

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ДАЦЮК ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ

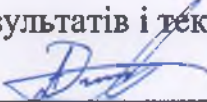
УДК 629.3.012:631.331:582.4 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ
ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР

13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Дмитро ДАЦЮК

Науковий керівник:
ЯРОПУД Віталій Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2024

АНОТАЦІЯ

Дацюк Д.А. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 Механічна інженерія) – Вінницький національний аграрний університет, Міністерство освіти і науки України, Вінниця, 2024.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесу сівби насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом удосконалення конструкції висівного апарату селекційної сівалки із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів.

Об'єкт дослідження – технологічний процес взаємодії робочого органу висівного апарату удосконаленої селекційної сівалки із насінневим матеріалом дрібнонасінневих культур.

Предмет досліджень – залежність показників якості висіву і продуктивності від конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату удосконаленої селекційної сівалки у відповідності із технологічними вимогами і фізико-механічними властивостями насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур.

Методи досліджень. В основу теоретичних досліджень покладені методи чисельного моделювання з використанням основних положень теорій класичної механіки, газодинаміки, ймовірності, пружності, моделей дискретних елементів, багатофазної взаємодії, Лагранжевої багатофазності. При цьому застосовувалися методи диференційного та інтегрального числення.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням математичного методу планування експерименту, методів натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснюватися з використанням теорії ймовірності, кореляційно-регресійного аналізу.

Моделювання й обробка результатів досліджень буде здійснюватися з використанням програмних пакетів STAR-CCM+ та Wolfram Cloud.

В роботі вирішена наукова задача підвищення ефективності процесу сівби насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом удосконалення конструкції висівного апарату селекційної сівалки із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів.

Аналіз роботи електромеханічної висівної системи «Клен» дозволив сформулювати основні шляхи її удосконалення: необхідно вдосконалити робочий орган висівного апарату для забезпечення точності висіву дрібнонасінневих культур на рівні 95,0 %; для сівби ділянок добазового насінництва необхідно забезпечити автоматичне завантаження насіння різних сортів до висівного апарату; потребує удосконалення система висіву на ділянках добазового насінництва з урахуванням GPS-трекінгу; елементи системи висіву повинні бути блочними для легкої заміни при виході їх з ладу. Сформовано основні напрямки досліджень: теоретичний (на основі чисельного моделювання, використовуючи метод дискретних елементів); лабораторно-експериментальний (на основі розробленого і створеного стенду із рухомим полем і високошвидкісною відеокамерою для фіксації положення насіння); експериментально-польовий метод (у виробничих умовах на дослідних ділянках). Обґрунтовано концептуальну конструктивно-технологічну схему висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур, що дозволяє автоматизувати процес висіву насіння на ділянках добазового насінництва з мінімальною участю селекціонера та забезпеченням високої точності сівби.

За результатами теоретичних досліджень руху насіння в ємності висівного апарату селекційної сівалки складено відповідну систему диференціальних рівнянь, що покладено в основу математичного апарата програмного пакета Simcenter Star-CCM+. За результатами чисельного моделювання отримано візуалізацію випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки та рівняння регресії її щільності від ефективного діаметра насіння і коефіцієнта варіації цього діаметра.

За результатами чисельного моделювання визначено, що пропускна здатність дозатора висівного апарату селекційної сівалки не залежить від щільності випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності. За результатами апроксимації даних отримано закономірність зміни пропускної здатності дозатора висівного апарату селекційної сівалки від кута нахилу заслінки у вигляді поліному третього ступеня.

За результатами чисельного моделювання процесу висіву насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур розробленим висівним апаратом встановлені залежності норми висіву і точність висіву від його конструктивно-технологічних параметрів (середній ефективний діаметр насіння, кут повороту заслінки, проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита, швидкість переміщення сівалки). Для забезпечення найбільш ефективної роботи висівного апарату необхідною умовою є забезпечення найбільшої точності висіву при заданому значенні швидкості переміщення сівалки (посівного агрегату), ефективного діаметра насіння та норми висіву насіння.

Для забезпечення ще більшої точності висіву необхідно у розподільник встановлювати направляючу насіння, яка виконана у вигляді жолоба по якому рухаються насінини. За результатами чисельного моделювання руху насіння в розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур отримані залежності пропускної здатності висівного апарату і коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарату від пропускної здатності дозатора, кута розхилу і кута нахилу.

За результатами лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасінневих культур (рижію, ріпаку, гірчиці) у ємності висівного апарату селекційної сівалки визначено закономірності зміни щільності випадкового пакування від ефективного діаметра насіння і його коефіцієнта варіації. Порівнюючи теоретичні і експериментальні дані встановлено їх достатньо високу подібність. Про це свідчать: коефіцієнт кореляції Пірсона – 0,9726; розрахункове значення t-критерію – $24,3743 > t_{0,05}(32) = 2,0322$; ліва інтервальна оцінка – 0,7641; права інтервальна оцінка – 0,9971; стандартне відхилення – 0,1163.

За результатами експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур визначені залежності норми висіву насіння і точності висіву від середнього ефективного діаметра насіння, кута повороту заслінки, проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита і швидкості переміщення сівалки для трьох варіантів форми отворів. Наочне і статистичне порівняння теоретичних і експериментальних залежностей свідчить про адекватність отриманих теоретичних моделей і достовірність отриманих експериментальних закономірностей.

Визначено, що точність висіву для I варіанту отвору (трикутник) дозатора висівного апарату знаходиться в діапазоні 78,0–99,9 %, для II варіанту (напівколо) діапазон 71,1–98,3 %, для III варіанту (прямокутник) діапазон 67,3–97,4 %. Тому враховуючи теоретичний висновок і отримані експериментальні дані в подальших дослідженнях прийнято I варіант отворів (трикутні).

Враховуючи умову компромісної задачі складено алгоритм і програму в Wolfram Cloud для визначення режимних параметрів дозатора висівного апарату (кут повороту заслінки, проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита) з урахуванням заданих середнього ефективного діаметра насіння, норми висіву і швидкості переміщення сівалки. В подальшому дану програму буде використано при створенні виробничого зразка дозатора висівного апарату.

Результати випробування експериментального зразка удосконаленого висівного апарату у виробничих умовах показують, що точність його висіву вища (89,3–95,1 %), ніж у базової сівалки «Клен-4,2» (85,2–92,0 %). Також про якість висіву свідчить отримана густина розміщення рослин: для удосконаленого висівного апарату – 982,0–1057,5 тис. шт./га, а для базового – 940,9–1029,8 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 1000 тис. шт./га. Урожайність озимої гірчиці складала: для удосконаленого висівного апарату – 0,92–1,07 т/га, а для базового – 0,89–1,03 т/га. Найменша істотна різниця для урожайності складала 0,03 т/га, що підтверджує статистичну адекватність результатів вимірювань.

Застосування удосконалених висівних апаратів у складі базової навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасіненних культур «Клен-4,2» під час висіву елітного насіння озимої гірчиці дозволяє одержати питомий річний економічний ефект у розмірі 2920 грн./га порівняно із базовими висівними апаратами за рахунок збільшення врожайності на 4,0 %. Визначено, що термін окупності додаткових капіталовкладень при удосконаленні 6 висівних апаратів на площі посіву 300 га елітного насіння гірчиці становить 0,27 року, тобто за перший сезон.

Ключові слова: агрегат, висівний апарат, випробування, сипкий матеріал, ефективність, сівба, ґрунт, продуктивність, робочий орган, урожайність, чисельне моделювання, якість, точність висіву, моделювання, насіння.

ANNOTATION

Datsiuk D.A. Justification of the design and technological parameters of the seeding device of the small-seeded selection seeder. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 133 Industrial Engineering (13 Mechanical Engineering) – Vinnytsia National Agrarian University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Vinnytsia, 2024.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the process of sowing seed material of small-seeded crops by improving the design of the sowing device of the selection seeder with reasonable structural and technological parameters that ensure accurate sowing.

The object of the research is the technological process of interaction of the working body of the seeding apparatus of the improved selection seeder with the seed material of small-seeded crops.

The subject of research is the dependence of sowing quality indicators and productivity on the structural and technological parameters of the sowing apparatus of the improved selection seeder in accordance with the technological requirements and physical and mechanical properties of the seed material of small-seeded crops.

Research methods. The theoretical research is based on the methods of numerical modeling using the main provisions of the theories of classical mechanics, gas dynamics, probability, elasticity, models of discrete elements, multiphase interaction, Lagrangian multiphase. At the same time, the methods of differential and integral calculus were used.

Experimental studies were conducted using the mathematical method of experiment planning, methods of field observations and expert evaluations, and the processing and analysis of the results of experimental studies were carried out using the theory of probability, correlation-regression analysis.

Modeling and processing of research results will be carried out using STAR-CCM+ and Wolfram Cloud software packages.

The paper solves the scientific problem of increasing the efficiency of the process of sowing seed material of small-seeded crops by improving the design of the seeding device of the selection seeder with justified structural and technological parameters that ensure accurate sowing.

Analysis of the operation of the «Klen» electromechanical seeding system made it possible to form the main ways of its improvement: it is necessary to improve the working body of the seeding device to ensure the accuracy of sowing small-seeded crops at the level of 95.0%; for sowing the plots of pre-basic seed production, it is necessary to ensure automatic loading of seeds of various varieties to the sowing device; the sowing system in the areas of pre-basic seed production needs to be improved, taking into account GPS-tracking; the elements of the sowing system should be block-type for easy replacement when they fail. The main directions of research were formed: theoretical (based on numerical modeling, using the method of discrete elements); laboratory-experimental (on the basis of a developed and created stand with a moving field and a high-speed video camera for fixing the position of the seeds); experimental field method (in production conditions at experimental sites). The conceptual structural and technological scheme of the seeding apparatus of the small-seeded selection seeder is substantiated, which allows to automate the process of sowing seeds in the areas of pre-basic seed production with minimal involvement of the breeder and ensuring high accuracy of sowing.

According to the results of theoretical studies of the movement of seeds in the capacity of the seeding apparatus of the selection seeder, a corresponding system of differential equations was compiled, which is the basis of the mathematical apparatus of the Simcenter Star-CCM+ software package. Based on the results of numerical simulation, a visualization of the random packing of seeds of small-seeded crops in the capacity of the seeding device of a selection planter and the regression equation of its density from the effective diameter of the seed and the coefficient of variation of this diameter were obtained.

According to the results of numerical modeling, it was determined that the throughput capacity of the metering device of the selection planter does not depend

on the density of the random packing of seeds of small-seeded crops in the container. According to the results of data approximation, the law of changing the throughput capacity of the metering device of the selection seeder from the angle of inclination of the flap in the form of a third-degree polynomial was obtained.

Based on the results of numerical modeling of the process of sowing seed material of small-seeded crops by the developed sowing device, the dependence of the sowing rate and sowing accuracy on its structural and technological parameters (average effective diameter of the seed, angle of rotation of the flap, time interval when the flap is open or closed, speed of movement of the seeder) was established. In order to ensure the most efficient operation of the sowing device, it is necessary to ensure the highest accuracy of sowing at a given value of the movement speed of the seeder (sowing unit), the effective diameter of the seeds and the rate of seed sowing.

To ensure even greater accuracy of sowing, it is necessary to install a seed guide in the distributor, which is made in the form of a chute along which the seeds move. Based on the results of numerical simulation of the movement of seeds in the distributor of the seeding apparatus of the selection planter of small-seeded crops, the dependences of the throughput of the sowing apparatus and the coefficient of variation of the throughput of the sowing apparatus on the throughput capacity of the dispenser, the angle of spread and the angle of inclination were obtained.

Based on the results of laboratory research on the packing of seeds of small-seeded crops (rydge, rapeseed, mustard) in the capacity of the seeding device of the selection planter, the regularities of the change in the density of the random packing from the effective diameter of the seed and its coefficient of variation were determined. By comparing theoretical and experimental data, their sufficiently high similarity was established. This is evidenced by: Pearson's correlation coefficient - 0.9726; the estimated value of the t-criterion is $24.3743 > t_{0.05}(32) = 2.0322$; left interval estimate - 0.7641; right interval estimate - 0.9971; standard deviation is 0.1163.

According to the results of experimental studies of the metering device of the

seeding device of the small-seeded selection planter, the dependences of the seed sowing rate and sowing accuracy on the average effective diameter of the seeds, the angle of rotation of the flap, the time interval when the flap is open or closed and the speed of movement of the planter for three variants of the shape of the holes were determined. A visual and statistical comparison of theoretical and experimental dependences testifies to the adequacy of the obtained theoretical models and the reliability of the obtained experimental regularities.

It was determined that the accuracy of sowing for the 1st version of the hole (triangle) of the metering device of the seeding device is in the range of 78.0–99.9%, for the 2nd version (semicircle) the range is 71.1–98.3%, for the 3rd version (rectangle) the range 67.3–97.4%. Therefore, taking into account the theoretical conclusion and the obtained experimental data, the first variant of holes (triangular) was adopted in further studies.

Taking into account the condition of the compromise problem, an algorithm and a program in the Wolfram Cloud were compiled to determine the mode parameters of the seeding device dispenser (the angle of rotation of the shutter, the time interval when the shutter is open or closed) taking into account the given average effective diameter of the seed, the rate of sowing and the speed of movement of the seeder. In the future, this program will be used in the creation of a production sample of the seeding device dispenser.

The results of testing the experimental sample of the improved seeding device in production conditions show that its sowing accuracy is higher (89.3–95.1%) than that of the basic planter «Klen-4.2» (85.2–92.0%). Also, the quality of sowing is indicated by the obtained density of plant placement: for the improved seeding device - 982.0–1057.5 thousand units/ha, and for the basic one - 940.9–1029.8 thousand units/ha. This is at the established rate of sowing - 1,000 thousand pieces per hectare. The yield of winter mustard was: for the improved seeding apparatus - 0.92–1.07 t/ha, and for the basic one - 0.89–1.03 t/ha. The smallest significant difference for productivity was 0.03 t/ha, which confirms the statistical adequacy of the measurement results.

The use of improved seeding devices as part of the basic mounted row planter for vegetable and small-seeded crops «Klen-4.2» during the sowing of elite winter mustard seeds makes it possible to obtain a specific annual economic effect in the amount of UAH 2920/ha compared to basic seeding devices due to the increase yield by 4.0%. It was determined that the payback period of additional capital investments in the improvement of 6 sowing machines on the area of sowing 300 hectares of elite mustard seeds is 0.27 years, i.e. for the first season.

Keywords: unit, sowing machine, test, loose material, efficiency, sowing, soil, productivity, working body, productivity, numerical simulation, quality, accuracy of sowing, simulation, seeds.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних **Web of Science Core Collection** та/або **Scopus**

1. Yaropud V., Honcharuk I., **Datsiuk D.**, Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus*. 2022. Vol. 33 (1). P. 199–208. DOI: 10.15159/jas.22.08 (0,88 друк. арк., особистий внесок: розроблено математичну модель випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарата селекційної сівалки – 0,52 друк. арк.).

2. Yaropud V., Aliiev E., **Datsyuk D.** Methods of numerical modeling of sowing apparatus of selection seeder of small-seed crops. *Machinery and Energetics*. 2021, 12(3). P. 121–127. DOI: 10.31548/machenergy2021.03.121 (0,66 друк. арк., особистий внесок: проведено розрахунок середнього значення кількісних витрат насіння і його середньоквадратичного відхилення; обґрунтовано, що для досліджень за фактори досліджень необхідно обрати: виготовлення дозатора циліндричної форми (I – трикутник, II – напівколо, III – прямокутник), кут повороту заслінки α , проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , швидкість переміщення сівалки V – 0,44 друк. арк.).

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародної наукометричної бази даних (**Index Copernicus**)

3. Яропуд В.М., **Дацюк Д.А.** Шляхи удосконалення висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 156–166. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15. (0,92 друк. арк., особистий внесок: проведено аналітичні дослідження принципу роботи висівної системи «Клен» та сформовано основні напрями її удосконалення; обґрунтовано конструктивно-технологічну схему висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур – 0,68 друк. арк.).

4. Яропуд В.М., Дацюк Д.А., Теслюк Г.В. Використання методу дискретних елементів у моделюванні руху та укладання насіння дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 73–82. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8. (0,69 друк. арк., особистий внесок: визначено, що зі зменшенням ефективного діаметра насіння і збільшення коефіцієнта варіації спостерігається збільшення щільності випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур сферичної форми у ємності – 0,43 друк. арк.).

5. Яропуд В.М., Дацюк Д.А. Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінних культур. *Сільськогосподарські машини*. 2023. № 49. С. 7–14. DOI: 10.36910/asm.vi49.945. (0,46 друк. арк., особистий внесок: отримано залежності пропускної здатності висівного апарата і коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарата від пропускної здатності дозатора, кута розхилу і кута нахилу; визначено, що для забезпечення раціональних параметрів запропонованої направляючої у розподільнику висівного апарату необхідно, щоб коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарата був мінімальним, а пропускна здатність висівного апарата була максимальною. – 0,38 друк. арк.).

6. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Експериментальні дослідження дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 43-52. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-5 (0,73 друк. арк., особистий внесок: встановлені залежності норми висіву насіння N і точності висіву δN від середнього ефективного діаметра насіння $D_{\text{еф}}$, кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V для трьох варіантів форми отворів – 0,51 друк. арк.).

7. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Випробування математичної моделі роботи дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 52–60. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-6 (0,68 друк. арк., особистий внесок: складено

програму в Wolfram Cloud для визначення режимних параметрів дозатора висівного апарата (кут повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt) з урахуванням заданих середнього ефективного діаметра насіння D_m , норми висіву N і швидкості переміщення сівалки V – 0,47 друк. арк.).

Патент України

8. Дацюк Д.А., Яропуд В.М., Алієв Е.Б. Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасінневих культур: пат. 149682 Україна: МПК А01С 7/04, А01В 49/06. № 202101285; заявл. 15.03.2021. опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48. 4 с.

Матеріали конференцій

9. Дацюк Д.А. Техніко-економічна ефективність застосування розробленого висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 2023. С. 13–15.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
1.1 Схеми селекційної роботи в залежності від біологічних особливостей культур.....	22
1.2 Агротехнологічні вимоги до сівби насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур.....	26
1.3 Огляд досліджень з визначення фізико-механічних властивостей насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур.....	33
1.4 Аналіз конструкцій висівних апаратів селекційних сівалок дрібнонасінневих культур.....	35
1.5 Аналіз методів попередніх досліджень сівалок точного висіву.....	44
1.6 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми висівного апарату дрібнонасінневих культур.....	46
1.7 Висновки до розділу 1.....	49
1.8 Мета і задачі досліджень.....	51
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ.....	53
2.1 Постановка завдання.....	53
2.2 Модель випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки.....	54
2.3 Чисельне моделювання висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.....	68
2.4 Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.....	78
2.5 Висновки до розділу 2.....	85

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ.....	88
3.1 Мета, задачі і програма експериментальних досліджень.....	88
3.2 Методика лабораторних досліджень пакування насіння дрібно-насінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки..	89
3.3 Методика експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.....	93
3.4 Методика статистичної обробки даних експериментальних досліджень.....	98
3.5 Висновки до розділу 3.....	102
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ.....	103
4.1 Результати лабораторних досліджень пакування насіння дрібно-насінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки..	103
4.2 Результати експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.....	106
4.3 Математична модель роботи дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.....	115
4.4 Висновки до розділу 4.....	118
РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	120
5.1 Випробування експериментального зразка удосконаленого висівного апарату у виробничих умовах.....	120
5.2 Впровадження результатів досліджень.....	126
5.3 Техніко-економічна ефективність застосування розробленого висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.....	128
5.4 Висновки до розділу 5.....	131
ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	136
ДОДАТКИ.....	157

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному рослинництві важлива роль відводиться енергозберігаючим технологіям. Це один із найважливіших перспективних і пріоритетних напрямків, який вимагає застосування сільськогосподарських машин нового покоління, що забезпечують високу якість робіт на всіх технологічних операціях, в тому числі і під час сівби дрібнонасінневих культур (сорго, амарант, ріпак, гірчиця, льон, мак та ін.).

Нові конструкції машин розробляються із врахуванням вимог багатофункціональності, енергоємності та ресурсозбереження. Для роботи таких машин у варіанті універсальних сівалок існуючі висівні апарати мало пристосовані і вимагають заміни.

Одним з перспективних напрямків у вирішенні даного завдання є розробка технологічного процесу сівби дрібнонасінневих сільськогосподарських культур з використанням висівних апаратів, робочі процеси яких засновані на формуванні потоку насіння шляхом подачі насіння висівними апаратами різного конструктивного виконання. Ці апарати універсальні в порівнянні з існуючими, дозволяють формувати більш рівномірний потік насіння дрібнонасінневих культур, що відрізняються за фізико-механічними властивостями.

Вирішення завдання з розробки конструктивно-технологічної схеми та обґрунтування параметрів висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур є актуальним і має важливе господарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено у Вінницькому національному аграрному університеті (ВНАУ) в межах науково-технічної (експериментальної) розробки «Розробка науково-технічного забезпечення енергетичної автономії АПК на основі еколого ефективного використання агробіомаси для виробництва біопалив» (№ ДР 0122U000844, період виконання 02.2022–12.2024 рр.), що

виконується за кошти державного бюджету та ініціативної науково-дослідної роботи «Підвищення ефективної роботи гідравлічних приводів сільськогосподарських машин та обладнання із застосуванням сучасних методів діагностування» (№ ДР 0122U002109, період виконання 03.2022–03.2026 рр.).

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу сівби насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур шляхом удосконалення конструкції висівного апарату селекційної сівалки із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів.

Для досягнення поставленої мети було висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату селекційної сівалки із урахуванням моделі випадкового пакування насіння у його дозаторі і граничних умов руху насіння дозволить забезпечити високу точність висіву насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур.

Задачі дослідження:

– провести аналіз способів і технічних засобів точного висіву насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур та обґрунтувати концептуальну конструктивно-технологічну схему висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіннєвих культур;

– провести теоретичний аналіз процесу взаємодії насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур із робочим органом висівного апарату вдосконаленої селекційної сівалки;

– оптимізувати конструктивно-технологічні параметри робочого органу висівного апарату вдосконаленої селекційної сівалки за результатами експериментальних досліджень;

– дослідити у виробничих умовах точність висіву розробленого висівного апарату вдосконаленої селекційної сівалки та визначити раціональні режимні параметри її роботи;

– провести випробування та визначити економічну ефективність експериментального зразка вдосконаленої селекційної сівалки та впровадити результати досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження: технологічний процес взаємодії робочого органу висівного апарату удосконаленої селекційної сівалки із насіннєвим матеріалом дрібнонасіннєвих культур.

Предмет дослідження: залежність показників якості висіву і продуктивності від конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату удосконаленої селекційної сівалки у відповідності із технологічними вимогами і фізико-механічними властивостями насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладені методи чисельного моделювання з використанням основних положень теорій класичної механіки, газодинаміки, вібрації, ймовірності, пружності, моделей дискретних елементів, багатофазної взаємодії, Лагранжевої багатофазності. При цьому застосовувалися методи диференційного та інтегрального числення.

Експериментальні дослідження проводились з використанням математичного методу планування експерименту, методів натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснюватися з використанням теорії ймовірності, кореляційно-регресійного аналізу.

Моделювання й обробка результатів досліджень буде здійснюватися з використанням програмних пакетів STAR-CCM+ та Wolfram Cloud.

Наукова новизна одержаних результатів.

Уперше:

- розроблено модель випадкового пакування насіння дрібнонасіннєвих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки і встановлені рівняння регресії її щільності від ефективного діаметра насіння і коефіцієнта варіації цього діаметра;

- встановлені залежності норми і точності висіву від конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату селекційної сівалки (середній ефективний діаметр насіння, кут повороту заслінки, проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита, швидкість переміщення сівалки).

Отримали подальший розвиток:

– алгоритм визначення режимних параметрів дозатора висівного апарату (кут повороту заслінки, проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита) з урахуванням заданих середнього ефективного діаметра насіння, норми висіву і швидкості переміщення сівалки.

Практичне значення одержаних результатів. Результати чисельного моделювання висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур і розроблені методики розрахунку його конструктивно-технологічних параметрів використані для лекційних і практичних занять освітнього компонента «Сільськогосподарські машини» освітньо-професійної програми «Агроінженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету. Розроблена конструкторська і технічна документація удосконаленого висівного апарату селекційної сівалки передана на підприємство ТОВ «Френдт» (м. Вінниця) для виготовлення 20 одиниць зразків для випробувань. Застосування удосконалених висівних апаратів у складі базової навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасіньєвих культур «Клен-4,2» під час висіву елітного насіння озимої гірчиці у господарстві ПСП «Агрофірма Нападівська» (с. Нападівка, Вінницький район) дозволяє одержати питомий річний економічний ефект у розмірі 2920 грн./га порівняно із базовими висівними апаратами за рахунок збільшення врожайності на 4,0 %. Визначено, що термін окупності додаткових капіталовкладень при удосконаленні 6 висівних апаратів на площі посіву 300 га елітного насіння гірчиці становить 0,27 року, тобто за перший сезон. Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» отримало конструкторську та технічну документацію на виготовлення експериментального зразка висівного апарату селекційної сівалки, який призначений для висіву насіння дрібнонасіньєвих культур. Отримана конструкторська та технічна документація буде використовуватися для виготовлення дослідних зразків висівних апаратів для проведення дослідно-виробничих випробувань. До ТОВ «Агромаш-Калина» передано рекомендації з налагодження висівного апарату селекційної сівалки

дрібнонасінневих культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно отримав теоретичні та експериментальні результати проведених досліджень, які висуваються на захист. Постановка завдань, аналіз та інтерпретація результатів були виконані спільно з науковим керівником та частково зі співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інженерно-технологічне забезпечення аграрного сектору економіки: сучасний стан, проблеми та перспективи» (21–22 жовтня 2020 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи та цифровізація агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку» (27–28 жовтня 2021 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи» (20–21 жовтня 2022 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених (1 грудня 2023 р., Дніпро. ДДАЕУ).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 9 наукових працях, у тому числі: 5 статей у наукових фахових виданнях України (категорії Б); 2 статті у виданнях, що проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus; 1 патент України на корисну модель; 1 теза у збірнику доповідей наукових конференцій, інших наукових виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 195 сторінок, у тому числі 13 додатків на 39 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 135 сторінок, та містить 53 рисунка та 13 таблиць. Список використаних джерел нараховує 191 найменування на 21 сторінці.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Схеми селекційної роботи в залежності від біологічних особливостей культур

Процес створення нових сортів сільськогосподарських культур містить широкий спектр завдань, пов'язаних із використанням специфічних методів селекції, таких як схрещування, відбір та оцінка отриманого генетичного матеріалу порівняно зі стандартними сортами, а також застосування різних технічних прийомів при сівбі, догляді, спостереженнях та збиранні врожаю [1, 2, 3, 4].

У досягненні високих та сталих врожаїв сільськогосподарських культур велике значення має вибір сортів. Створення нових сортів і гібридів сільськогосподарських рослин є надзвичайно важливим для виробництва продуктів харчування. Селекційний процес складається з трьох основних етапів: спочатку потрібно створити або відібрати популяції, тобто отримати мінливість; потім відбирають потрібні генотипи з вихідних (елітних) рослин; і, нарешті, проводять випробування потомства, розмноження до виробничо значущих обсягів, що також включає в себе великий комплекс завдань, пов'язаних із застосуванням специфічних селекційних методів та використанням різних технічних прийомів при посіві, догляді, спостереженнях і збиранні врожаю [5, 6, 7].

Сівба малими ділянками широкого набору оцінюваних сортів, ліній або сімей впливає на вибір системи сівозміни та може призвести до необхідності використання компактної селекційної техніки.

Схема селекційної роботи з самоzapильними культурами має на меті відбір гомозиготних високопродуктивних рослин, оцінку їхніх нащадків та створення на їхній основі нового сорту, як показано на рисунку 1.1 [8, 9].

Початкові джерела генетичної різноманітності для цієї роботи представлені розплідниками, які можуть бути колекційними, гібридними або

спеціалізованими. В цих розплідниках дослідники аналізують різні форми рослин, такі як колекційний матеріал, мутантні екземпляри, поліплоїди та інші види, і проводять схрещування для отримання нових комбінацій генів [10].



Рисунок 1.1 – Схема селекційної роботи з самоzapильними культурами

У колекційних розплідниках проводиться початкове дослідження вихідного матеріалу, включаючи кращі сорти іноземної та вітчизняної селекції, а також цінні зразки для подальшого аналізу і порівняння на наступному етапі селекційної роботи в селекційних розплідниках. Крім того, у колекційних розплідниках проводять пересів зразків колекції з метою збереження схожості насінневого матеріалу. Зазвичай роблять це кожні 2–5 років. Кількість зразків у колекційному розпліднику може становити від 300 до 2000 та більше. Насіння

кожного зразка висівають у кількості від 100 до 200 на ділянках розміром 1–2 метри на 10–30 см. Стандартні ряди розміщують через кожні 20–30 досліджуваних номерів, іноді через кожні 10–20. У колекційному розпліднику кращі зразки збирають з цілої ділянки за допомогою фронтальних вертикальних снопов'язалок або вручну, збираючи по 50–100 кращих екземплярів з кожної ділянки, а також окремі елітні рослини [11, 12, 13].

У гібридному розпліднику проводять висів гібридних популяцій усіх поколінь, від F1 до F6, і, іноді, навіть пізніших поколінь. Для цього використовують саджальні апарати, які забезпечують рослинам площу живлення розміром 5×20 см, іноді 10×20 см або навіть 10×30 см, особливо це важливо при розмноженні ранніх поколінь або при відборі елітних рослин. Для сівби матеріалів, які розщеплюються на покоління гібридних популяцій під час відбору елітних класів, використовують селекційні сівалки з міжряддям шириною 15 см. Стандартні ділянки розміщують через кожні 10–30 номерів, і розмір ділянок залежить від кількості насіння і покоління гібридів (зазвичай не перевищує 10 м²). Кількість рядків визначається кількістю насінин в F1 та відібраних елітних рослин в F2 і F3, і кількість ділянок – від обсягів схрещування та кількості відборів. Для гібридів F1 найзручніше використовувати ділянки з рядами довжиною 2 м, а для F2 і F3 – 6 м [14, 15, 16].

У гібридному розпліднику проводять відбір таких елементів: окремих елітних рослин, які відрізняються за конкретними ознаками; найкращих зразків; найкращих насінників старших поколінь. Для всіх цих рослин і насінників вказують номер ділянки, номер відбору, походження (результат схрещування), висоту рослини, кількість продуктивних стебел, ботанічну різновидність і форму. Після обмолоту рослин, які були відібрані індивідуально або як сім'ї, проводять бракування за допомогою ознак, таких як забарвлення, вигляд і маса 1000 насінин і т. д.

Оскільки селекція використовує методи мутагенезу, поліплоїдії, культури тканин і клітин, іноді потрібні спеціалізовані розплідники для вирощування мутантних форм, поліплоїдів, анеуплоїдів, гаплоїдів тощо. До групи таких

спеціальних розплідників можна віднести і розплідник гібридизації, де вирощують батьківські форми для подальших схрещувань [17, 18].

Розміри ділянок у СР-1 для окремих ліній можуть відрізнятися, тобто вони можуть мати різну кількість рядків, проте довжина самого рядка повинна бути однаковою. Сівба здійснюється вручну за допомогою сівалок, і норма висіву коливається від 10 до 40 насінин на погонний метр. Лінії порівнюють між собою і зі стандартом, які розміщені через 10–20–40 ділянок.

У СП-2 висівають лінії, які були відібрані з селекційного розсадника у перший рік. Сівбу виконують за допомогою селекційних сівалок на ділянках площею від 2 до 5 м².

Кількість насінневого матеріалу в контрольному розпліднику вже достатня для проведення оцінки та порівняння випробуваного матеріалу на одиницю площі. У зв'язку з цим розмір ділянок збільшується до 2–10 м² і більше. Крім того, вводять повторні висіви дослідів. Сівба виконується за допомогою селекційних сівалок з прийнятою у виробництві нормою висіву, з дво- чи чотириразовою повторністю [19, 20].

У попередньому (малому) сортовипробуванні, а також в контрольному розсаднику, продовжують оцінювати сортозразки, спостерігаючи за урожаєм на одиниці площі. У попередньому сортовипробуванні оцінюють кращі лінії, які були відібрані з контрольного розплідника. Площа ділянки для обліку, яка використовується для зернових культур, зазвичай становить 10–25 м², і проводять чотири повторення. Стандарт розміщують через 5–10 тестованих ліній, які тепер називають сортами. Сівбу виконують за допомогою селекційних сівалок з прийнятою у виробництві нормою висіву. Зазвичай випробовують 25–30 сортів, але при великих обсягах роботи ця кількість може сягати 100.

У конкурсному (основному) сортовипробуванні надають основну оцінку найкращим сортам, які пройшли попереднє сортовипробування та були відібрані для екологічного сортовипробування з інших науково-дослідних установ. Вибирають сорти, які виявилися кращими за районовані сорти. Загальна кількість сортів, які перевіряють у конкурсному сортовипробуванні,

зазвичай становить 10–20, але може досягати 40–60. Сівбу виконують так само, як і в попередньому сортовипробуванні, і проводять чотири- або шестикратне повторення з рандомізованим або систематичним розташуванням сортів. Площа ділянки для обліку зернових культур зазвичай становить 25–50 м², а для просапних культур – 150–200 м² [21, 22].

Екологічне (міжстанційне) сортовипробування є важливою складовою завершальної оцінки нових сортів і доповнює конкурсне сортовипробування. Основна мета екологічного сортовипробування полягає у вивченні реакції нових сортів на різних ґрунтово-кліматичних умовах одночасно, отриманні перших даних про їхню пластичність, перевірці врожайності, яку було отримано в дослідках оригінатора [23].

План роботи з селекцією перехреснозапильних культур ідентичний тому, який використовується при селекції самозапильних культур. Проте основна відмінність полягає в тому, що при селекції перехреснозапильних культур, у будь-якому розпліднику або сортовипробуванні, селекційні номери або сорти, які ростуть поруч, здебільшого перезапильються один з одним. Це призводить до значних змін в їхньому початковому генетичному складі, і насіння, зібране з таких ділянок, вже має генетичні відмінності від початкових батьківських форм [24, 25]. Під час сівби такого насіння виростають рослини, які відрізняються від батьківських форм [26].

1.2 Агротехнологічні вимоги до сівби насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур

Останнім часом в селекційному виробництві насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур інтерес до проблем сівби значно зріс [27]. Це пояснюється важливістю отримання якісних посівів в початковий момент дослідження і попереднього розмноження нових сортів і гібридів дрібнонасіннєвих культур. Відповідно до умов, необхідних для нормального розвитку рослин, до сівби на селекційних ділянках попереднього розмноження і

сортівипробування висувають високі агротехнічні вимоги за якістю посівів, тому що використовується більш дорогий посівний матеріал. Важливою агротехнічною вимогою є забезпечення рівномірного розподілу насіння вздовж рядка на рівні не нижче 95 %. Виконання цієї вимоги сприяє якнайкращому забезпеченню всіх рослин поживними речовинами [28, 29, 30].

Спосіб сівби залежить від ґрунтово-кліматичних умов і посівних якостей насіння дрібнонасіневих культур. Завданням сівби є створення сприятливих умов проростання насіння і рослин, а також забезпечення їх необхідної густоти при рівномірному розміщенні в рядках. Необхідна густина посівів і порядок розміщення насіння на полі є основою при виборі способу сівби насіння дрібнонасіневих культур. Виходячи з цього, вибирають відстань міжряддя та інтервал між насінням [31, 32, 33].

При обробленні дрібнонасіневих культур прийнято розрізняти такі способи сівби (рис. 1.2) [34, 35, 36].

При рядковому способі сівби (рис. 1.2, а) насінини розташовані паралельними рядами, на різній відстані одна від одної. Рядкова однорядна сівба поділяється на: звичайний рядковий, вузькорядний та перехресний способи сівби [37, 38, 39].

Іноді перед сівбою змішують насіння двох або кількох культур і висівають одночасно, таку сівбу називають змішаною. Такі посіви застосовують для культур рядкової або вузькорядної сівби, тому що складові належать до довгоденних культур, які швидко ростуть у перші фази розвитку, і їх не пригнічують бур'яни [40].

Нерідко дрібнонасінні культури висівають рядковим способом або ж застосовують вузькорядний, а при обробленні культур на насіння користуються широкорядним, в якому відстань між рядками становить 45–60 см [41, 42, 43].

Перехресну сівбу (рис. 1.2, б) виконують у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Її метою є більш рівномірний розподіл насіння на полі. Нині цей спосіб сівби застосовується дуже рідко, тому що йому притаманні недоліки – подвійні витрати праці й енергії на сівбу.

Стрічкову сівбу (рис. 1.2, г) застосовують за обробітку овочевих та інших культур, насінини яких схожі за розмірами. Насінини за цього способу висівають суцільною стрічкою, її ширина становить 10–20 см, а міжряддя при цьому 45 для міжрядного обробітку [44, 45, 46, 47, 48].

Розкидний (безрядковий) спосіб сівби (рис. 1.2, і) є найдавнішим способом. Його застосовують під час ручної сівби, при сівбі з літака, з сошниками спеціальної конструкції, що забезпечують сівбу із зникаючими стрічками. Міжряддя при безрядковій сівбі не враховуються.

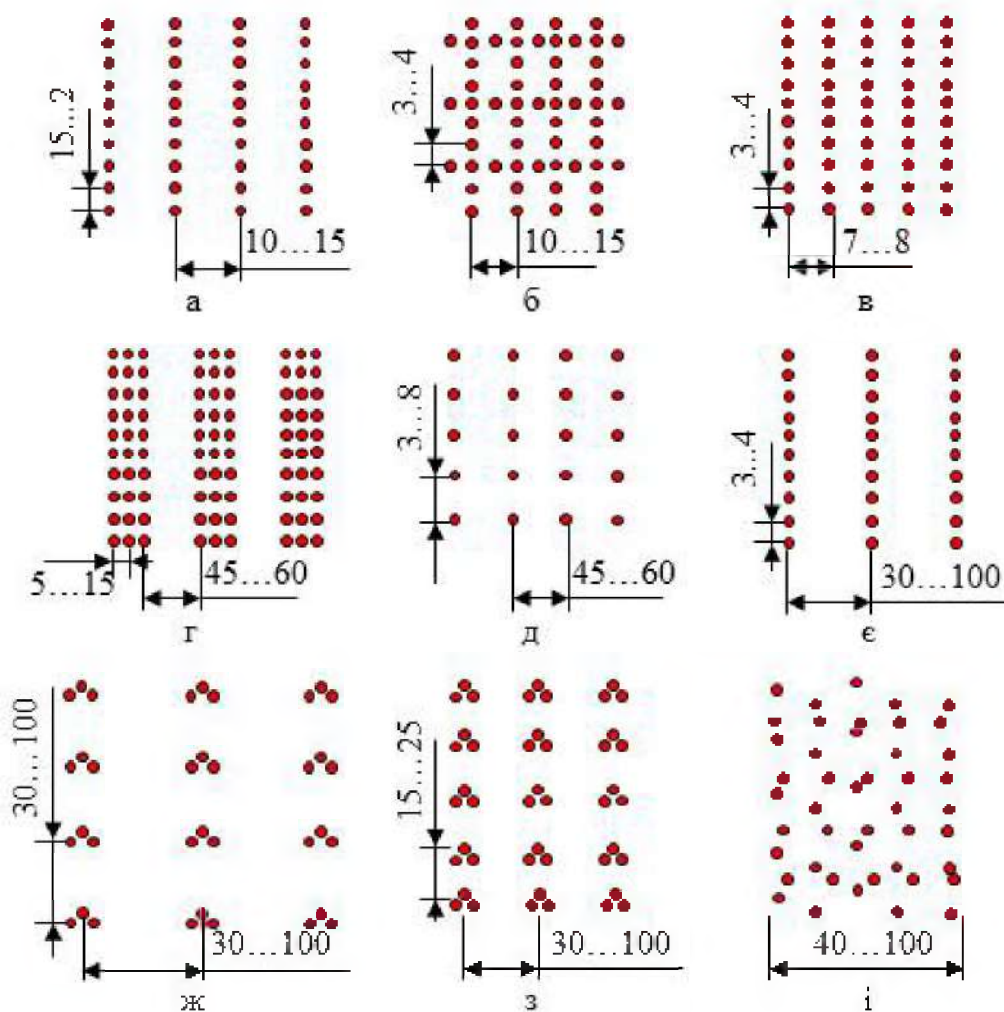


Рисунок 1.2 – Схеми сівби насіння дрібнонасінневих культур:

а – рядкова; б – перехресна; в – вузькорядна; г – стрічкова; д – пунктирна; є – широкорядна; ж – квадратно-гніздова; з – гніздова; і – розкидна (безрядкова).

