most effective for the NF-1 type elevator is the gravitational-centrifugal unloading mode, as this mode allows maximum use of the bucket volume, since the centrifugal force contributes to the preliminary redistribution of grain and accelerated emptying of the bucket, which directly increases productivity and minimises seed spillage into the elevator shaft during unloading. At speeds of 0.76 m/s, the centrifugal force creates the necessary inertial ‘back pressure’ that pushes the grain out of the bucket before it begins to fall under its own weight. This mode ensures a stable ejection trajectory, which minimises grain impact on the inner walls of the elevator head.

The use of experimental bucket No. 2 with a 30° unloading shelf and a special bottom when operating in gravitational-centrifugal mode made it possible: for sunflower seeds: to overcome the windage of the seeds and direct them precisely into the discharge window; for wheat and soybeans: ensure stable discharge of mass without ‘rubbing’ the grain between the bucket and the shaft wall.

Regarding the productivity of grain transportation by bucket elevator, using sunflower as an example, it has been established that increasing the speed from 0.64 m/s to 0.74 m/s increases productivity from 1.4 t/h to 2.28 t/h (by 62%). This mode is achieved through better filling of the buckets and a clear discharge trajectory, which eliminates jams in the elevator head. The highest productivity of the NF-1 was recorded during the transportation and gravitational-centrifugal unloading of soybeans (4.78 t/h) and winter wheat (5.29 t/h), respectively, due to their high bulk density. At the same time, the NF-1 elevator, equipped with experimental buckets No. 2, demonstrates a stable flow without a critical increase in energy consumption.

Key words: elevator, bucket, gravity-centrifugal unloading, grain spillage, agricultural crops, productivity.

Постановка проблеми

Нині широкого розповсюдження набули транспортні системи, ключовими ланками котрих є крутонахилені чи вертикально розташовані скребкові та ковшові норії. Такі норії мають досить великий діапазон по продуктивності транспортування зерна (до 100 тон за годину і більше), використовуються як на зернозбиральних комбайнах [2, 8, 11], так і у якості складових елеваторного обладнання.

Якість транспортування та розвантаження зерна різноманітних сільськогосподарських культур норіями ковшового типу можливо оцінити за рахунок таких показників, як ступінь прямого та зворотного сипу зерна, ступінь механічного пошкодження та компресійного травмування зерна, питомі витрати енергії на транспортування зерна, матеріалоемність конструкції норії та ін.

Відомо, що за типом розвантаження норії поділяють на норії з гравітаційним розвантаженням, норії з гравітаційно-відцентровим розвантаженням та норії з відцентровим розвантаженням [4, 5]. Така класифікація визначається на основі співвідношення сили тяжіння зерна та відцентрової сили в зоні розвантаження.

Ковшові норії з відцентровим розвантаженням в основному використовують у складі елеваторного обладнання для транспортування товарного зерна. Virізнюються норії відцентрового розвантаження підвищеною продуктивністю транспортування зерна, але при цьому мають і відносно значний рівень механічного руйнування та компресійного пошкодження зерна під час транспортування та розвантаження. Як правило швидкість транспортування норій з відцентровим розвантаженням, що використовуються у складі елеваторного обладнання, є постійною, відповідного не враховуються особливості транспортування зерна різноманітних сільськогосподарських культур [4, 5, 10].

У межах даного дослідження нами пропонувано розглянути особливості технологічного процесу транспортування та розвантаження зерна різноманітних сільськогосподарських культур ковшовими норіями з гравітаційним та гравітаційно-відцентровим типами розвантаження.

В нашому випадку частина експериментального дослідження та виробничого випробування норій з модернізованими ківшами проведена на прикладі норії типу НФ (норія Фадєєва). Дані ковшові крутонахилені чи вертикально розташовані норії використовуються в комплексах виробничих ліній по очищенню та сепарації насінневого матеріалу основних сільськогосподарських культур. Відповідно одним з головних пріоритетів щодо визначення параметрів транспортування та розвантаження насіння сільськогосподарських культур є мінімізація механічного пошкодження та компресійного руйнування зерна. Обидва фактори впливають на відсоток проростання насіння, що є домінуючим фактором в даному випадку.

Відповідно, використання відносно високопродуктивних ковшових норій для транспортування насінневого матеріалу не є розповсюдженим саме за причиною механічного пошкодження зерна (удари при розвантаженні, удари між зерном та робочими органами ковшової норії...).

Тому нами обрано тематику дослідження, що спрямована на удосконалення технологічного процесу транспортування та гравітаційного, або в залежності від швидкості транспортування – гравітаційно-відцентрового розвантаження зерна ковшовою норією.

Така тема являється актуальною відносно транспортних систем, що використовуються у складі зерноочисних комплексів по калібруванню та підготовці насінневого матеріалу основних сільськогосподарських культур. При цьому дане дослідження спрямоване на підвищення, в тому числі, енергоефективності технологічного обладнання в системі первинної переробки сільськогосподарської продукції зернового підкомплексу аграрного виробництва та покращення екологічності аграрної продукції [7, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Обрана тематика є широко представленою в наукових звітах відомих українських вчених. Наприклад, щодо законів, закономірностей та особливостей технологій зерновиробництва, технологічних процесів збирання сільськогосподарських культур, транспортування сипкого технологічного матеріалу, сепарації та транспортування насіння основних сільськогосподарських культур, і в тому числі, з використанням скребкових норій, ковшових норій, представлені у наукових працях: Погорілого Л. В., Шейченка В. О., Адамчука В. В., Босойго Е. С. та ін. [1, 3].

Питання щодо створення та використання математичних моделей по віднайденню закономірностей технологічних процесів транспортування та відцентрового розвантаження зерна скребковими норіями розглянуто вченими у працях [6, 8, 10].