За результатами проведеного аналізу робимо висновок, що серед різних способів сівби актуальними для селекційного процесу є рядковий, стрічковий, вузькорядний і широкорядний способи сівби дрібнонасіньєвих культур, які забезпечують підвищення врожайності культури за найменших витрат на сівбу.

Не торкаючись усіх аспектів агротехнічних вимог, зупинимося тільки на показниках, які визначають якісну сторону процесу і разом зі способом сівби є технологічною основою при розробці та вдосконаленні посівних машин і агрегатів.

Основною і неодмінною умовою для якісної сівби, особливо за рядкового способу з однонасіньєвим і гніздовим розміщенням насіння (в подальшому для стислості будемо умовно називати його «точним»), є передпосівний обробіток ґрунту і підготовка насіння.

Визначено, що кращі умови для роботи посівних машин точного висіву створюються, коли поверхня ґрунту ретельно розпушена на глибину загортання насіння і вирівняна до стану, за якого в шарі 0–5 см не міститься грудок і рослинних решток розміром понад 30 мм [49, 50, 51].

Згідно з аналізом літературних джерел, культиватори з пасивними робочими органами не забезпечують отримання структури ґрунту з зазначеними розмірами грудок і рослинних залишків. У зв'язку з цим передпосівний обробіток ґрунту для сівби сівалками точного висіву повинен переважно здійснюватися фрезерними культиваторами або іншими знаряддями з активними робочими органами [52].

Передпосівна підготовка насіння [53, 54, 55, 56] в більшості випадків передбачає надання їм більшої сипучості та рівності за розмірами, оскільки ці властивості багато в чому визначають якість роботи висівних систем сівалок. Насіння багатьох дрібнонасіньєвих культур мають опушеність, зачепи і різні шорсткості, що значною мірою ускладнює одиничний або програмований відбір їх при точному однонасіньєвому і гніздових посівах. Визначено, що навіть при висіві звичайними катушковими висівними апаратами опушених насінин томатів погіршується рівномірність подачі їх в 1,2–1,5 раза. Тому, незалежно

від способу сівби, вищеописане насіння повинно бути відшліфоване і вирівняне за розмірами.

Основною вимогою до сівби є, як відомо, поздовжня (уздовж рядка) і вертикальна (по глибині загортання) рівномірність розподілу насіння.

Ознайомлення з літературою із цього питання показало, що більшість наявних робіт присвячено вивченню польової схожості насіння, густоти стояння рослин і впливу їх на урожай [38, 39, 41, 42, 43, 45, 47, 48]. Щодо досліджень з визначення частки впливу поздовжньої рівномірності розподілу насіння на названі показники, то такі дані щодо дрібнонасіневих культур мало досліджені. Це, ймовірно, пояснюється, з одного боку, труднощами таких експериментів, з іншого – самим формуванням завдання. В агрономічному аспекті, що передбачає в кінцевому підсумку видачу практичних рекомендацій, цілком достатнім виявляється назвати спосіб сівби й оптимальну для цієї культури схему розміщення рослин без вказівки допусків на відповідні параметри висіву. З погляду агротехнічних вимог цих відомостей недостатньо, оскільки в реальних умовах завжди спостерігаються відхилення, які можуть істотно вплинути на кінцевий результат сівби та процесу обробітку загалом. Тому для оцінки якості сівби необхідні кількісні дані допустимих відхилень, в межі яких повинні укладатися параметри процесу, виконуваного посівною машиною.

Спроби усунути наявний недогляд в цьому важливому питанні були зроблені низкою дослідників. Зокрема, дослідники [52, 57, 58] в якості критерію оцінки впливу рівномірності розподілу рослин на величину врожаю запропонував спеціальний коефіцієнт, що виражає аналітичний взаємозв'язок між шириною міжрядь, відстанню між рослинами в рядку і числом їх в гнізді. Однак за своєю фізичною суттю цей коефіцієнт не відображає впливу розкидання (розсіювання) інтервалів на статистичні характеристики сівби, тобто величини, які входять до нього, мають цілком конкретні дискретні значення без варіювання їх в межах однієї схеми розміщення рослин. Тому запропонована автором залежність, що зв'язує величину врожаю овочевих культур з параметрами сівби, відображає не так вплив відхилень у розподілі

рослин, як відмінності в схемах розміщення і щільності посівів. У зв'язку з цим залежність для коефіцієнта рівномірності розподілу рослин не може бути використана при оцінюванні якості роботи дрібнонасіневих посівних машин.

Величина розкидання інтервалів за рядкової сівби з однонасіневим і гніздовим розміщенням насіння дорівнює 30 %, і не чинить істотного впливу на врожай. Унаслідок цього допустимий розкид інтервалів для зазначених видів розміщення насіння, що характеризується коефіцієнтом варіації, може бути прийнятий 25–30 % [52].

Істотний критерій якості гніздової сівби – число і компактність розміщення насіння в гнізді. Аналіз робіт, присвячених цьому питанню, показав, що оптимальна густина розміщення рослин за інших рівних умов, залежить від польової схожості насіння. За польової схожості насіння не нижче 80 % посіви забезпечуються висівом в гніздо по одній насінині (зерна), при 60–80 % – по два, при 40–60 % – три та при 20–40 % – по чотири-шість насінин [52].

Не менш важливим показником якості посіву є рівномірність глибини загортання насіння (вертикальна рівномірність розподілу).

За наявних численних досліджень [52], що стосуються вивчення впливу абсолютних значень глибини загортання насіння на різні показники росту та розвитку рослин, можна зробити висновок про те, що оптимальна глибина загортання насіння більшості дрібнонасіневих культур знаходиться в межах від 2 до 5 см і її розсіювання з коефіцієнтом варіації 20–25 % не робить істотного впливу на основні параметри зростання.

Крім перерахованих вимог, що ставляться до сівби насіння дрібнонасіневих культур, істотне значення має укладання їх в борозну. Визначено, що кращі умови для забезпечення дружних і рівномірних сходів створюються тоді, коли насінини розташовуються на щільному ложі і закриті вологим ґрунтом. При цьому в зоні розташування насіння ґрунт повинен бути ущільнений, а в поверхневому шарі – пухкий.

Складовою частиною агротехнічних вимог, що ставляться до посівних машин, є техніко-експлуатаційні та виробничо-технологічні показники.

Вони визначають основні параметри посівного агрегату: ширину захвату, робочі швидкості, споживану потужність, продуктивність, термін служби, коефіцієнти готовності й надійності технологічного процесу, умови техніки безпеки і зручності експлуатації, кількість персоналу з технічного обслуговування та ін. [35, 36].

Таким чином, основні якісні, кількісні та експлуатаційні характеристики посівних та інших машин визначаються на основі агротехнічних вимог, досконалість і точне виконання яких забезпечує створення працездатних і економічно ефективних посівних агрегатів.

Аналіз та узагальнення літературних даних, власних досліджень, спостережень і результатів багаторічних випробувань різних конструкцій овочевих сівалок точного висіву дозволили сформулювати такі основні вимоги до якості технологічного процесу: однонасінного розміщення – число насінин, що висіваються по 1–2, має бути не менше 60 %, по 3–4 – не більше 30 %, 5 і більше – до 10 %; гніздове розміщення – число насінин, що висіваються в гніздо, має перебувати в межах 5 ± 2 . Таких гнізд при сівбі має бути не менше, ніж 75 %, число з 2 і 8 насінин не повинно перевищувати 25 %. На обох видах розміщення коефіцієнт варіації інтервалів між гніздами або окремо розташованими насінинами не повинен перевищувати 30 %, коефіцієнт варіації глибини загортання насіння – 20 %. У шарі заданої глибини повинно бути розміщено не більше 80 % насіння; умови роботи – сівба має проводитися на розпушеному вирівняному полі, ґрунт в шарі 0–5 см не повинен містити грудок і рослинних решток розмірами більше 30 мм. При цьому грудки розміром від 1 до 10 мм повинні становити не менше 50 %, пилоподібні частки (менш 0,25 мм) – не більше 10 %.

Запропоновані основні елементи агротехнічних вимог, що ставляться до сівби насіння дрібнонасінневих культур, природно, по мірі розвитку агробіологічної науки й технічних засобів сівби будуть уточнюватися. На даному етапі вони можуть послужити основою для оцінки існуючих і розробки нових, більш досконалих посівних машин і агрегатів.

1.3 Огляд досліджень з визначення фізико-механічних властивостей насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур

Фізико-механічні характеристики насіння дрібнонасінневих культур є важливими показниками, які мають бути враховані при виконанні посівних операцій. Оскільки частина насіння піддається механічному впливу, такому як руйнування, перемішування, транспортування та зберігання, знання його фізико-механічних властивостей є необхідними [59, 60, 61].

При проектуванні та розрахунку обладнання для технологічних процесів висіву насіння це надзвичайно важливо, і для цього необхідно володіти інформацією про масу 1000 насінин [25, 62, 63], щільність [64, 65, 66, 67], коефіцієнт тертя [68, 69], кут природнього відкосу [70, 71] та інші властивості [72, 73, 74, 75, 76, 77].

Багато дослідників [78, 79, 80] присвятили свою роботу визначенню фізико-механічних властивостей дрібнонасінневих культур, і літературні джерела містять дані, які надають загальний огляд цих характеристик. Ця інформація може бути використана при розробці типових моделей для процесів і машин висіву насіння дрібнонасінневих культур.

Для покращення процесу висіву насіння дрібнонасінневих культур, таких як гірчиця, рижій та інші, був проведений аналіз їхніх фізико-механічних властивостей на основі експериментальних даних [81, 82, 83, 84, 85, 86].

Об'єктами подальших досліджень є насіння дрібнонасінневих культур, які були обрані із селекції Інституту олійних культур НААН (м. Запоріжжя), включаючи гірчицю Тавричанка, рижій сорту Престиж, ріпак Легіон.

В ході досліджень [81–85] вивчені взаємозв'язки між вологістю насіння (позначено як W_b) та такими параметрами, як ефективний діаметр (D_e), маса 1000 насінин (M_{1000}), пористість (ϵ), дійсна щільність (ρ_t), кут природнього відкосу (ϕ), коефіцієнт тертя (f). Графічне представлення цих залежностей подано на рисунку 1.3.

На основі результатів досліджень [81–85] можна зробити висновок, що при розробці та розрахунку машин для сівби насіннєвого матеріалу олійних культур можна використовувати середні розмірні показники насіння як вихідні дані.

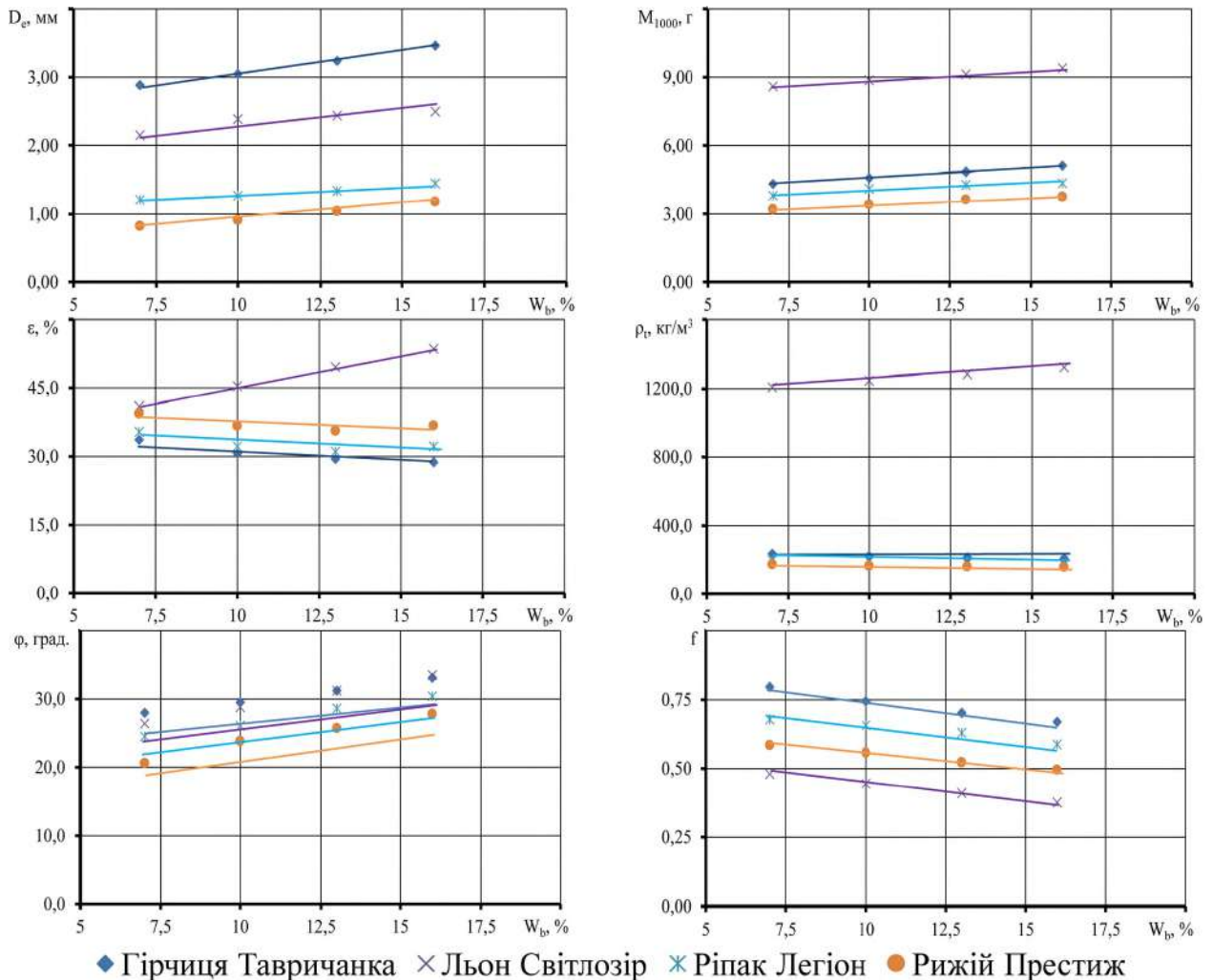


Рисунок 1.3 – Залежність впливу вологості насіння W_b на ефективний діаметр D_e , масу 1000 насінин M_{1000} , пористість ϵ , дійсну щільність ρ_t , кут природнього відкосу ϕ , коефіцієнт тертя f [81–85].

Крім того, результати цих досліджень надають можливість отримати початкові дані для моделювання процесу роботи висівного апарату селекційної сівалки та вибору його раціональних параметрів.

1.4 Аналіз конструкцій висівних апаратів селекційних сівалок дрібнонасіненевих культур

Висівний апарат – один з найбільш важливих робочих органів сівалки. Він служить для відбору із загальної маси певної кількості насіння і формування вихідного потоку їх із заданими параметрами [87, 36, 88]. Тому переваги і недоліки сівалок щодо якості розподілу насіння в рядку і загалом на засіяному полі, головним чином, визначаються роботою висівних апаратів.

До теперішнього часу в літературі опубліковано кілька класифікацій висівних апаратів сівалок загального призначення і для дрібнонасіненевих культур зокрема [89, 90].

Проте багато дослідників не повною мірою відображають особливості конструкцій висівних апаратів і не узгоджують їх між собою за класифікаційними ознаками, що вносить певні труднощі при вдосконаленні й розробці їхніх конструктивно-технологічних схем.

Серед класифікацій висівних апаратів сівалок для дрібнонасіненевих культур найбільший інтерес представляє запропонована в [91, 92]. У цій класифікації за ознаку прийнято принцип дії апаратів і конструктивне оформлення їхніх висівних пристроїв, що надало їй більш універсальний характер з можливістю охоплення як існуючих, так і новостворених моделей. Проте в цій класифікації відсутнє місце електромеханічних висівних апаратів і системи автоматичного керування їхньою роботою. Тому запропоновано доповнену класифікацію висівних апаратів, яка наведена на рис. 1.4.

За принципом дії (захоплення насіння) висівні апарати сучасних сівалок для дрібнонасіненевих культур можуть бути розділені на механічні, пневматичні, пневмомеханічні, гідравлічні і електромеханічні.

Механічні апарати за конструктивним виконанням та принципом дії основного робочого органу, що здійснює відбір насіння їхньої загальної маси і створює насінневий потік, можна розділити на катушкові, чашкові, шнекові, вібраційні, відцентрові, ложкові, комірчасті і стрічкові апарати [93, 94, 95, 96].

Механічні апарати (рис. 1.5) відрізняються достатньо високою надійністю і простотою в обслуговуванні. Проте ці апарати мають низку недоліків: низка здатність рівномірного висіву насіння, відсутність автоматизації процесу висіву, відсутність можливості швидкої зміни партії насіння під час висіву селекційних ділянок, ймовірність травмування насіння.

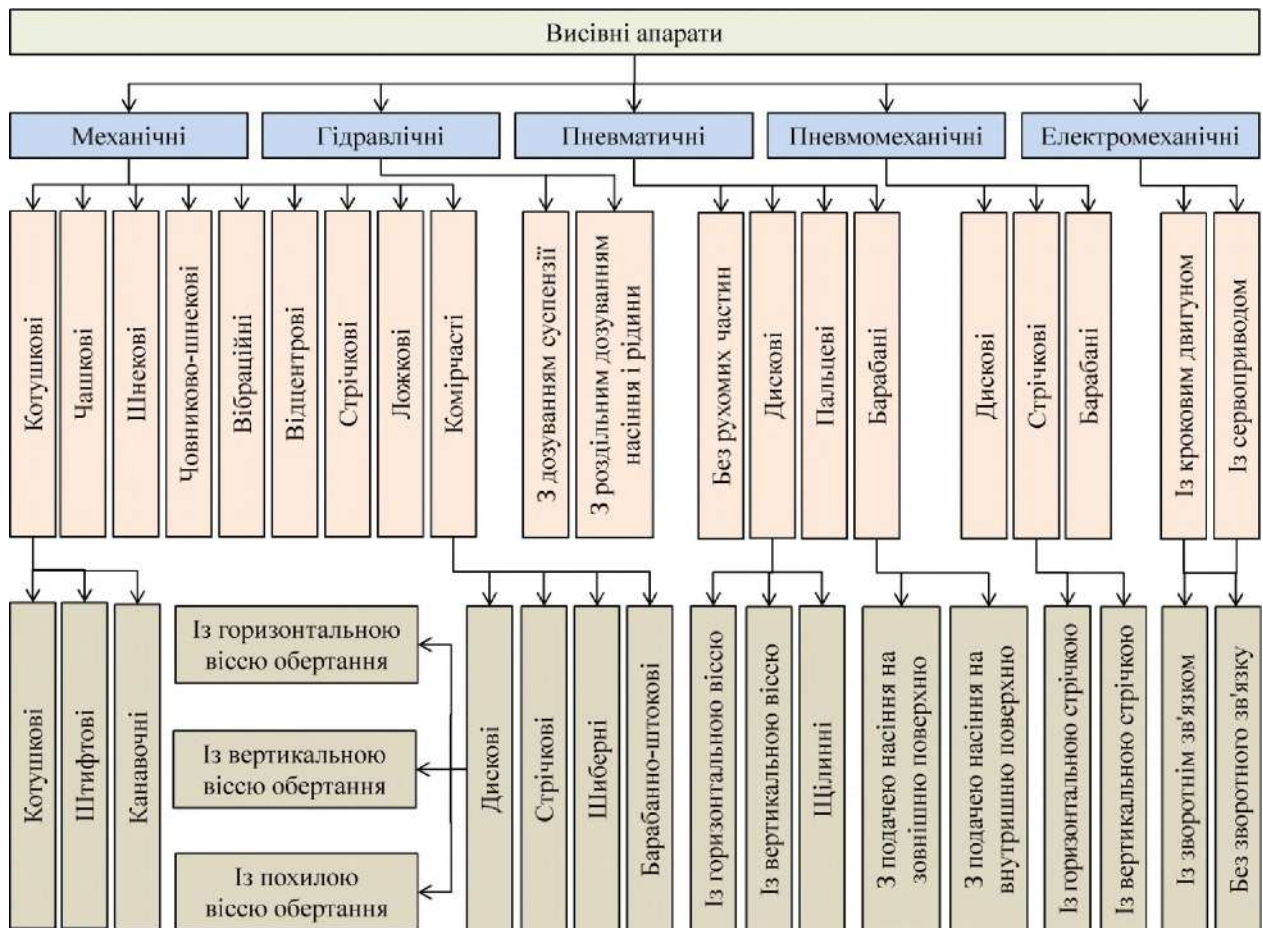


Рисунок 1.4 – Класифікація висівних апаратів сівалок для дрібнонасінневих культур.

Гідравлічні висівні апарати призначені в основному для пунктирного і гніздового висіву пророщеного насіння дрібнонасінневих культур (рис. 1.5). В основу цих апаратів покладено принцип об'ємного дозування суспензії, що складається з рідини та рівномірно розподілених у ній насінин. Як робочу рідину зазвичай використовують воду або гель. Дозуючі пристрої, як правило, представляють собою поршневі насоси або клапанні системи, що забезпечують

порційну подачу суспензії трубопроводами безпосередньо в ґрунт (за принципом фумігації) або борозни, відкриті сошниками. Норма висіву насіння встановлюється шляхом зміни його кількості у суспензії й подається порційно. Якість роботи цих апаратів головним чином визначається рівномірністю розподілу насіння в рідині, тобто сталістю щільності суспензії [97, 98, 99, 100, 101]. Перевагами цих висівних апаратів є насамперед можливість додавання разом із рідиною стимуляторів росту і мікродобрив, що позитивно впливає на подальший ріст і розвиток рослин. Недоліками апаратів такого типу є: низька рівномірність висіву, відсутність можливості швидкої зміни партії насіння під час висіву селекційних ділянок, складність в обслуговуванні через велику кількість гідро каналів і патрубків.

Пневматичні висівні апарати (рис. 1.5) за конструктивним виконанням висівних пристроїв можуть бути розділені на дискові, барабанні, пальцеві (штокові) і апарати без рухомих частин, які працюють як на вакуумному принципі, так і на принципі нагнітання повітря в насінневу камеру. В обох випадках насінини притискаються до отворів (осередків) висівних пристроїв повітряним струменем, утримуються і переносяться до місця скидання. Скидання насіння зазвичай здійснюється шляхом припинення подачі повітря (екранування) або механічними скидачами [57, 58, 102, 103]. Пневмомеханічні висівні апарати за конструкцією поділяються на дискові, барабанні і стрічкові. До групи пневмомеханічних апаратів у цьому входять віднесені висівні пристрої, в яких пневматика служить для поліпшення захоплення і винесення насіння із загальної маси. Подальше транспортування і забезпечення рівномірної подачі насіння в цих апаратах здійснюється спеціальними механічними пристроями [104]. Перевагами пневматичних і пневмомеханічних висівних апаратів є висока точність висіву для великих насінин (>5 мм) і не висока складність при технічному обслуговуванні. Також ці висівні апарати можуть комплектуватися датчиками контролю положення насіння в отворі, що дозволяє автоматично перевести робочий орган в інше положення у разі відсутності насіння. Це сприяє підвищенню точності висіву. Недоліками цих

апаратів є недостатня точність висіву для дрібних насінин (<5 мм), необхідність контролювати герметичність системи і проводити її очищення від забруднення.



Дрібнонасі́нневий висівний апарат
СЗГ 00.2430-т



Гідравлічний висівний апарат
Т30 HYDROSEEDER



Пневматична висівна секція
сівалки SPM 8



Електромеханічний висівний
апарат Клен

Рисунок 1.5 – Загальний вигляд деяких висівних апаратів.

Електромеханічні висівні апарати (рис. 1.5) відрізняються від механічних наявністю електропривода робочих органів. Можуть бути використані як крокові двигуни так і сервоприводу. Використання системи контролю

електроприводами і різноманітними датчиками швидкості й положення дозволяє виконувати процес висіву з достатньо високою точністю навіть для дрібнонасінневих культур. При цьому є можливість змінювати сортозразки насіння безпосередньо під час висіву на різних ділянках. Недоліками електромеханічних висівних апаратів є складність технічного обслуговування, високий рівень знань обслуговуючого персоналу і необхідність формування бази даних сортозразків перед процесом висіву [105, 106, 107, 108, 109].

При сівбі дрібнонасінневих культур на ділянках сортовипробування і попереднього розмноження велике поширення в Україні отримали пневматичні і електромеханічні сівалки. Однак, проблемою їх використання є не достатня рівномірність розподілу насіння вздовж рядка, що пов'язано з випадковими процесами, які відбуваються під час висіву. Внаслідок цього посіви виходять нерівномірними – зі згущенням або розрідженням рослин у рядку, що у кінцевому результаті, призводить до зниження врожайності селекційноцінних дрібнонасінневих культур [110].

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на вдосконалення процесу дозування насіння висівними апаратами селекційних сівалок мають важливе наукове і практичне значення.

Спираючись на вищесказане можна стверджувати, що саме електромеханічні висівні апарати найбільш доцільні у селекційній сівбі дрібнонасінневих культур.

Проведений аналіз показав, що найпоширенішими селекційними сівалками в Україні є сівалки із висівними електромеханічними апаратами «Клен» (рис. 1.6), які призначені для точного рядкового висіву насіння дрібнонасінневих культур на ділянках попереднього і виробничого конкурсного сортовипробування, а також для проведення агротехнічних дослідів. Висівний апарат оснащено надійним електромеханічним приводом і ротаційним розподільником насіння. Розподільник насіння має плавне регулювання частоти обертання для найкращого розподілу різного за величиною насінневого матеріалу в сошниках [111].

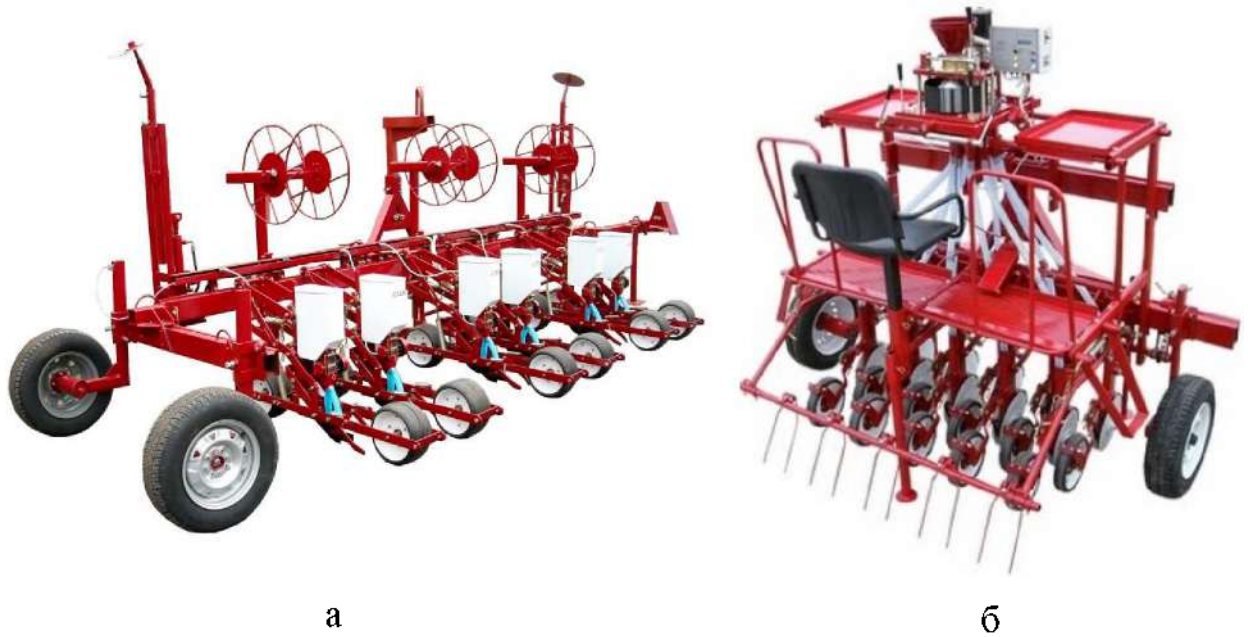


Рисунок 1.6 – Загальний вигляд селекційних сівалок «Клен-4,2» (а) і «Клен-1,5» (б) [111, 112].

Висівна система «Клен» – представляє собою комплекс (рис. 1.7), що складається з: вимикача живлення, пульта управління, двигуна дозатора, двигуна розподільника насіння, датчика швидкості, датчиків дозатора, виносного сигналу в кабінку тракториста. Живлення системи здійснюється через силовий провід з наконечниками для підключення до акумуляторної батареї. Налаштування параметрів ділянки і параметрів сівалки відбувається оперативно, централізовано з пульта управління. Контроль за роботою висівної системи – електронний (світлова і звукова сигналізація несправності на пульті управління). Облік засіяних ділянок – електронний (індикація на пульті управління) [111, 112].

Пульт управління – основний вузол системи, з яким взаємодіє оператор сівалки. Має дисплей, три світлові індикатори, шість кнопок навігації і окрему кнопку подачі сигналу (на правій грані корпусу). Здійснює управління електричних конструктивних елементів сівалки відповідно до обраного режиму роботи.



Двигун дозатора – кроковий двигун, що обертає дозуючий апарат. Розташований позаду самого апарату.

Мотор-редуктор розкидача – приводить в дію пристрій розподілу насіння в сошниках, обладнаний колекторним електродвигуном. Його працездатність визначається пультом за споживаним струмом. Пристрій розподілу насіння (розкидач) розташований під дозатором і з'єднаний із сошниками гнучкими насіннепроводами.

Датчик колеса – оптичний датчик розташований в маточині опорного колеса (лівого відносно руху сівалки). З його допомогою здійснюється вимірювання швидкості руху й підрахунок пройденої відстані. Підключається до пульта через перехідник-подовжувач.

Датчик положення дозатора – механічний кінцевий вимикач, що спрацьовує при перекритті вихідного отвору дозатора (початкове положення). Має механічне регулювання. Зупинка дозатора відбувається в момент розмикання контактів датчика.

Датчик завантаження дозатора – механічний кінцевий вимикач, що спрацьовує при натисканні на ручку завантаження (й опускання конуса). При натисканні на ручку ланцюг замикається. Не є обов'язковим елементом системи, у разі відмови дублюється кнопкою «+» на пульті.

Сигнал тракториста – виносний звуковий випромінювач підвищеної гучності. Вмикається кнопкою, розташованою на правому боці пульта. Слугує для подачі сигналу трактористу оператором сівалки (наприклад, про необхідність почати рух або зупинитися).

Вимикач живлення – захисний автомат, розташований на ввіді живлення в систему. Служить для захисту самої системи і устаткування трактора від перевищення струму у разі короткого замикання або пошкодження проводки. Також виконує роль механічного вимикача живлення. Конструктивно представляє собою блок з двома кабелями: один підводиться до пульта управління, інший – до акумулятора трактора.

Представлена система є автоматизованою, але потребує доопрацювання:

- необхідно вдосконалити робочий орган висівного апарату для забезпечення точності висіву дрібнонасіньових культур на рівні 95,0 %;
- для сівби на ділянках добазового насінництва необхідно забезпечити автоматичне завантаження насіння різних сортотипів до висівного апарату;
- потребує вдосконалення система висіву на ділянках добазового насінництва з урахуванням GPS-трекінгу;
- елементи системи висіву повинні бути блоковими для легкої заміни при виході їх з ладу.

Відома навісна сівалка «Клен» [113], призначена для агрегування з тракторами та використовується для передпосівного та конкурсного тестування на багаторядкових ділянках третього етапу селекційно-насіньових робіт. Ця

сівалка облаштована висівним апаратом порційного типу, який випускає задані порції насіння на ділянці заданої довжини. Однак у неї є декілька недоліків, зокрема, недосконала конструкція висівного апарату, яка не забезпечує точний висів насіння різних сортів у різні рядки та не відповідає вимогам для сівби дрібнонасіньових культур на другому етапі селекційно-насіньових робіт. Крім цього, сівалка має складну систему електронного управління, що ускладнює швидку зміну налаштувань для інших висівних апаратів. Також відсутня можливість автоматичного завантаження насіння різних сортів для сівби на ділянках базового насінництва.

Відома селекційна касетна сівалка [114] складається з рами, контейнера, касетного столу з блоком касет, насіннепроводів, висівних апаратів з конусами та сошниками, прикочувальних пристроїв, коробки програми, коробки передач та підрамника із сошниковими вузлами. Серед недоліків цієї сівалки варто відзначити відсутність можливості автоматичної зміни касет для великої кількості залежно від плану сівби. Також до інших недоліків можна віднести конструктивні рішення висівного апарату, які ускладнюють швидке очищення та подальше технічне обслуговування.

Навісна селекційна сівалка під назвою «СНС-16А» [115], яка складається з рами, опорно-приводних коліс, повідкового бруса, двох дискових сошників зі штангою і пружинами, закріпленими на порожнистому квадратному валу, що має механізм для зміни глибини ходу сошників. Крім того, ця сівалка включає насіннепроводи, насінневий ящик із встановленими в його нижній частині висівними апаратами та механізм приводу висівних апаратів. У цьому механізмі приводу є електродвигун з черв'ячним редуктором, один вал якого пов'язаний з валом висівних апаратів, а інший – з валом електродвигуна. Швидкість обертання вала електродвигуна контролюється мікропроцесорним блоком управління, який живиться від електрообладнання трактора. Серед недоліків цієї відомої сівалки варто відмітити відсутність можливості фіксації координат ділянок і їхніх розмірів, що ускладнює подальший селекційний процес і збільшує трудомісткість селекціонера.

Мета розробки – підвищення точності висіву дрібнонасіненних культур для посіву ділянок добазового насінництва з урахуванням GPS-трекінгу із забезпеченням автоматичного завантаження насіння різних сортозразків до висівного апарату.

В основу розробки поставлено завдання створення такого висівного апарату, в якому шляхом встановлених актуатора контейнера, актуатора футляра, тензодатчиків, RFID-міток, модуля зчитування даних, модуля GPS-зв'язку, що дозволяє більш ефективно виконувати технологічний процес посіву ділянок добазового насінництва з урахуванням GPS-трекінгу із забезпеченням автоматичного завантаження насіння різних сортозразків до висівного апарату.

1.5 Аналіз методів попередніх досліджень сівалок точного висіву

Аналіз літературних джерел показав достатньо широкий спектр методів досліджень сівалок точного висіву. Узагальнюючи можна розділити їх на чотири великі групи: аналітичні методи, методи чисельного моделювання, лабораторно-експериментальні і експериментально-польові.

Аналітичні методи в статтях [116, 117, 118, 100] в основному базуються на визначенні траєкторій руху насінин під час їх проходження через висівний апарат. За результатами досліджень складаються диференціальні рівняння, які мають складний розв'язок. Для вирішення наведених рівнянь зазвичай роблять припущення і спрощення, що призводить до погіршення точності отриманих результатів. Тому цей метод будемо використовувати лише для розрахункових елементів дослідження.

Нині все активніше розвиваються методи чисельного моделювання, які базуються на методі дискретних елементів. У багатьох дослідженнях [53, 55, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125] цей метод широко використовується для опису руху насінин під дією зовнішніх факторів. Метод дискретних елементів (DEM) є одним з важливих числових методів, що використовується для моделювання і аналізу різних процесів в інженерії та природничих науках. Він дозволяє розглядати тіла як складні агрегати окремих часток, що взаємодіють

одна з одною. Метод дискретних елементів може бути застосований до широкого спектра завдань, включаючи переміщення насіння у висівному апараті [57, 58, 103]. Однією з основних переваг використання DEM для моделювання переміщення насіння є можливість визначити ймовірність успішного укладання насіння в певному місці та час потрібний для цього. Метод дискретних елементів відкриває нові можливості для вивчення переміщення насіння у висівних апаратах. Цей числовий метод дозволяє моделювати рух частинок на мікроскопічному рівні та враховувати різноманітні фізичні впливи та впливи середовища. Тому в подальших теоретичних дослідженнях будемо використовувати саме цей метод.

Лабораторно-експериментальні дослідження проводять у лабораторних умовах з використанням відповідних стендів із вимірювальним обладнанням. Такі стенди використовувалися в роботах [100, 126, 127, 128, 129, 130, 131]. Основними елементами таких стендів є рухоме поле у вигляді стрічкового транспортеру і високошвидкісні відеокамери для фіксації положення насіння. Тому у подальших дослідженнях передбачено створення такого стенду і проведення відповідних лабораторних досліджень, які дозволять не лише обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри висівного апарату, але й налаштувати його перед встановленням на сівалку.

Експериментально-польові методи дослідження проводяться на дослідних полях з використанням спеціалізованого вимірювального обладнання і загальноприйнятих польових методик досліджень. Науковий інтерес містять дослідження науковців УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, які займаються випробуванням техніки і технологій сільськогосподарського виробництва [132, 133, 134, 135]. Цікаві методики запропоновані в [136] для польових випробувань сівалки для прямої сівби зернових культур, визначені якісні показники її роботи. У статті [137] подано результати порівняльних польових експериментів, проведених з використанням пневматичних сівалок, щодо їх точності укладання насіння кукурудзи відносно довжини рядка. У роботі [138] критерієм оцінювання використано ймовірність точності висіву як комплексний показник підвищення ефективності роботи сівалки.

1.6 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми висівного апарату дрібнонасіненних культур

Для розв'язання поставлених задач розроблено висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасіненних культур, концептуальна конструктивно-технологічна схема якого представлена на рис. 1.8 (додаток А).

Висівний апарат містить раму 1, яка закріплена на рамі селекційної сівалки. На рамі 1 встановлено контейнер 2, де розміщуються касети 3 із насінням. Касети 3 складаються із корпусу 4, висувного футляра 5 і RFID-мітки 6. На тильній стороні контейнера 2 на рамі 1 встановлено актуатор контейнера 7. На фронтальній стороні контейнера 2 на рамі 1 встановлено актуатор футляра 8 і модуль зчитування даних 9. З двох боків рами 1 під актуатором футляра 8 жорстко закріплені тензодатчики 10. До тензодатчиків 10 кріпиться ємність 11. У ємності 11 розміщується дозатор 12 циліндричної форми із трикутними вирізами. Співвісно до дозатора 12 встановлено вал 13 із заслінкою 14. Вал 13 приєднано до валу крокового двигуна 15, який жорстко закріплено із зовнішньої сторони ємності 11. До рами 1 за допомогою кронштейнів 16 закріплено розподільник 17. До розподільника 17 знизу жорстко закріплені патрубків насіннепроводу 18. До патрубків насіннепроводу 18 приєднані гофровані насіннепроводи (на рис. не показано).

Актуатор контейнерів 7, актуатор футляра 8, модуль зчитування даних 9, тензодатчики 10, кроковий двигун 15 по засобах електричних проводів 19 приєднано до блока керування 20. Блок керування 20 по засобах електричних проводів 19 приєднано до датчика обертів 21, який розміщено на колесі сівалки. Блок керування 20 по засобах електричних проводів 19 приєднано до сигналу тракториста 22, який розміщено в кабіні трактора. Блок керування 20 по засобах електричних проводів 19 приєднано до модуля GPS-зв'язку 23, який розміщено на сівалці. Блок керування 20 по засобах електричних проводів 19 приєднано до джерела живлення 24, яким може бути акумулятор (12 В) трактора.

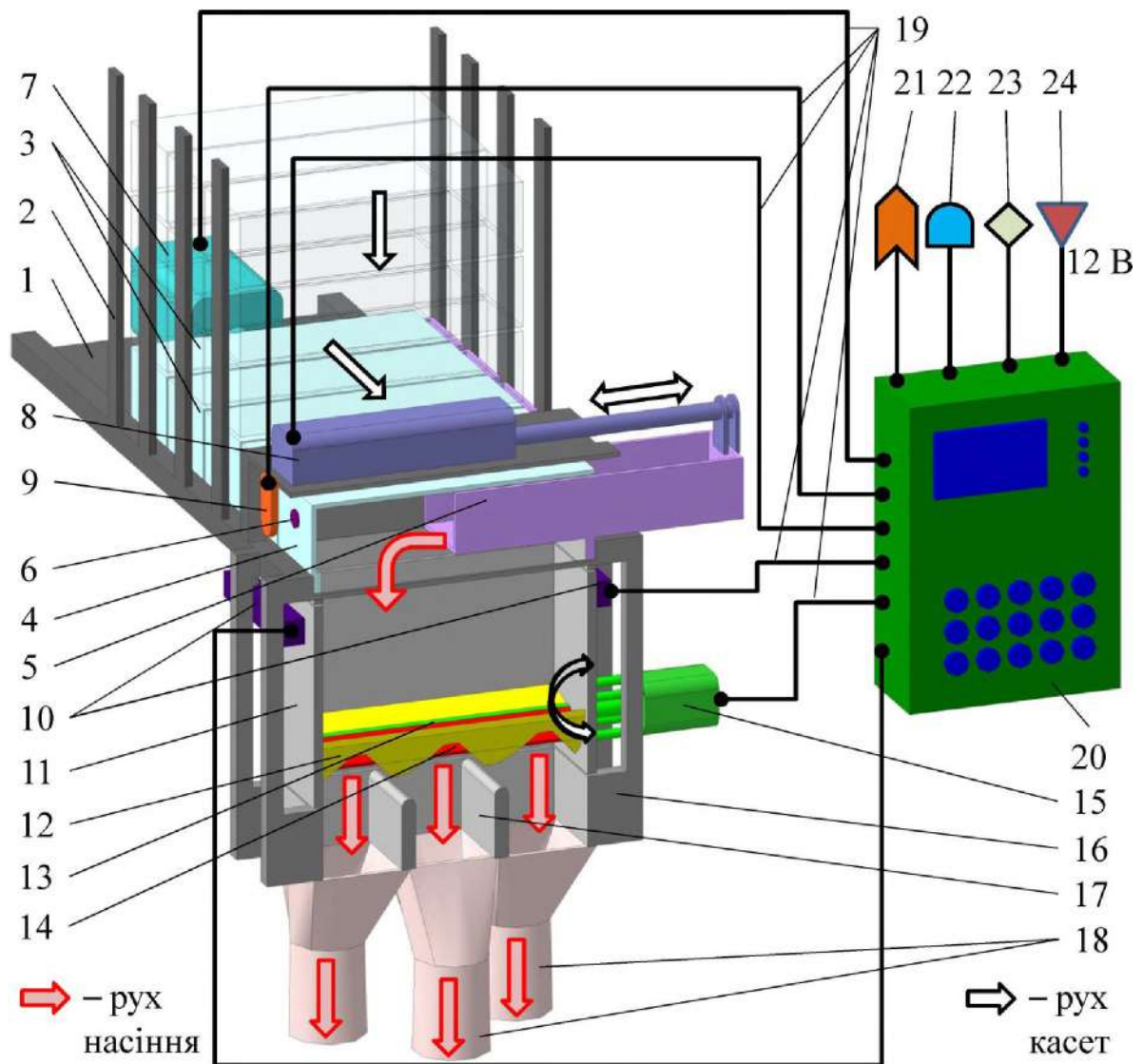


Рисунок 1.8 – Концептуальна конструктивно-технологічна схема висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіненних культур.

Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасіненних культур працює таким чином. Перед початком сівби, згідно з затвердженим планом, селекціонер засипає в касети 3 насіння дрібнонасіненних культур необхідних сортозразків шляхом переміщення висувного футляра 5 з корпуса 4. Після завантаження насіння, з використанням програматора селекціонер записує номер сортозразка у RFID-мітку 6. Далі селекціонер встановлює сформовані касети 3 із насінням в контейнер 2 і завантажує до блока керування 20 через персональний комп'ютер або телефон файл із планом посіву. У файлі вказані дані щодо розміру ділянок, їх розташування, розміщення сортозразків на них,

густоту висіву і морфологічні параметри насіння (середній геометричний розмір, маса 1000 насінин і лабораторна схожість).

Після підготовчих операцій селекціонер вмикає блок керування 20, який зчитує отриману інформацію з файлу із планом посіву і по засобах електричних проводів 19 передає сигнал до сигналу тракториста 22. Тракторист починає керувати рухом трактора. Інформація з модуля GPS-зв'язку 23 і датчика обертів 21 по засобах електричних проводів 19 передається до блока керування 20, де визначаються координати сівалки і швидкість руху трактора. Порівнюючи отримані дані із планом сівби, блок керування 20 починає процес висіву.

Блок керування 20 по засобах електричних проводів 19 передає сигнал до актуатора контейнерів 7, який приводиться в дію і переміщує нижній ряд касет 3 з контейнера 2 по рамі 1 до місця, де встановлений модуль зчитування даних 9. Модуль зчитування даних 9 зчитує інформацію щодо сортозразка з RFID-мітки 6 і передає її до блока керування 20. Блок керування 20 для визначеного сортозразка встановлює параметри висіву відповідно до завантаженого плану посіву. Далі блок керування 20 передає сигнал засобами електричних проводів 19 до актуатора футляра 8, який відкриває висувний футляр 5 з корпусу 4, що призводить до вивантаження насіння до ємності 11. Після цього актуатор футляра 8 закриває висувний футляр 5.

Тензодатчики 10 вимірюють масу вивантаженого насіння і передають цю інформацію до блоку керування 20, який порівнює її із завантаженими даними морфологічних параметрів насіння. На основі прийнятого рішення щодо норми висіву блок керування 20 по засобах електричних проводів 19 вмикає кроковий двигун 15, який починає обертати вал 13 і відповідно заслінку 14 на певний кут періодично в обох напрямках обертання. Частота обертання і амплітуда кута повороту залежить від встановленої норми висіву і морфологічних параметрів насіння. У відкритому стані заслінка 14 і дозатор 12 утворюють отвір, через який насіння потрапляє до розподільника 17, а далі до патрубку насіннепроводу 18 і гофрованого насіннепроводу. З гофрованого насіннепроводу насіння потрапляє до сошника і далі в ґрунт.

Досягнувши краю ділянки (за даними з модуля GPS-зв'язку 23) або закінчення насіння в ємності 11 (по даним з тензодатчиків 10) блок керування 20 передає відповідний сигнал по засобах електричних проводів 19 до сигналу тракториста 22. Після цього актуатор контейнера 7 штовхає касети 3. Касета без насіння виштовхується з рами 1, а на її місце встановлюється наступна і процес повторюється. Під час роботи згідно з планом посіву і даних, отриманих з датчика обертів 21 і модуля GPS-зв'язку 23, блок керування 20 передає відповідний сигнал по засобах електричних проводів 19 до сигналу тракториста 22, вказуючи про необхідність продовження шляху, зупинок і поворотів.

Використання запропонованого висівного апарату дозволяє автоматизувати процес висіву насіння на ділянках добазового насінництва з мінімальною участю селекціонера та забезпеченням високої точності сівби.

Подальшими дослідженнями передбачено обґрунтування конструктивних параметрів дозатора і режимних параметрів (швидкість, періодичність і амплітуда обертання) крокового двигуна висівного апарату залежно від морфологічних властивостей насіння дрібнонасінневих культур і норми їх висіву.

1.7 Висновки до розділу 1

1. Аналіз схеми селекційної роботи залежно від біологічних особливостей дрібнонасінневих культур дозволяє стверджувати про необхідність створення такої малогабаритної посівної машини, яка може забезпечити сівбу для всіх етапів селекційного процесу (створення популяцій для відбору; відбір потрібних генотипів – вихідних елітних рослин; випробування потомства, розмноження до виробничо значущих обсягів).

2. Відповідно до умов, необхідних для нормального розвитку рослин, до сівби на селекційних ділянках попереднього розмноження і сортовипробування важливими агротехнічними вимогами є забезпечення рівномірного розподілу насіння вздовж рядка на рівні не нижче, ніж 90 %. Виконання цієї вимоги сприяє якнайкращому забезпеченню всіх рослин поживними речовинами.

3. За результатами аналізу конструкцій існуючих висівних апаратів доповнено їх класифікацію на основі принципу дії апаратів і конструктивне оформлення їх висівних пристроїв. За результатами патентно-інформаційного аналізу встановлено, що електромеханічні висівні апарати є найбільш доцільними у селекційній сівбі дрібнонасіньєвих культур, оскільки вони забезпечують достатню високу точність висіву і мають перспективні можливості щодо організації зміни сортозразків безпосередньо під час висіву на різних ділянках.

4. Аналіз роботи електромеханічної висівної системи «Клен» дозволив сформулювати основні шляхи її удосконалення: необхідно удосконалити робочий орган висівного апарату для забезпечення точності висіву дрібнонасіньєвих культур на рівні 95,0 %; для сівби на ділянках добазового насінництва необхідно забезпечити автоматичне завантаження насіння різних сортозразків до висівного апарату; потребує удосконалення система висіву на ділянках добазового насінництва з урахуванням GPS-трекінгу; елементи системи висіву повинні бути блоковими для легкої заміни при виході їх з ладу.

5. За результатами аналізу методів попередніх досліджень сівалок точного висіву сформовані основні напрямки досліджень:

– теоретичний: на основі чисельного моделювання, використовуючи метод дискретних елементів;

– лабораторно-експериментальний: на основі розробленого і створеного стенду із рухомим полем і високошвидкісною відеокамерою для фіксації положення насіння;

– експериментально-польовий метод: у виробничих умовах на дослідних ділянках.

6. Для вирішення поставлених завдань обґрунтовано концептуальну конструктивно-технологічну схему висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур, який дозволяє автоматизувати процес висіву насіння на ділянках добазового насінництва з мінімальною участю селекціонера та забезпеченням високої точності сівби.

1.8 Мета і задачі досліджень

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу сівби насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом удосконалення конструкції висівного апарату селекційної сівалки із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких завдань:

– провести аналіз способів і технічних засобів точного висіву насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур та обґрунтувати концептуальну конструктивно-технологічну схему висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур;

– провести теоретичний аналіз процесу взаємодії насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур із робочим органом висівного апарату вдосконаленої селекційної сівалки;

– оптимізувати конструктивно-технологічні параметри робочого органу висівного апарату вдосконаленої селекційної сівалки за результатами експериментальних досліджень;

– дослідити у виробничих умовах точність висіву розробленого висівного апарату удосконаленої селекційної сівалки та визначити раціональні режимні параметри її роботи;

– провести випробування і визначити економічну ефективність експериментального зразка удосконаленої селекційної сівалки та впровадити результати досліджень у виробництво.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [139, 140].

1. Яропуд В.М., Дацюк Д.А. Шляхи удосконалення висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 156–166. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15.

2. Дацюк Д.А., Яропуд В.М., Алієв Е.Б. Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасінневих культур: пат. 149682 Україна: МПК А01С 7/04, А01В 49/06. № 202101285; заявл. 15.03.2021. опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48. 4 с.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ

2.1 Постановка завдання

Висів насіння дрібнонасіньєвих культур у розробленому висівному апараті зводиться до процесу його дозування і транспортування до насіннепроводу. Як зазначалось у розділі 1, після відкриття висувного футляра з корпусу за допомогою актуатора насіння вивантажується до ємності висівного апарату, де формується з точки зору математики у випадкову об'ємну масу. Далі з використанням заслінки через дозувальні отвори, що утворилися, насіння потрапляє до розподільника і переміщується до насіннепроводу. Враховуючи вищезазначене, теоретичні дослідження будемо проводити в 3 етапи:

- розробка моделі випадкового пакування насіння дрібнонасіньєвих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки;
- моделювання процесу роботи висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур;
- дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур.

Сучасні аналітичні дослідження процесів переміщення насіння вимагають використання аналітичних методів та складних систем диференційних рівнянь із граничними і початковими умовами [119]. Такі системи складно розв'язати традиційними методами теоретичної механіки, тому для їх чисельного розв'язання широко використовують комп'ютерне моделювання, що дозволяє зробити дослідження більш ефективним та точним.

Серед сучасних методів комп'ютерного моделювання механіко-технологічних процесів переміщення сипкого середовища, зокрема насінневої суміші, особливий інтерес викликають методи, основою яких є дискретне представлення речовини. Серед цих методів особливо варто виділити метод динаміки частинок та метод дискретних елементів [141, 142].

Метод динаміки частинок заснований на моделюванні середовища як сукупності частинок, які взаємодіють між собою і можуть бути матеріальними точками або твердими тілами. Рух цих частинок описується рівняннями класичної механіки. При використанні методу динаміки частинок для моделювання руху частинок на кожному кроці ітераційного процесу розв'язується задача Коші – інтегруються диференціальні рівняння з урахуванням заданих початкових умов. Існують відомі програмні засоби, такі як CHARMM, AMBER, GROMACS, NAMD, GROMOS, які дозволяють проводити розрахунки з використанням методу динаміки частинок [143, 144].

Ці методи дозволяють здійснювати детальне моделювання переміщення сипких матеріалів, зокрема насінневої суміші, і досліджувати різні аспекти їх поведінки, такі як розподіл частинок, взаємодія між ними та зовнішніми факторами. Застосування цих методів дозволяє отримати важливі дані і висновки для покращення ефективності сівалок і висівних апаратів, що працюють із сипкими матеріалами.

Метод дискретних елементів є розширенням методу кінцевих елементів, який використовується для моделювання процесів. При застосуванні цього методу, початкові положення та швидкості частинок визначаються для моделювання. За допомогою фізичних законів взаємодії між частинками обчислюються сили, що діють на кожен з них. Цей метод дозволяє використовувати різні закони взаємодії, доки є розв'язані рівняння, які їх описують.

Для кожної частинки обчислюється результуюча сила і вирішується задача Коші для вибраного інтервалу часу. Отримані результати використовуються як вихідні дані для подальших кроків моделювання. Найвідоміші програмні засоби, які реалізують метод дискретних елементів, включають PFC3D, Chute Maven, PASSAGE, GROMOS 96, ELFEN, MIMES, EDEM, Simcenter Star-CCM+ [145, 146].

Метод дискретних елементів базується на законах збереження імпульсу і моменту імпульсу для Лагранжевих моделей багатофазного середовища [147].

Проте для побудови фізико-математичної моделі необхідно припускати, що частинки компонентів представлені у вигляді кульок з визначеною густиною і ефективним діаметром.

У зв'язку з цим, для подальших теоретичних досліджень було обрано чисельне моделювання з використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+¹. Цей пакет є повнофункціональною мультидисциплінарною платформою для інженерних розрахунків та аналізу поведінки виробів у реальних умовах експлуатації, зокрема взаємодії з різноманітними середовищами.

2.2 Модель випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки

Першим етапом теоретичних досліджень є розробка моделі випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки і обґрунтування геометричних параметрів його дозатора.

Геометричну форму насіння дрібнонасінневих культур (ріпак, гірчиця, рижій, просо та ін.) будемо апроксимувати у вигляді куль з ефективним діаметром D . Згідно з дослідженнями [120, 121, 122, 148], навіть відкалібрована насіннева суміш містить насінини із різним ефективним діаметром. Тому приймаємо, що ефективний діаметр насіння підпорядковується нормальному розподілу і характеризується густиною ймовірності:

$$f(D, D_\mu, \sigma_D) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(D - D_\mu)^2}{2\sigma_D^2}\right), \quad (2.1)$$

де σ_D – середнє квадратичне відхилення для ефективного діаметра насіння, м;

D_μ – середнє значення для ефективного діаметра насіння, м.

При цьому насінини можуть мати ефективний діаметр, який знаходиться

¹ В дослідженнях використовувалося програмне забезпечення «Simcenter STAR-CCM+ Academic Pack», власником ліцензії якої є Дніпровський державний аграрно-економічний університет на основі договору про наукове співробітництво з Вінницьким національним аграрним університетом.

в діапазоні $D \in [D_{\min}; D_{\max}]$, де D_{\min} – мінімальне значення ефективного діаметра, м; D_{\max} – максимальне значення ефективного діаметра, м.

Приймаючи, що густина насінин є однаковою і дорівнює ρ , маса 1000 насінин визначається за формулою:

$$m_{1000} = \frac{500}{3} \rho \pi D^3 \quad (2.2)$$

де ρ – густина насінин, кг/м^3 .

Ємність висівного апарату селекційної сівалки має вигляд прямокутного паралелепіпеда висотою h , основа якого є квадрат з бічною стороною – a .

Генерація випадкового пакування полягає в послідовному запуску насіння сферичної форми з випадково обраною координатою на верхній грані ємності висівного апарату селекційної сівалки (рис. 2.1) в напрямку до її нижньої площини.

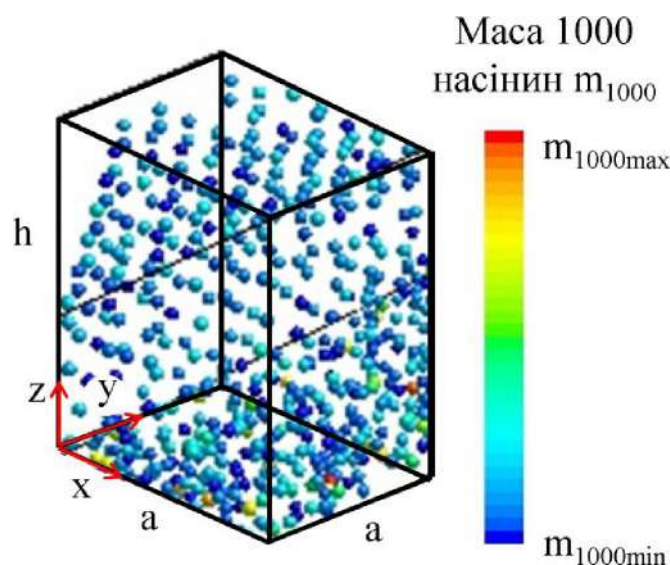


Рисунок 2.1 – Моделювання заповнення ємності висівного апарату селекційної сівалки сферичними насінинами.

Початкова швидкість осідання для всіх частинок задається однакою. Для випадкової генерації насінин приймаємо, що верхня площина ємності висівного апарату селекційної сівалки розділена на $N_G = 4a^2/\pi D^2$ комірок однакових розмірів. У цих комірках генеруються (1) або не генеруються (0) насінини. Ймовірність генерації насінини в кожній комірці дорівнює 0,5.

Надалі проводиться стеження за рухом запускених насінин. Щоб виключити розрахунок руху насінини від верхньої межі ємності до першого її контакту із вже сформованим упакованим насінням, запуск насінини реально проводиться з певної точки всередині ємності над упакованим насінням, в якій насінини, що рухається, досить близько знаходиться до рівня упакованого насіння. Координата z' підконтрольної насінини приймає значення $z' = z + D_1/2 + D_2/2$, де z – координата центру найвищої насінини з числа насінин, що осіли на дно ємності; D_1 – діаметр насінини, що рухається і D_2 – діаметр насінини із сформованого випадкового пакування з центром в z . Координати x' і y' визначаються генератором випадкових чисел, який з однаковою ймовірністю приймає значення від $0,5a - (\lambda - D_1/2)$ до $0,5a + (\lambda - D_1/2)$, де λ – наперед задане число між $D_{\min}/2$ і $D_{\max}/2$. Установка числа λ дозволяє задавати розмір джерела запуску насінин. При $\lambda = D_1/2$ насінини, що запускаються, знаходяться на лінії $x' = 0,5a$ і $y' = 0,5a$.

При контакті упакованих насінин, відбувається взаємодія, яка може бути описана як пружно-демпферний контакт. Припускається, що на насінину можуть впливати такі сили:

– сила, що спричинена гравітацією (сила тяжіння) [149]:

$$\overline{F}_g = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho g \overline{e}, \quad (2.3)$$

де \overline{F}_g – вектор-сила тяжіння, Н.

– сумарна сила взаємодії між насінинами та стінкою може бути розрахована на основі контактної моделі Герца-Міндліна, що включає пружні та демпферні компоненти. [145, 150, 151]:

$$\overline{F}_{\text{contact}} = \overline{F}_n + \overline{F}_t, \quad (2.4)$$

де $\overline{F}_{\text{contact}}$ – сила взаємодії між стінкою і насінинами, Н;

\overline{F}_n – нормальна проєкція сили, Н;

\overline{F}_t – тангенціальна проєкція сили, Н.

Нормальна проєкція сили розраховується за рівнянням:

$$\overline{F}_n = -K_n \overline{d}_n - N_n \overline{V}_n; \quad (2.5)$$

де K_n – коефіцієнт нормальної жорсткості складової пружності, кг/с^2 ;

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{d_n R_{eq}}; \quad (2.6)$$

N_n – коефіцієнт нормального згасання складової демпфера, кг/с;

$$N_n = \sqrt{(5K_n M_{eq})} N_{n \text{ damp}}. \quad (2.7)$$

Відповідно до результатів досліджень [149, 150], тангенціальна проекція сили визначається за формулою

$$\bar{F}_t = -K_t \bar{d}_t - N_t \bar{V}_t \quad (2.8)$$

за $|K_t \bar{d}_t| < |K_n \bar{d}_n| C_{fs}$, де C_{fs} – коефіцієнт тертя між стінкою і насінням або між насінинами. Також тангенціальна проекція сили визначається за такою формулою:

$$\bar{F}_t = \frac{|K_n \bar{d}_n| C_{fs} \bar{d}_t}{|\bar{d}_t|}; \quad (2.9)$$

де K_t – коефіцієнт тангенціальної пружної складової жорсткості, кг/с²;

$$K_t = 8G_{eq} \sqrt{d_t R_{eq}}; \quad (2.10)$$

N_t – коефіцієнт тангенціального згасання складової демпфера, кг/с;

$$N_t = \sqrt{(5K_t M_{eq})} N_{t \text{ damp}}; \quad (2.11)$$

N_{damp} – коефіцієнт загасання

$$N_{damp} = \frac{-\ln(C_{n \text{ rest}})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n \text{ rest}})^2}}; \quad (2.12)$$

R_{eq} – еквівалентний радіус насінин А і В, м;

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{2}{D_A} + \frac{2}{D_B}}; \quad (2.13)$$

M_{eq} – еквівалентна маса насінин А і В, кг;

$$M_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}; \quad (2.14)$$

E_{eq} – еквівалентний модуль пружності насінин А і В, Па;

$$E_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B}}; \quad (2.15)$$

G_{eq} – еквівалентний модуль зсуву насінин А і В, Па;

$$G_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{2(2 - \nu_A)(1 + \nu_A)}{E_A} + \frac{2(2 - \nu_B)(1 + \nu_B)}{E_B}}; \quad (2.16)$$

де M_A, M_B – маса насінин А і В, кг;

d_n, d_t – віртуальне перекриття насіння за нормальної і тангенціальної проєкцій, м [150];

D_A, D_B – ефективні діаметри насіння А і В, м;

E_A, E_B – модулі пружності насінин насіння А і В, Па;

ν_A, ν_B – коефіцієнти Пуассона насіння А і В;

$\overline{V}_n, \overline{V}_t$ – нормальна і тангенціальна проєкції швидкості насіння в точці контакту, м/с;

Взаємодія насіння зі стінкою відбувається за формулами (2.5)–(2.16), що є адекватними при умові коли маса стінки $M_{\text{wall}} = \infty$ і її радіус $D_{\text{wall}} = \infty$. Тоді рівняння (2.13) і (2.14) можна перетворити у такий вигляд:

$$R_{\text{eq}} = D_p/2, \quad M_{\text{eq}} = M_p. \quad (2.17)$$

Враховуючи згадані вище сили, можна записати систему диференціальних рівнянь, яка описує рух однієї сферичної насінини у ємності висівного апарату селекційної сівалки:

$$\begin{cases} \frac{1}{6} \pi D^3 \rho \frac{d_p \overline{V}_p}{dt} = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho \overline{g} + \overline{F}_n + \overline{F}_t, \\ \frac{d_p \overline{S}_p}{dt} = \overline{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \overline{V}_p \cdot \nabla, \end{cases} \quad (2.18)$$

де \overline{V}_p – вектор-швидкості переміщення насінин, м/с;

\overline{S}_p – вектор-переміщення насінин, м.

Для визначення положення кожної насінини в ємності висівного апарату селекційної сівалки необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь (2.17) з урахуванням формул (2.3)–(2.16), що аналітично досить складно зробити. Тому далі будемо використовувати програмний пакет Simcenter Star-CCM+, в основу якого покладено представлений математичний апарат.

Факторами чисельного моделювання є середнє значення ефективного діаметра насіння D_{μ} (0,001 м; 0,002 м; 0,003 м;) і коефіцієнт варіації δ_D (0,1; 0,2; 0,3), який розраховується як відношення середньоквадратичного відхилення ефективного діаметра насіння σ_D до його середнього значення (табл. 2.1). Моделювання проводилось для повнофакторного дослідження для двох факторів із загальною кількістю дослідів 9 у п'ятиразовій повторності.

Таблиця 2.1

Фактори і рівні чисельного моделювання випадкового пакування насіння у ємності висівного апарату

№	Ефективний діаметр насіння D_{μ} , м	Коефіцієнт варіації δ	Середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра насіння σ_D , м	Мінімальне значення діаметра насіння D_{\min} , м	Максимальне значення діаметра насіння D_{\max} , м
1	0,001	0,1	0,0001	0,0007	0,0013
2	0,001	0,2	0,0002	0,0004	0,0016
3	0,001	0,3	0,0003	0,0001	0,0019
4	0,002	0,1	0,0002	0,0014	0,0026
5	0,002	0,2	0,0004	0,0008	0,0032
6	0,002	0,3	0,0006	0,0002	0,0038
7	0,003	0,1	0,0003	0,0021	0,0039
8	0,003	0,2	0,0006	0,0012	0,0048
9	0,003	0,3	0,0009	0,0003	0,0057

Критерієм оцінки є щільність пакування, яка визначається таким чином:

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{6} \pi D_i^3}{a^2 h} \quad (2.18)$$

де i – номер насінини;

N – загальна кількість насінин.

Зазначимо, що для випадку однорозмірних куль найщільнішим пакуванням у просторі є правильний ікосаедр, який містить 12 вершин (рис. 2.2, а). Центри куль розміщуються у вершинах цієї об'ємної фігури.

Як зазначено в дослідженнях [152, 153], середня щільність такого пакування складає 0,74048. Для простого випадкового пакування (4 кулі): кубічної (рис. 2.2, б) і гексагональної форм (рис. 2.2, в) щільність складає 0,5236 і 0,6043 відповідно. Враховуючи вищесказане, можна стверджувати, що для однорозмірних куль в просторі щільність пакування може знаходитися в межах 0,5236–0,74048.

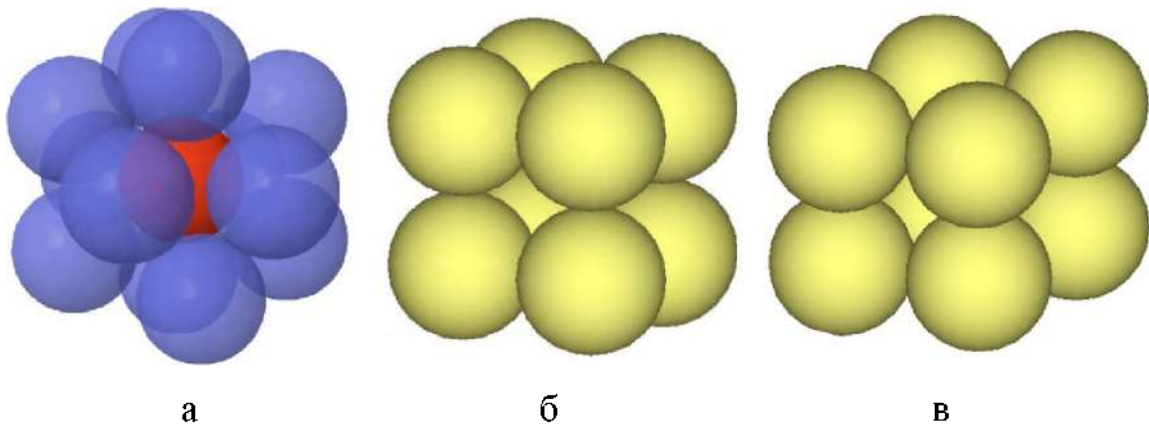


Рисунок 2.2 – Приклади пакування однорозмірних куль у просторі.

Наступним етапом є визначення закономірностей роботи дозатора, який представляється у вигляді заслінки, яка відкриває отвори різної форми. Отвори дозатора циліндричної форми зроблені у трьох виконаннях (рис. 2.3): I – трикутник, II – напівколо, III – прямокутник. Залежності площі одного отвору дозатора S від кута повороту заслінки α для різних виконань приведено на рис. 2.2.

Факторами чисельного моделювання є щільність пакування ϕ (0,550; 0,575; 0,600) і кут повороту заслінки α (0,1–1,5 через 0,1).

Критерієм оцінки є пропускна здатність дозатора Q_d :

$$Q_d = \frac{n}{t} \quad (2.19)$$

де t – час, с;

n – кількість насінин.

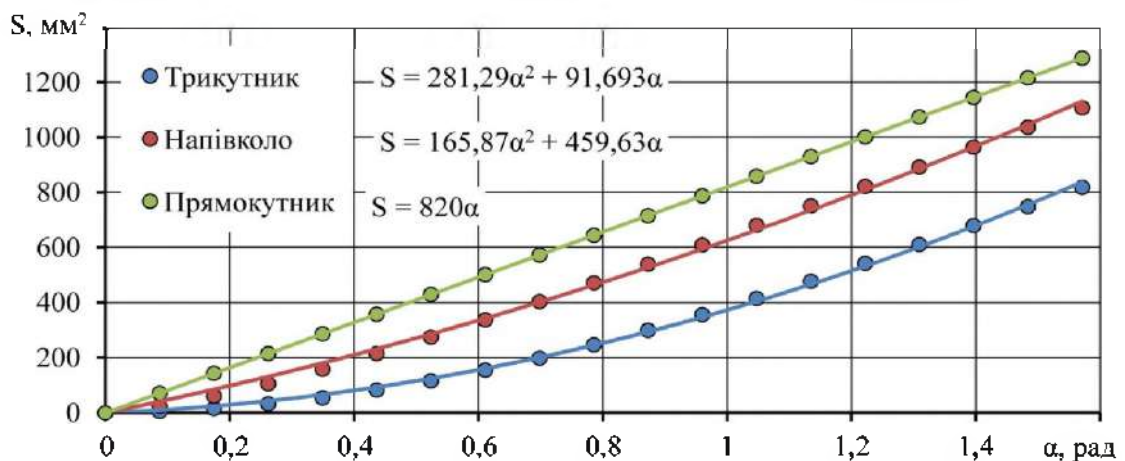
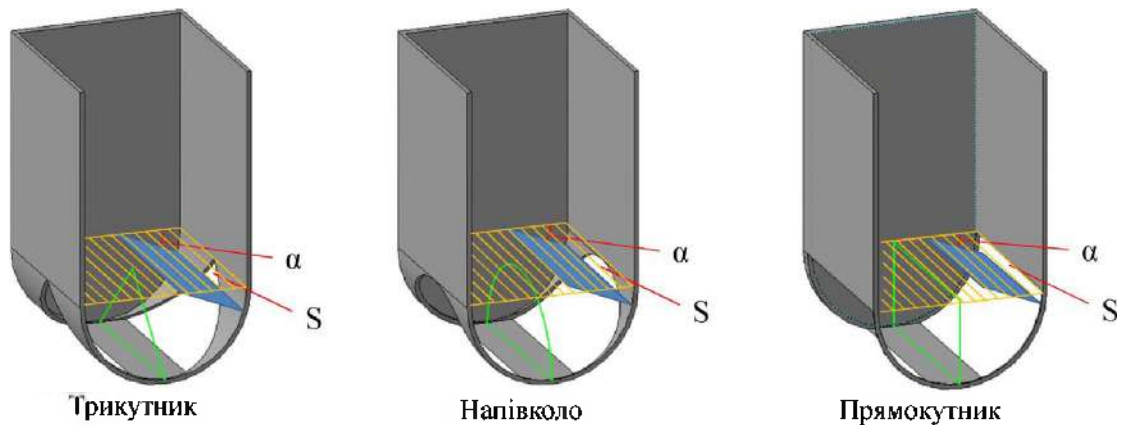


Рисунок 2.3 – Залежності площі одного отвору дозатора S від кута повороту заслінки α для різних виконань.

У програмному пакеті Star CCM+ для симуляції процесу дозування використовуються різні фізичні моделі, такі як [154, 155, 156, 157]:

1. Тривимірна модель, яка дозволяє розглядати процеси у трьох вимірах, враховуючи розподіл частинок у просторі.
2. Нестационарна неявна модель, що враховує зміни параметрів системи з часом, забезпечуючи більш точне узгодження з реальними умовами процесу дозування.
3. Математична модель однокомпонентного газу (повітря) і модель ідеального газу (повітря), що дозволяють описувати поведінку повітря в процесі дозування.
4. Модель турбулентної течії повітря і k-ε модель турбулентності повітря, які дозволяють враховувати турбулентні струмування повітря під час процесу

дозування.

5. Ізотермічне рівняння енергії рідини, що враховує теплові взаємодії між частинками під час дозування.

6. Усереднене по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, що дозволяє узагальнено описувати рух рідини у системі.

7. Роздільна течія, методи градієнта і границь, які допомагають розглядати різні умови та переходи між різними станами речовини.

8. Лагранжева модель багатофазного середовища, що дозволяє досліджувати рух частинок і їхню взаємодію у багатофазних системах.

9. Модель багатофазної взаємодії, яка дозволяє аналізувати взаємодію між різними фазами матеріалу.

10. Модель дискретних елементів (DEM), що дозволяє моделювати рух окремих частинок і їх динаміку в системі.

11. Поле сили тяжіння, яке враховує вплив сили тяжіння на рух частинок під час дозування.

Використання цих фізичних моделей дозволяє здійснювати комплексне моделювання процесу дозування та отримувати детальні результати для аналізу та оптимізації процесу. Для моделювання процесу, насіння гірчиці репрезентовано у формі Лагранжевої фази, використовуючи різні моделі, зокрема:

- модель постійної щільності;
- модель з урахуванням сили градієнта тиску;
- модель з урахуванням сили опору частинок;
- модель зі сферичними частинками;
- модель з однокомпонентними твердими частинками;
- модель частинок DEM (модель дискретних елементів).

Як приклад насіння гірчиці використовувалося згідно з проведеним аналізом літературних джерел, в якому були зазначені такі фізико-механічні характеристики [81]: щільність – 700 кг/м^3 ; модуль Юнга – $0,2 \text{ МПа}$; коефіцієнт тертя у стані спокою – $0,58$; коефіцієнт Пуассона – $0,2$; нормальний коефіцієнт відновлення – $0,5$; коефіцієнт опору кочення – $0,3$; дотичний коефіцієнт

відновлення – 0,5.

Таке представлення насіння дозволяє досліджувати його поведінку під час процесу дозування та взаємодію з іншими елементами середовища.

За результатами чисельного моделювання отримано візуалізацію випадкового пакування насінин (f , %) дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки при різних геометричних розмірах насіння (рис. 2.4). Для кожного чисельного дослідження розраховано пористість об'ємного масиву насінин, дані якої зведені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

Результати моделювання випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки

Ефективний діаметр насіння		Коефіцієнт варіації діаметра		Щільність пакування ϕ							
				Повторність					$\bar{\phi}$	σ_{ϕ}	δ_{ϕ}
$D_{ц}, м$	x_1	δ	x_2	1	2	3	4	5			
0,001	-1	0,1	-1	0,5628	0,5684	0,5552	0,5611	0,5594	0,5614	0,0048	0,0086
0,001	-1	0,2	0	0,5991	0,6024	0,5955	0,5970	0,5969	0,5982	0,0027	0,0045
0,001	-1	0,3	1	0,6164	0,6227	0,6112	0,6192	0,6130	0,6165	0,0046	0,0075
0,002	0	0,1	-1	0,5587	0,5611	0,5524	0,5585	0,5559	0,5573	0,0033	0,0059
0,002	0	0,2	0	0,5944	0,5977	0,5912	0,5930	0,5939	0,5940	0,0024	0,0040
0,002	0	0,3	1	0,6041	0,6063	0,5975	0,6048	0,6010	0,6027	0,0035	0,0058
0,003	1	0,1	-1	0,5532	0,5564	0,5496	0,5546	0,5522	0,5532	0,0026	0,0046
0,003	1	0,2	0	0,5884	0,5938	0,5842	0,5923	0,5857	0,5889	0,0041	0,0070
0,003	1	0,3	1	0,5995	0,6048	0,5952	0,6032	0,5990	0,6003	0,0038	0,0063

Примітки: $\bar{\phi}$ – середнє значення щільності пакування; σ_{ϕ} – середнє квадратичне відхилення щільності пакування; δ_{ϕ} – коефіцієнт варіації щільності пакування

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud представимо отримані дані таблиці 2.2 у вигляді рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді:

$$\phi = 0,592558 - 0,00560667 x_1 + 0,00171333 x_1^2 + 0,0246133 x_2 - 0,001995 x_1 x_2 - 0,0117867 x_2^2. \quad (2.20)$$

Статистична обробка отриманого рівняння (2.20) представлена в таблиці 2.3. Враховуючи кількість ступенів вільності отриманої матриці

результатів (табл. 2.4) табличний критерій Стюдента складає $t(0,05;36) = 2,03$.

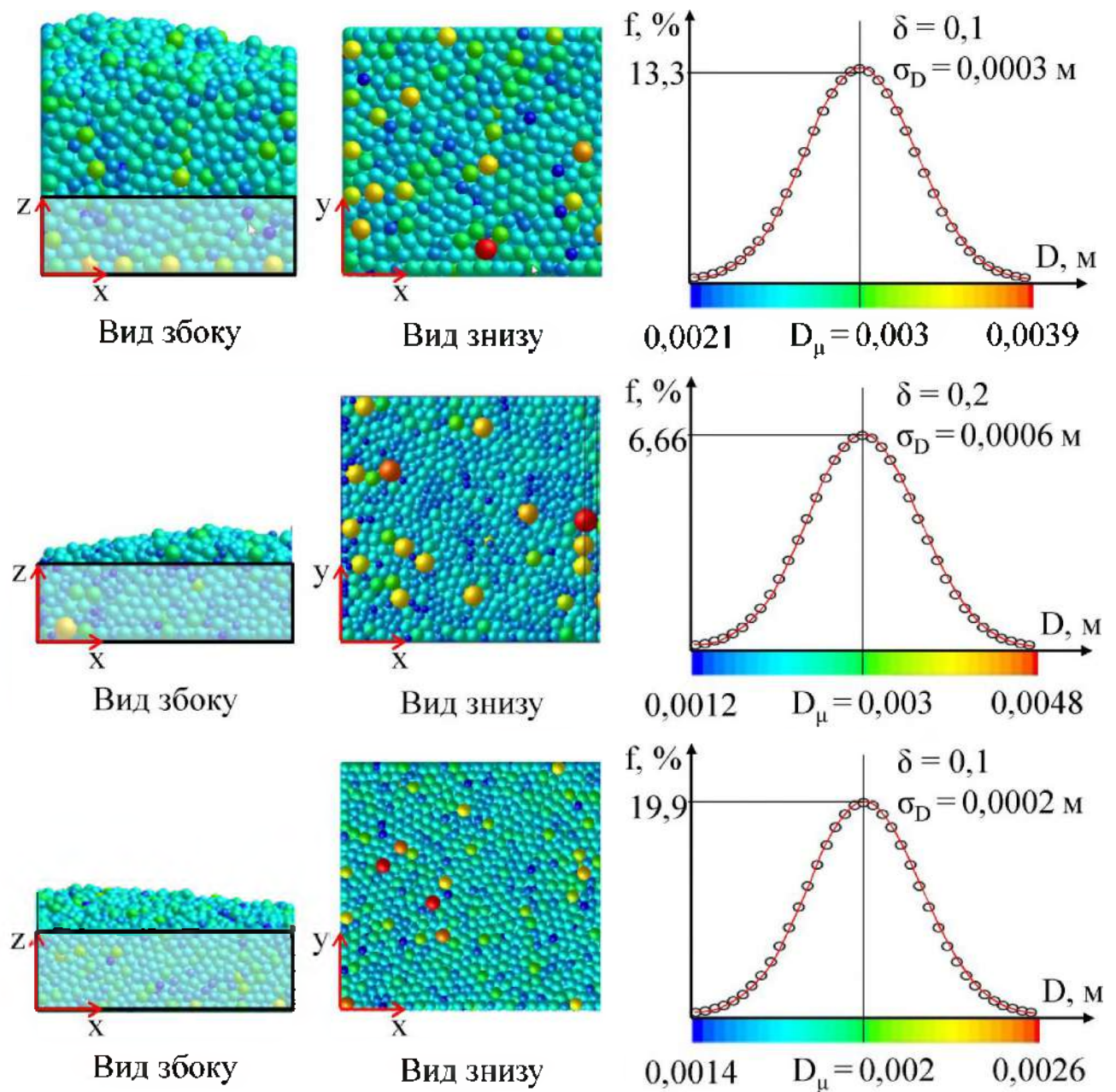


Рисунок 2.4 – Візуалізація випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки.