Наукові звіти відносно результатів експериментального дослідження та практичної перевірки якості транспортування та розвантаження зерна норіями містять публікації [4, 5, 10].

Але, в умовах сьогодення розвиток технологій сільськогосподарського виробництва є безперервним процесом. В останній час все більше інновацій впроваджуються у виробничу сферу сільського господарства. Цифровізація технологічних процесів, поширення комп'ютеризованих систем, які отримують, обробляють та систематизують інформацію щодо характеристик транспортування насіння, закономірностей та тенденцій проходження зернових потоків при норійному транспортуванні зерна різноманітних сільськогосподарських культур, є системними явищами.

Відповідно, розвиток агровиробництва та, насінництва зокрема, спонукає до систематичного підвищення рівня екологічності та енергоефективності продукції [7, 9]. З урахуванням вищезгаданого, актуальність подальших досліджень щодо удосконалення якісних та кількісних характеристик різноманітних ковшових норій, в тому числі з гравітаційним та гравітаційно-відцентровим типом розвантаження, є одним із актуальних питань сьогодення.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є покращення кількісних та якісних параметрів транспортування та розвантаження насіння основних сільськогосподарських культур ковшовими вертикально змонтованими та крутонахиленими норіями з гравітаційним та гравітаційно-відцентровим типом розвантаження.

Завдання досліджень:

- на основі результатів математичних розрахунків, що описують закономірності руху зерна по поверхні ковшів вертикально розташованої норії при гравітаційному та гравітаційно-відцентровому розвантаженні зерна, здійснити експериментальну перевірку роботи таких транспортних систем за умови використання модернізованих ковшів з різними конструкційними характеристиками.
- надати практичні рекомендації щодо покращення режимів транспортування та гравітаційного, гравітаційно-відцентрового розвантаження насіння основних сільськогосподарських культур ковшовими норіями типу НФ.
- визначити стратегічні напрямки подальшого наукового дослідження за обраною тематикою удосконалення кількісних та якісних характеристик транспортування насіннєвого матеріалу ковшовими вертикально розташованими норіями ощадними норіями типу НФ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Попередніми конструкційними розрахунками, компоувальними схемами та технологічними, просторовими, технічними обмеженнями було запропоновано до експериментальної перевірки та випробування два типу ковшів (рис. 1). Ківш № 1 – є базовим варіантом норії типу НФ-1, має кут стінки висипання 43° . Ківш № 2 – експериментальний удосконалений нами за результатами графо-аналітичних методів – відповідно має кут стінки висипання 30° . Щодо методичних складових експериментального дослідження, то швидкість транспортування зерна ковшовою стрічною була обрана дискретно, з урахуванням технічних характеристик енергетичного приводу такої стрічки, і складала $0,64$ м/с і $0,76$ м/с відповідно.

Щодо основних відмінностей по конструкції удосконаленого нами ковша, то, в такому випадку, кут розвантаження насіння сільськогосподарських культур зменшений до 30° , та добавлена додаткова пласка стабілізуюча полка довжиною 22 мм. (рис. 1). Щодо конструктивного обґрунтування впровадження полки довжиною 22 мм для експериментального ковша – то це збільшення корисного об'єму. Завдяки зміні профілю вдалося оптимізувати внутрішній простір, піднявши розрахунковий корисний об'єм до $0,272$ л. проти $0,221$ л. у першому зразку, тобто збільшити на $23,1\%$.

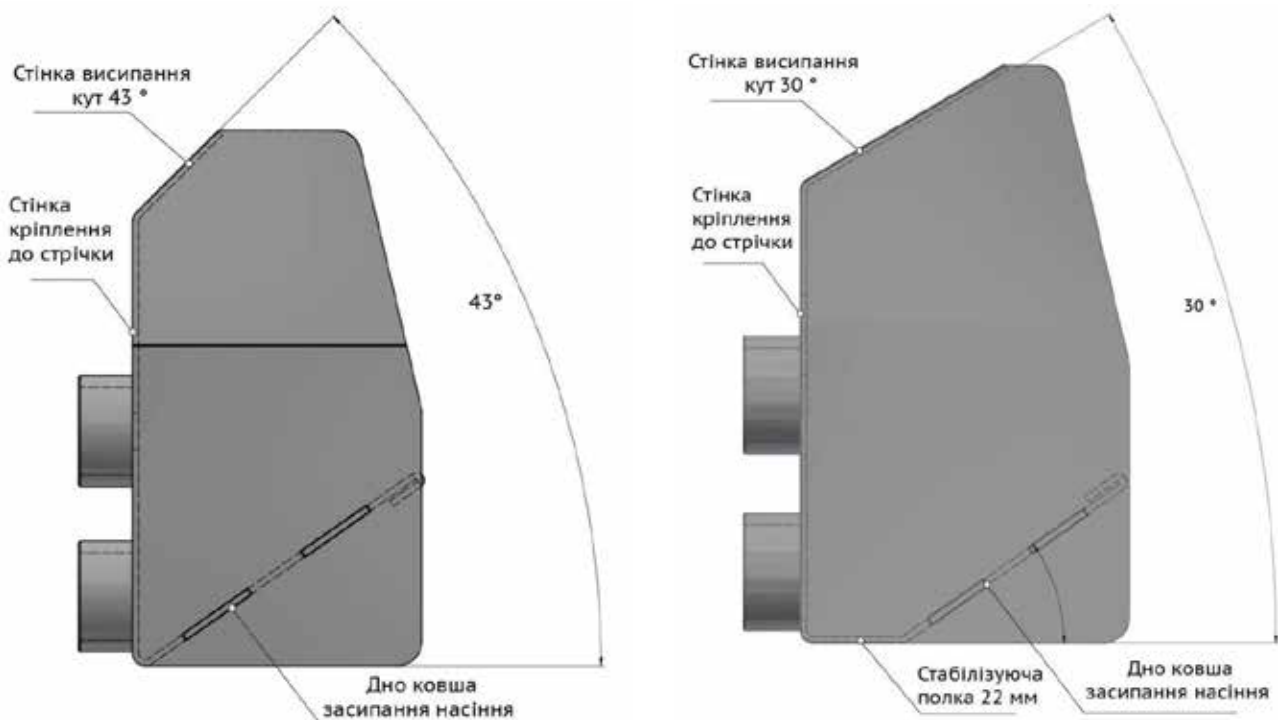


Рис. 1. Конструктивно-компоувальні схеми ковшів № 1 та № 2, що використовувались для проведення порівняльних експериментальних досліджень ощадної норії типу НФ-1 (удосконалено авторами)

Нахил передньої стінки експериментального ковша у 30° обумовлено виключно конструктивними особливостями удосконалення норії НФ-1 (рис. 2а).

Після додавання стабілізуючої полиці утворилась ситуація коли верхня частина ковша мала гранично допустимі розміри кута нахилу для забезпечення раціонального компоування робочих органів усередині шахти.

Подальше збільшення кута є неможливим, оскільки це призвело б до порушення габаритних параметрів ковша, його зіткнення з наступним кошем. Подальше зменшення такого кута – менше 30° створить більший відсоток просипу насіння при завантаженні норії.

Припускаємо, що процес гравітаційного розвантаження, щодо часу вивільнення ковша, можливо охарактеризувати за допомогою вертикальної та горизонтальної проєкцій швидкості руху зернини по внутрішній поверхні.

Горизонтальна складова швидкості V_x відповідає за дальність винесення зернового потоку вперед, що забезпечує «чистий переліт» через спинку попереднього ковша прямо в розвантажувальний патрубок.

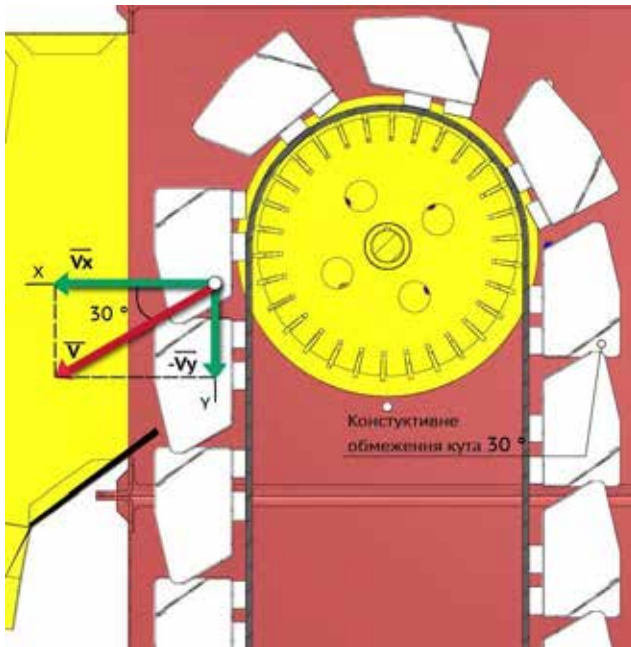


Рис. 2а. Щодо обґрунтування конструктивних обмежень при виборі кута розвантаження експериментального ковша

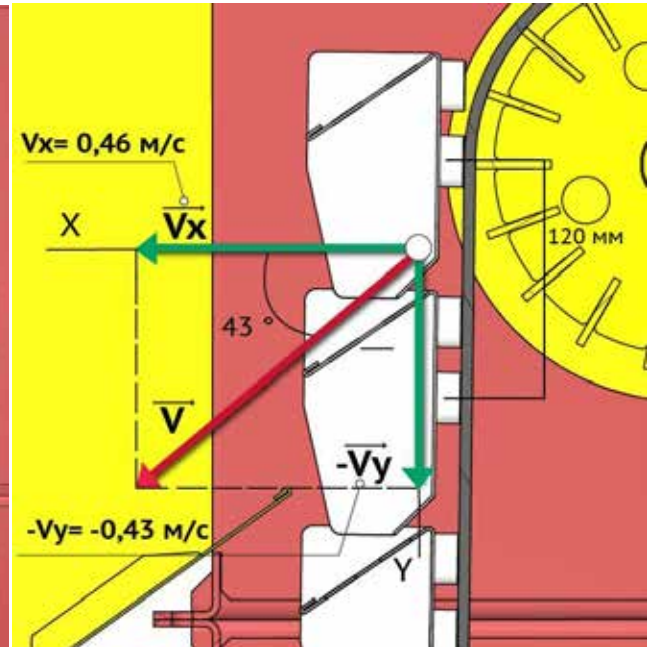


Рис. 2б. Схема розкладання вектору швидкості зсипання зерна з ковша № 1 при швидкості стрічки 0,64 м/с

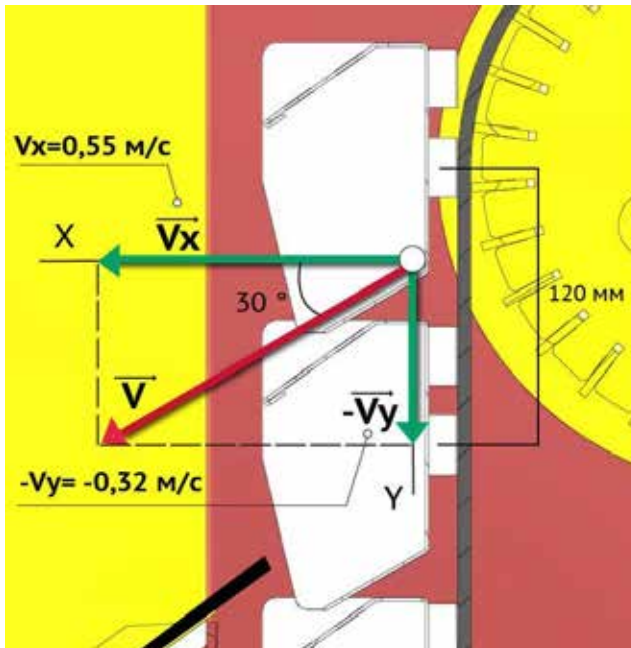


Рис. 2в. Схема розкладання вектору швидкості зсипання зерна з ковша № 2 при швидкості стрічки 0,64 м/с