Порівнюючи табличний критерій Стюдента із розрахованим в таблиці 2.3, можемо відкинути незначущі коефіцієнти рівняння регресії (2.20) і остаточно отримати:

$$\phi = 0,499418 - 1,61667 D_\mu + 0,7575 \delta - 19,95 D_\mu \delta - 1,17867 \delta^2. \quad (2.21)$$

Статистична обробка рівняння (2.20)

Коефіцієнт	Значення	Критерій Стьюдента
a_{00}	0,592558	465,7
a_{10}	- 0,00560667	- 8,04488
a_{20}	0,0246133	35,3171
a_{12}	- 0,001995	- 2,33729
a_{11}	0,00171333	1,41937
a_{22}	- 0,0117867	- 9,76439

Графічне представлення рівняння (2.21) наведено на рис. 2.5. Зі зменшенням ефективного діаметра насіння D_{μ} і збільшенням коефіцієнта варіації δ спостерігається збільшення щільності випадкового пакування ϕ насіння дрібнонасінневих культур сферичної форми у ємності висівного апарату селекційної сівалки.

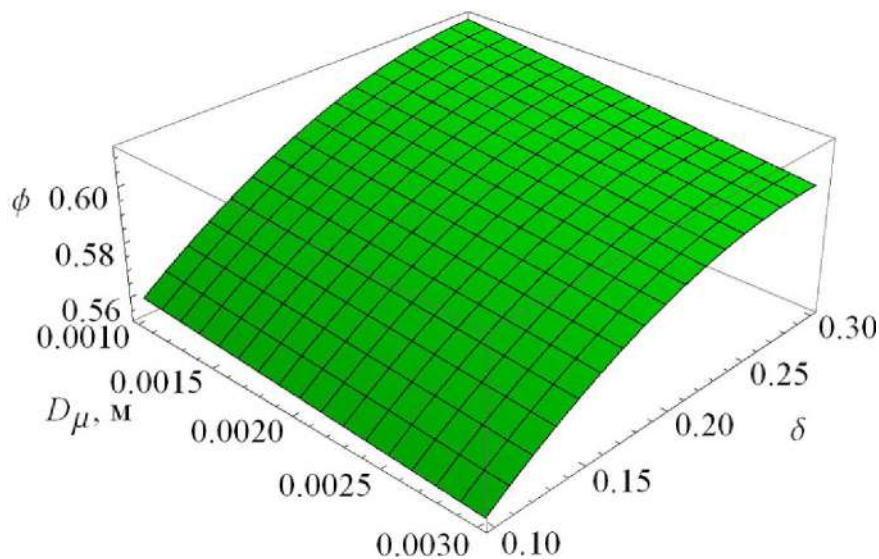


Рисунок 2.5 – Закономірність зміни щільності випадкового пакування ϕ насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки від ефективного діаметра насіння D_{μ} і його коефіцієнта варіації δ .

Це пояснюється тим, що насінини меншого діаметра заповнюють пустоти між насінинами більшого діаметра. Збільшення щільності випадкового пакування насіння може призвести до утворення склепінь, що унеможливило дозування. Дану гіпотезу перевіримо визначенням закономірностей роботи дозатора.

За результатами моделювання роботи дозатора отримано візуалізацію процесу на рис. 2.6, а числові дані зведені в табл. 2.4.

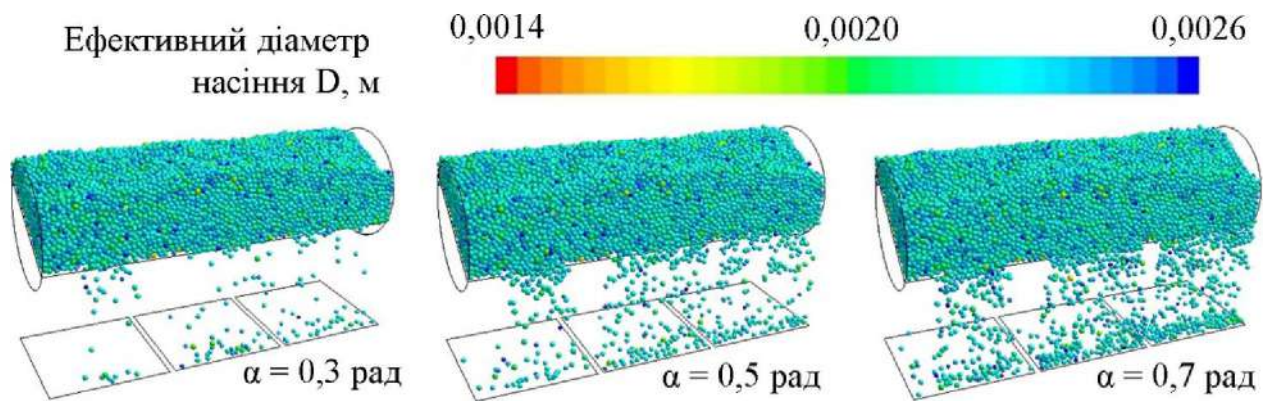


Рисунок 2.6 – Візуалізація процесу роботи дозатора висівного апарату селекційної сівалки.

Таблиця 2.4

**Пропускна здатність дозатора Q_d висівного апарату
селекційної сівалки (шт./с)**

Φ	Варіант отвору	Кут повороту заслінки α , рад														
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,550	I	0	0	0	6	18	35	63	103	155	227	319	438	584	764	985
	II	0	0	16	38	69	109	161	227	307	403	516	648	802	978	1179
	III	0	1	30	71	124	187	263	351	450	562	685	819	965	1124	1293
0,575	I	0	0	0	3	13	32	60	99	151	224	316	434	580	761	981
	II	0	0	13	35	66	107	160	224	305	399	513	646	800	976	1176
	III	0	0	11	52	105	169	246	333	432	544	667	801	947	1105	1275
0,600	I	0	0	0	1	12	30	58	97	149	222	314	432	579	760	979
	II	0	0	0	30	61	101	154	219	299	395	508	641	794	971	1172
	III	0	0	0	36	89	153	229	318	417	528	650	786	932	1090	1259
Сер.	I	0	0	0	3	14	33	60	99	152	224	316	435	581	762	981
	II	0	0	10	34	65	106	158	224	303	399	513	645	799	975	1176
	III	0	0	14	53	106	170	246	334	433	545	667	802	948	1106	1276

Примітки: I – трикутник; II – напівколо; III – прямокутник

Як видно з табл. 2.4, пропускна здатність дозатора Q_d висівного апарату селекційної сівалки не залежить від щільності випадкового пакування ϕ

насіння дрібнонасінневих культур у ємності. Проте видно, що при куті нахилу заслінки $\alpha = 0-0,3$ рад пропускна здатність дозатора $Q_d = 0$. Це пов'язано із утворенням склепіння у ємності висівного апарату.

Знайшовши середнє значення пропускної здатності дозатора Q_d для трьох значень щільності випадкового пакування ϕ насіння проведемо апроксимацію отриманих даних у вигляді поліному третього ступеня (рис. 2.7):

– для I варіанту (трикутник):

$$Q_d = 494,05 \alpha^3 - 387,74 \alpha^2 + 130,04 \alpha - 13,729; R^2 = 0,9998; \quad (2.22)$$

– для II варіанту (напівколо):

$$Q_d = 220,92 \alpha^3 + 213,26 \alpha^2 - 34,755 \alpha; R^2 = 0,9999; \quad (2.23)$$

– для III варіанту (прямокутник):

$$Q_d = -57,688 \alpha^3 + 753,18 \alpha^2 - 150,99 \alpha; R^2 = 0,9998. \quad (2.24)$$

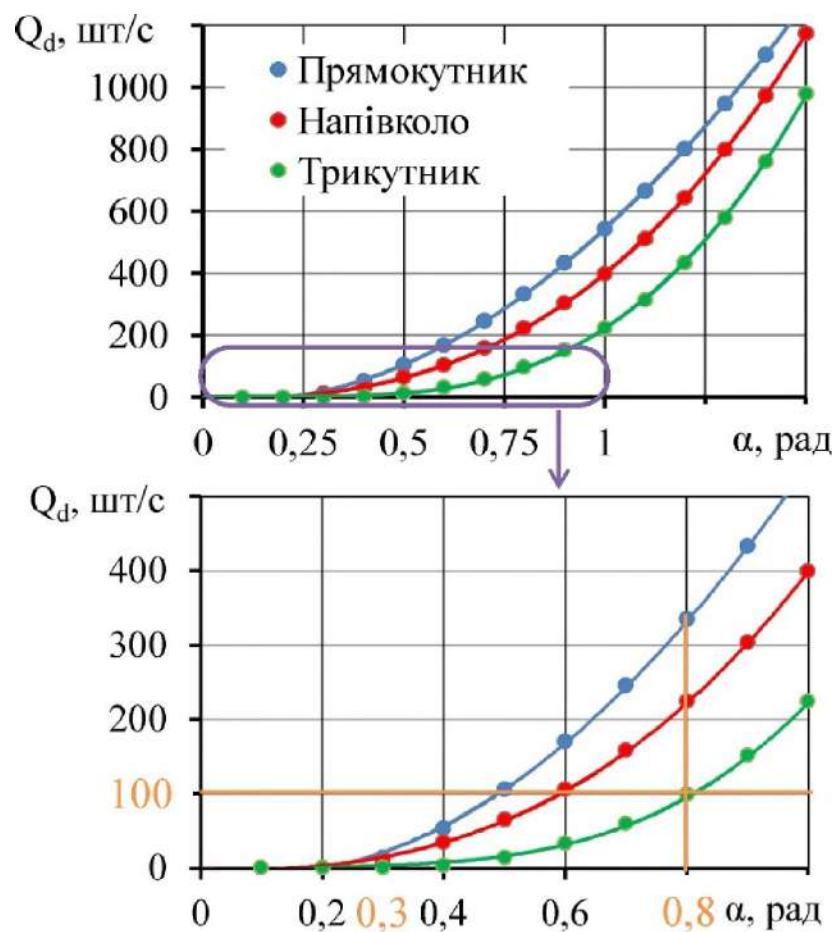


Рисунок 2.7 – Закономірність зміни пропускної здатності дозатора Q_d висівного апарату селекційної сівалки від кута нахилу заслінки α .

Аналіз рис. 2.7 дозволяє стверджувати, що за необхідності забезпечити пропускну здатність дозатора Q_d від 1 шт./с до 100 шт./с кут нахилу заслінки α повинен змінюватися в межах від 0,3 рад до 0,8 рад. При швидкості переміщення сівалки 1 м/с (4 м/с) пропускну здатність дозатора 1 шт./с і 100 шт./с відповідає нормі висіву 50 тис. шт./га (12,5 тис. шт./га) і 5 млн. шт./га (1,25 млн. шт./га).

Для уточнення цієї залежності необхідно провести додаткові дослідження, які будуть реалізовані в подальшому. Окрім зазначеного, з графіків Q_d (α) видно, що кут нахилу графіка для I варіанту отвору дозатора (трикутника) є найменшим. Тобто вибір саме трикутної форми дозатора дозволяє забезпечити найвищу точність дозування насіння.

2.3 Чисельне моделювання висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур

Чисельне моделювання процесу висіву насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур буде проводитися в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+. Для цього створена 3D-модель області висівного апарату і його робочого органу (дозатор циліндричної форми із трикутними вирізами і заслінки). Далі на основі обраних моделей сітки (генератор поверхневої сітки і генератор багатограних комірок) і встановлених опорних значень лінійного розміру (0,0025 м) проведено генерацію об'ємної сітки (рис. 2.8).

Насіння було представлено у вигляді Лагранжевої фази відповідно до таких моделей: постійної щільності, сили градієнта тиску, сили опору частинок, сферичних частинок, однокомпонентних твердих частинок, частинок DEM. Для прикладу, для досліджень обрано насіння гірчиці, яке згідно проведеного аналізу літературних джерел має такі фізико-механічні властивості: щільність – 700 кг/м³; модуль Юнга – 0,2 МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,2; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт тертя спокою – 0,58; коефіцієнт опору кочення – 0,3; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5. Оскільки перед сівбою

насіння підлягає калібруванню за геометричним розміром, то приймаємо такі характеристики: середнє значення ефективного діаметра – $D = 0,002$ м; мінімальне значення ефективного діаметра – $D_{\min} = 0,0014$ м; максимальне значення ефективного діаметра – $D_{\max} = 0,0026$ м; стандартне відхилення – $\sigma_D = 0,002$ м. Розподіл розміру насіння підпорядковується нормальному розподілу Гауса. При цьому маса 1000 насінин m_{1000} змінювалася в діапазоні від 2,2 до 4,2 г [81, 158].

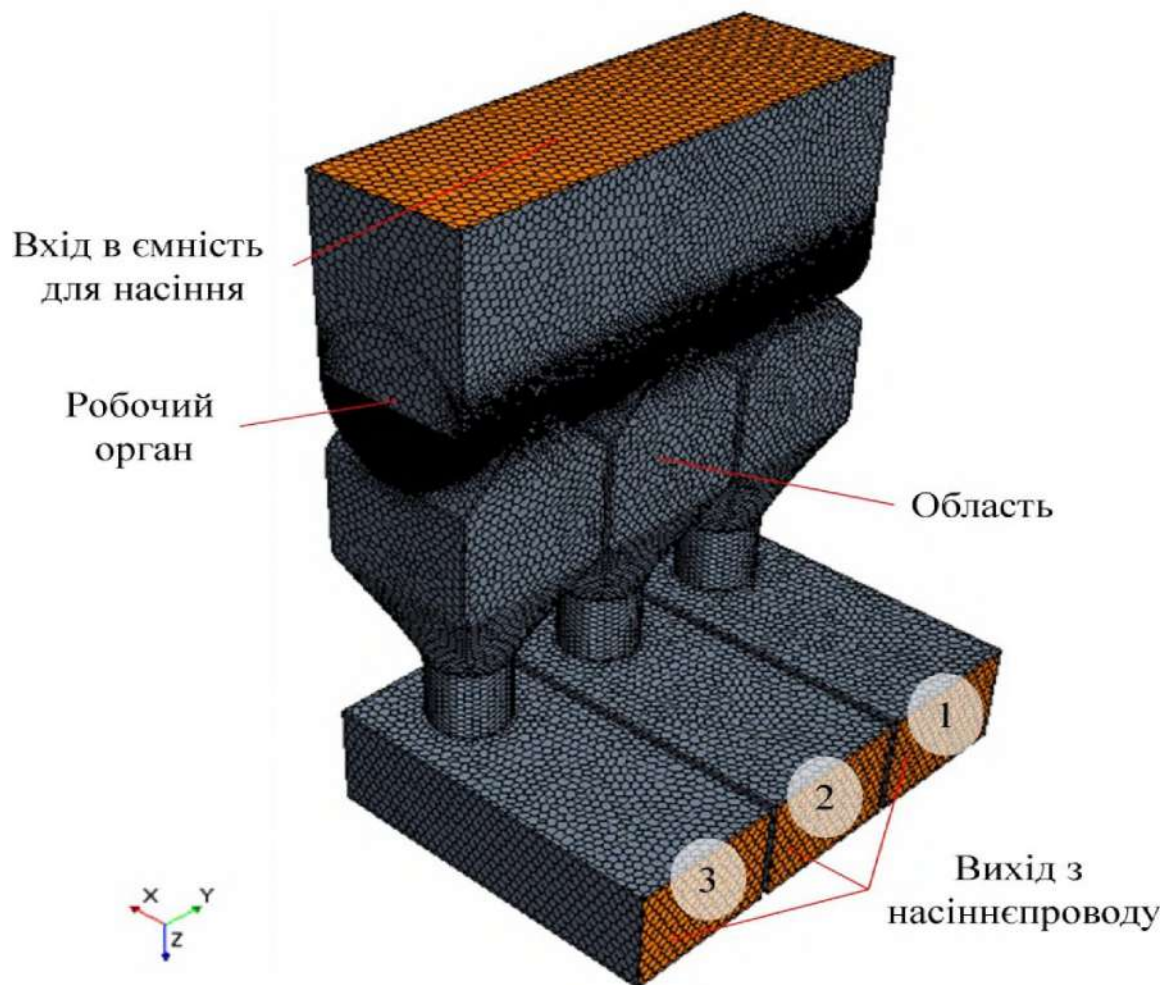


Рисунок 2.8 – Об’ємна сітки області висівного апарату і його робочого органу.

Взаємодія між насінинами підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Міндліна [159]: коефіцієнт тертя спокою – 0,58; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5.

За властивості середовища були прийняті такі параметри: середовище – повітря; динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – $9,8$ м/с²; температура – 293 К; тиск – 101325 Па.

Схема чисельного моделювання процесу висіву насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур наведена на рис. 2.9. Подача насіння здійснюється у верхній частині ємності для насіння на основі функції інжектування Лагранжевої фази із такими параметрами: ймовірність появи насінини – 0,8, початкова швидкість насінин – 0 м/с, подача насіння $Q = 5$ кг/с (це значення підібрано з умови забезпечення постійного рівня насінин в ємності висівного апарату).

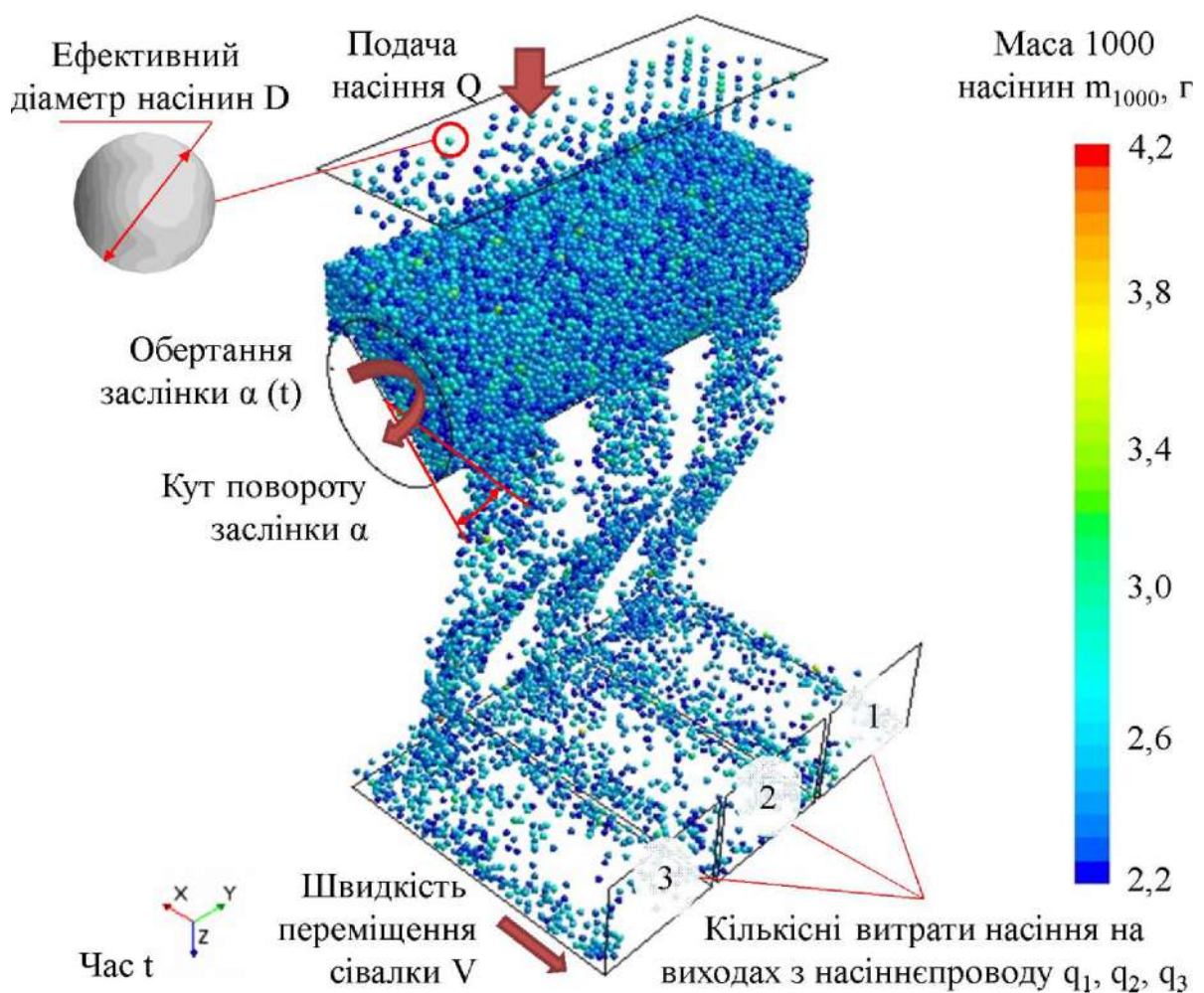


Рисунок 2.9 – Схема чисельного моделювання процесу висіву насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур.

Обертання заслінки було задано за періодичною функцією, яка наведена на рис. 2.10: t_0 – початковий час відкриття заслінки; Δt – проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита; Δt_ω – проміжок часу, коли заслінка відкривається або закривається із кутовою швидкістю обертання ω на кут α_{\max}

$$\Delta t_\omega = \frac{\alpha_{\max}}{\omega} \quad (2.25)$$

Граничні умови для чисельного моделювання такі: взаємодія між насінною і стінками висівного апарату підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Міндліна: коефіцієнт тертя спокою – 0,58; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5. Площини виходів з насіннепроводів 1, 2 і 3 є прозорими для насіння. На цих площинах фіксується значення кількісних витрат насіння q_1 , q_2 , q_3 . Нижні частини насіннепроводів (рис. 2.10) моделюються як транспортерні стрічки, які переміщуються зі швидкістю V . Це дозволяє зімітувати переміщення сівалки, на якій розміщений висівний апарат.

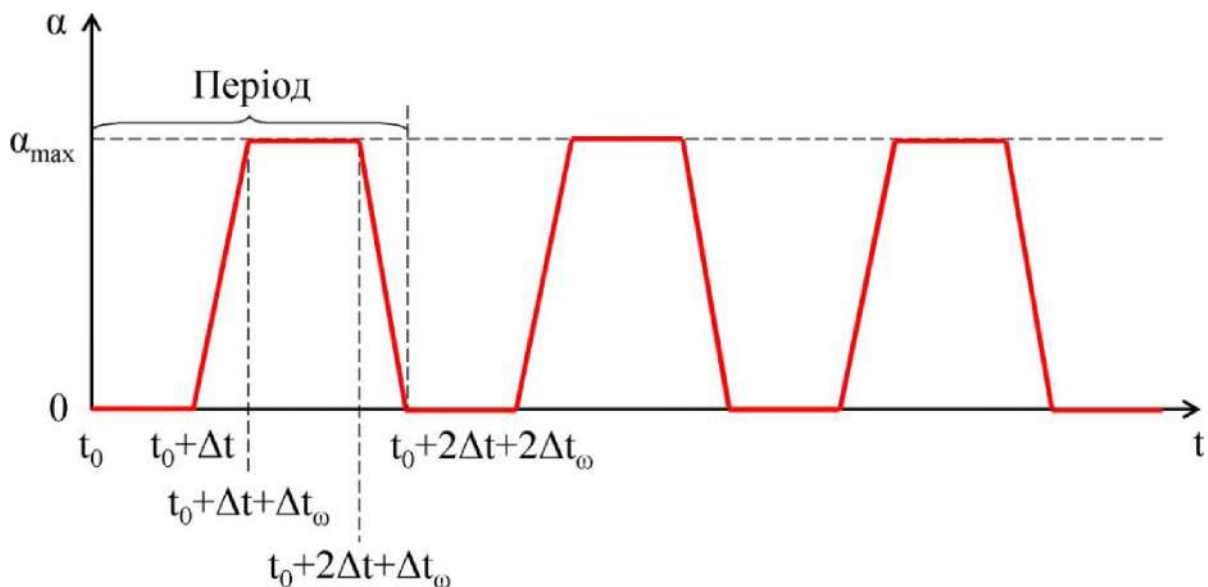


Рисунок 2.10 – Періодична функція обертання заслінки висівного апарату.

Для перевірки створеної симуляції розробленого висівного апарата селекційної сівалки прийняті такі конструктивно-технологічні параметри: виріз дозатора циліндричної форми у виконанні I – трикутник; швидкість

переміщення сівалки $V = 2$ м/с; максимальний кут повороту заслінки $\alpha_{\max} = \pi/4$; кутова швидкість обертання $\omega = 5,5$ рад/с; проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита $\Delta t = 1$ с. За результатами перевірки створеної симуляції отримана візуалізація процесу його роботи (рис. 2.11).

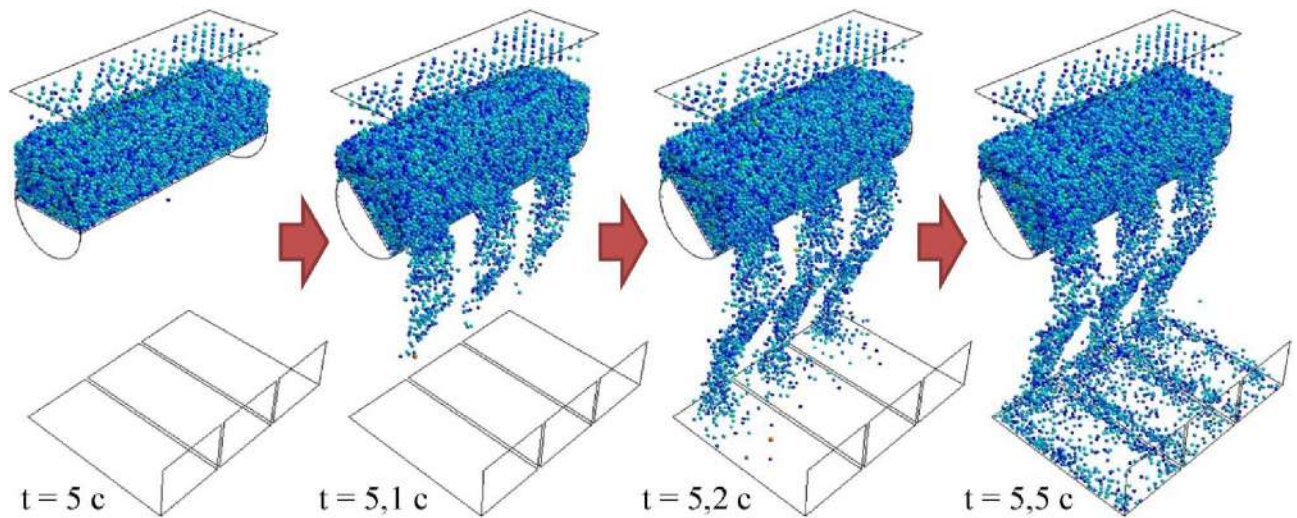


Рисунок 2.11 – Візуалізація процесу роботи висівного апарату селекційної сівалки.

Окрім цього визначено динаміку кількісних витрат насіння q_1 , q_2 , q_3 , яка представлена на рис. 2.12. Аналіз рис. 2.12 дозволяє зробити висновок про відсутність відмінності між розташуванням вирізів дозатора циліндричної форми. Це підтверджується високим коефіцієнтами кореляції між q_1 , q_2 і q_3 , які знаходяться в межах 0,95–0,96. Проведено розрахунок середнього значення кількісних витрат насіння $q_{\text{сер}} = 277$ шт./с і середньоквадратичного відхилення $\sigma = 54$ шт./с. Ці параметри і визначають ефективність процесу висіву дрібнонасінневих культур.

Середні кількісні витрати насіння $q_{\text{сер}}$ (шт./с) розділені на швидкість переміщення сівалки V (м/с), що помножена на відстань між рядками A (м) визначають норму висіву N (шт./га):

$$N = 10000 \frac{q_{\text{сер}}}{VA} \quad (2.26)$$

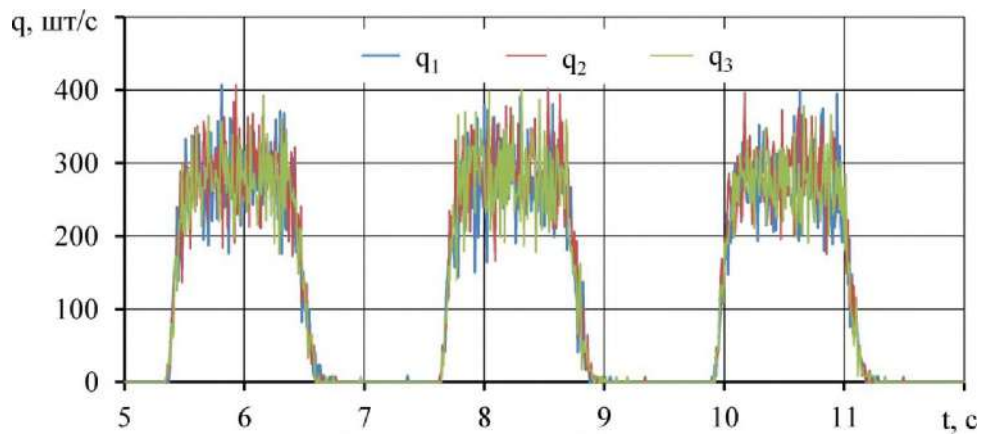


Рисунок 2.12 – Динаміка кількісних витрат насіння q_1 , q_2 , q_3 .

У подальших розрахунках приймаємо широкорядну сівбу гірчиці (відстань між рядками 0,45 м).

Норма висіву повинна відповідати технологічним вимогам:

$$N = N_{\text{ном.}} \quad (2.27)$$

Для гірчиці за широкорядної сівби норма висіву становить – 1000–1500 тис. шт./га [41, 42, 43].

Відповідно, середньоквадратичне відхилення σ визначає саме рівномірність висіву, тобто умовою якісного висіву є мінімізація середньоквадратичного відхилення кількісних витрат насіння σ :

$$\sigma \rightarrow \min. \quad (2.28)$$

Для подальших досліджень необхідно встановити залежності норми висіву N і точність висіву δ_N від конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату. Точність висіву розраховується за формулою:

$$\delta_N = 100 \left(1 - \frac{\sigma_N}{\bar{N}} \right), \quad (2.29)$$

де σ_N – середньоквадратичне відхилення норми висіву, шт./га;

\bar{N} – середнє значення відхилення норми висіву, шт./га.

Як фактори досліджень обрано: середній ефективний діаметр насіння D_{μ} (0,001 м; 0,002 м; 0,003 м), кут повороту заслінки α (20°, 33°, 46°), проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt (0,2 с, 0,4 с, 0,6 с), швидкість переміщення сівалки V (1 м/с, 2 м/с, 3 м/с).

Повний факторний чисельний експеримент для 4 факторів і 3 рівнів варіації містить $3^4 = 81$ дослід. Кількість повторів складала – 3. За результатами досліджень дані зведені в таблицю Б.1.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку для норми висіву насіння N у закодованому вигляді (додаток Б):

$$\begin{aligned}
 N = & 703,131 - 103,478 x_1 - 0,743519 x_1^2 - 372,502 x_2 + 56,9302 x_1 x_2 + \\
 & + 186,771 x_2^2 + 943,698 x_3 + 0,345833 x_1 x_3 - 514,622 x_2 x_3 + \\
 & + 497,988 x_3^2 - 372,66 x_4 + 56,6663 x_1 x_4 + 203,5 x_2 x_4 - \\
 & - 514,875 x_3 x_4 + 186,362 x_4^2.
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Статистична обробка рівняння (2.30) представлена в табл. 2.7. Враховуючи табличне значення критерію Стьюдента $t(0,05;162) = 1,97$ проведемо відхилення не значущих коефіцієнтів і отримуємо рівняння для норми висіву насіння N у розкодованому вигляді (рис. 2.13):

$$\begin{aligned}
 N = & 293,657 - 103478, D - 218,121 V + 186,362 V^2 + 2091,04 \alpha - \\
 & - 2269,24 V \alpha + 9673,37 \alpha^2 - 1101,19 \Delta t + 1017,5 V \Delta t - \\
 & - 11340,6 \alpha \Delta t + 4669,27 \Delta t^2.
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Таблиця 2.7

Статистична обробка рівняння (2.30)

Коефіцієнт	Значення	Критерій Стьюдента
a_{00}	703,131	6,8647
a_{10}	-103,478	-2,47462
a_{20}	-372,502	-8,9082
a_{30}	943,698	22,5681
a_{40}	-372,66	-8,91198
a_{12}	56,9302	1,11163
a_{13}	0,345833	0,00675278
a_{14}	56,6663	1,10647
a_{23}	-514,622	-10,0486
a_{24}	203,5	3,97357
a_{34}	-514,875	-10,0535
a_{11}	-0,743519	-0,0102658
a_{22}	186,771	2,57875
a_{33}	497,988	6,87575
a_{44}	186,362	2,57312

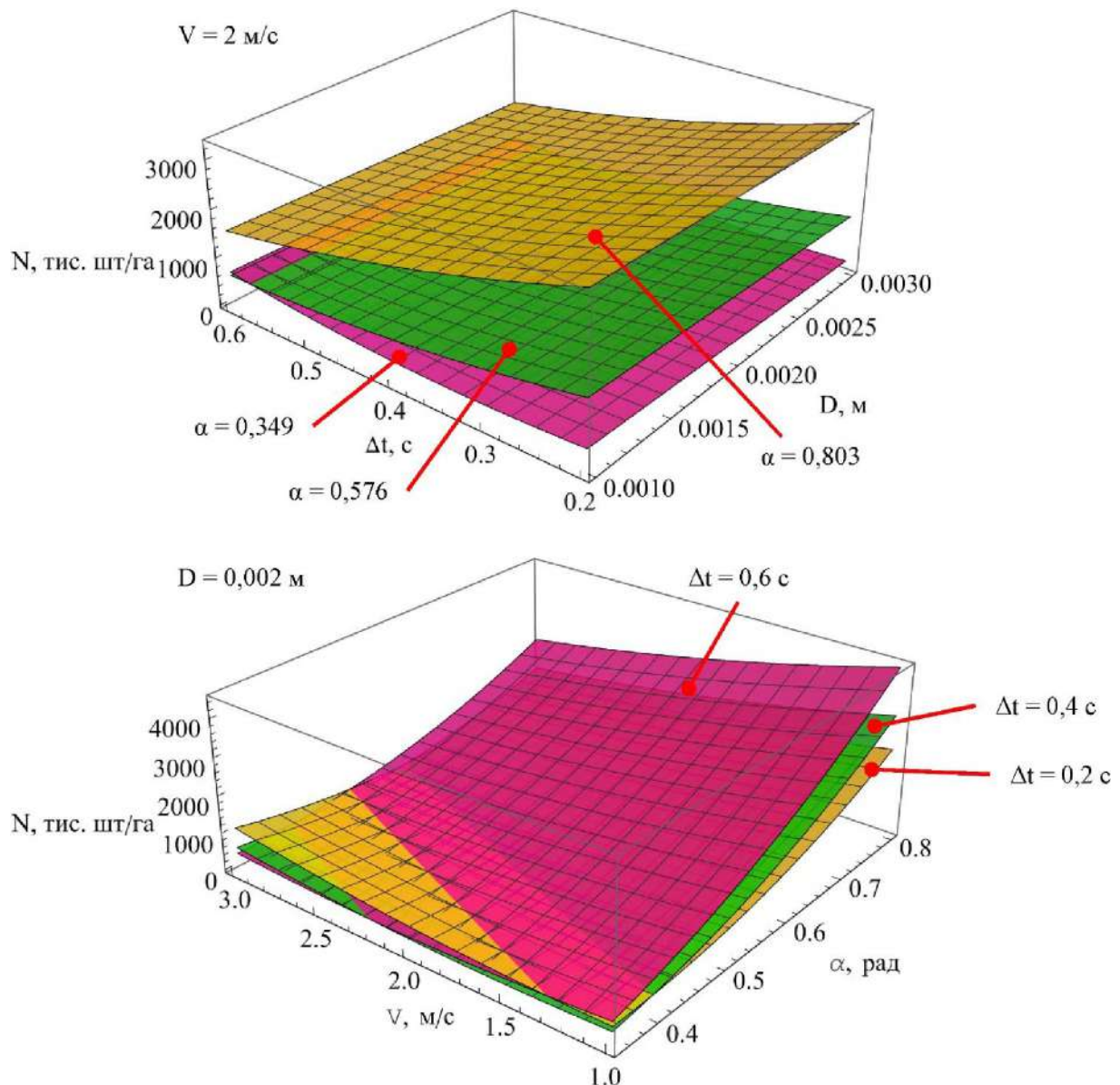


Рисунок 2.13 – Залежність норми висіву насіння N від середнього ефективного діаметра насіння D_{μ} , кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V .

Аналіз рис. 2.13 показує, що із збільшенням кута повороту заслінки α норма висіву насіння N збільшується. В свою чергу зі збільшенням швидкості переміщення сівалки V і проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt норми висіву насіння N зменшується. Дана залежність у подальшому буде використана для автоматичного керування режимними параметрами висівного апарату враховуючи ефективний діаметр насіння D_{μ} і швидкість переміщення сівалки V для забезпечення необхідного рівня норми висіву N .

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку для точності висіву δ_N у закодованому вигляді (додаток Б):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 94,8047 + 0,0041949 x_1 + 0,00473501 x_1^2 + 1,70513 x_2 + \\ & + 0,110476 x_1 x_2 - 0,755145 x_2^2 - 3,5281 x_3 + 0,0939126 x_1 x_3 + \\ & + 1,08338 x_2 x_3 - 0,445989 x_3^2 - 4,35326 x_4 + 0,00438941 x_1 x_4 + \\ & + 1,63515 x_2 x_4 - 3,46412 x_3 x_4 - 0,896159 x_4^2. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Статистична обробка рівняння (2.32) представлена в таблиці 2.5. Враховуючи табличне значення критерію Стьюдента $t(0,05;162) = 1,97$ проведемо відхилення не значущих коефіцієнтів і отримуємо рівняння для точності висіву δ_N у розкодованому вигляді (рис. 2.14):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 96,9055 + 4,75461 V - 0,896159 V^2 + 5,43597 \alpha - \\ & - 15,2676 V \alpha - 6,47353 \Delta t + 8,17575 V \Delta t + 23,8742 \alpha \Delta t - 18,8786 \Delta t^2. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Таблиця 2.5

Статистична обробка рівняння (2.32)

Коефіцієнт	Значення	Критерій Стьюдента
a ₀₀	94,8047	276,224
a ₁₀	0,0041949	0,0299385
a ₂₀	1,70513	12,1693
a ₃₀	-3,5281	-25,1796
a ₄₀	-4,35326	-31,0686
a ₁₂	0,110476	0,643767
a ₁₃	0,0939126	0,54725
a ₁₄	0,00438941	0,0255781
a ₂₃	1,08338	6,31309
a ₂₄	1,63515	9,52839
a ₃₄	-3,46412	-20,1862
a ₁₁	0,00473501	0,0195105
a ₂₂	-0,755145	-3,11155
a ₃₃	-0,445989	-1,83768
a ₄₄	-0,896159	-3,6926

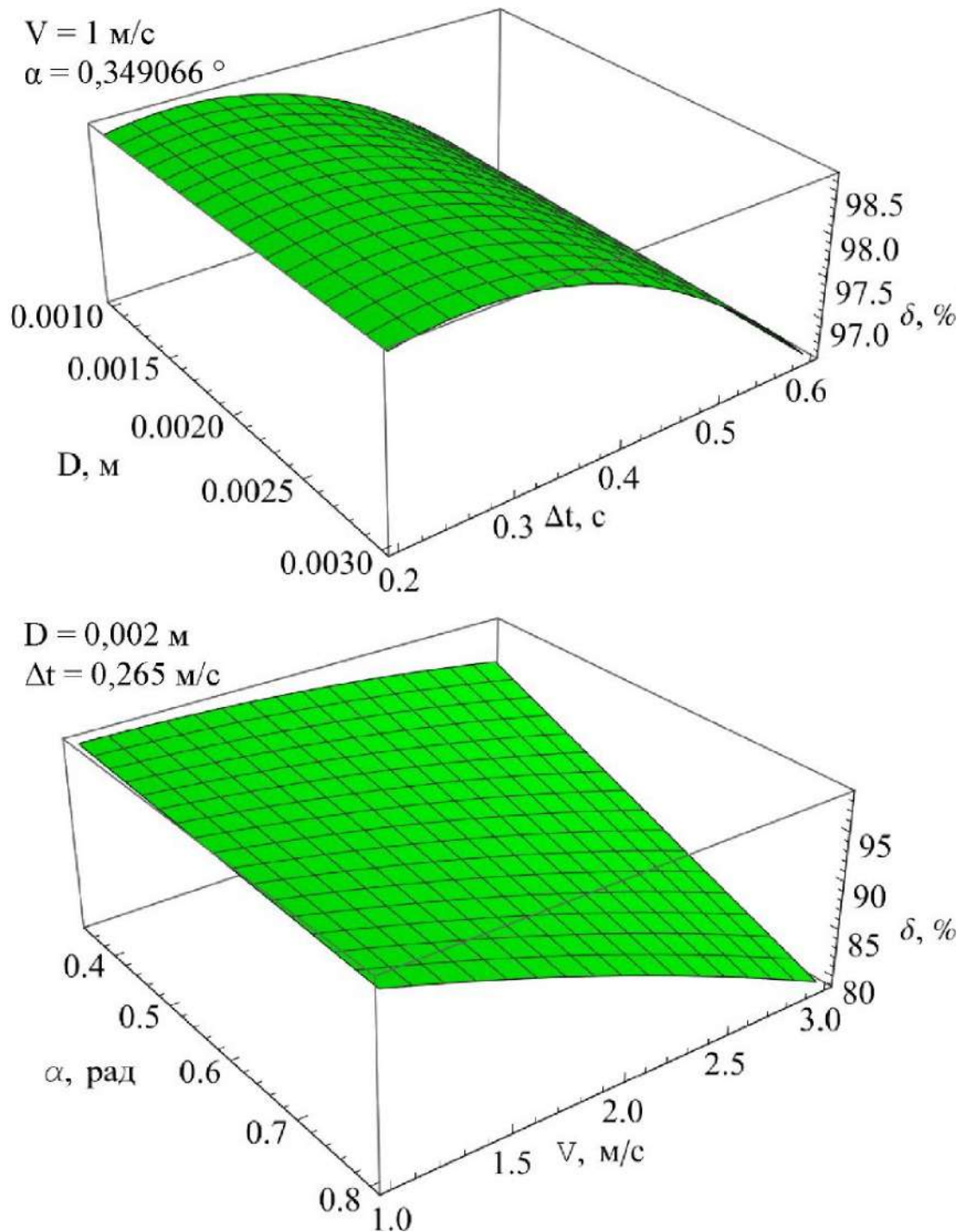


Рисунок 2.14 – Залежність точності висіву δ_N від середнього ефективного діаметра насіння D_μ , кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V .

Аналіз рис. 2.14 показує, що зі збільшенням швидкості переміщення сівалки V , кута повороту заслінки α і проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt точність висіву δ_N зменшується.

Для забезпечення найбільш ефективної роботи висівного апарату необхідною умовою є забезпечення найбільшої точності висіву δ_N при заданому значенні швидкості переміщення сівалки V , ефективного діаметра насіння D_μ і норми висіву насіння N :

$$\begin{cases} N(D_0, \Delta t, \alpha, V_0) = N_0, \\ \delta_N(D_0, \Delta t, \alpha, V_0) \rightarrow \max, \\ D_0 = \text{const}, \\ V_0 = \text{const}. \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta t(D_0, N_0, V_0), \\ \alpha(D_0, N_0, V_0). \end{cases} \quad (2.34)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (2.34), (2.33) і (2.31) в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Б), наприклад, для $N_0 = 1000$ тис. шт./га, $D_0 = 0,001$ м, $V_0 = 1,8$ м/с отримуємо $\alpha = 0,662404$ рад ($37,9^\circ$), $\Delta t = 0,555$ с. При цьому точності висіву $\delta_N = 95,5\%$.

Для забезпечення ще більшої точності висіву необхідно у розподільник встановлювати направляючу насіння, дослідження якої проведемо у наступному підрозділі.

2.4 Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур

Направляюча у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки виконана у вигляді жолоба по якому рухаються насінини (рис. 2.15). Задачею аналітичних досліджень є визначення кута нахилу β і кута розхилу² γ направляючої за яких пропускна здатність висівного апарату селекційної сівалки Q_d' є рівномірною, тобто $\Delta(Q_d')$ є мінімальною:

$$\Delta(Q_d') = \frac{\sigma(Q_d')}{Q_d'}, \quad (2.35)$$

де $\Delta(Q_d')$ – коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату селекційної сівалки Q_d' ;

² Кут розхилу направляючої – кут між двома протилежними твірними направляючої (кут при вершині направляючої)

$\sigma(Q_d')$ – середньоквадратичне відхилення пропускної здатності висівного апарату селекційної сівалки Q_d' , шт./с;

$\overline{Q_d'}$ – середнє значення пропускної здатності висівного апарату селекційної сівалки Q_d' , шт./с.

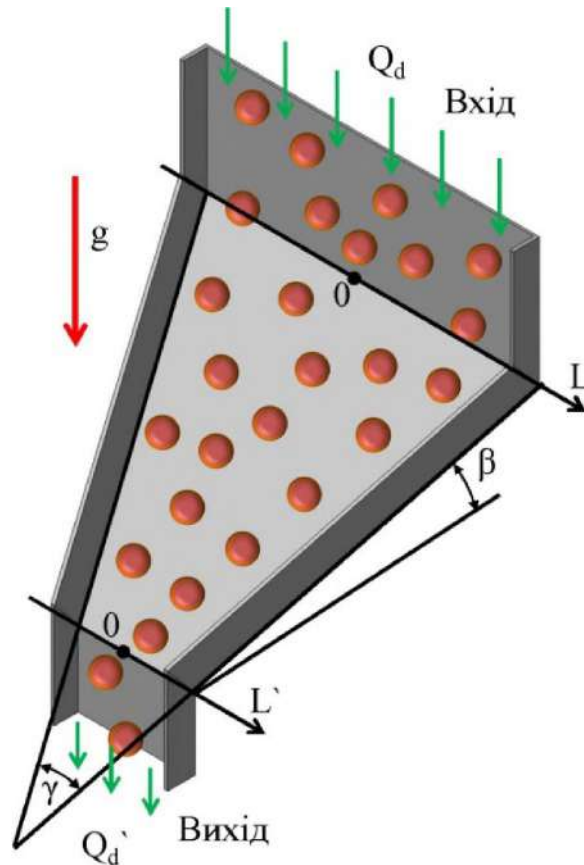


Рисунок 2.15 – Схема проведення досліджень руху насіння у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур.

Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарату проведені з використанням вищезазначених (розділ 2.2-2.3) методів чисельного моделювання у програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+. Фактори досліджень та їхні рівні представлені в табл. 2.6. Найменше значення кутів обиралося з умови, що насіння повинно переміщатися по похилій площині не утворюючи склепінь, тобто $\beta_{\min} = \gamma_{\min} = \arctg(k) = \arctg(0,58) = 0,525$ (де k – коефіцієнт тертя спокою насіння по поверхні направляючої). Кількість повторів – 3. План досліджень – повнофакторний із загальною кількістю дослідів – $3^3 = 27$.

Візуалізація результатів чисельного моделювання деяких дослідів представлена на рисунках 2.16-2.18, аналіз яких дозволяє стверджувати про зменшення середньої пропускної здатності висівного апарату Q_d' в порівнянні з пропускною здатністю дозатора Q_d і збільшення її рівномірності шляхом зменшення коефіцієнта варіації $\Delta(Q_d')$. Числові дані результатів досліджень наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Фактори, рівні і результати досліджень руху насіння у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіненевих культур

№	Пропускна здатність дозатора Q_d , шт./с	Кут розхилу γ	Кут нахилу β	Пропускна здатність висівного апарату Q_d'				Коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$			
				1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	20	0,524	0,524	7,9	7,9	7,4	7,7	0,61	0,58	0,57	0,59
2	20	0,524	0,785	13,4	13,3	12,5	13,1	0,67	0,60	0,60	0,62
3	20	0,524	1,047	15,7	15,9	15,3	15,6	0,84	0,79	0,81	0,81
4	20	0,785	0,524	9,4	9,6	8,7	9,2	0,65	0,58	0,59	0,61
5	20	0,785	0,785	15,0	14,8	14,2	14,7	0,71	0,62	0,66	0,66
6	20	0,785	1,047	17,7	17,0	16,8	17,2	0,91	0,85	0,85	0,87
7	20	1,047	0,524	10,1	9,9	9,5	9,8	0,74	0,68	0,70	0,71
8	20	1,047	0,785	15,3	15,2	14,4	15,0	0,78	0,71	0,71	0,73
9	20	1,047	1,047	18,1	17,9	17,1	17,7	0,98	0,89	0,91	0,93
10	60	0,524	0,524	23,6	23,4	22,7	23,2	0,63	0,57	0,56	0,59
11	60	0,524	0,785	38,9	38,9	38,3	38,7	0,65	0,62	0,60	0,62
12	60	0,524	1,047	47,3	46,8	46,3	46,8	0,88	0,80	0,81	0,83
13	60	0,785	0,524	28,0	27,4	27,0	27,5	0,67	0,62	0,60	0,63
14	60	0,785	0,785	43,4	43,3	42,6	43,1	0,70	0,63	0,64	0,66
15	60	0,785	1,047	51,5	50,8	50,6	51,0	0,91	0,85	0,85	0,87
16	60	1,047	0,524	29,3	29,2	28,6	29,0	0,74	0,67	0,69	0,70
17	60	1,047	0,785	44,7	44,5	44,2	44,5	0,77	0,74	0,73	0,75
18	60	1,047	1,047	52,7	52,5	52,1	52,4	0,97	0,91	0,93	0,94
19	100	0,524	0,524	39,2	38,6	38,2	38,7	0,64	0,59	0,57	0,60
20	100	0,524	0,785	64,8	64,7	64,4	64,6	0,66	0,62	0,63	0,64
21	100	0,524	1,047	78,2	77,8	77,2	77,7	0,87	0,80	0,80	0,82
22	100	0,785	0,524	46,3	45,9	45,4	45,9	0,68	0,59	0,62	0,63
23	100	0,785	0,785	71,8	72,0	71,4	71,7	0,69	0,62	0,66	0,66
24	100	0,785	1,047	85,2	85,0	84,4	84,9	0,90	0,81	0,85	0,85
25	100	1,047	0,524	48,2	48,3	47,8	48,1	0,72	0,68	0,69	0,70
26	100	1,047	0,785	74,8	74,1	73,9	74,3	0,80	0,74	0,74	0,76
27	100	1,047	1,047	87,3	87,1	86,7	87,0	0,96	0,93	0,91	0,93

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку для пропускної здатності висівного апарату Q_d' у закодованому вигляді (додаток Б):

$$Q_d' = 43,1321 + 26,2741 x_1 + 0,0259259 x_1^2 + 2,87099 x_2 + 1,85926 x_1 x_2 - 1,4537 x_2^2 + 11,7327 x_3 + 7,77593 x_1 x_3 - 0,0277778 x_2 x_3 - 3,87593 x_3^2. \quad (2.36)$$

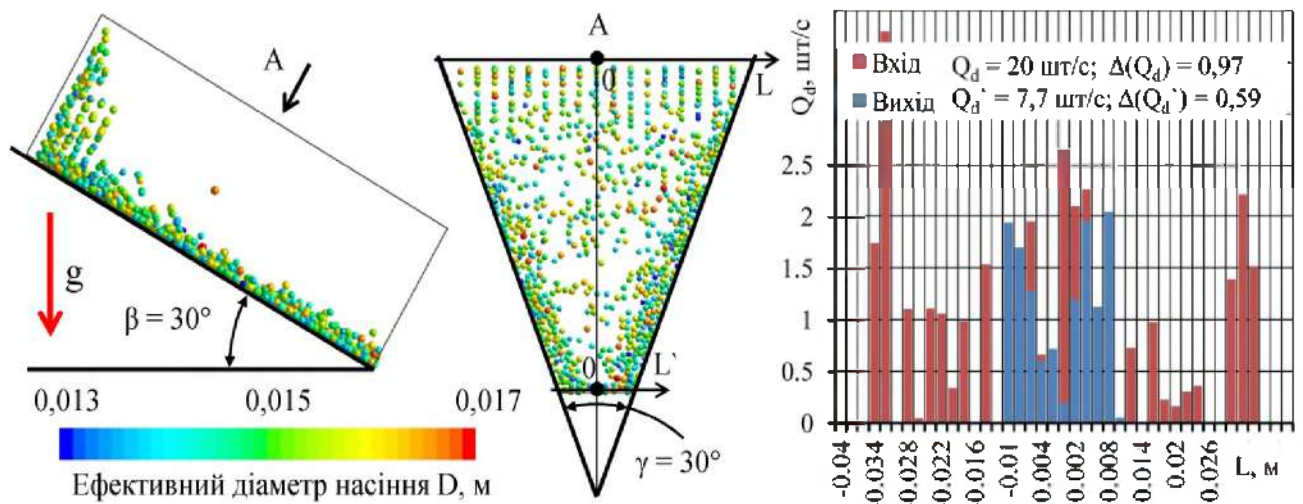


Рисунок 2.16 – Візуалізація результатів чисельного моделювання досліду № 1 (табл. 2.7).

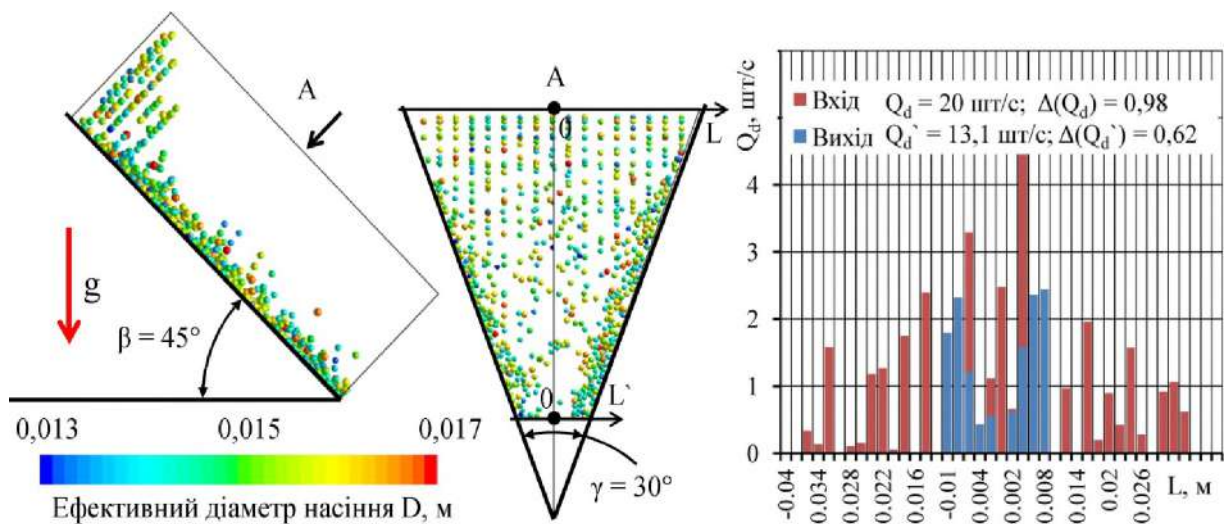


Рисунок 2.17 – Візуалізація результатів чисельного моделювання досліду № 2 (табл. 2.7).

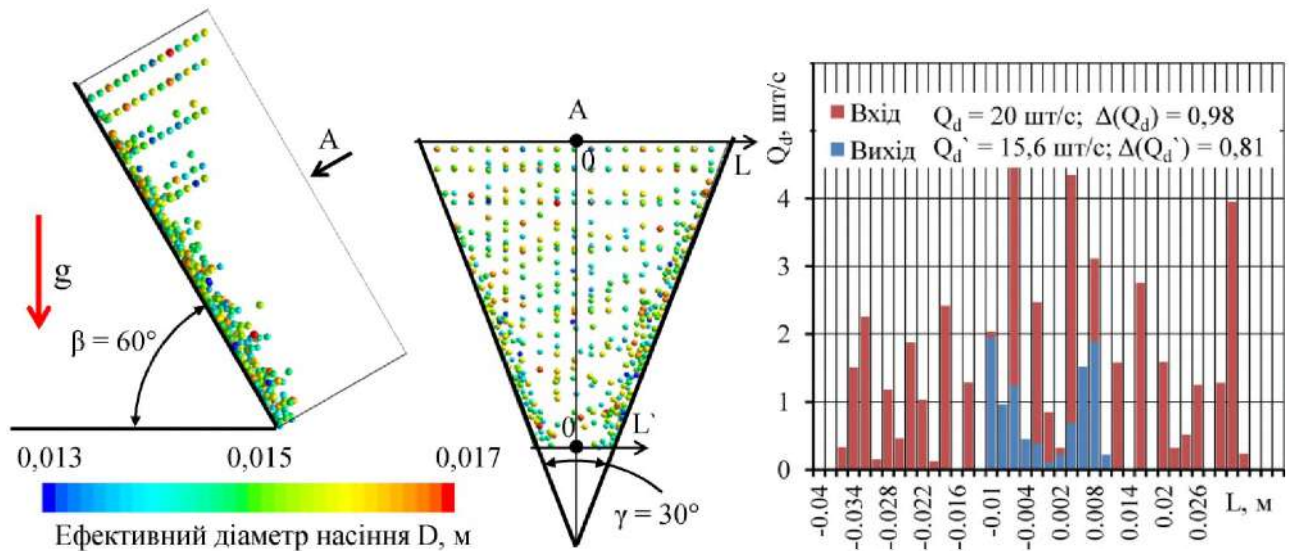


Рисунок 2.18 – Візуалізація результатів чисельного моделювання досліджу № 3 (табл. 2.7).

Статистична обробка рівняння (2.36) представлена в табл. 2.7. Враховуючи табличне значення критерію Стюдента $t(0,05;54) = 2,00$ проведемо відхилення не значущих коефіцієнтів і отримуємо рівняння для пропускної здатності висівного апарату Q_d' у розкодованому вигляді (рис. 2.19):

$$Q_d' = -44,5759 - 0,0648676 Q_d + 33,5619 \beta + 0,17741 Q_d \beta - 21,1774 \beta^2 + 88,9114 \gamma + 0,741978 Q_d \gamma - 56,4642 \gamma^2. \quad (2.37)$$

Таблиця 2.7

Статистична обробка рівняння (2.36)

Коефіцієнт	Значення	Критерій Стюдента
a_{00}	43,1321	63,3971
a_{10}	26,2741	83,4256
a_{20}	2,87099	9,11598
a_{30}	11,7327	37,2538
a_{12}	1,85926	4,82021
a_{13}	7,77593	20,1594
a_{23}	-0,0277778	-0,0720152
a_{11}	0,0259259	0,0475276
a_{22}	-1,4537	-2,66494
a_{33}	-3,87593	-7,10537

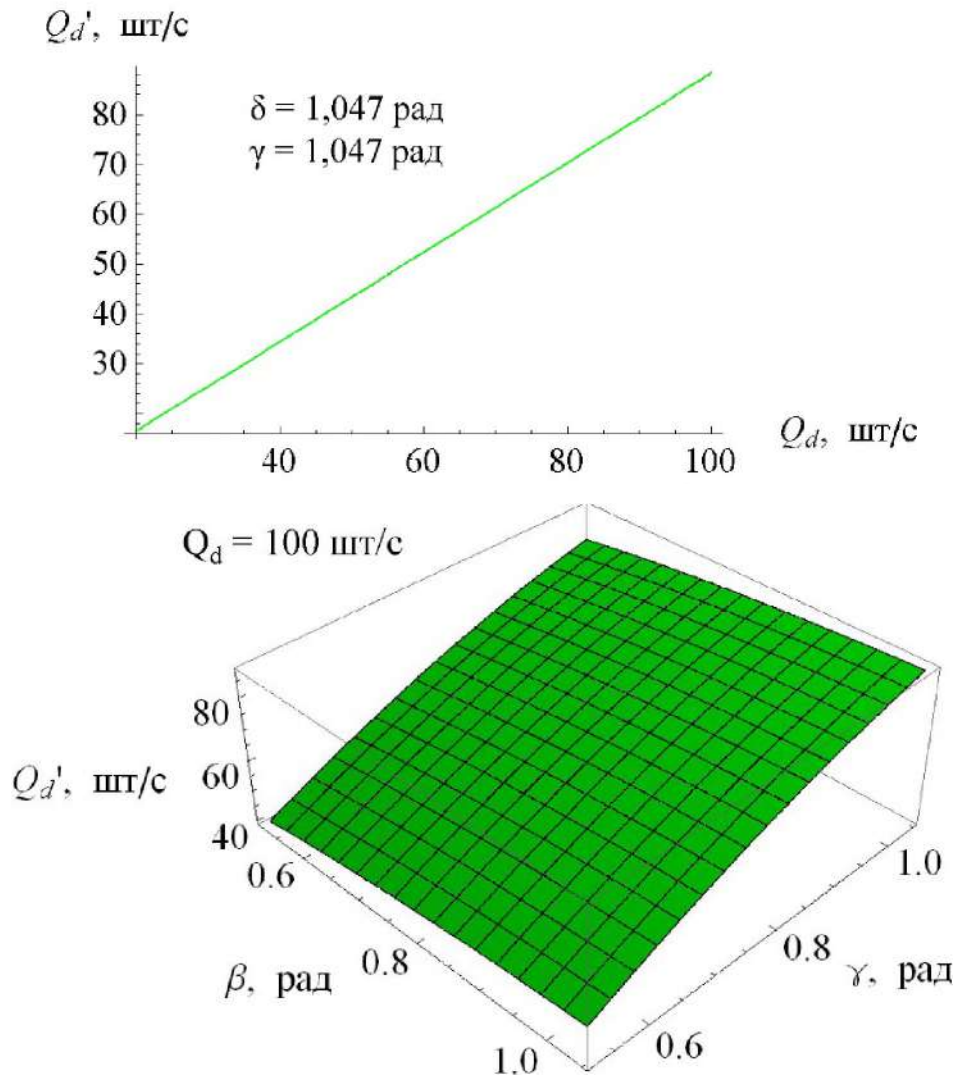


Рисунок 2.19 – Залежність пропускної здатності висівного апарату Q_d' від пропускної здатності дозатора Q_d , кута розхилу γ , кута нахилу β .

Аналіз рис. 2.19 показує, що зі збільшенням пропускної здатності дозатора Q_d , кута розхилу γ , кута нахилу β пропускна здатність висівного апарату Q_d' збільшується.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку для коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ у закодованому вигляді (додаток Б):

$$\begin{aligned} \Delta(Q_d') = & 0,664815 + 0,00333333 x_1 - 0,00222222 x_1^2 + 0,0564815 x_2 - \\ & - 0,00111111 x_1 x_2 + 0,0216667 x_2^2 + 0,117407 x_3 - 0,00222222 x_1 x_3 + \quad (2.38) \\ & + 9,61481 \cdot 10^{-17} x_2 x_3 + 0,0777778 x_3^2. \end{aligned}$$

Статистична обробка рівняння (2.38) представлена в табл. 2.8. Враховуючи табличне значення критерію Стюдента $t(0,05;54) = 2,00$ проведемо відхилення не значущих коефіцієнтів і отримаємо рівняння для коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ у розкодованому вигляді (рис. 2.20):

$$\Delta(Q_d') = 1,03654 - 0,279974 \beta + 0,315638 \beta^2 - 1,33078 \gamma + 1,13306 \gamma^2. \quad (2.39)$$

Таблиця 2.8

Статистична обробка рівняння (2.38)

Коефіцієнт	Значення	Критерій Стюдента
a_{00}	0,664815	141,526
a_{10}	0,00333333	1,53292
a_{20}	0,0564815	25,9744
a_{30}	0,117407	53,9927
a_{12}	-0,00111111	-0,417207
a_{13}	-0,00222222	-0,834413
a_{23}	$9,61481 \cdot 10^{-17}$	$3,61023 \cdot 10^{-14}$
a_{11}	-0,00222222	-0,590019
a_{22}	0,0216667	5,75269
a_{33}	0,0777778	20,6507

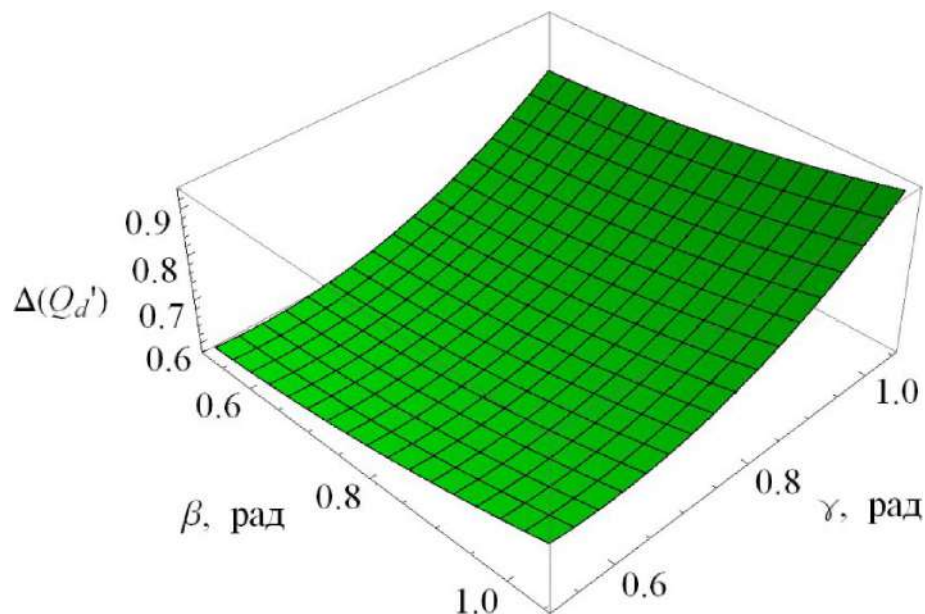


Рисунок 2.20 – Залежність коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ від кута розхилу γ , кута нахилу β .

Аналіз рис. 2.20 показує, що зі збільшенням кута розхилу γ , кута нахилу β коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ збільшується. Пропускна здатність дозатора Q_d не впливає на $\Delta(Q_d')$.

Аналізуючи отримані залежності підсумовуємо, що для забезпечення раціональних параметрів запропонованої направляючої в розподільнику висівного апарату необхідно, щоб коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ був мінімальним, а пропускна здатність висівного апарату Q_d' була максимальною:

$$\begin{cases} \Delta(Q_d') \rightarrow \min, \\ Q_d' \rightarrow \max, \\ 20 \leq Q_d \leq 100, \\ 0,524 \leq \beta \leq 1,047, \\ 0,524 \leq \gamma \leq 1,047. \end{cases} \quad (2.40)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (2.40) спільно з (2.37) і (2.39) в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Б) отримуємо для будь якого Q_d : $\beta = 0,7328$ (42°), $\gamma = 0,785$ (45°). При цих значеннях коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d') = 0,65$, що у 1,5 раза більший, ніж коефіцієнт варіації пропускної здатності дозатора $\Delta(Q_d)$. Це дозволяє стверджувати про підвищення точності висіву розробленого висівного апарату.

2.5 Висновки до розділу 2

1. За результатами теоретичних досліджень руху насіння в ємності висівного апарату селекційної сівалки складено відповідну систему диференціальних рівнянь (2.17) з урахуванням формул (2.3)–(2.16), що покладено в основу математичного апарата програмного пакета Simcenter Star-CCM+. За результатами чисельного моделювання отримано візуалізацію випадкового пакування насіння дрібнонасіньових культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки і рівняння регресії її щільності ϕ (2.21) від ефективного діаметра насіння D_μ і коефіцієнта варіації цього діаметра δ .

2. За результатами чисельного моделювання визначено, що пропускна здатність дозатора Q_d висівного апарату селекційної сівалки не залежить від щільності випадкового пакування ϕ насіння дрібнонасіньєвих культур у ємності. За результатами апроксимації даних отримано закономірність зміни пропускної здатності дозатора Q_d висівного апарату селекційної сівалки від кута нахилу заслінки α у вигляді поліному третього ступеня (2.22)–(2.23). Окрім зазначеного, з графіків $Q_d(\alpha)$ визначено, що кут нахилу графіка для варіанту отвору дозатора трикутної форми є найменшим, порівняно з формами напівкола і прямокутника. Тобто вибір саме трикутної форми дозатора дозволяє забезпечити найвищу точність дозування насіння.

3. За результатами чисельного моделювання процесу висіву насінневого матеріалу дрібнонасіньєвих культур розробленим висівним апаратом визначені залежності норми висіву N (2.31) і точність висіву δ_N (2.33) від його конструктивно-технологічних параметрів (середній ефективний діаметр насіння D_{μ} , кут повороту заслінки α , проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , швидкість переміщення сівалки V). Для забезпечення найбільш ефективної роботи висівного апарату необхідною умовою є забезпечення найбільшої точності висіву δ_N при заданому значенні швидкості переміщення сівалки V , ефективного діаметра насіння D_{μ} і норми висіву насіння N . Розв'язуючи спільно рівняння (2.34), (2.33) і (2.31), наприклад, для $N_0 = 1000$ тис. шт./га, $D_0 = 0,001$ м, $V_0 = 1,8$ м/с отримуємо $\alpha = 0,662404$ рад ($37,9^\circ$), $\Delta t = 0,555$ с.

4. Для забезпечення ще більшої точності висіву необхідно у розподільник встановлювати направляючу насіння, яка виконана у вигляді жолоба по якому рухаються насінини. За результатами чисельного моделювання руху насіння в розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур отримані залежності пропускної здатності висівного апарату Q_d' (2.37) і коефіцієнта варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ (2.39) від пропускної здатності дозатора Q_d , кута розхилу γ і кута нахилу β . Аналізуючи отримані залежності приходимо до висновку, що для забезпечення раціональних параметрів запропонованої направляючої в розподільнику

висівного апарату необхідно, щоб коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d')$ був мінімальним, а пропускна здатність висівного апарату Q_d' була максимальною. Розв'язуючи систему рівнянь (2.40) спільно з (2.37) і (2.39) отримуємо для будь-якого Q_d : $\beta = 0,7328$ (42°), $\gamma = 0,785$ (45°). При цих значеннях коефіцієнт варіації пропускної здатності висівного апарату $\Delta(Q_d') = 0,65$, що у 1,5 раза більше, ніж коефіцієнт варіації пропускної здатності дозатора $\Delta(Q_d)$. Це дозволяє стверджувати про підвищення точності висіву розробленого висівного апарату.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [160, 161, 162, 163].

1. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus*. 2022. Vol. 33 (1). P. 199–208. DOI: 10.15159/jas.22.08.

2. Яропуд В.М., Алієв Е.Б., Дацюк Д.А. Методика чисельного моделювання висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Техніка та енергетика*. 2021. Т. 12. № 3. С. 121–127. DOI: 10.31548/machenergy2021.03.121

3. Яропуд В.М., Дацюк Д.А., Теслюк Г.В. Використання методу дискретних елементів у моделюванні руху та укладання насіння дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 73–82. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8

4. Яропуд В.М., Дацюк Д.А. Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінних культур. *Сільськогосподарські машини*. 2023. № 49. С. 7–14. DOI: 10.36910/acm.vi49.945

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ

3.1 Мета, задачі і програма експериментальних досліджень

Мета експериментальних досліджень передбачала перевірку розроблених математичних моделей і обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіненних культур.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі завдання:

– на основі лабораторних досліджень встановити вплив розмірно-масових параметрів насіння дрібнонасіненних культур на структуру їхнього пакування у ємності висівного апарату селекційної сівалки;

– на основі експериментальних досліджень встановити взаємозв'язок пропускної здатності дозатора висівного апарату від його конструктивних параметрів і параметрів пакування насіння;

– обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіненних культур.

Програма експериментальних досліджень передбачала:

– проведення лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасіненних культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки;

– розробку і виготовлення макетного зразка дозатора висівного апарату селекційної сівалки;

– проведення експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки;

– статистичну обробку отриманих даних експериментальних досліджень.

3.2 Методика лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки

Для перевірки розробленої моделі випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки були проведені відповідні лабораторні дослідження.

Для досліджень серед дрібнонасінневих культур обрано гірчицю, ріпак і рижій.

Перед початком роботи необхідно підготувати вихідну насінневу суміш. Для цього насінневу суміш було очищено від всіх органічних і неорганічних домішок до чистоти 98,0–99,9 % [164]. Якість насіння сільськогосподарських культур визначалася методами, які описані у ДСТУ 4138-2002 [165]. Після цього очищену насінневу суміш розділяли на фракції з використанням лабораторного розсіву РЛУ-3 і набору сит із отворами круглої форми СЛ-200 (1,0 мм, 2,0 мм, 3,0 мм). Загальний вигляд обладнання представлено на рис. 3.1. Розмір насіння за фракціями був такий: 1 – до 1,0 мм; 2 – 1,0–2,0 мм; 3 – більше 2,0 мм.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд лабораторного розсіву РЛУ-3 (а) і набору сит із отворами круглої форми СЛ-200 (б).

З використанням лічильника зерна та насіння Contador і ваг лабораторних

Radwag AS 220.R1 (абсолютна похибка вимірювання 0,0001 г) для кожної фракції було визначено масу 1000 насінин. Загальний вигляд обладнання наведено на рис. 3.2.

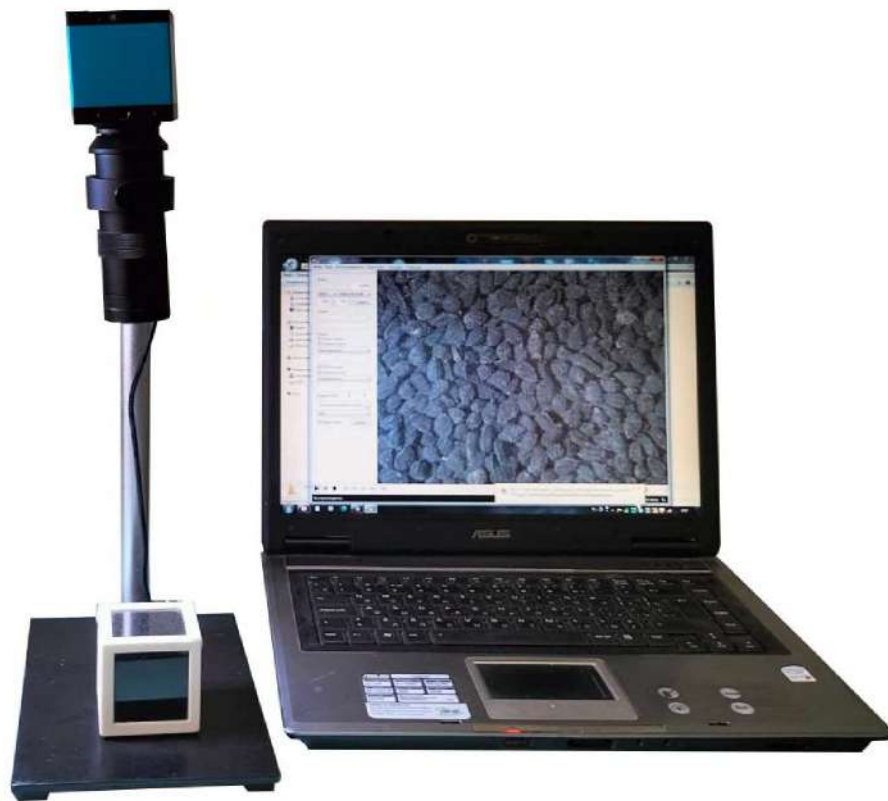
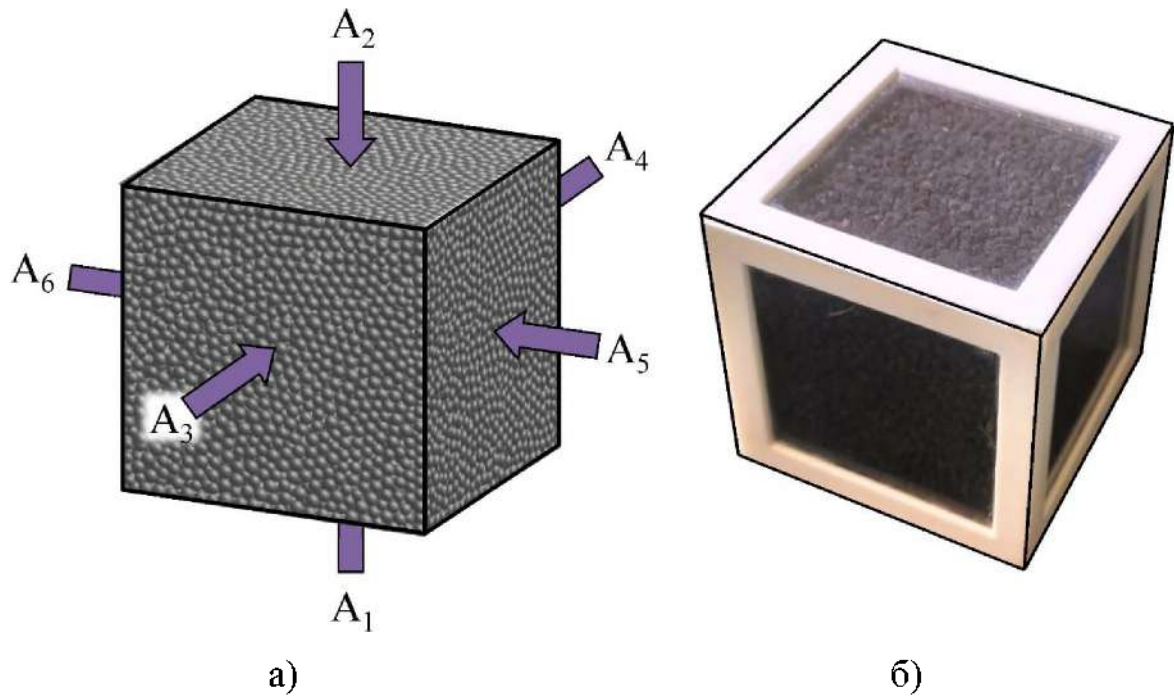
Отримані фракції кожної культури розміщали у скляний прозорий куб (50 мм × 50 мм × 50 мм) і фотографували з різних сторін згідно з рис. 3.3. Далі отримані фото обробляли на персональному комп'ютері з використанням способу автоматичного фенотипування насіння [166] і програмного забезпечення, розробленого Алієвим Е.Б [148, 167, 168, 169, 170, 171].