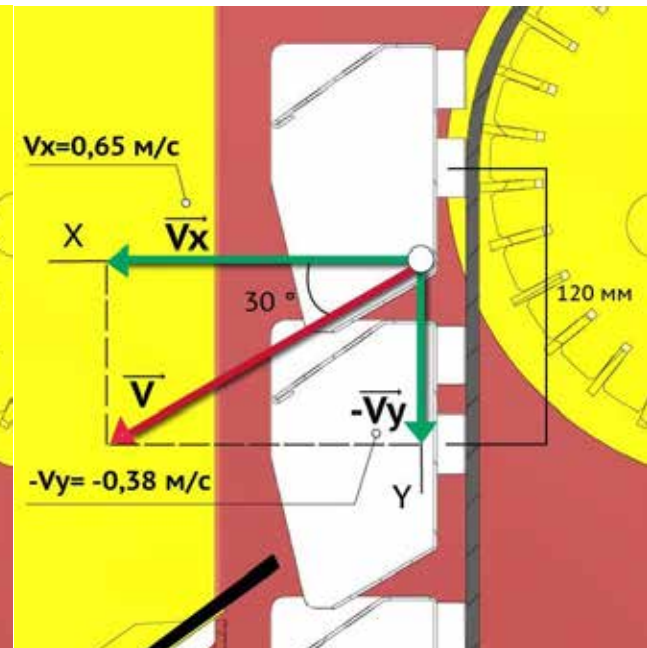


Рис. 2г. Схема розкладання вектору швидкості зсипання зерна з ковша № 2 при швидкості стрічки 0,76 м/с

Вертикальна складова швидкості V_y сприяє відносному переміщенню зерна вгору по внутрішній стінці ковша, не даючи йому випадати завчасно. Останнє запобігає «засипанню під себе» та поверненню насіння у висхідну шахту норії.

На рис. 2б та рис. 2в представлена базова кінематика для ковша № 1 і № 2 при швидкості 0,64 м/с. На рис. 2г – представлена кінематика для ковша № 2 при швидкості 0,76 м/с.

Опис елементів характеристик проєкцій швидкості руху зерна по внутрішній поверхні ковша подано в табл. 1 та візуалізовано на рис. 3.

Таблиця 1

Порівняння параметрів проєкцій швидкості розвантаження зерна з базовими ківшами № 1 та експериментальними ківшами № 2 для норії НФ-1

Тип ковша (кут)	Горизонтальна складова (V_x), м/с	Вертикальна складова (V_y), м/с	Характеристика вектора швидкості
Ківш № 1 (43°) швидкість 0,64 м/с	0,46	0,43	Домінує вертикальна складова траєкторія крута та коротка
Ківш № 2 (30°) швидкість 0,64 м/с	0,55	0,32	Зростання горизонтальної складової швидкості за рахунок зміни геометрії ковша
Ківш № 2 (30°) швидкість 0,76 м/с	0,65	0,38	Оптимальна швидкість вильоту зерна; пологий вектор для повноти розвантаження зерна

Отримано:

– Швидкісний чинник – підвищення швидкості до 0,76 м/с для модернізованого ковша надає потоку зерна збільшення швидкості проходження по внутрішній поверхні ковша V_x 0,65 м/с. Це забезпечує таку траєкторію, при якій зерно гарантовано омине спинку наступного ковша.

– Найбільша ефективність досягається саме при поєднанні кута 30° та швидкості 0,76 м/с (ківш № 2), оскільки це створює найбільше для даних умов значення вектору швидкості сходження зерна, що мінімізує будь-які механічні перешкоди на шляху потоку.

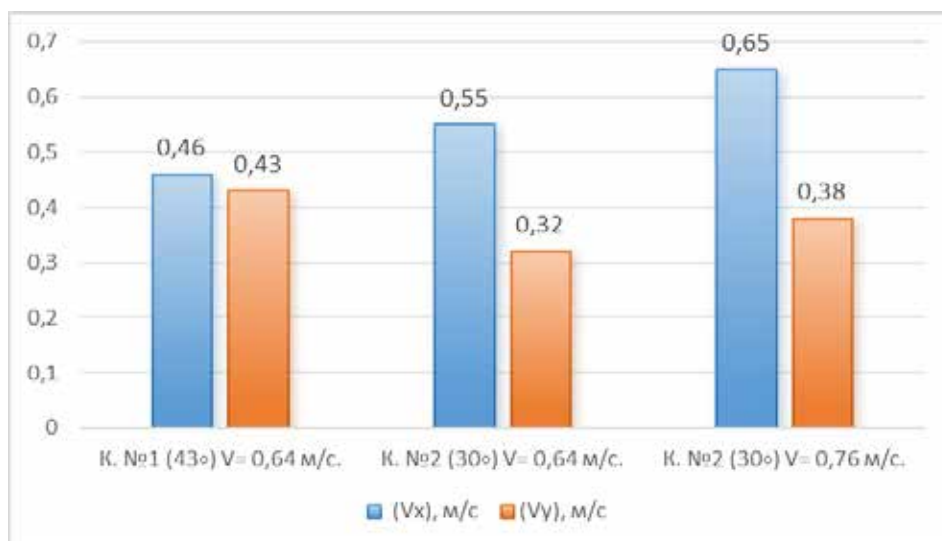


Рис. 3. Порівняльна діаграма проєкцій швидкості руху зерна по внутрішній поверхні ковшів норії НФ-1

Експериментальні випробування базувалися на серії, з кратністю, більше десяти повторів, контрольних запусків модернізованої норії НФ-1, оснащеної ковшами № 1 (базовий) і № 2 (з кутом розвантаження 30° та полицею 22 мм). Дослідження проводилися для трьох видів сільськогосподарських культур – пшениці, сої та соняшнику, що дозволило оцінити роботу обладнання з насінням різної насипної щільності та текучості.