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лічильника зерна та насіння Contador (а) і ваг лабораторних Radwag AS 220.R1 (б).

Процес обробки фото в програмному забезпеченні фенотипування насіння проводився таким чином. Над отриманим зображенням проводяться морфологічні перетворення, метою яких є позбавлення випадкових вкраплень, шумів і об'єднання зон, розділених тінню [171].

Алієвим Е. Б. і Яропудом В. М. розроблено програмне забезпечення на базі Visual Studio C++ і бібліотеки OpenCV, яке проводить аналіз всіх отриманих з фотокамери зображень [171, 172]. Цей алгоритм дозволяє ідентифікувати насіння на зображеннях за допомогою взяття послідовних точок на периметрі кожної насінини та максимізації або мінімізації певних значень.



В

Рисунок 3.3 – Схема (а) і загальний вигляд (б, в) розміщення фотокамери перед скляним прозорим кубом із насінням.

Процес аналізу зображень включає такі етапи, як:

1. Перетворення зображення фракції насінневої суміші з 24-розрядного (повнокольорового) на 1-бітове (чорно-біле) за допомогою методу сегментації. Це дозволяє виділити чорні насінини на білому фоні [173].

2. Видалення шумів за допомогою морфологічних операцій з використанням функцій OpenCV Erode та Dilate [174].

3. Автоматичне визначення контуру кожного насіння на 1-бітовому зображенні за допомогою детектора границь Кенні та перетворення Хафа з використанням функції OpenCV FindContour. Після цього отримуються набори координат кожного контуру [175].

За результатами аналізу визначається кількість насінин N та площа області фотозображення S_N [166, 171]. Усі ці етапи допомагають здійснити автоматичну ідентифікацію та вимірювання параметрів насіння, що є важливими для сільськогосподарських досліджень та селекції.

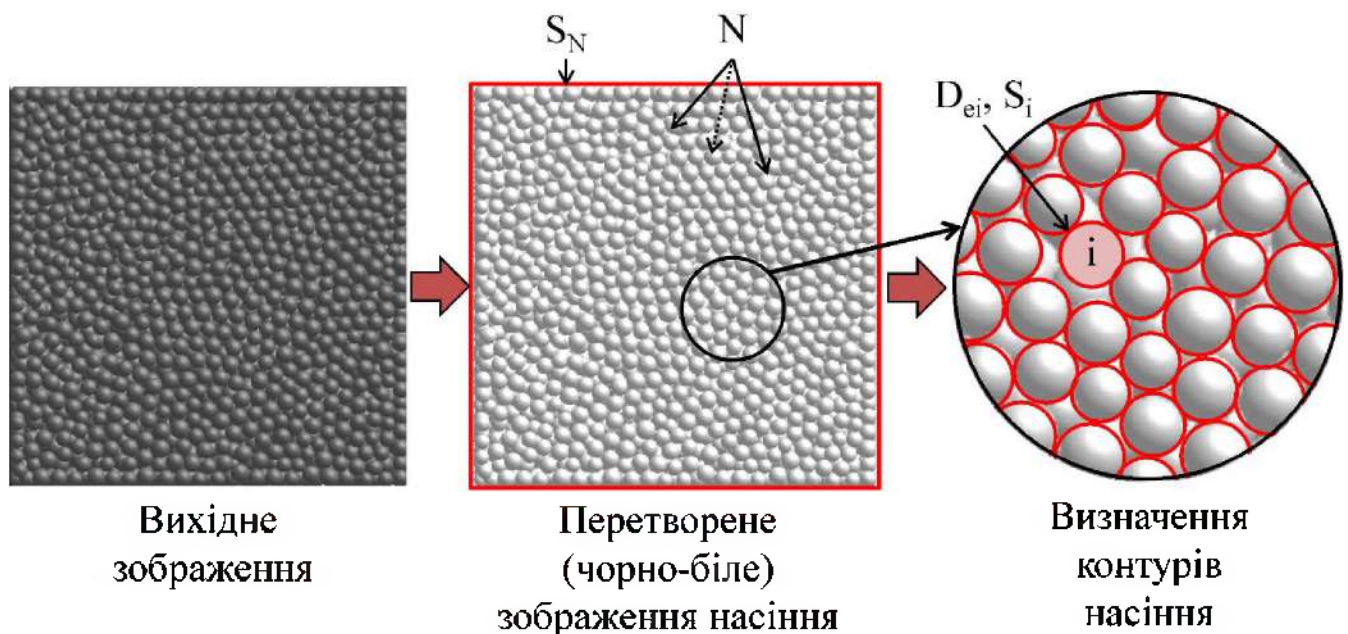


Рисунок 3.4 – Етапи обробки фото насіння в програмному забезпеченні розробленому Алієвим Е.Б. [166, 171].

З набору координат контуру функція OpenCV ContourArea обчислює його площу S_i [176], а ефективний діаметр D_{ei} визначається за формулою:

$$D_{ei} = 2\sqrt{\frac{S_i}{\pi}} \quad (3.1)$$

де S_i – площа насінини, м²;

D_{ei} – ефективний діаметр насінини, м.

Аналізуючи ефективний діаметр D_{ei} всіх насінин будувалася відповідний графік розподілу, визначалися середнє значення D_{μ} , середнє квадратичне відхилення σ_D , коефіцієнт варіації δ , мінімальне D_{\min} і максимальне D_{\max} значення.

Відповідно до розділу 2 критерієм оцінки є щільність пакування, яка визначалася за отриманими даними обробки фотозображення таким чином:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{S_N} \quad (3.2)$$

де i – номер насінини;

N – загальна кількість насінин;

S_N – площа області фотозображення, мм²;

S_i – площа насінини, мм².

Далі за даними обробки шести зображень (відповідно до рис. 3.3, а) визначили середні значення всіх зазначених вище параметрів і порівнювали з даними чисельного моделювання (розділ 2).

3.3 Методика експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур

Для перевірки отриманих за результатами чисельного моделювання (розділ 2) закономірностей роботи дозатора висівного апарату селекційної сівалки розроблено і виготовлено його макетний зразок у трьох виконаннях отворів: I – трикутник, II – напівколо, III – прямокутник. 3D-моделі дозаторів представлені на рис. 3.5.

Деталі макетного зразка дозатора висівного апарату селекційної сівалки надруковані на 3D-принтері Anycubic Mega S з ABS+ пластика (рис. 3.6). Схему і загальний вигляд макетного зразка дозатора висівного апарату селекційної сівалки у складі створеного лабораторного стенду наведено на рис. 3.7. Як привод дозатора висівного апарату використовується сервопривод MG995: швидкість повороту: $0,17 \text{ с} / 60^\circ$ (4,8 В) – $0,13 \text{ с} / 60^\circ$ (6,0 В), зусилля на валу: 9 кг/см (4,8 В) – 12 кг/см (6 В). До складу експериментального стенду входить транспортерна стрічка, яка імітує процес переміщення сівалки. Приводом транспортерної стрічки є кроковий двигун SY42STH38-1684A.

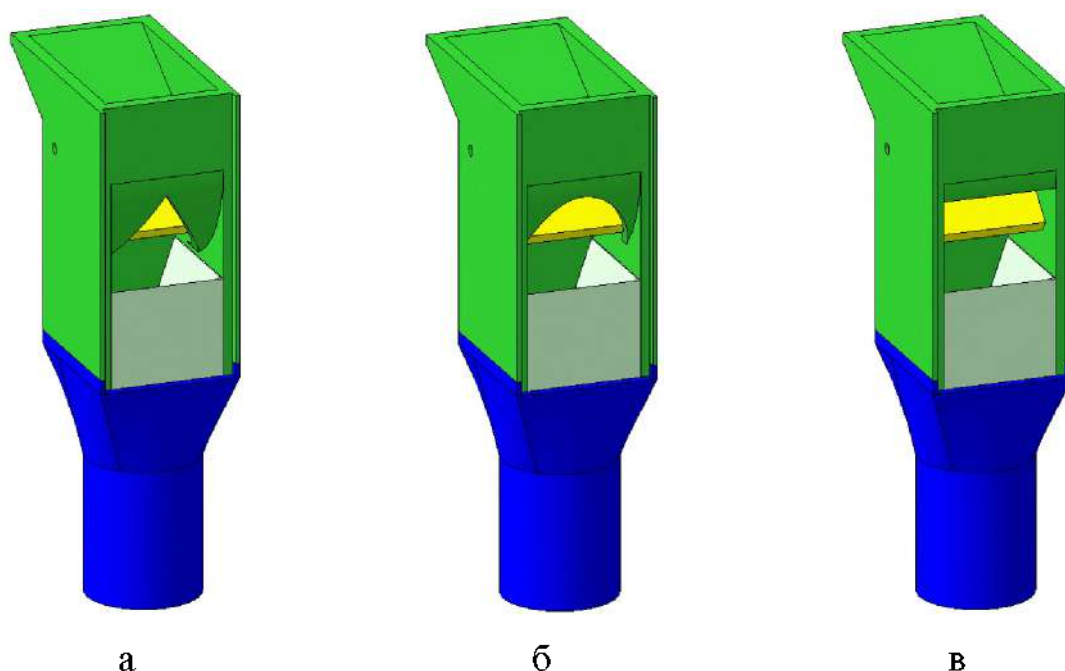


Рисунок 3.5 – 3D-модель дозатора висівного апарату селекційної сівалки із отворами різної форми: трикутник (а), напівколо (б), прямокутник (в).

Макетний зразок дозатора висівного апарату прикріплено до рами через тензOMETричний датчик (1 кг, абсолютна похибка вимірювання 0,1 г), який підключено до модуля HX711. Сервопривод MG995, модуль HX711, кроковий двигун SY42STH38-1684A через відповідний контролер підключені до контролера Arduino Uno R3 ATmega328. Електрична схема підключення макетного зразка дозатора висівного апарату наведена на рис. 3.8.

Для забезпечення точності роботи тензOMETричного датчика було проведено його калібрування. Після проведення статичного калібрування з використанням набору лабораторних гирь (з відхиленням від номіналу 0,1 г), було встановлено математичне співвідношення для перерахунку вимірної напруги у відповідні значення маси:

$$M = 400,6(U - U_0), \quad (3.3)$$

де U – вимірювана напруга, В;

M – маса, г;

U_0 – початкова напруга без навантаження, В.

Кореляція складає $R = 0,97$.

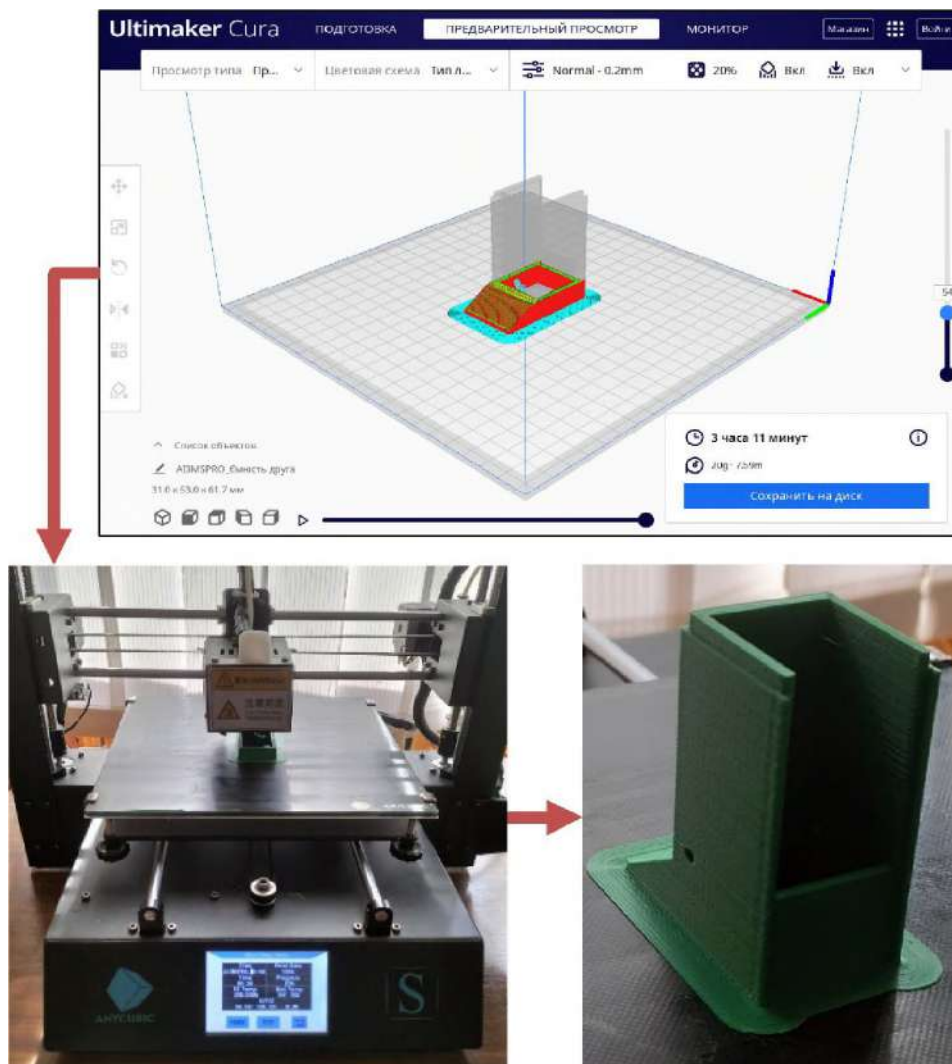


Рисунок 3.6 – Процес виготовлення деталей макетного зразка дозатора на 3D-принтері Anycubic Mega S з ABS+ пластика.

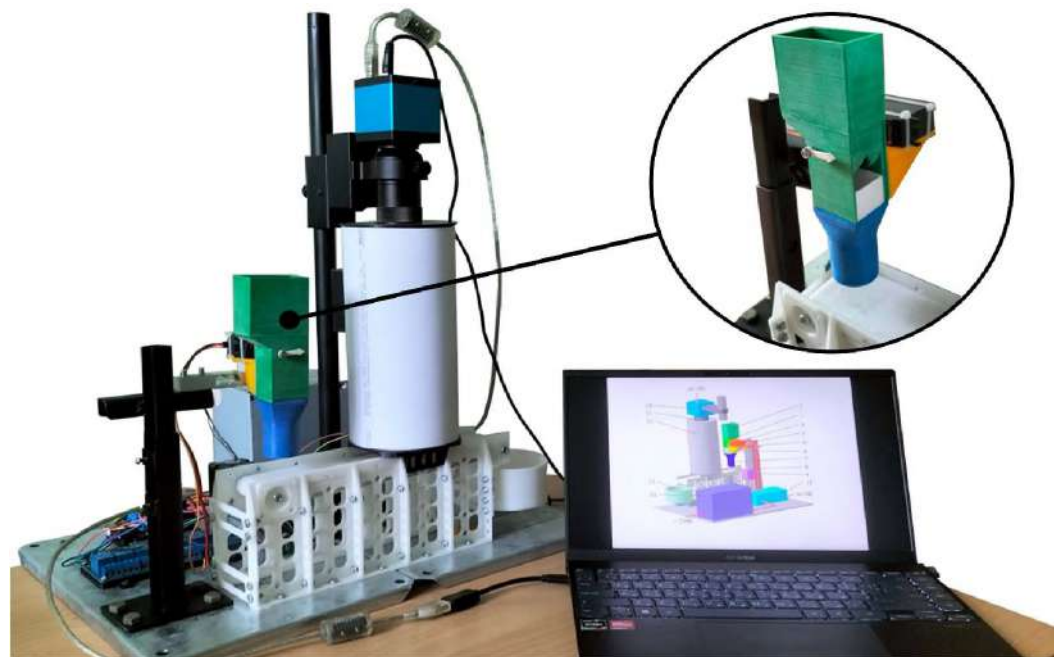
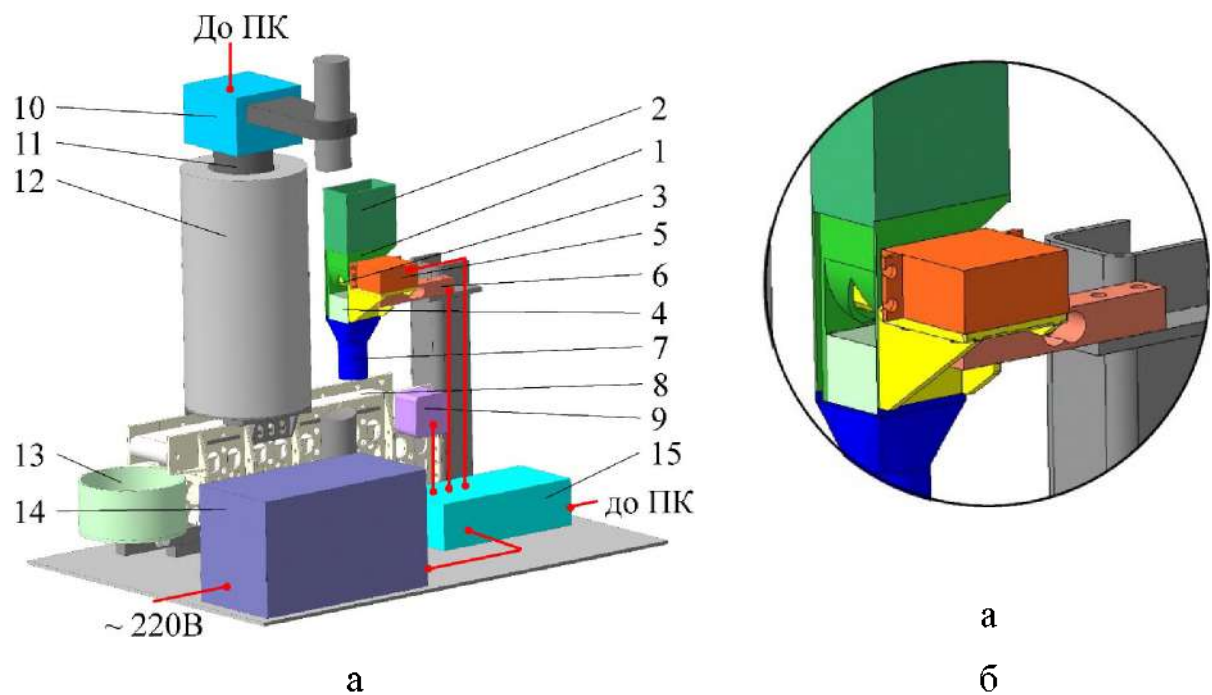


Рисунок 3.7 – Схема (а) і загальний вигляд (б) макетного зразка дозатора висівного апарату селекційної сівалки у складі створеного лабораторного стенду:

1 – дозатор; 2 – бункер; 3 – заслінка; 4 – розподільник; 5 – сервопривод MG995; 6 – тензометричний датчик; 7 – патрубок; 8 – транспортерна стрічка; 9 – кроковий двигун SY42STH38-1684A; 10 – цифрова відеокамера Video Microscope Camera 1080P 16MP; 11 – об'єктив; 12 – тубус із підсвіткою; 13 – забірник насіння; 14 – блок живлення; 15 – блок керування (контролер Arduino Uno R3 ATmega328, контролер крокового двигуна, модуль HX711).

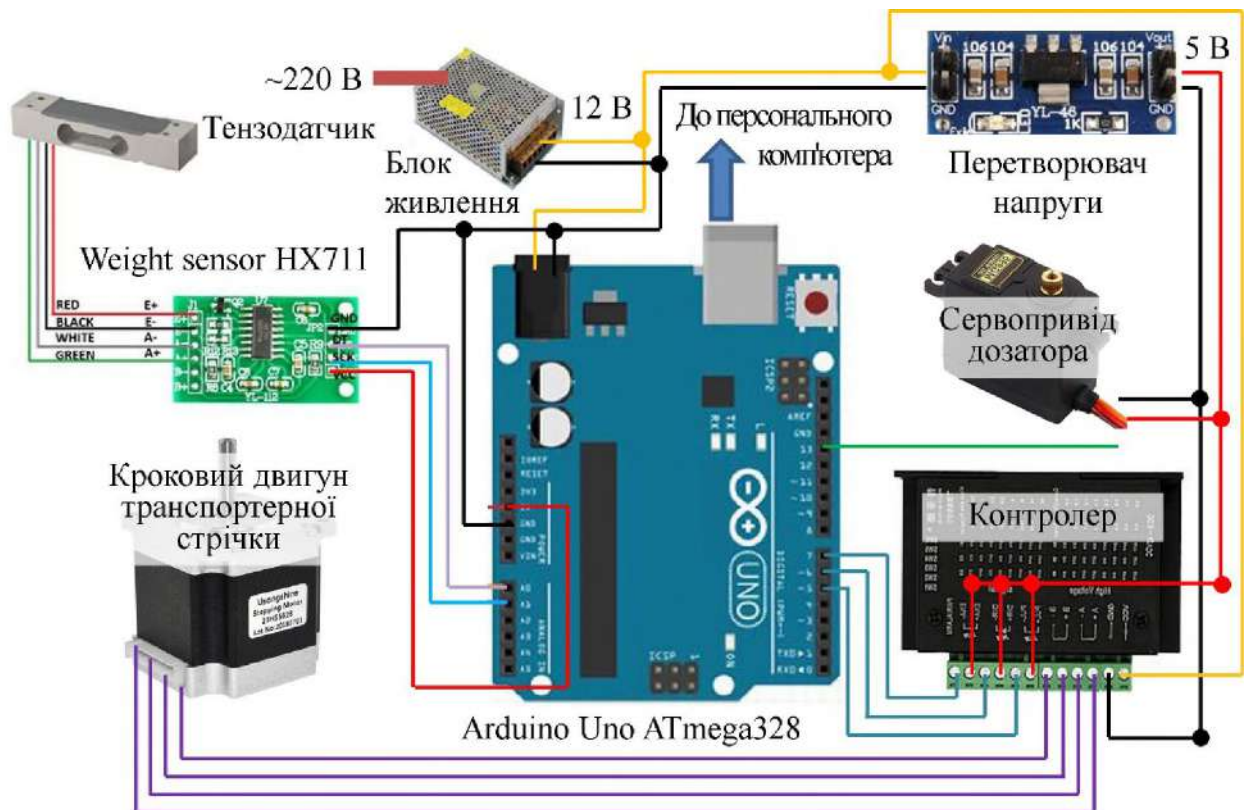


Рисунок 3.8 – Електрична схема підключення макетного зразка дозатора висівного апарату.

Над транспортерною стрічкою розміщено тубус із підсвіткою, в якому встановлена цифрова відеокамера Video Microscope Camera 1080P 16MP. З використанням способу автоматичного фенотипування насіння [166] і програмного забезпечення, розробленого Алієвим Е.Б. [171], фіксується положення насінини і час. Алгоритм Алієва Е.Б. приведено в розділі 3.2. На основі отриманих даних розраховується пропускна здатність і рівномірність дозування.

Факторами чисельного моделювання є діаметр насіння $D_{\text{ц}}$, кут повороту заслінки α , проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , швидкість переміщення транспортерної стрічки (сівалки) V . Рівні та інтервали варіювання факторів наведені в табл. 3.1.

Кількісним критерієм оцінки є норма висіву насіння N , яка розраховується за формулою (2.26), вимірюючи значення пропускну здатності дозатора Q_d з використанням відеокамери. Якісним критерієм оцінки є точність висіву δ , що розраховувалась за формулою (2.29).

Таблиця 3.1

**Рівні та інтервали варіювання факторів при проведенні
експериментальних досліджень дозатора висівного апарату
селекційної сівалки дрібнонасінневих культур**

Рівні варіацій факторів	Фактори			
	Діаметр насіння D_p , м (x_1)	Кут повороту заслінки α , рад ($^\circ$) (x_2)	Проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , с (x_3)	Швидкість переміщення транспортерної стрічки (сівалки) V , м/с (x_4)
Верхній рівень (+)	0,003	0,8028 (46)	0,4	4,0
Основний рівень (0)	0,002	0,5759 (33)	0,3	2,5
Нижній рівень (-)	0,001	0,3489 (20)	0,2	1,0
Інтервал варіацій факторів	0,001	0,2268 (13)	0,1	1,5

Дослідження проводились за D-оптимальним планом Бокса-Бенкіна другого порядку для 4 факторів у трикратній повторності. Матрицю плану представлено в табл. В.1.

Один дослід проводився при пропусканні через експериментальний зразок дозатора подачі 300 г насіння. Повторність – триразова.

3.4 Методика статистичної обробки даних експериментальних досліджень

Експериментальні дані, отримані при оцінюванні режимів роботи експериментального дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур, обробляли за допомогою методів математичної статистики.

Середнє значення розраховували за формулою:

$$X = \frac{1}{n} \sum_i^n X_i, \quad (3.4)$$

де X_i – поточне значення величини;

n – кількість вимірів.

Стандартне відхилення розраховують за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (X - X_i)^2}{n - 1}}. \quad (3.5)$$

Залежності описували за допомогою рівняння регресії другого ступеня, яке мало вигляд [177]

$$y = b_0 + \sum_i^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_i^k b_{ii} x_i^2, \quad (3.6)$$

де b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії;

k – кількість факторів;

x_i, x_j – незалежні змінні (фактори).

Для квадратичної апроксимації коефіцієнти регресії b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} , які визначають вплив факторів на параметри оптимізації, розраховували формулами [178]

$$b_0 = O_1 \sum_i^n y_i - \frac{O_1}{O_2} \sum_i^k b_{ij} \bar{x}_i^2, \quad (3.6)$$

$$b_i = O_2 \sum_i^n x_i y_i, \quad (3.7)$$

$$b_{ii} = O_3 \sum_i^n (x_i^2 - \bar{x}_i^2) y_i, \quad (3.8)$$

$$b_{ij} = O_4 \sum_i^n x_i x_j y_i, \quad (3.9)$$

де O_i – числовий коефіцієнт визначали за таблицею [179];

y_i – значення параметра оптимізації в i – му досліді;

n – кількість дослідів.

Для визначення значущості коефіцієнтів регресії спочатку розраховували їх дисперсію [180]

$$S_{bij}^2 = O_4 S_o^2, S_{bi}^2 = O_2 S_o^2, S_{bii}^2 = O_3 S_o^2, S_{bo}^2 = \left(O_1 + \frac{O_1^2}{O_2} O_3 k \right) S_o^2, \quad (3.10)$$

де S_o^2 – загальна дисперсія.

Довірчий інтервал визначався за допомогою рівнянь

$$\Delta b_o = t S_{bo}^2, \Delta b_i = t S_{bi}^2, \Delta b_{ij} = t S_{bij}^2, \Delta b_{ii} = t S_{bii}^2. \quad (3.11)$$

Відповідно проводили оцінювання значущості коефіцієнтів регресії, виключивши з них незначущі числа. При дослідженні поверхні відгуку адекватність рівняння регресії вихідним експериментальним даним або результатам теоретичних досліджень встановлювали таким чином.

Оцінювання адекватності рівняння регресії загалом проводили за коефіцієнтом множинної детермінації D [181]

$$D = \frac{S_p}{S_o}, \quad (3.12)$$

де S_p – сума квадратів відхилень за рахунок регресії (дисперсія за рахунок регресії);

S_o – сума квадратів загальна (загальна дисперсія).

Дисперсію за рахунок регресії визначали за формулою [179]

$$S_p = \sum_{i=1}^n (y_{i\phi} - \bar{Y})^2, \quad (3.13)$$

де $y_{i\phi}$ – значення залежної змінної (функції) за рівнянням регресії;

\bar{Y} – середнє значення залежної змінної.

Загальну дисперсію визначали за формулою

$$S_o = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2. \quad (3.14)$$

Коефіцієнт множинної детермінації показує на скільки часток пояснюється зміна залежної змінної (y) від зміни незалежних змінних (x_i). Після цього визначали, з якою ймовірністю $D > 0$, тобто адекватність рівняння загалом.

Адекватність математичної моделі (полінома) процесу перевіряли за допомогою критерію Фішера [177, 178, 179]:

$$F_{\text{роз}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{дос}}^2}, \quad (3.15)$$

де $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсія адекватності

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n_{\text{дос}} - k - 1}. \quad (3.16)$$

Дисперсію дослідів знаходили за формулою [177, 178, 179]

$$S_{\text{оп}}^2 = \frac{\sum_i^{n_i} \sum_{i=1}^{m_i} (y_i - \bar{Y})^2 (m_i - 1)}{n_i \sum_1^m (m_i - 1)}, \quad (3.17)$$

де n_i – кількість дослідів з повторностями;

m_i – кількість повторностей кожного дослідів.

Якщо $F_{\text{роз}} < F_{\text{табл}}$, то адекватність обґрунтована [177, 178]. Табличне значення критерію Фішера визначали за заданим рівнем значущості та двома ступенями відповідності f_1, f_2 :

$$\begin{aligned} f_1 &= n - \lambda, \\ f_2 &= n(k - 1), \end{aligned} \quad (3.18)$$

де λ – кількість значимих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Обробка результатів досліджень виконувались за допомогою комп'ютерної програми Wolfram Cloud [182, 183]. Для пошуку оптимального рішення використовується метод компромісної задачі, який передбачає аналіз математичних моделей процесу на основі оцінювальних показників та встановлення оптимальних параметрів. Спочатку, із загального списку факторів вибираються найбільш значущі для кожної моделі та їх оптимальні значення. Після цього із цих обраних факторів формується список спільних і аналізується діапазон їхніх оптимальних значень.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Складено методику лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасіньових культур (гірчиця, ріпак, рижій) у ємності висівного апарату селекційної сівалки. Визначені рівні та інтервали варіювання факторами дослідженням ефективного діаметра насіння D_{μ} і його коефіцієнта варіації δ . За критерій досліджень обрано щільність пакування ϕ насіння в ємності висівного апарату селекційної сівалки.

2. Розроблено і виготовлено макетний зразок дозатора висівного апарату селекційної сівалки. Складено методику проведення експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки. Факторами чисельного моделювання є діаметр насіння D_{μ} , кут повороту заслінки α , проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , швидкість переміщення транспортерної стрічки (сівалки) V . Кількісним критерієм оцінки є норма висіву насіння N , якісним критерієм оцінки є точність висіву δ . Наведено опис статистичної обробки отриманих даних експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВИСІВНОГО АПАРАТУ СЕЛЕКЦІЙНОЇ СІВАЛКИ

4.1 Результати лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки

Лабораторні дослідження передбачали перевірку розробленої математичної моделі випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки.

Відповідно до методики лабораторних досліджень (розділ 3.2), предметом досліджень обрано насінини гірчиці, ріпаку та рижію. Усі насінини мали кулеподібну форму. Геометричний розмір насінин (врожаю 2022 р.) коливався в діапазоні: гірчиця Тавричанка – 2,1–3,2 мм, ріпак Легіон – 0,9–2,1 мм, рижій Престиж – 0,5–1,0 мм.

Тому за 1 фракцією був просіяний через сита (\varnothing 1,0 мм) рижій, за 2 фракцією був просіяний через сита (\varnothing 1,0 мм, \varnothing 2,0 мм) ріпак, а за 3 фракцією була просіяна через сита (\varnothing 2,0 мм) гірчиця.

Етапи аналізу зображень насіння рижію, ріпаку й гірчиці наведено на рис. 4.1–4.3. I етап – вихідне фото насіння, яке упаковане в область, розміром 50 мм \times 50 мм. II етап – перетворене 1-бітове зображення (чорне насіння на білому фоні). III етап – визначення контурів насіння та обчислення його ефективного діаметру D_{ei} , площі S_i та щільності пакування ϕ . IV етап – складання гістограми розподілу насінин за діаметром, визначення середнього значення діаметра D_{μ} , його середньоквадратичного відхилення σ_D і коефіцієнта варіації δ .

За результатами обробки зображень отримано таблицю даних (36 зразків), яка наведена в додатку В. Візуалізацію отриманих даних порівняно з теоретичними (2.21) і представлено на рис. 4.4.

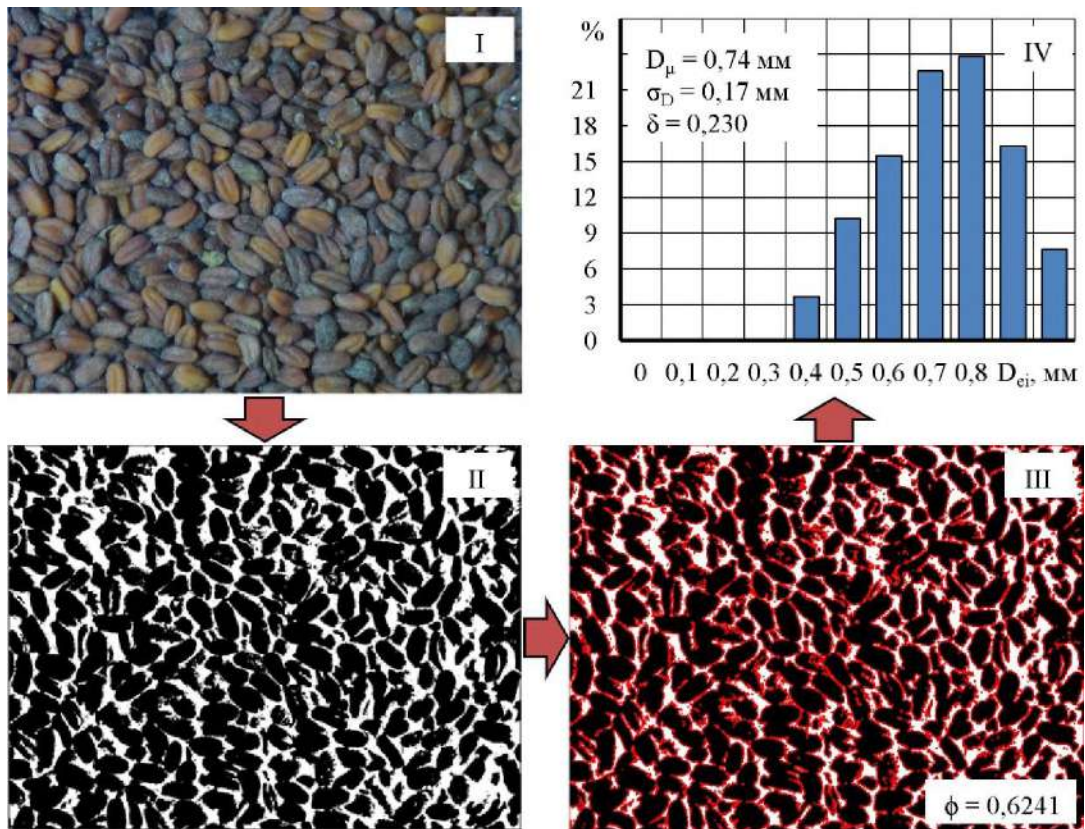


Рисунок 4.1 – Етапи аналізу зображень насіння рижю.

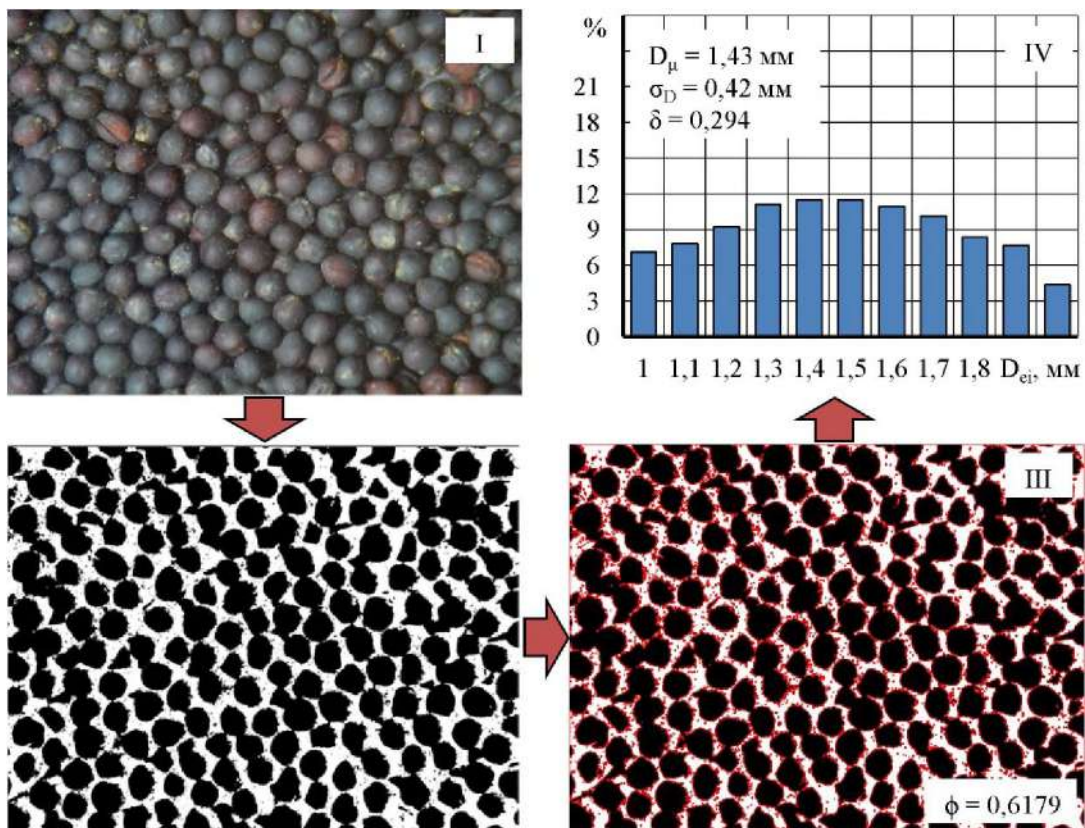


Рисунок 4.2 – Етапи аналізу зображень насіння ріпаку.

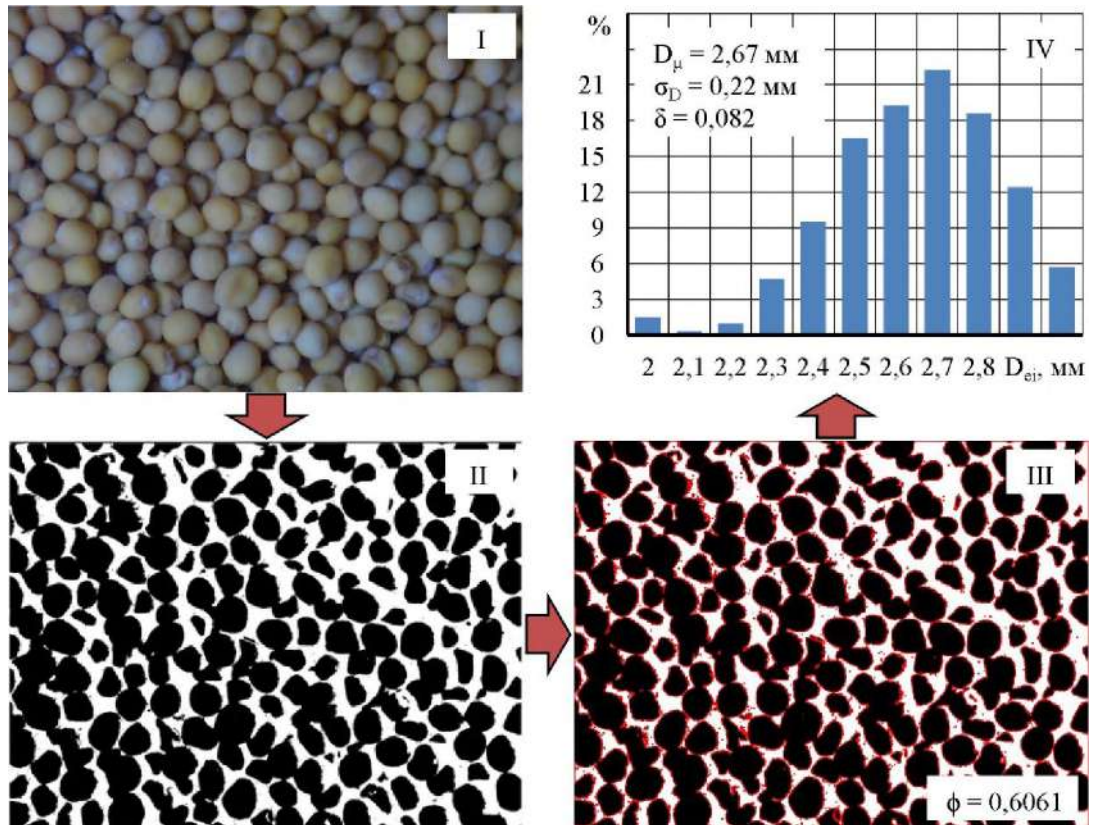


Рисунок 4.3 – Етапи аналізу зображень насіння гірчиці.