У ході кожного експерименту фіксувалася маса порції зерна $m_{факт}$ чистий час її проходження через норію $t_{факт}$, просип в черевик норії $m_{просип}$. Результати експерименту подано в табл. 2 та табл. 3.

Порядок проведення вимірювань полягав у наступному:

1. Підготовка порцій: Для кожної культури формувалася контрольна наважка зерна фіксованої маси (наприклад, 14,7 кг для пшениці). Перед запуском зерно засипалося у приймальний бункер.

2. Налаштування режимів: Швидкість стрічки була встановлена на рівні 0,64 і 0,76 м/с. Експерименти проводилися в 3-х положеннях регулювальної заслінки: 30мм, 50 мм при швидкості 0,64 м/с та 60 мм при швидкості 0,76 м/с тільки з ковшем № 2, що дозволило моделювати різну інтенсивність подачі.

3. Фіксація часових показників: За допомогою секундоміра вимірювався чистий час проходження всієї порції через норію – від моменту відкриття заслінки до виходу останньої зернини з розвантажувального патрубку.

4. Збір та зважування просипу: Після кожного циклу проводилося ретельне очищення «черевика» норії. Маса зерна, що випала у зворотний потік (просип), зважувалася на електронних вагах із точністю до 1 грама.

5. Контроль заповнення: Паралельно з вимірюваннями здійснювалася фото- та відеофіксація процесу завантаження ковшів для візуального підтвердження ступеня їх наповнення та стабільності траєкторії вильоту зерна.

Обробка отриманих результатів полягала, в тому числі, в розрахунку фактичної продуктивності Q (т/год) та відносного показника втрат (%). Порівняння просипу при ступені відкриття заслінки 50 і 60 мм.

Визначення годинної продуктивності (Q). На цьому етапі фактична маса порції зерна співвідносилася з часом її проходження.

$$Q = 3,6 \cdot m_{\text{факт}} / t_{\text{факт}}, \quad (1)$$

де: $m_{\text{факт}}$ – фактична маса зерна, отримана під час заміру; $t_{\text{факт}}$ – час проходження даної маси через норію; 3,6 – коефіцієнт перерахунку одиниць вимірювання.

На прикладі озимої пшениці, представлений розрахунок є базовим для всіх серій випробувань продуктивності ковша норії НФ-1 при $V = 0,76$ м/с. Отримані значення продуктивності наведено у таблиці 2.

Визначення частоти проходження ковшів (n); визначення секундної продуктивності що проходить через норію ($Q_{\text{сек}}$); розрахунок маси зерна в одному ковші ($m_{\text{ковш}}$); визначення об'єму порції зерна в одному ковші № 2 було здійснено за стандартними методиками щодо проєктування основних параметрів зернових норій.

Визначення ступеня заповнення. Цей показник відображає відношення об'єму зерна до повної геометричної місткості ковша. Порівняння заповнення ковша № 2 при різній продуктивності дало змогу оцінити, який «запас» простору залишається для запобігання просипанню. У випадку завантаження норії зерновим потоком з відкриттям заслінки 60 мм – ківш заповнений на 100%.

Отримані експериментальні значення по визначенню якості транспортування зерна норією НФ-1, обладнаною як базовими, так і експериментальними ковшами, при швидкості стрічки 0,64 м/с містить табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльні результати експериментальних даних по визначенню якості транспортування зерна норією НФ-1 при швидкості стрічки 0,64 м/с

№ експерименту	Культура	Ківш №, кут	Заслінка, мм	Маса насіння, г	Час розвантаження маси, с	Продуктивність Q , т/год	Просип, г	Об'єм ковша, л	Заповнення ковша, %	Просип, %
1	Пшениця	№ 2 (30°)	30	13,35	34	1,41	250	0,27	36,1	1,87
2		№ 2 (30°)	50	15,65	17	3,31	1000	0,27	84,6	6,39
3		№ 1 (43°)	30	15,6	42,7	1,32	500	0,22	41,3	3,2
4		№ 1 (43°)	50	14,9	17	3,16	1000	0,22	99,1	6,71
5	Соя	№ 2 (30°)	30	15,7	38	1,49	250	0,27	38,0	1,59
6		№ 2 (30°)	50	15,65	20	2,82	300	0,27	71,9	1,92
7		№ 1 (43°)	30	14,65	39,5	1,34	350	0,22	42,0	2,39
8		№ 1 (43°)	50	15,7	18	3,14	450	0,22	98,7	2,87
9	Соняшник	№ 2 (30°)	30	7,8	40	0,7	100	0,27	35,4	1,28
10		№ 2 (30°)	50	8,15	21	1,4	350	0,27	70,4	4,29
11		№ 1 (43°)	30	7,8	47	0,6	400	0,22	37,1	5,13
12		№ 1 (43°)	50	7,4	21	1,27	350	0,22	78,7	4,73

Визначення відносних показників просипу зерна (Ψ). Для об'єктивної оцінки ефективності модернізації необхідно визначити не лише абсолютну масу втрат, а й відносний показник осипу. Це дозволяє порівняти роботу ковшів № 2 та № 1 незалежно від загальної маси порції, що проходила через норію.

$$\Psi = m_{\text{просип}} / m_{\text{факт}}, \% \quad (2)$$

де: $m_{\text{просип}}$ – маса зерна, зібрана в черевіку норії (осип); $m_{\text{факт}}$ – фактична маса контрольної порції зерна.

Отримані експериментальні значення по визначенню якості транспортування зерна норією НФ-1, обладнаною як базовими, так і експериментальними ковшами, при швидкості стрічки 0,76 м/с містить табл. 3.

Таблиця 3

Порівняльні результати експериментальних даних по визначенню якості транспортування зерна норією НФ-1 при швидкості стрічки 0,76 м/с

№ експерименту	Культура	Ківш №, кут	Заслінка, мм	Маса насіння, г	Час розвантаження маси, с	Продуктивність Q, т/год	Просип, г	Об'єм ковша, л	Заповнення ковша, %	Просип, %
1	Пшениця	№ 2 (30°)	50	14,7	18	2,94	91	0,27	63	0,62
2		№ 2 (30°)	60	14,7	10	5,29	106	0,27	100	0,72
3	Соя	№ 2 (30°)	50	14,6	17,4	3,04	50	0,27	100	0,34
4		№ 2 (30°)	60	14,7	11	4,78	50	0,27	100	0,34
5	Соняшник	№ 2 (30°)	50	7,95	20	1,43	50	0,27	56,5	0,63
6		№ 2 (30°)	60	7,9	12,5	2,28	50	0,27	100	0,63

За результатами отриманих експериментальних даних (табл. 1, табл. 2) можливо зазначити: кращий режим транспортування та розвантаження насіння різноманітних сільськогосподарських культур (пшениця, соя, соняшник) норією НФ-1 за умови зменшення механічного та компресійного пошкодження насіння, зменшення прямого і зворотного просипу насіння, отримано при використанні експериментальних ковшів № 2 з кутом внутрішньої стінки 30°, дообладнаних додатково полицею, що дало збільшити швидкість транспортування стрічки норії до 0,76 м/с.

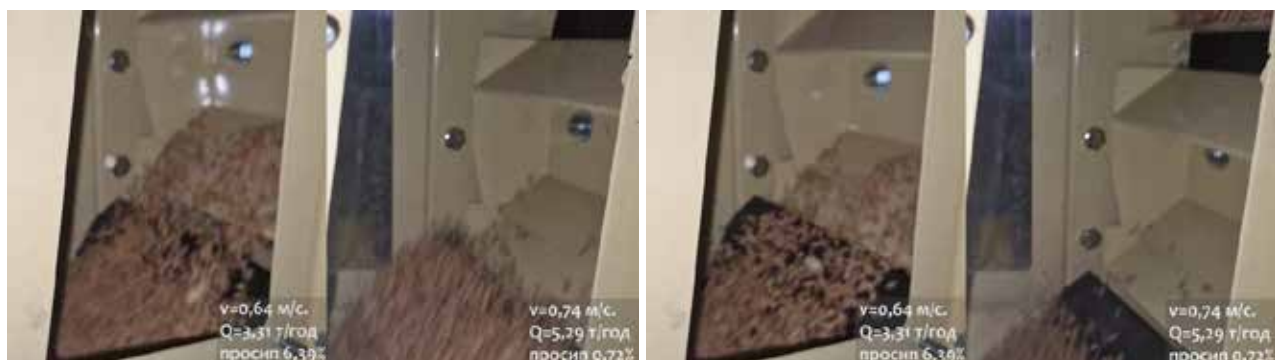
Для детального вивчення впливу геометрії ковша на процес спорожнення було проведено пофазову фотофіксацію руху зернового струменя за допомогою Slow-motion відео. Дослідження кожної культури (пшениці, сої та соняшнику) здійснювалося за ідентичним алгоритмом з продуктивністю 50 і 60 мм заслінки, що дозволило порівняти поведінку різних за натурою та тертям насіння у однакових умовах.

Процес розвантаження був розділений на чотири контрольні фази, кожна з яких відображає критичний момент формування траєкторії:



Фаза 1. Початок розвантаження

Фаза 2. Інтенсивний вихід насіння з ковша



Фаза 3. Фінальне сходження насіння з ковша

Фаза 4. Повне вивільнення ковша

Рис. 4. Візуалізація динаміки розвантаження потоку пшениці з ковша № 2 при продуктивності 3,31 і 5,29 т/год та швидкості 0,64 і 0,76 м/с

Фаза 1. Початок розвантаження та формування траєкторії вильоту зерна. Фіксація моменту виходу перших шарів насіння.

Фаза 2. Стадія інтенсивного виходу зерна з ковша. Візуальний аналіз основної маси потоку, оцінка товщини струменя та його дистанції від осі барабана.

Фаза 3. Сходження зернової маси з робочої поверхні ковшів: Дослідження динаміки «хвоста» порції та перевірка ефективності кута 30° у запобіганні вертикальному падінню залишків.

Фаза 4. Повне вивільнення ковша та завершення викиду зерна. Контроль чистоти ковша після виходу з робочої зони та фіксація рециркуляції (зворотного сипання).

Порівняння фаз 1-4 розвантаження пшениці показує, що при вищій швидкості потік стає згуртованим і чітко перелітає зону просипу. Збільшення швидкості з $0,64$ до $0,76$ м/с разом із новим кутом ковша (30°) знизило просип з $6,39\%$ до $0,72\%$ при зростанні продуктивності до $5,29$ т/год (рис. 4).

При швидкості $0,76$ м/с потік сої стає максимально згуртованим, що добре видно на перших двох фазах розвантаження (рис. 5) Завдяки кулястій формі та високій текучості насіння, воно миттєво реагує на відцентрову силу та притискається до передньої стінки модернізованого ковша з кутом 30° . На третій фазі чітко помітно, що швидкість $0,76$ м/с дозволяє зерну перелітати зону зворотного висипання, тоді як при швидкості $0,64$ м/с значна частина потоку розсіюється. Це дозволило знизити відсоток просипу сої з $1,92\%$ до мінімальних $0,34-0,72\%$. На заключній фазі підтверджується повний вихід зерна з об'єму ковша без залишку. Такий режим роботи забезпечив ріст продуктивності на сої до $4,78$ т/год, що відповідає повному робочому заповненню ковшів на рівні 100% (рис. 5).