Порівнюючи теоретичні і експериментальні дані, встановлено їх достатньо високу подібність. Про це свідчать:

- коефіцієнт кореляції Пірсона – 0,9726;
- розрахункове значення t-критерію – $24,3743 > t_{0,05}(32) = 2,0322$;
- табличне значення стандартного нормального розподілу – 1,9600;
- значення перетворення Фішера – 2,1375;
- ліва інтервальна оцінка – 0,7641;
- права інтервальна оцінка – 0,9971;
- стандартне відхилення – 0,1163.

Зі зменшенням ефективного діаметра насіння D_{μ} та збільшенням коефіцієнта варіації δ спостерігається підвищення щільності випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур сферичної форми у ємності висівного апарату селекційної сівалки. Це пояснюється тим, що насіння меншого діаметра заповнює простір між насінинами більшого діаметра.

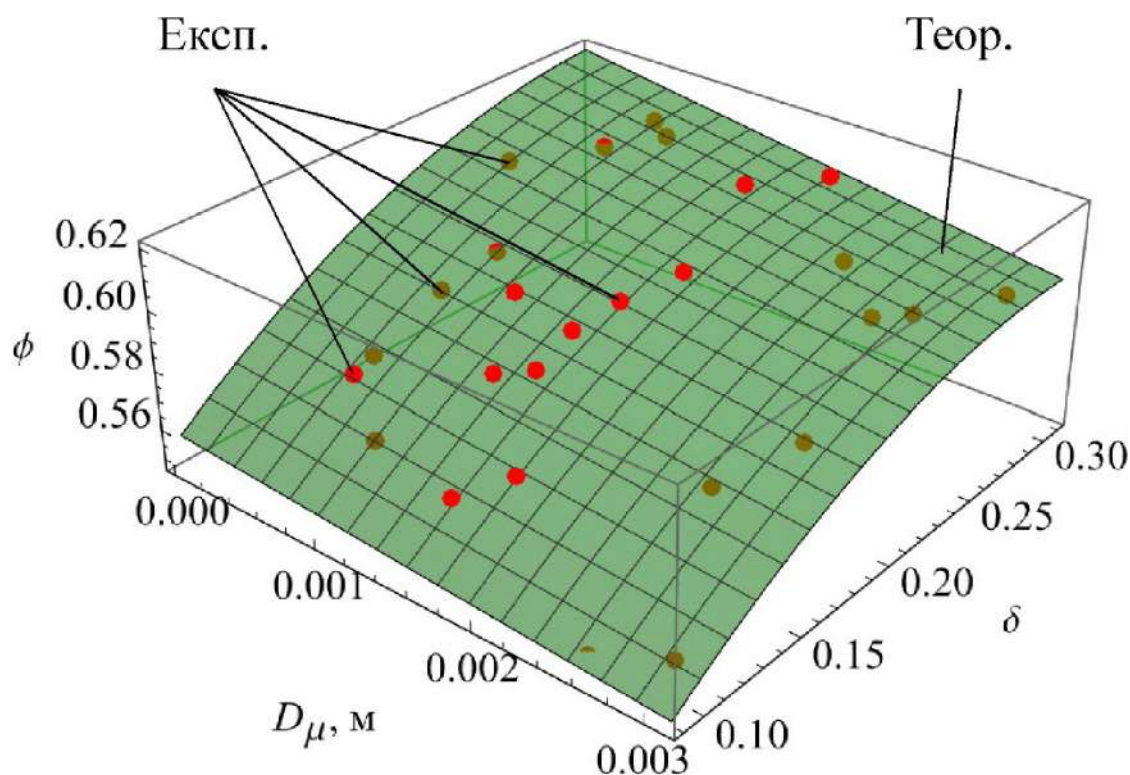


Рисунок 4.4 – Закономірність зміни щільності випадкового пакування ϕ насіння дрібнонасінневих культур (рижю, ріпаку, гірчиці) у ємності від ефективного діаметра насіння D_{μ} і його коефіцієнта варіації δ .

Зростання щільності випадкового пакування насіння може спричинити утворення заторів, що ускладнює процес дозування.

4.2 Результати експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур

Процес проведення експериментальних досліджень розробленого дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур на лабораторному стенді представлено на рис. 4.5. Так само наведені результати фотозйомки розподілу насіння на транспортерній стрічці.

За результатами експериментальних досліджень і розрахунку якісного і кількісного критеріїв дані зведені в табл. В.2.

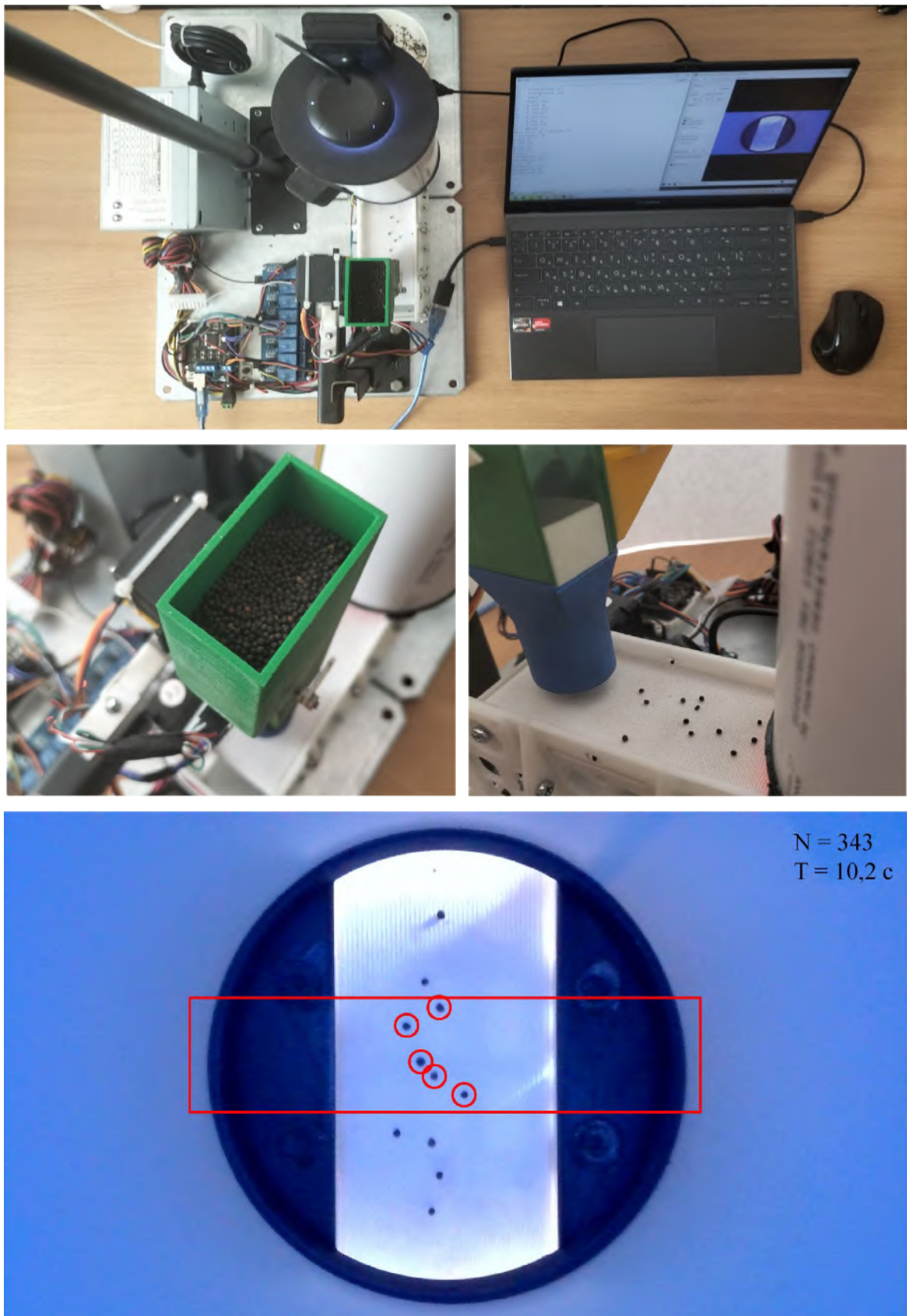


Рисунок 4.5 – Процес проведення експериментальних досліджень розробленого дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур на лабораторному стенді.

Провівши обробку даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді для норми висіву насіння N для трьох варіантів форми отворів (додаток В):

– варіант I (трикутник):

$$\begin{aligned} N = & 956,9 - 91,5167 x_1 - 8,02083 x_1^2 - 353,717 x_2 - 25,65 x_1 x_2 + \\ & + 183,454 x_2^2 + 954,417 x_3 - 2,2 x_1 x_3 - 518,175 x_2 x_3 + 507,179 x_3^2 - \\ & - 269,817 x_4 - 1,9 x_1 x_4 + 213,025 x_2 x_4 - 518,475 x_3 x_4 + 198,079 x_4^2; \end{aligned} \quad (4.1)$$

– варіант II (напівколо):

$$\begin{aligned} N = & 826,6 - 119,683 x_1 + 17,2167 x_1^2 - 286,267 x_2 + 8,2 x_1 x_2 + \\ & + 191,642 x_2^2 + 1060,3 x_3 + 7,975 x_1 x_3 - 464,775 x_2 x_3 + \\ & + 535,042 x_3^2 - 462,817 x_4 + 0,875 x_1 x_4 + 159,925 x_2 x_4 - \\ & - 602,2 x_3 x_4 + 227,467 x_4^2; \end{aligned} \quad (4.2)$$

– варіант III (прямокутник):

$$\begin{aligned} N = & 997,167 - 104,783 x_1 - 22,4167 x_1^2 - 217,058 x_2 - 42,975 x_1 x_2 + \\ & + 163,396 x_2^2 + 1166,94 x_3 + 0,2 x_1 x_3 - 382,325 x_2 x_3 + \\ & + 522,946 x_3^2 - 566,283 x_4 - 47,475 x_1 x_4 + 103,725 x_2 x_4 - \\ & - 663,85 x_3 x_4 + 280,658 x_4^2. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Результат розрахунку критерію Стьюдента для кожного коефіцієнта рівнянь регресії наведено в табл. 4.1. Ураховуючи табличне значення критерію Стьюдента $t(0,05;54) = 2,005$, проведемо відхилення не значущих коефіцієнтів і отримуємо рівняння для норми висіву насіння N у розкодованому вигляді (рис. 4.6):

– варіант I (трикутник):

$$\begin{aligned} N = & 245,046 - 40216,7 D - 172,054 V + 198,079 V^2 + 1995,69 \alpha - \\ & - 2285,11 V \alpha + 9851,9 \alpha^2 - 734,58 \Delta t - 128250,0 D \Delta t + \\ & + 1065,12 V \Delta t - 11418,9 \alpha \Delta t + 4586,35 \Delta t^2; \end{aligned} \quad (4.4)$$

– варіант II (напівколо):

$$\begin{aligned} N = & 219,48 - 119683,0 D - 163,872 V + 227,467 V^2 + 2106,21 \alpha - \\ & - 2654,12 V \alpha + 10393,1 \alpha^2 - 964,349 \Delta t + 799,625 V \Delta t - \\ & - 10242,2 \alpha \Delta t + 4791,04 \Delta t^2; \end{aligned} \quad (4.5)$$

– варіант III (прямокутник):

$$N = -129,202 - 9833,33 D - 116,259 V - 47475,0 D V + 280,658 V^2 + 2663,53 \alpha - 2925,83 V \alpha + 10158,2 \alpha^2 - 537,872 \Delta t + 518,625 V \Delta t - 8425,23 \alpha \Delta t + 4084,9 \Delta t^2. \quad (4.6)$$

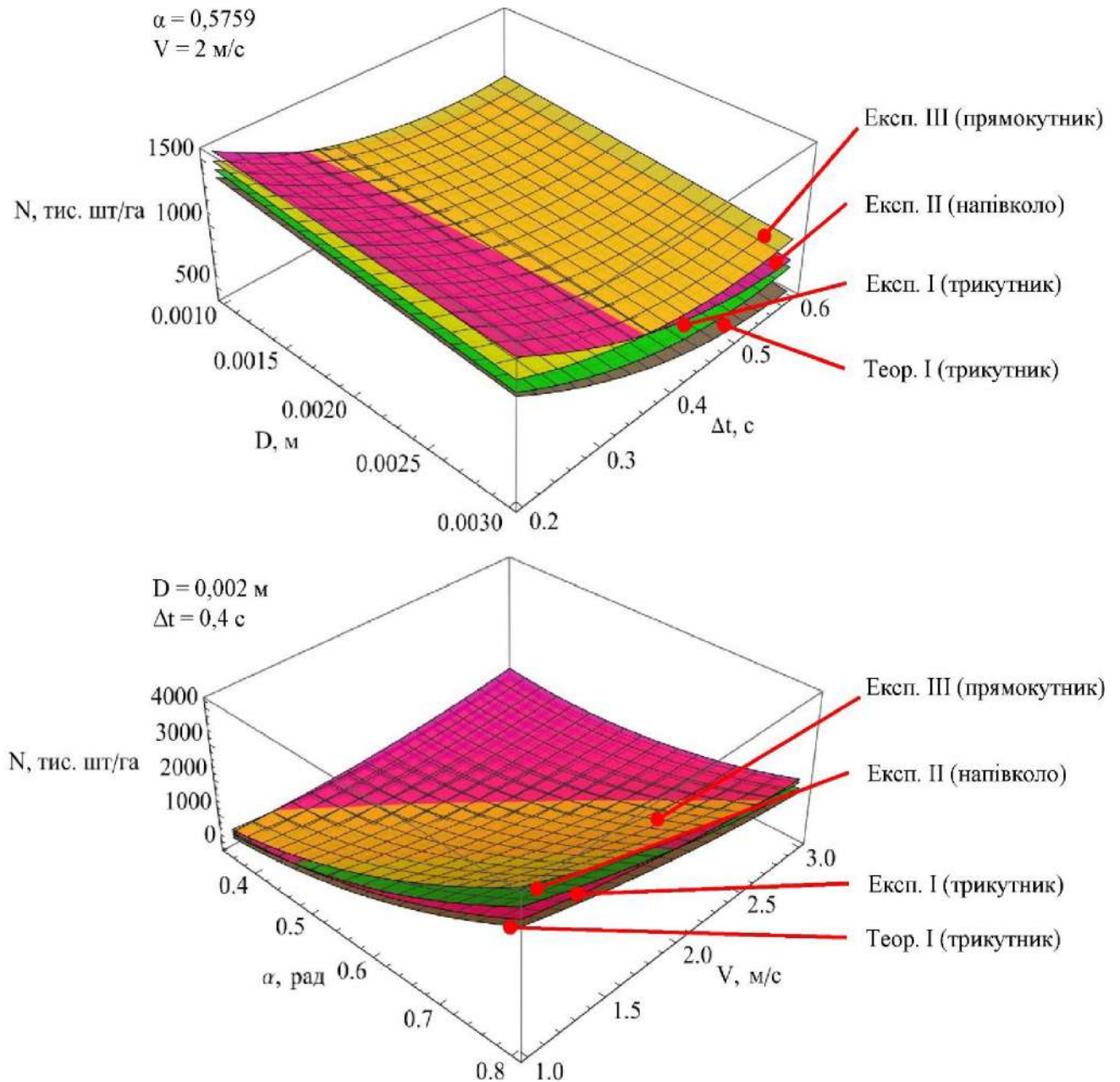


Рисунок 4.6 – Залежність норми висіву насіння N від середнього ефективного діаметра насіння D_{μ} , кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V .

Таблиця 4.1

Статистична обробка рівняння (4.1)–(4.3)

Коефіцієнт	(4.1)		(4.2)		(4.3)	
	Значення	Критерій Стьюдента	Значення	Критерій Стьюдента	Значення	Критерій Стьюдента
a_{00}	956,9	68,6011	826,6	22,5065	997,167	40,2476
a_{10}	-91,5167	-13,1218	-119,683	-6,51744	-104,783	-8,45853
a_{20}	-353,717	-50,7166	-286,267	-15,5888	-217,058	-17,5218
a_{30}	954,417	136,846	1060,3	57,7394	1166,94	94,2002
a_{40}	-269,817	-38,6868	-462,817	-25,203	-566,283	-45,7127
a_{12}	-25,65	-2,12335	8,2	0,257808	-42,975	-2,00289
a_{13}	-2,2	-0,182119	7,975	0,250734	0,2	0,00932121
a_{14}	-1,9	-0,157285	0,875	0,02751	-47,475	-2,21262
a_{23}	-518,175	-42,8953	-464,775	-14,6125	-382,325	-17,8187
a_{24}	213,025	17,6345	159,925	5,02804	103,725	4,83421
a_{34}	-518,475	-42,9202	-602,2	-18,9332	-663,85	-30,9394
a_{11}	-8,02083	-0,766695	17,2167	0,62503	-22,4167	-1,20638
a_{22}	183,454	17,536	191,642	6,95732	163,396	8,79331
a_{33}	507,179	48,4802	535,042	19,424	522,946	28,1429
a_{44}	198,079	18,934	227,467	8,2579	280,658	15,1039

З аналізу рис. 4.6 видно, що зі збільшенням кута повороту заслінки α збільшується норма висіву насіння N . Також, зі збільшенням швидкості переміщення сівалки V та проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , норми висіву насіння N зменшуються. Ця залежність буде використана для автоматичного керування режимними параметрами висівного апарату, враховуючи ефективний діаметр насіння D_n та швидкість переміщення сівалки V , для забезпечення необхідної норми висіву N . Порівнюючи наочно графіки залежностей I варіанту форми отвору (трикутник) для експериментальну і чисельного моделювання, бачимо їх сумісність. У свою чергу для II і III варіантів спостерігається їх віддаленість від теоретичної залежності. Це підтверджується рис. 4.7, на якому представлено порівняння перетворених теоретичних залежностей (2.22)–(2.24) з використанням формули (2.26) із (4.4)–(4.4) при прийнятих значеннях $V = 2$ м/с, $D = 0,003$ м, $\Delta t = 0,5$ с в розрізі кута повороту заслінки α . З аналізу рис. 4.7 можна зробити висновок, що при налаштуванні кута нахилу заслінки α в діапазоні від 0,3 рад до 0,8 рад

спостерігається зміна норми висіву: для варіанту I (трикутник) – 400–3500 тис. шт./га, для варіанту II (напівколо) – 600–3200 тис. шт./га, для варіанту III (прямокутник) – 800–3900 тис. шт./га. Для однозначного твердження щодо ефективності одного з варіантів необхідно дослідити точність висіву δ .

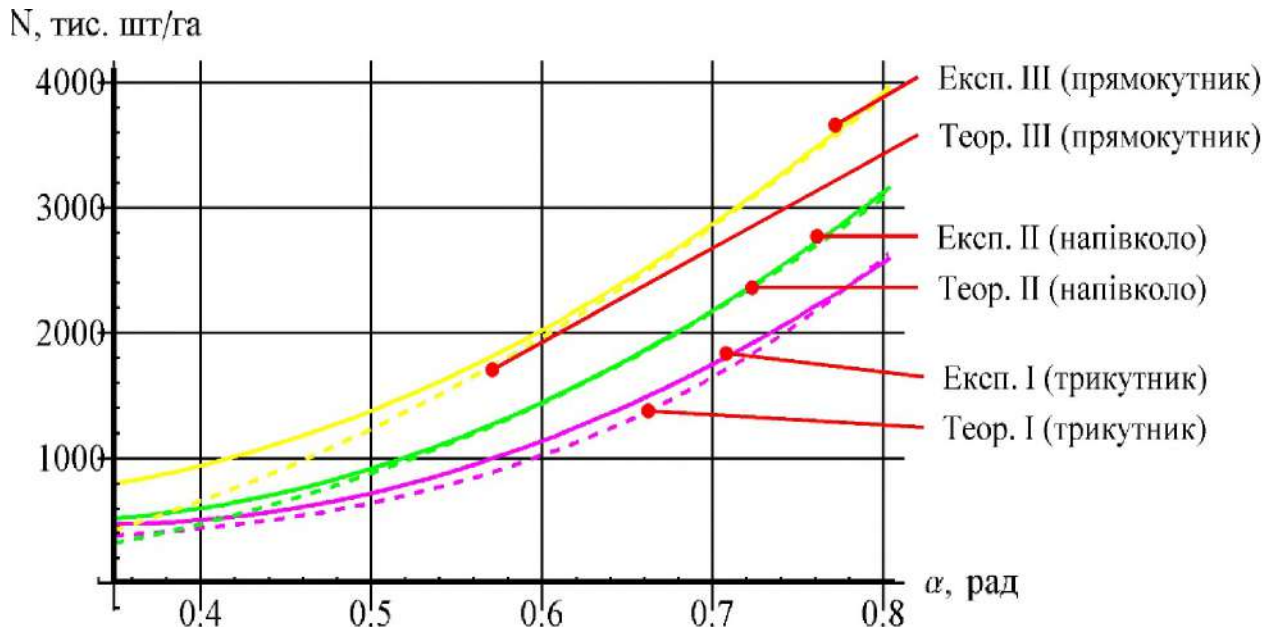


Рисунок 4.7 – Залежність норми висіву насіння N від кута повороту заслінки α при $V = 2$ м/с, $D = 0,003$ м, $\Delta t = 0,5$ с.

Задані статистичні показники дозволяють зробити висновок про адекватність математичних моделей (4.1)–(4.4). Дисперсія адекватності $S_{ад}^2(4.1) = 11406,4$, $S_{ад}^2(4.2) = 41490,7$, $S_{ад}^2(4.3) = 17533,4$, що є важливим показником для оцінки точності моделі. Дисперсія похибки дослідів $S_y^2(4.1) = 9197,9$, $S_y^2(4.2) = 26321,5$, $S_y^2(4.3) = 16760,7$, що вказує на розкид даних відносно залежності моделі. При цьому розраховане значення критерію Фішера $F(4.1) = 1,240$, $F(4.2) = 1,576$, $F(4.3) = 1,046$, що менше за табличне значення $F_{0,05}(20, 54) = 1,768$ при рівні значущості 0,05. Це підтверджує, що моделі (4.1)–(4.4) є адекватними, оскільки вони статистично значимо пояснюють варіацію даних. Отже, можна стверджувати, що ці математичні моделі є адекватними на будь-якому рівні довірчої ймовірності, що підтримує її використання для прогнозування та пояснення залежностей між змінними.

Провівши обробку даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді для точності висіву δ_N для трьох варіантів форми отворів (додаток В):

– варіант I (трикутник):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 95,2667 + 9,23022 \cdot 10^{-15} x_1 - 0,2875 x_1^2 + 1,88333 x_2 - 0,5 x_1 x_2 - \\ & - 0,7625 x_2^2 - 3,14167 x_3 + 0,55 x_1 x_3 + 1,2 x_2 x_3 - 0,525 x_3^2 - \\ & - 3,99167 x_4 + 1,9984 \cdot 10^{-15} x_1 x_4 + 1,65 x_2 x_4 - \\ & - 3,875 x_3 x_4 - 0,75 x_4^2; \end{aligned} \quad (4.7)$$

– варіант II (напівколо):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 91,7667 - 0,866667 x_1 - 0,966667 x_1^2 + 0,7 x_2 - 0,275 x_1 x_2 + \\ & + 0,533333 x_2^2 - 1,333333 x_3 + 1,775 x_1 x_3 + 1,7 x_2 x_3 - 0,491667 x_3^2 \\ & - 4,7 x_4 - 0,25 x_1 x_4 + 0,925 x_2 x_4 - 4,475 x_3 x_4 - 0,441667 x_4^2; \end{aligned} \quad (4.8)$$

– варіант III (прямокутник):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 90,5667 - 1,51667 x_1 - 1,18333 x_1^2 + 0,516667 x_2 - 0,225 x_1 x_2 + \\ & + 1,14167 x_2^2 - 0,116667 x_3 + 3,05 x_1 x_3 + 2,175 x_2 x_3 - \\ & + 1,05833 x_3^2 - 4,85 x_4 - 0,875 x_1 x_4 + 0,9 x_2 x_4 - \\ & - 4,975 x_3 x_4 - 0,383333 x_4^2. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Результат розрахунку критерію Стьюдента для кожного коефіцієнта рівнянь регресії наведено в табл. 4.2. Ураховуючи табличне значення критерію Стьюдента $t(0,05;54) = 2,005$, проведемо відхилення не значущих коефіцієнтів і отримаємо рівняння для точності висіву δ_N у розкодованому вигляді (рис. 4.8):

– варіант I (трикутник):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 94,4276 + 5,54487 V - 0,75 V^2 + 9,73294 \alpha - 17,0785 V \alpha - \\ & - 7,0641 \Delta t + 8,25 V \Delta t + 26,4442 \alpha \Delta t - 19,0625 \Delta t^2; \end{aligned} \quad (4.10)$$

– варіант II (напівколо):

$$\delta_N = 81,8321 + 6,65962 V + 33,5695 \alpha - 19,723 V \alpha; \quad (4.11)$$

– варіант III (прямокутник):

$$\begin{aligned} \delta_N = & 90,4936 - 7742,31 D + 7,77885 V + 16,9684 \alpha + \\ & + 13442,5 D \alpha - 21,9267 V \alpha. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Таблиця 4.2

Статистична обробка рівняння (4.7)–(4.9)

Коефіцієнт	(4.7)		(4.8)		(4.9)	
	Значення	Критерій Стьюдента	Значення	Критерій Стьюдента	Значення	Критерій Стьюдента
a_{00}	95,2667	257,11	91,7667	82,9841	90,5667	60,6152
a_{10}	$9,23022 \cdot 10^{-15}$	$4,98219 \cdot 10^{-14}$	-0,866667	-1,56744	-1,51667	-2,03017
a_{20}	1,88333	10,1656	0,7	1,26601	0,516667	0,691598
a_{30}	-3,14167	-16,9577	-1,33333	-2,41145	-0,116667	-0,156167
a_{40}	-3,99167	-21,5458	-4,7	-8,50037	-4,85	-6,4921
a_{12}	-0,5	-1,55818	-0,275	-0,287152	-0,225	-0,173886
a_{13}	0,55	1,714	1,775	1,85344	3,05	2,35712
a_{14}	$1,9984 \cdot 10^{-15}$	$6,22773 \cdot 10^{-15}$	-0,25	-0,261047	-0,875	-0,676224
a_{23}	1,2	3,73963	1,7	1,77512	2,175	1,6809
a_{24}	1,65	5,14199	0,925	0,965875	0,9	0,695545
a_{34}	-3,875	-12,0759	-4,475	-4,67275	-4,975	-3,84482
a_{11}	-0,2875	-1,03456	-0,966667	-1,16553	-1,18333	-1,05599
a_{22}	-0,7625	-2,74383	0,533333	0,643054	1,14167	1,01881
a_{33}	-0,525	-1,88919	-0,491667	-0,592815	-1,05833	-0,94444
a_{44}	-0,75	-2,69884	-0,441667	-0,532529	-0,383333	-0,342081

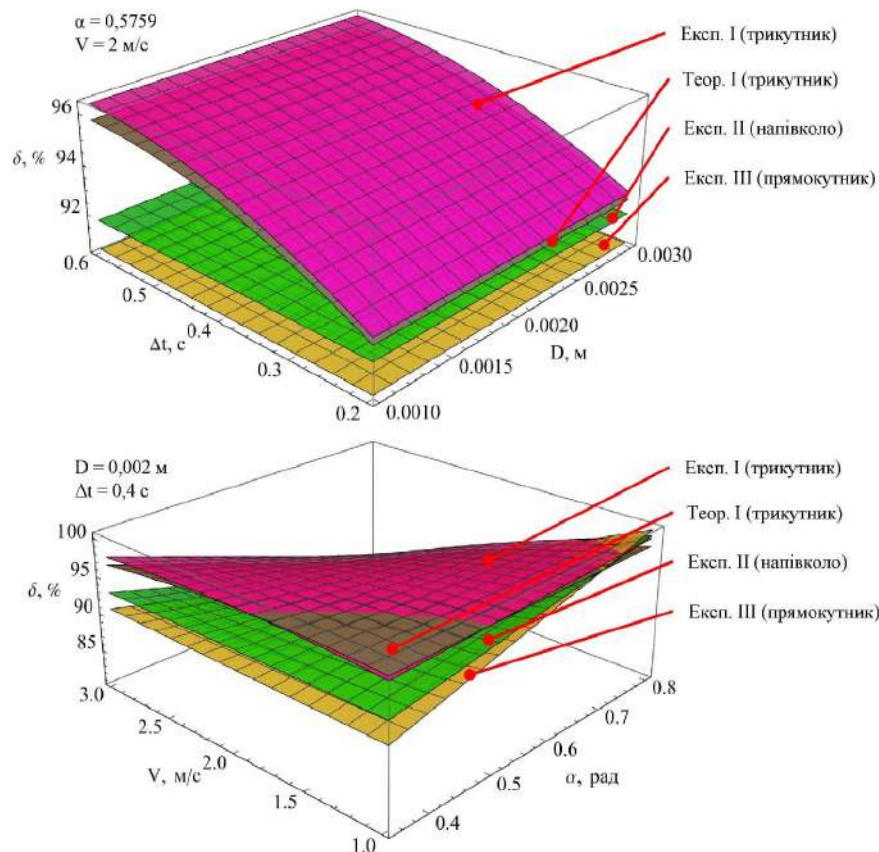


Рисунок 4.8 – Залежність точності висіву δ_N від середнього ефективного діаметра насіння D_{μ} , кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V .

З аналізу рис. 4.8 видно, що зі збільшенням кута повороту заслінки α і проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt точності висіву δ_N збільшується. Водночас зі збільшенням швидкості V точність висіву δ_N зменшується.

Діаметр насіння D_n мав низький вплив на точність висіву δ_N , тому його вплив був знехтуваний. Ця залежність буде використана для автоматичного керування режимними параметрами висівного апарату. Порівнюючи наочно графіки залежностей I варіанту форми отвору (трикутник) для експериментального і чисельного моделювання видно їх сумісність. У свою чергу для II і III варіантів спостерігається їх віддаленість від теоретичної залежності. Для I варіанту діапазон 78,0–99,9 %, для II варіанту діапазон 71,1–98,3 %, для III варіанту діапазон 67,3–97,4 %. З наведених даних видно, що найкраща точність висіву досягається для I варіанту. Тому враховуючи теоретичний висновок (розділ 2) і отримані експериментальні дані в подальших дослідженнях приймаємо I варіант отворів (трикутні).

Значення дисперсії адекватності математичної моделі $S_{ад}^2(4.10) = 15,92$, $S_{ад}^2(4.11) = 37,05$, $S_{ад}^2(4.12) = 21,63$, що є мірою того, наскільки добре модель відображає реальні дані. Дисперсія похибки дослідів $S_y^2(4.10) = 9,048$, $S_y^2(4.11) = 36,843$, $S_y^2(4.12) = 38,02$, і цей показник вказує на розкид між спостережуваними даними і прогнозованими значеннями моделі. Крім того, для оцінки адекватності моделі було використано критерій Фішера. Розраховане значення $F(4.10) = 1,760$, $F(4.11) = 1,005$, $F(4.12) = 1,757$, що менше за табличне значення $F_{0,05}(20, 54) = 1,768$ при рівні значущості 0,05. Це говорить про те, що отримана модель є статистично адекватною для пояснення даних і може бути використана для здійснення прогнозів.

Отже, на підставі отриманих показників можемо стверджувати, що ці математичні моделі є адекватними на будь-якому рівні довірчої ймовірності. Це дозволяє з упевненістю використовувати її результати для різних прикладних завдань, що стосуються прогнозування й аналізу залежностей.

4.3 Математична модель роботи дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур

Отримані закономірності (4.4) і (4.10) для I варіанту отворів (трикутні) висівного апарату селекційної сівалки без узагальнення не несуть практичної інформації. Проте, враховуємо умову компромісної задачі: для забезпечення найбільш ефективної роботи висівного апарату необхідною умовою є забезпечення найбільшої точності висіву δ_N при заданому значенні швидкості переміщення сівалки V , ефективного діаметра насіння D_μ і норми висіву насіння N . Ця умова математично записана у вигляді системи рівнянь (2.34).

Розв'язання системи рівнянь (2.34) спільно з (4.4) і (4.10) у аналітичному вигляді є досить складною задачею. Тому скористаємось програмним пакетом Wolfram Cloud. Код розробленої програми мовою програмування Wolfram наведено в додатку В, а її алгоритм можна представити в декілька етапів (рис. 4.9).

1. Задаємо значення ефективного діаметра насіння D_0 . Його можна задавати прямим способом або використовуючи повзунок.
2. Задаємо значення норми висіву насіння N_0 . Його можна задавати прямим способом або використовуючи повзунок.
3. Задаємо значення швидкості переміщення сівалки V_0 . Його можна задавати прямим способом або використовуючи повзунок.
4. Ураховуючи закономірність (4.4) з використанням функції Plot3D будуємо відповідний тривимірний графік $N(\alpha, \Delta t)$ – позначений зеленим кольором, і задана норма висіву N_0 – позначена жовтим кольором.
5. З використанням функції Solve проводиться перетворення рівняння (4.4) типу $N(D_0, \Delta t, \alpha, V_0) = N_0$ у такий вигляд $\Delta t = \Delta t(D_0, N_0, \alpha, V_0)$.
6. Отримана залежність $\Delta t = \Delta t(D_0, N_0, \alpha, V_0)$ підставляється у рівняння (4.10) і представляється у такому вигляді $\delta_N(D_0, \Delta t(D_0, N_0, \alpha, V_0), \alpha, V_0)$.

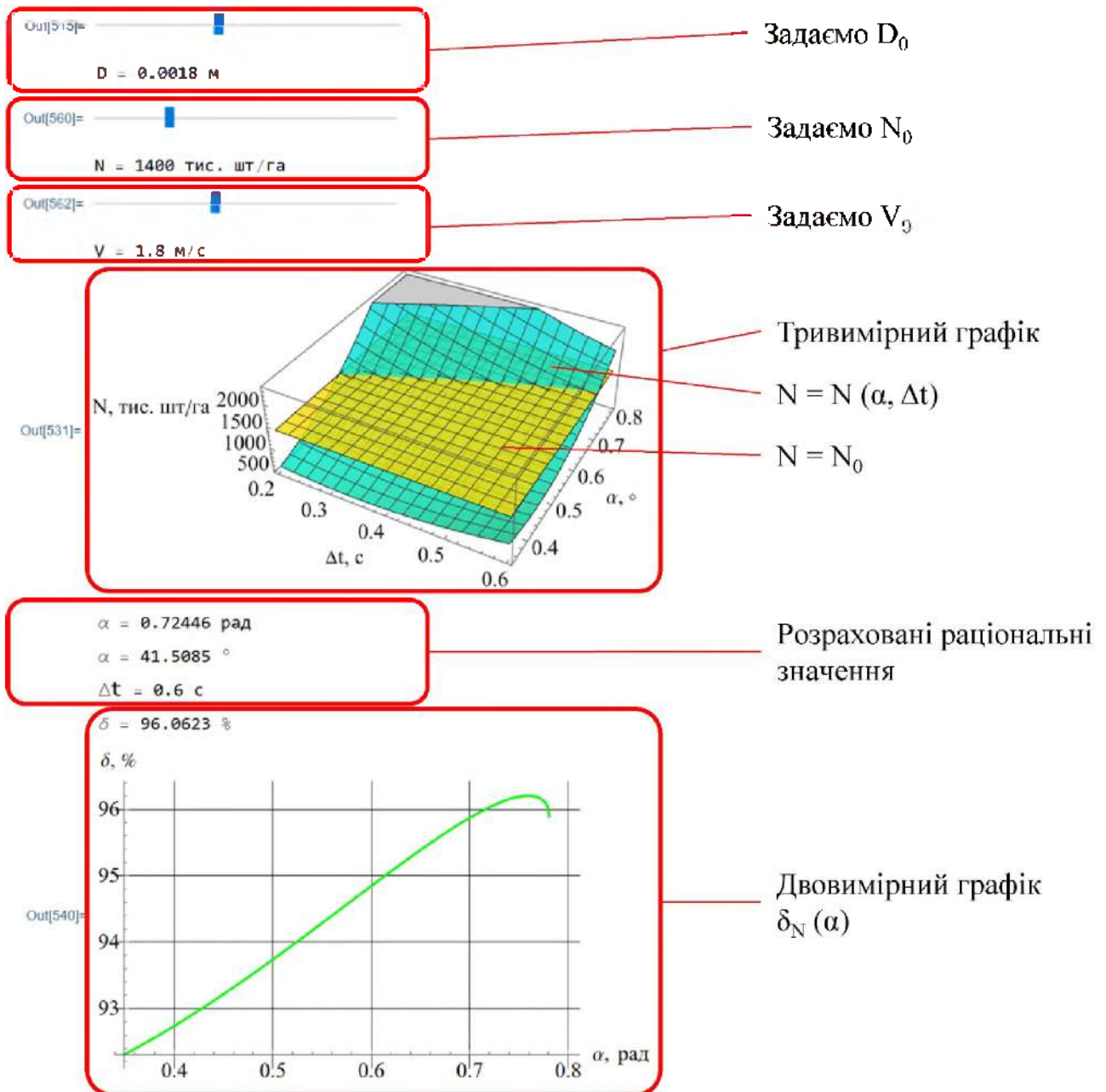


Рисунок 4.9 – Візуалізація програми Wolfram Cloud для обчислення раціональних параметрів дозатора висівного апарату.

7. З використанням функції FindMaximum проводиться розрахунок аргументів функції при яких функція $\delta_N(D_0, \Delta t(D_0, N_0, \alpha, V_0), \alpha, V_0)$ досягає максимального значення в межах їх варіювання $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$, $\Delta t_{\min} \leq \Delta t \leq \Delta t_{\max}$.

8. В результаті отримуємо значення раціональних кутів повороту заслінки α_{opt} і проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрыта Δt_{opt} .

9. Для демонстрації процесу розрахунку з використанням функції Plot виводиться двовимірний графік залежності $\delta_N(\alpha)$.

В програмі є можливість виводити перетворені закономірності в явному аналітичному вигляді.

Проведемо аналіз деяких розрахованих результатів.

При діаметрі насіння гірчиці $D_0 = 1,8 \text{ мм} = 0,0018 \text{ м}$ і нормі його висіву для широкорядної сівби $N_0 = 1400 \text{ тис. шт./га}$ і швидкості руху сівалки $V_0 = 1,8 \text{ м/с}$ отримуємо такі режимні параметри дозатора висівного апарату $\alpha = 0,72446 \text{ рад}$ ($41,5^\circ$), $\Delta t = 0,6 \text{ с}$. Цікавим є те, що при зміні швидкості переміщення сівалки, тобто її коливань від $1,6 \text{ м/с}$ до $2,0 \text{ м/с}$ відбувається постійне переналаштування дозатора: $\alpha(1,6 \text{ м/с}) = 0,72446 \text{ рад}$ ($41,5^\circ$), $\Delta t(1,6 \text{ м/с}) = 0,658451 \text{ с}$; $\alpha(2,0 \text{ м/с}) = 0,72446 \text{ рад}$ ($41,5^\circ$), $\Delta t(2,0 \text{ м/с}) = 0,552203 \text{ с}$. При цьому точності висіву $\delta_N(1,6 \text{ м/с}) = 97,0 \%$, $\delta_N(2,0 \text{ м/с}) = 94,8 \%$. Тобто, режими роботи дозатора прагнуть досягти такого значення, за якого точність висіву δ_N є максимальною.