Фаза 1. Початок розвантаження

Фаза 2. Інтенсивний вихід насіння з ковша

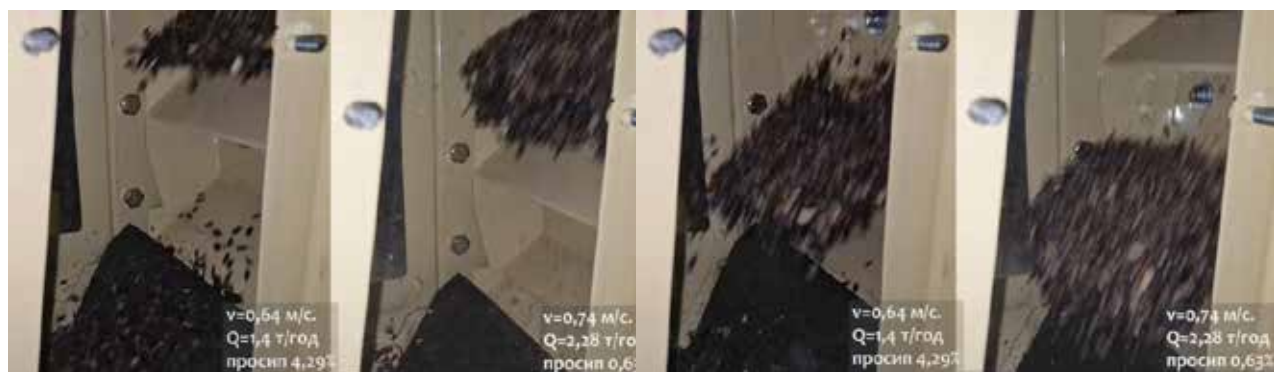


Фаза 3. Фінальне сходження насіння з ковша

Фаза 4. Повне вивільнення ковша

Рис. 5. Візуалізація динаміки розвантаження потоку сої з ковша № 2 при продуктивності $2,82$ і $4,78$ т/год та швидкості $0,64$ і $0,76$ м/с

Щодо транспортування і розвантаження соняшника – фаза 1 та 2 (початок викиду рис. 6): на швидкості $0,64$ м/с спостерігається нестабільна траєкторія. Значна частина насіння не встигає вилетіти в розвантажувальний патрубков і падає вниз зворотнім осипом. Фаза 3 та 4 – завершення викиду: при швидкості $0,76$ м/с потік зерна більш згуртований та спрямований чітко за інерційною траєкторією. Це дозволяє майже повністю уникнути зворотного просипу. Збільшення швидкості всього на $0,1$ м/с дозволило не тільки підвищити продуктивність на 62% , а й вагомо знизити рівень просипу – з $4,29\%$ до $0,63\%$.



Фаза 1. Початок розвантаження

Фаза 2. Інтенсивний вихід насіння з ковша



Фаза 3. Фінальне сходження насіння з ковша

Фаза 4. Повне вивільнення ковша

Рис. 6. Візуалізація аналізу динаміки розвантаження та траєкторії потоку соняшника ковша № 2 при продуктивності 2,82 і 4,78 т/год та швидкості 0,64 і 0,76 м/с

Висновки

1. При оцінюванні характеру роботи та режиму розвантаження ковшової норії експериментально доведено, що найбільш ефективним для норії типу НФ-1 є гравітаційно-відцентровий режим розвантаження. Такий режим дозволяє максимально використовувати об'єм ковша, оскільки відцентрова сила сприяє попередньому перерозподілу зерна, пришвидшеному звільненню місткості ковша, що безпосередньо підвищує продуктивність та мінімізує просип насіння в шахту норії при розвантаженні. При швидкостях 0,76 м/с відцентрова сила створює необхідний інерційний «підпір», який виштовхує зерно з ковша раніше, ніж воно почне падати під дією власної ваги. Цей режим забезпечує стабільну траєкторію викиду, що мінімізує удари зерна об внутрішні стінки головки норії.

2. За результатами аналізу візуалізації динаміки розвантаження та траєкторій зернового потоку по сільськогосподарським культурам:

- при транспортуванні та розвантаженні соняшника – через низьку натурну вагу соняшник найбільш схильний до зворотного просипу через повітряні потоки; перехід у гравітаційно-відцентровий режим дозволив сформувати згуртований потік зерна, що знизило втрати з 4,29% до 0,63%;

- при транспортуванні та розвантаженні озимої пшениці – у гравітаційно-відцентровому режимі пшениця виходить із ковша відносно швидко; конструкція експериментального ковша № 2 з полицею 22 мм забезпечує повне вивільнення від зерна, останнє дає змогу працювати на максимальній продуктивності 5,29 т/год., просип при цьому складає 0,72%;

- при транспортуванні та розвантаженні сої – завдяки формі та масі соя має значну інерцію, у поєднанні з відцентровою силою це забезпечує найбільш точне потрапляння в розвантажувальний патрубок; дослідження підтвердило, що для сої цей режим є оптимальним для запобігання пошкодженню оболонки зерна при ударах, при продуктивності 4,78, просип складає 0,34%

3. Використання ковша з розвантажувальною полицею 30° та спеціальним дном при роботі у гравітаційно-відцентровому режимі дозволило: для соняшнику: враховувати парусність насіння та спрямувати його чітко у викидне вікно; для пшениці та сої: забезпечити стабільний виліт маси без «затирання» зерна між ковшем та стінкою шахти.

4. Відносно продуктивності транспортування зерна норією – на прикладі соняшнику встановлено, що підвищення швидкості з 0,64 м/с до 0,76 м/с збільшує продуктивність з 1,4 т/год до 2,28 т/год (на 62%), такий режим досягається завдяки кращому наповненню ковшів та покращеній траєкторії вильоту, яка виключає затори в голові норії. Найвища продуктивність НФ-1 зафіксована при транспортуванні та гравітаційно-відцентровому розвантаженні сої 4,78 т/год., та пшениці озимої – 5,29 т/год., відповідно, завдяки їхній високій насипній щільності. При цьому норія НФ-1, обладнана експериментальними ковшами № 2, демонструє стабільний потік без критичного зростання енерговитрат.

Список використаної літератури

1. Артёмов М. П. та ін. Технологічна блочно-варіантна система машиновикористання в землеробстві України. Частина 2. : монографія. Харків : ТОВ «Планета-Прінт», 2022. 192 с.
2. Установа для дослідження технологічних процесів елеватора комбайна: Пат. 41504 Україна : МПК (2009) A01D 41/00 № u 2008 14677; заявл. 22.12.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.
3. Погорілий Л., Івасюк В., Соломаха О. До практичної реалізації моніторингу ґрунтів у системі точного землеробства. *Техніка АПК*. 2002. № 10-11. С. 8–9.
4. Спосіб дослідження технологічних процесів Пат. 41557, Україна: МПК (2009) A01D 41/00 № u 2008 15248; заявл. 29.12.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.
5. Установа для дослідження технологічних процесів елеватора комбайна Пат. 91783 Україна: МПК(2009) A01D 61/00, A01D 93/00 №: а 2009 01515; заявл. 23.02.2009; опубл. 25.08.2010, Бюл. № 16.
6. Bilovod O., Kelemesh A., Burlaka O., Tarasenko D. Study of the features of grain transportation of various agricultural crops by scraper elevators of combine harvesters. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 2 (129). С. 98–105. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-12>
7. Бурлака О. А., Яхін С. В. Теоретичні аспекти процесу відцентрового розвантаження зерна у елеваторі зернозбирального комбайну. *Вісник Полтавської державної академії*. 2017. № 1–2 (84–85). С. 139–143.
8. Krajewski S., Żukovskis J., Gozdowski D., Cieśliński M., Wójcik-Gront E. 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*. 2024. 14, 477. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030477>
9. Бурлака О. А., Яхін С. В. Підвищення ефективності роботи скребкових елеваторів з відцентровим типом розвантаження. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. № 4. С. 195–200. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.04.31>
10. Imelda, Hidayat R. Climate change impacts, adaptation and mitigation in the agricultural sector. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2024. Vol. 10, Issue 3. P. 1457–1476. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.03.30>
11. Бурлака О., Яхін С., Падалка В., Бурлака А. 100 тон за годину, а що далі? Порівнюємо та аналізуємо характеристики флагманських моделей високопродуктивних зернозбиральних комбайнів. *Scientific Progress & Innovations*. 2021. (3), 274–288. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34>

References

1. Artomov, M.P. et al. (2022). *Tekhnolohichna blochno-variantna sistema mashynovykorystannia v zemlerobstvi Ukrainy* [Technological block-variant system of machine use in agriculture in Ukraine]. Part 2.: monograph. Kharkiv : TOV «Planeta-Print» [in Ukrainian].
2. Burlaka, O. (2009). Ustanovka dlia doslidzhennia tekhnolohichnykh protsesiv elevatora kombaina [Installation for researching technological processes of a combine elevator] (Ukraine Patent No. 41504). State Department of Intellectual Property of Ukraine.
3. Pohorilyi, L., Ivasiuk, V., & Solomakha, O. (2002). Do praktychnoi realizatsii monitorynhu gruntiv u systemi tochnoho zemlerobstva [Towards the practical implementation of soil monitoring in the precision agriculture system]. *Tekhnika APK, 10-11*, 8–9 [in Ukrainian].
4. Burlaka, O. (2009). Sposib doslidzhennia tekhnolohichnykh protsesiv [Method of researching technological processes] (Ukraine Patent No. 41557). State Department of Intellectual Property of Ukraine.
5. Burlaka, O. (2010). Ustanovka dlia doslidzhennia tekhnolohichnykh protsesiv elevatora kombaina [Installation for researching technological processes of a combine elevator] (Ukraine Patent No. 91783). State Department of Intellectual Property of Ukraine.
6. Bilovod, O., Kelemesh, A., Burlaka, O., & Tarasenko, D. (2025). Study of the features of grain transportation of various agricultural crops by scraper elevators of combine harvesters. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 2(129), 98–105. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-12>
7. Burlaka, O., & Yakhin, S. (2017). Teoretychni aspekty protsesu vidtsentrovoho rozvantazhennia zerna u elevatori zernozbyrального kombainu [Theoretical aspects of the process of centrifugal unloading of grain in the elevator of a combine harvester]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi akademii, 1–2*(84–85), 139–143 [in Ukrainian].

8. 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, 477. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030477>
9. Burlaka, O., & Yakhin, S. (2018). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty skrebkovykh elevatoriv z vidtsentrovym typom rozvantazhennia [Increasing the efficiency of scraper elevators with centrifugal unloading type]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi akademii*, 4, 195–200. <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.04.31> [in Ukrainian].
10. 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>.
11. Burlaka, O., Yakhin, S., Padalka, V., & Burlaka, A. (2021). 100 ton za hodynu, a shcho dali? Porivniuiemo ta analizuiemo kharakterystyky flahmanskykh modelei vysokoproduktyvnykh zernozbyralnykh kombainiv [100 tons per hour, what is next? Let us compares and analyzes characteristics of the latest models of highly productive combine harvesters]. *Scientific Progress & Innovations*, (3), 274–288. <https://doi.org/10.31210/visnyk2021.03.34> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 18.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026