Ще одним практичним прикладом застосування даної програми є зміна насінин (зміна їхнього діаметра) і норми висіву за ділянкової сівби селекційних дослідів з урахуванням концептуальної конструктивно-технологічної схеми висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур (розділ 1), який дозволяє автоматизувати процес висіву насіння на ділянках добазового насінництва з мінімальною участю селекціонера та забезпеченням високої точності сівби. Так, наприклад, при заміні насіння гірчиці з діаметром $D_{01} = 1,1 \text{ мм} = 0,0011 \text{ м}$ на $D_{02} = 2,6 \text{ мм} = 0,0026 \text{ м}$ і норми висіву з $N_{01} = 1000 \text{ тис. шт./га}$ на $N_{02} = 1500 \text{ тис. шт./га}$ отримуємо зміни режимних параметрів дозатора за постійної швидкості руху $V_0 = 1,8 \text{ м/с}$:

– $\alpha(0,0011 \text{ м}, 1000 \text{ тис. шт./га}) = 0,5122 \text{ рад}$ ($29,3^\circ$), $\Delta t(0,0011 \text{ м}, 1000 \text{ тис. шт./га}) = 0,788232 \text{ с}$; $\delta_N = 94,5 \%$;

– $\alpha(0,0026 \text{ м}, 1500 \text{ тис. шт./га}) = 0,6243 \text{ рад}$ ($35,8^\circ$), $\Delta t(0,0026 \text{ м}, 1500 \text{ тис. шт./га}) = 0,513401 \text{ с}$; $\delta_N = 93,6 \%$.

У подальшому цю програму буде використано при створенні виробничого зразка дозатора висівного апарату.

4.4 Висновки до розділу 4

1. За результатами лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасінневих культур (рижію, ріпаку, гірчиці) у ємності висівного апарату селекційної сівалки визначено закономірності зміни щільності випадкового пакування від ефективного діаметра насіння D_{μ} і його коефіцієнта варіації δ . Порівнюючи теоретичні і експериментальні дані, засвідчуємо їхню достатньо високу подібність. Про це свідчать: коефіцієнт кореляції Пірсона – 0,9726; розрахункове значення t-критерію – $24,3743 > t_{0,05}(32) = 2,0322$; ліва інтервальна оцінка – 0,7641; права інтервальна оцінка – 0,9971; стандартне відхилення – 0,1163.

2. За результатами експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур визначено залежності норми висіву насіння N (4.4)–(4.6) і точності висіву δ_N (4.10)–(4.12) від середнього ефективного діаметра насіння D_{μ} , кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V для трьох варіантів форми отворів.

3. Наочне і статистичне порівняння теоретичних і експериментальних залежностей (4.4) і (2.31), (4.10) і (2.33) свідчить про адекватність отриманих теоретичних моделей і достовірність отриманих експериментальних закономірностей.

4. Визначено, що точність висіву δ_N для I варіанту отвору (трикутник) дозатора висівного апарату знаходиться в діапазоні 78,0–99,9 %, для II варіанту (напівколо) діапазон 71,1–98,3 %, для III варіанту (прямокутник) діапазон 67,3–97,4 %. Тому враховуючи теоретичний висновок (розділ 2) і отримані експериментальні дані в подальших дослідженнях прийнято I варіант отворів (трикутні).

5. Враховуючи умову компромісної задачі (2.34) складено програму в Wolfram Cloud для визначення режимних параметрів дозатора висівного апарату (кут повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або

закрита Δt) з урахуванням заданих середнього ефективного діаметра насіння $D_{\text{с}}$, норми висіву N і швидкості переміщення сівалки V . У подальшому цю програму буде використано при створенні виробничого зразка дозатора висівного апарату.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [184, 185].

1. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Експериментальні дослідження дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньових культур. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 43-52. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-5.

2. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Випробування математичної моделі роботи дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньових культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 52–60. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-6.

РОЗДІЛ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Випробування експериментального зразка удосконаленого висівного апарату у виробничих умовах

Перед впровадженням результатів досліджень були проведені випробування експериментального зразка висівного апарату селекційної сівалки у виробничих умовах. За основу взято висівний апарат сівалки «Клен-4,2», який був переобладнаний відповідно до отриманих результатів досліджень. У конструкції базового висівного апарату змінено форму дозатора у відповідності до розділів 2.3, 3.3 і 4.2, додано розподільник згідно з розділом 2.4. Для вимірювання параметрів маси насіння і контролю якості висіву, розподільник був прикріплений до рами висівного апарату через тензодатчик згідно з розділом 1.5 і 3.3. Загальний вигляд удосконаленого висівного апарату наведено на рис. 5.1.

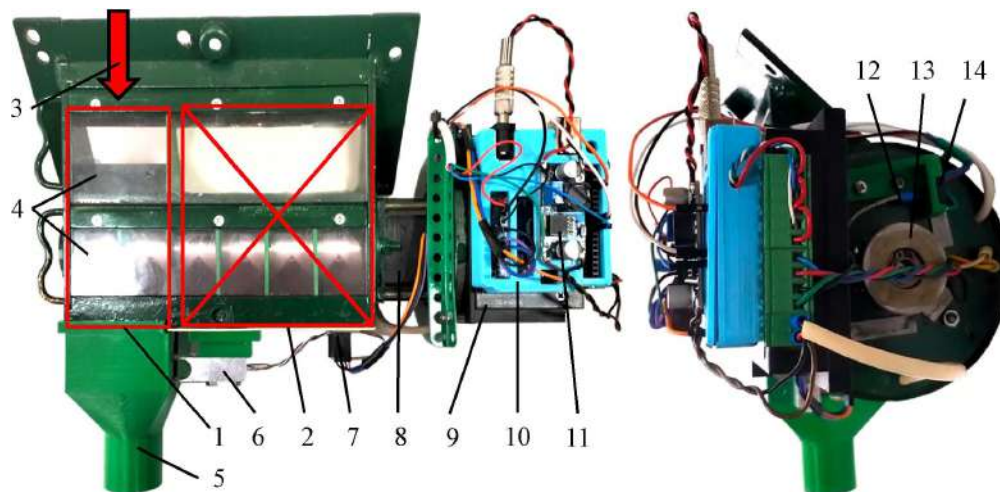


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд удосконаленого висівного апарату:

1 – два робочих підключених дозатора; 2 – чотири заблокованих дозатора; 3 – подача насіння; 4 – оглядові лючки; 5 – розподільник; 6 – тензодатчик; 7 – Weight sensor HX711; 8 – кроковий двигун дозатора; 9 – драйвер TB6600; 10 – Arduino Uno ATmega328; 11 – перетворювач напруги; 12 – прапорець положення заслінки дозатора; 13 – пружинний механізм повертання заслінки дозатора; 14 – кінцевий вимикач.

Як блок керування для удосконаленого висівного апарату обрано плату керування Arduino UNO спільно із драйвером крокового двигуна ТВ6600. Як датчик початкового положення заслінки обрано кінцевий вимикач. Визначення маси насіння під час дозування відбувалося з використанням підсилювача сигналу HX711. Для визначення швидкості переміщення сівалки використовувався датчик Хола 314Х, який розміщений на колесі. Електрична схема підключення експериментального зразка удосконаленого висівного апарату наведена на рис. 5.2.

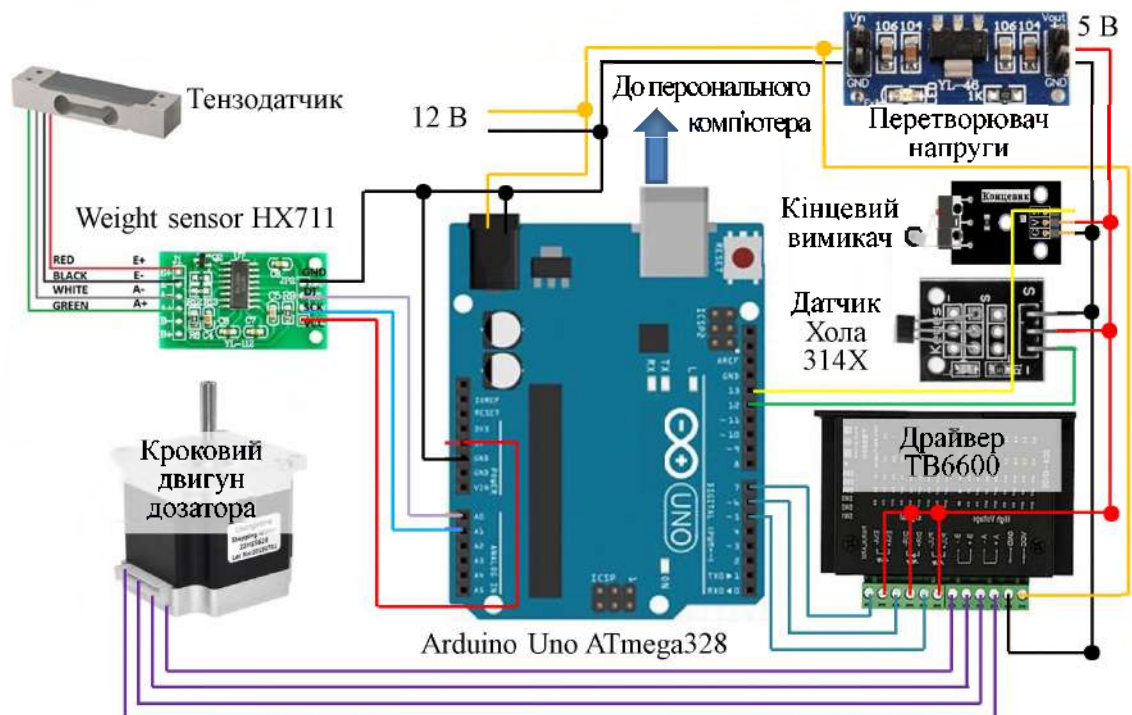


Рисунок 5.2 – Електрична схема підключення експериментального зразка удосконаленого висівного апарату.

Для роботи висівного апарату складено програму в середовищі Arduino IDE, яка базувалась на результатах досліджень розділу 4.3. Загальний код програми наведений в додатку Г. Програмування роботи висівного апарату для заданої культури (середній діаметр насіння D_0) і норми висіву (N_0) здійснювалася через персональний комп'ютер. Проте за необхідності можна створити незалежний інтерфейс, який дозволить змінювати параметри роботи висівного апарату безпосередньо на полі.

Випробування проводились у два етапи:

- налагодження роботи висівного апарату на стенді з імітацією рухомого поля;
- безпосередні виробничі випробування на навісній рядковій сівалці для овочевих і дрібнонасіневих культур «Клен-4,2».

Стенд для налагодження роботи висівного апарату з імітацією рухомого поля представлено на рис. 5.3. Рухоме поле виконано у вигляді стрічкового конвеєра, швидкість якого регулюється з використанням блока керування. Для визначення середньої норми висіву в кінці стрічкового конвеєра встановлені цифрові ваги, які фіксують динаміку зміни маси насіння.

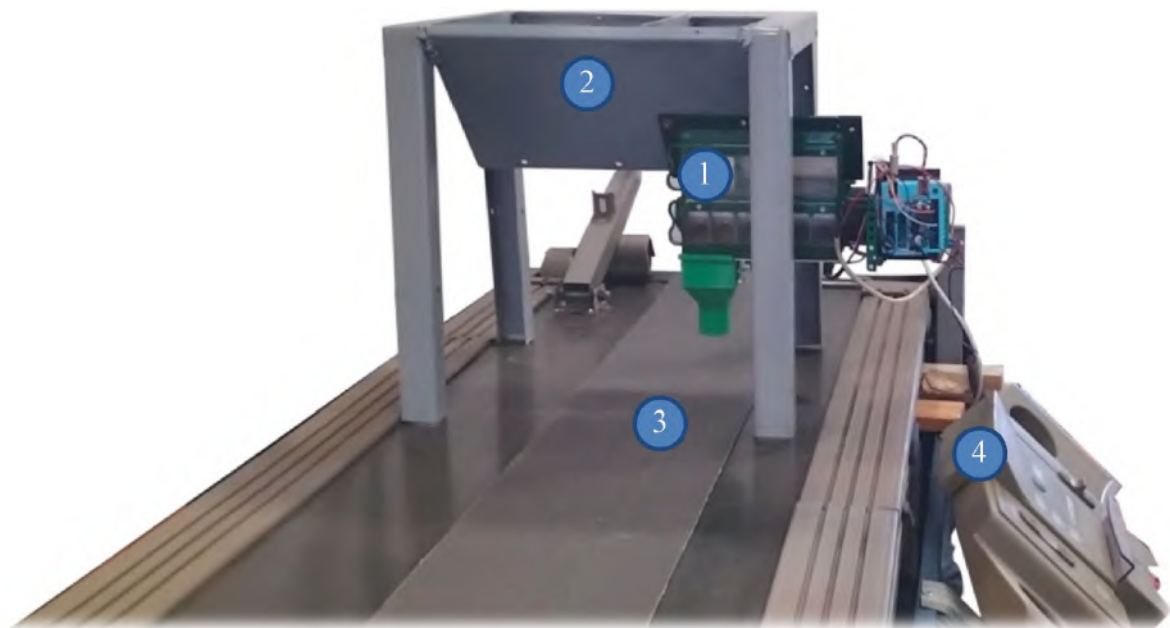


Рисунок 5.3 – Стенд для налагодження роботи висівного апарату із імітацією рухомого поля:

1 – удосконалений висівний апарат; 2 – бункер для насіння; 3 – стрічковий конвеєр; 4 – блок керування стрічковим конвеєром.

Для налагодження висівного апарату була прийнята норма висіву – 1000 тис. шт./га при міжрядді – 70 см. Тобто, відстань між насінинами повинна бути 14,3 мм. Швидкість переміщення стрічки стенда змінювали в межах 0,5–4,0 м/с. Результати вимірювань наведені в додатку Д (табл. Д.1).

Узагальнена гістограма розподілу відстані між насінинами при різних швидкостях стрічки наведена на рис. 5.4.

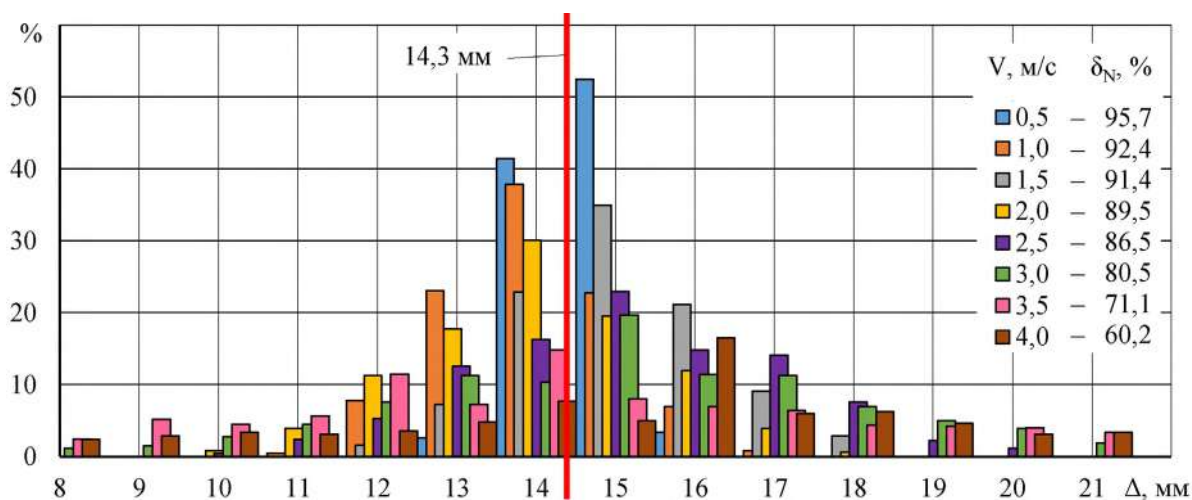


Рисунок 5.4 – Узагальнена гістограма розподілу відстані між насінинами при різних швидкостях стрічки.

Також для кожної швидкості розрахована точність висіву висівного апарату. За результатами налагодження програми блока керування висівного апарату середня точність його висіву знаходилася у межах 81,7–95,7 %. Чим менша швидкість руху стрічки, тим точність висіву вища. Однак при цьому продуктивність роботи сівалки є меншою, а витрати палива – більшими. Тому в подальших економічних розрахунках необхідно обґрунтувати раціональну швидкість руху сівалки.

Для другого етапу було скомплектовано одну висівну секцію навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасінневих культур «Клен-4,2». Загальний вигляд висівної секції наведено на рис. 5.5.

Під час дослідів у виробничих умовах висівалась озима гірчиця сорту Новинка із нормою висіву – 1000 тис. шт./га при міжрядді – 70 см. Маса 1000 насінин складала 2,4 г, їх схожість – 98,3 %. Дата висіву 04.09.2022 р. Місце проведення дослідів – ПСП «Агрофірма Нападівська» (с. Нападівка, Вінницький район, Вінницька область). Ґрунт ділянок для дослідів – чорнозем звичайний важкосуглинковий (вміст гумусу в орному горизонті – 3,5 %. рН – 6,5-7,0). Основний обробіток ґрунту – полицевий на глибину 20–22 см.



Рисунок 5.5 – Загальний вигляд висівної секції із удосконаленим висівним апаратом:

1 – рама; 2 – бункер для насіння; 3 – транспортне колесо; 4 – базовий висівний апарат; 5 – удосконалений висівний апарат; 6 – насіннепровід; 7 – сошник; 8 – загортачі; 9 – прикочувальне колесо.

Передпосівний обробіток проводили на глибині загортання насіння. Проводили допосівне та післяпосівне коткування. Погодні умови були сприятливі для сівби озимої гірчиці. Виконання дослідів і проведення досліджень відбувались відповідно до загальноприйнятих методів для польових дослідів у галузі сільського господарства та рослинництва.

Для контролю використовувався базовий висівний апарат сівалки «Клен-4,2». Швидкість руху сівалки обрано на 4 рівнях – 0,5 м/с (1,8 км/год), 1 м/с (3,6 км/год), 1,5 м/с (5,4 км/год), 2 м/с (7,2 км/год).

Після сходів визначали: густоту розміщення рослин на 5 м контрольному рядку і відстань між рослинами на 2 м контрольному рядку в п'ятиразовій повторності. Фото сходів із роз'ясненнями наведено на рис. 5.6. На фото наочно видно, що удосконалений висівний апарат забезпечує кращу точність висіву, ніж базовий. Це підтверджується і результатами вимірювань, які зведені в таблицю Д.2 та рис. 5.7.

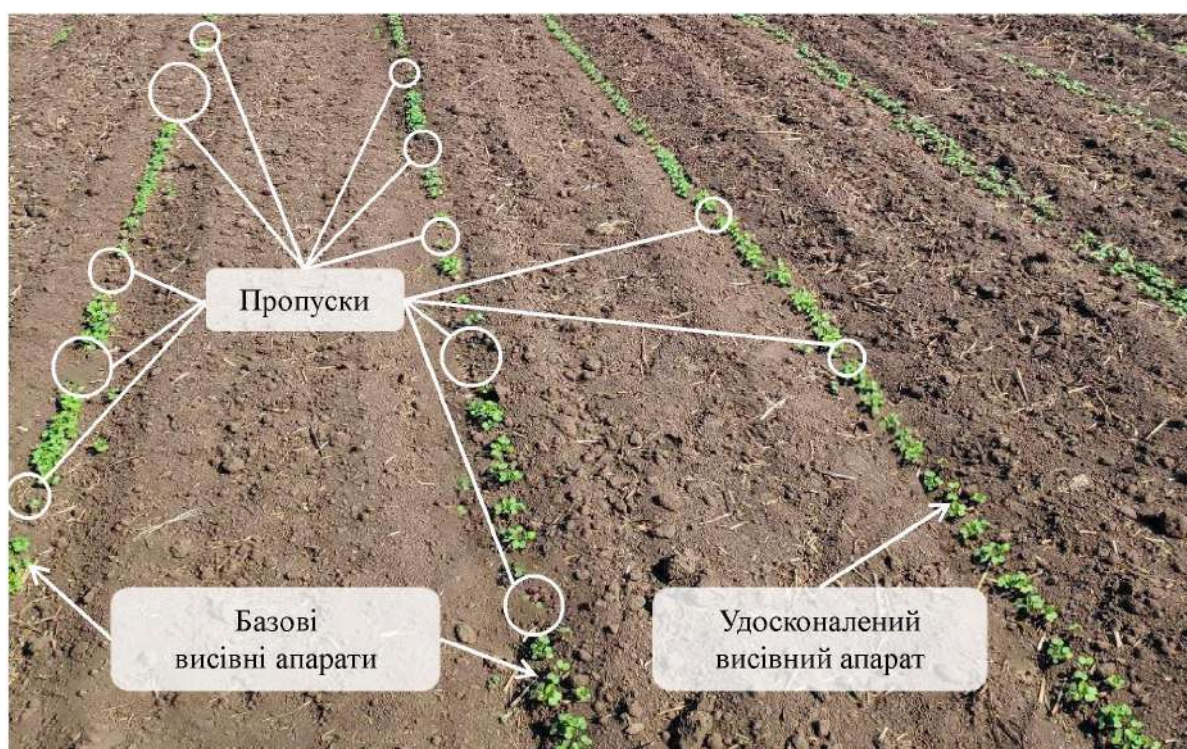


Рисунок 5.6 – Фото сходів гірчиці, що посіяна базовими і удосконаленим висівними апаратами.

Збирання проводили на ділянці вручну, шляхом формування снопів при досягненні вологості насіння 10–12 %. Дата збирання урожаю – 11–13.07.2023. Далі сформовані снопи обмолочували і визначали масу отриманих насінин. Врожайність визначалася суцільним поділянковим методом з подальшим перерахуванням на стандартну вологість та 100 % чистоту [11]. Результати вимірної врожайності наведені на рис. 5.7.

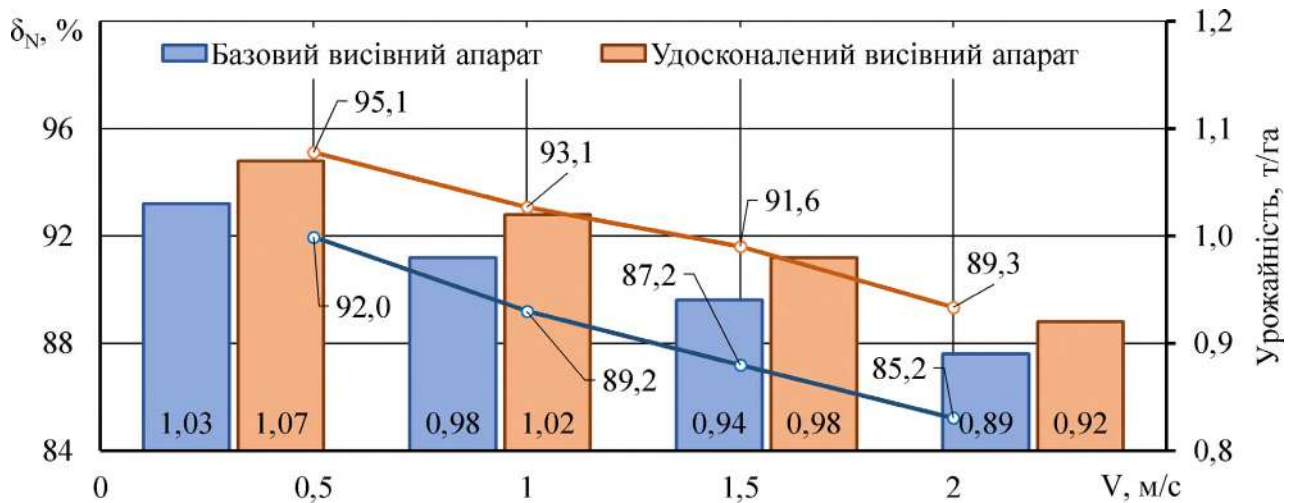


Рисунок 5.7 – Результати вимірювань точності висіву і урожайності.

Результати вимірювань (рис. 5.7) показують, що точність висіву удосконаленого висівного апарату вища (89,3–95,1%), ніж базового (85,2–92,0%). Також про якість висіву свідчить отримана густина розміщення рослин: для удосконаленого висівного апарату – 982,0–1057,5 тис. шт./га, а для базового – 940,9–1029,8 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 1000 тис. шт./га. Урожайність озимої гірчиці складала: для удосконаленого висівного апарату – 0,92–1,07 т/га, а для базового – 0,89–1,03 т/га. Найменша істотна різниця для урожайності складала 0,03 т/га, що підтверджує статистичну адекватність результатів вимірювань.

Ураховуючи отримані дані, можна стверджувати, що удосконалений висівний апарат є більш ефективним, ніж базовий.

5.2 Впровадження результатів досліджень

Результати чисельного моделювання висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур і розроблені методики розрахунку його конструктивно-технологічних параметрів були використані для лекційних і практичних занять освітнього компонента «Сільськогосподарські машини» освітньо-професійної програми «Агроінженерія» першого (бакалаврського)

рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (додаток Е).

Розроблена конструкторська і технічна документація удосконаленого висівного апарату селекційної сівалки передана на підприємство ТОВ «Френдт» (ЄДРПОУ 38782983, Вінницька обл., Вінницький р-н, місто Вінниця, вул. Юності, буд. 10а). ТОВ «Френдт» зацікавлене у виготовленні дослідної партії в кількості 20 штук для виробничих випробувань і подальшого поставлення висівного апарату на серійне виробництво (додаток Ж).

Удосконалений висівний апарат селекційної сівалки проходив виробничу перевірку в складі навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасіньєвих культур «Клен-4,2» у ПСП «Агрофірма Нападівська» (ЄДРПОУ 32292489, Вінницька область, Вінницький район, с. Нападівка, вул. Центральна, 7) (додаток И). Результати випробувань наведені в розділі 5.1.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Україна, 22400, Вінницька область, Калинівський район, місто Калинівка, вулиця Незалежності, 46) отримало конструкторську та технічну документацію на виготовлення експериментального зразка висівного апарату селекційної сівалки, який призначений для висіву насіння дрібнонасіньєвих культур (додаток К).

Отримана конструкторська та технічна документація буде використовуватися для виготовлення дослідних зразків висівних апаратів для проведення дослідно-виробничих випробувань.

До ТОВ «Агромаш-Калина» передано рекомендації з налагодження висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем (додаток Л).

Отримані рекомендації використовуються у наукових дослідженнях технологічного процесу висівних апаратів селекційних сівалок, закономірностей виникнення відмов, розроблення заходів їх попередження (усунення) та оцінювання працездатності цих апаратів.

5.3 Техніко-економічна ефективність застосування розробленого висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур

Розрахунок показників техніко-економічної ефективності застосування удосконаленого висівного апарату для сівби озимої гірчиці сорту Новинка виконано з використанням загальноприйнятих методик [186, 187, 188, 189, 190]. Основою розрахунку є проведені виробничі випробування удосконаленого і базового висівних апаратів (розділ 5.1). Як базову сівалку обрано «Клен-4,2» із шістьма висівними апаратами.

Економічний ефект за рік (E_p) визначався різницею наведених витрат за базовим і удосконаленим варіантами:

$$E_p = [(C_б + E_б \cdot K_б) - (C_y + E_y \cdot K_y) + D] \cdot Q_n, \quad (5.1)$$

де $C_б, C_y$ – питомі експлуатаційні витрати на одиницю продукції при базовому і вдосконаленому варіантах, грн.;

$K_б, K_y$ – питомі капітальні вкладення базового і вдосконаленого варіантів, грн.;

$E_б, E_y$ – нормативні коефіцієнти ефективності капітальних вкладень;

D – додатковий чистий дохід за рахунок збільшення кількості та/або якості продукції;

Q_n – обсяг робіт за рік.

Галузеву вартість удосконаленого висівного апарату (Π_y) визначали за формулою:

$$\Pi_y = \Pi_б + \Pi_\Delta, \quad (5.2)$$

де $\Pi_б$ – вартість базового висівного апарату, грн.;

Π_Δ – додана вартість удосконалення, грн.

Ціна удосконаленого висівного апарату більше за базовий на 10000 грн.

Тобто $\Pi_\Delta = 6 \cdot 20000 = 72000$ грн.

Продуктивність агрегату за годину роботи

$$W_{\text{чч}} = 0,36 \cdot B \cdot v_a, \quad (5.3)$$

де B – ширина захвату, м.;

v_a – швидкість руху агрегату, м/с.

Продуктивність агрегату за годину змінного часу

$$W_{зч} = W_{чч} \cdot k_{зм}, \quad (5.4)$$

де $k_{зм} = 0,85$ – коефіцієнт використання часу зміни.

Продуктивність агрегату за годину експлуатаційного часу

$$W_{еч} = W_{чч} \cdot k_{еч}, \quad (5.5)$$

де $k_{еч} = 0,8$ – коефіцієнт використання експлуатаційного часу зміни.

Витрати на оплату праці

$$З = \frac{\sum N_i \tau_i k_d}{W_{зч}}, \quad (5.6)$$

де N_i – кількість і-го обслуговуючого персоналу, люд.;

τ_i – погодинна ставка оплати за відповідним розрядом, грн./год.;

$k_d = 1,4$ – коефіцієнт, що враховує різні доплати.

Питомі витрати палива

$$q = \frac{G_T}{W_{еч}}, \quad (5.7)$$

де G_T – годинна витрата палива, кг/год.

Витрати на паливо

$$\Pi = q \cdot \Pi_p, \quad (5.8)$$

де Π_p – ціна одного кілограму палива, грн/кг.

Витрати на паливо-мастильні матеріали

$$\text{ПМ} = k_{пм} \cdot \Pi, \quad (5.9)$$

де $k_{пм} = 1,3$ – коефіцієнт, що враховує вартість паливо-мастильних матеріалів.

Витрати на реновацію, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання для сівалки

$$P_M = \frac{B_M (V_{рм} + V_{тм})}{W_{еч} T_{зм}}, \quad (5.10)$$

де B_M – балансова вартість сівалки, грн.;

$V_{рм} = 0,142$, $V_{тм} = 0,16$ – коефіцієнти відрахувань на реновацію, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання сівалки;

$T_{зм}$ – нормативне річне завантаження машини, год.

Витрати на реновацію, капітальний ремонт, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання для трактора

$$P_{\tau} = \frac{B_{\tau}(v_{\text{рт}} + v_{\text{кт}} + v_{\text{тт}})}{W_{\text{еч}} T_{\text{зт}}}, \quad (5.11)$$

де B_{τ} – балансова вартість трактора, грн.;

$v_{\text{рт}} = 0,125$, $v_{\text{кт}} = 4$, $v_{\text{тт}} = 22$ – коефіцієнти відрахувань на реновацію, капітальний і поточний ремонт, технічне обслуговування та зберігання трактора;

$T_{\text{зт}}$ – нормативне річне завантаження трактора, год.

Питомі капітальні вкладення

$$K = \frac{B_{\tau}}{W_{\text{еч}} \cdot T_{\text{зт}}} + \frac{B_{\text{м}}}{W_{\text{еч}} \cdot T_{\text{зм}}}. \quad (5.12)$$

Додатковий чистий дохід D за рахунок збільшення кількості та/або якості продукції розраховувався таким чином:

$$D = \text{ВП}_y - \text{ВП}_6 = (Y_y - Y_6) k_{\text{н}} \text{Ц}_y. \quad (5.13)$$

де ВП – вартість продукції, грн.;

Y – урожайність, т/га;

$k_{\text{н}} = 0,8$ – коефіцієнт втрат маси насіння при очищенні;

Ц_y – ціна елітного насіння, грн/т.

Результати розрахунку техніко-економічної ефективності наведені в табл. М.1 (додаток М). Для демонстрації залежності економічної ефективності від швидкості переміщення агрегату побудований відповідний графік на рис. 5.8.

Апроксимація даних у вигляді квадратичного рівняння дозволяє стверджувати про наявність максимуму за швидкості переміщення посівного агрегату $V = 1,26 \text{ м/с} = 4,53 \text{ км/год}$. Тобто ця швидкість руху з економічної точки зору є оптимальною.

Таким чином, застосування удосконалених висівних апаратів у складі базової навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасінневих культур «Клен-4,2» під час висіву елітного насіння озимої гірчиці дозволяє одержати питомий річний економічний ефект у розмірі 2920 грн./га порівняно з базовими висівними апаратами за рахунок збільшення врожайності на 4,0 %.

На рис. 5.8 також зазначені дані щодо питомих експлуатаційних витрат для базового й удосконаленого варіантів та додатковий чистий дохід.

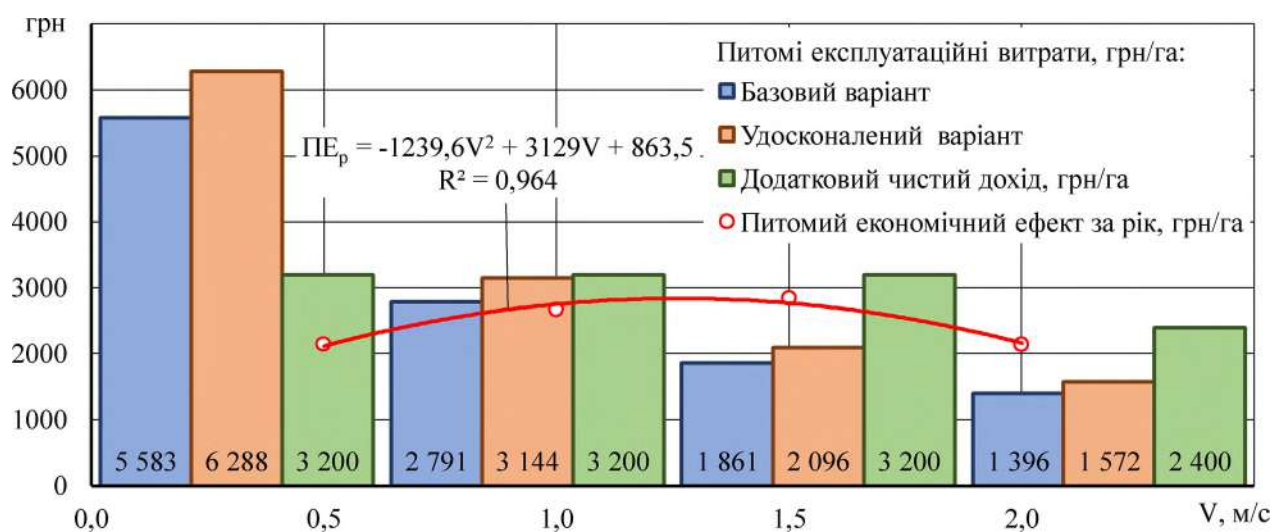


Рисунок 5.8 – Графік залежності питомого річного економічного ефекту від швидкості руху агрегату.

Встановлено, що термін окупності додаткових капіталовкладень при вдосконаленні 6 висівних апаратів на площі посіву 300 га елітного насіння гірчиці становить 0,27 року, тобто за перший сезон.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Результати випробування експериментального зразка удосконаленого висівного апарату у виробничих умовах показують, що точність його висіву вища (89,3–95,1 %), ніж у базової сівалки «Клен-4,2» (85,2–92,0 %). Також про якість висіву свідчить отримана густина розміщення рослин: для удосконаленого висівного апарату – 982,0–1057,5 тис. шт./га, а для базового – 940,9–1029,8 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 1000 тис. шт./га. Урожайність озимої гірчиці складала: для удосконаленого висівного апарату – 0,92–1,07 т/га, а для базового – 0,89–1,03 т/га. Найменша істотна різниця для урожайності складала 0,03 т/га, що підтверджує статистичну адекватність результатів вимірювань.

2. Застосування удосконалених висівних апаратів у складі базової навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасіньневих культур «Клен-4,2» під час висіву елітного насіння озимої гірчиці дозволяє одержати питомий річний економічний ефект у розмірі 2920 грн./га порівняно з базовими висівними апаратами за рахунок збільшення врожайності на 4,0 %. Встановлено, що термін окупності додаткових капіталовкладень при вдосконалених 6 висівних апаратів на площі посіву 300 га елітного насіння гірчиці становить 0,27 року, тобто за перший сезон.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [185, 191].

1. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Випробування математичної моделі роботи дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 52–60. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-6

2. Дацюк Д.А. Техніко-економічна ефективність застосування розробленого висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньневих культур. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 2023. С. 13–15.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане наукове завдання підвищення ефективності процесу сівби насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом удосконалення конструкції висівного апарату селекційної сівалки із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів. За результатами досліджень зроблено такі висновки:

1. Аналіз роботи електромеханічної висівної системи «Клен» дозволив сформулювати основні шляхи її вдосконалення: необхідно вдосконалити робочий орган висівного апарату для забезпечення точності висіву дрібнонасінневих культур на рівні 95,0 %; для посіву ділянок добазового насінництва необхідно забезпечити автоматичне завантаження насіння різних сортозразків до висівного апарату; потребує удосконалення система висіву на ділянках добазового насінництва з урахуванням GPS-трекінгу; елементи системи висіву повинні бути блоковими для легкої заміни при виході їх з ладу. Обґрунтовано концептуальну конструктивно-технологічну схему висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур, який дозволяє автоматизувати процес висіву насіння на ділянках добазового насінництва з мінімальною участю селекціонера та забезпеченням високої точності сівби.

2. За результатами теоретичних досліджень руху насіння в ємності висівного апарату селекційної сівалки складено відповідну систему диференціальних рівнянь (2.17) з урахуванням формул (2.3)–(2.16), що покладено в основу математичного апарата програмного пакета Simcenter Star-CCM+. За результатами чисельного моделювання отримано візуалізацію випадкового пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки і рівняння регресії її щільності ϕ (2.21) від ефективного діаметра насіння D_{μ} і коефіцієнта варіації цього діаметра δ . За результатами чисельного моделювання встановлено, що пропускна здатність дозатора Q_d висівного апарату селекційної сівалки не залежить від щільності випадкового пакування ϕ насіння дрібнонасінневих культур у ємності. За результатами

апроксимації даних отримано закономірність зміни пропускної здатності дозатора Q_d висівного апарату селекційної сівалки від кута нахилу заслінки α у вигляді поліному третього ступеня (2.22)–(2.23).

3. За результатами чисельного моделювання процесу висіву насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур розробленим висівним апаратом встановлені залежності норми висіву N (2.31) і точність висіву δ_N (2.33) від його конструктивно-технологічних параметрів (середній ефективний діаметр насіння D_{μ} , кут повороту заслінки α , проміжок часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt , швидкість переміщення сівалки V). Для забезпечення найбільш ефективної роботи висівного апарату необхідною умовою є забезпечення найбільшої точності висіву δ_N при заданому значенні швидкості переміщення сівалки V , ефективного діаметра насіння D_{μ} і норми висіву насіння N . Вирішуючи спільно рівняння (2.34), (2.33) і (2.31), наприклад, для $N_0 = 1000$ тис. шт./га, $D_0 = 0,001$ м, $V_0 = 1,8$ м/с отримуємо $\alpha = 0,662404$ рад ($37,9^\circ$), $\Delta t = 0,555$ с.

4. За результатами лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасінневих культур (рижію, ріпаку, гірчиці) у ємності висівного апарату селекційної сівалки визначено закономірності зміни щільності випадкового пакування від ефективного діаметра насіння D_{μ} і його коефіцієнта варіації δ . Порівнюючи теоретичні і експериментальні дані засвідчуємо їхню достатньо високу подібність. Про це свідчать: коефіцієнт кореляції Пірсона – 0,9726; розрахункове значення t-критерію – $24,3743 > t_{0,05}(32) = 2,0322$; ліва інтервальна оцінка – 0,7641; права інтервальна оцінка – 0,9971; стандартне відхилення – 0,1163.

5. За результатами експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур визначено залежності норми висіву насіння N (4.4)–(4.6) і точності висіву δ_N (4.10)–(4.12) від середнього ефективного діаметра насіння D_{μ} , кута повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt і швидкості переміщення сівалки V для трьох варіантів форми отворів. Обґрунтовано точність висіву δ_N для I варіанту отвору (трикутник) дозатора висівного апарату знаходиться в

діапазоні 78,0–99,9 %, для II варіанту (напівколо) діапазон 71,1–98,3 %, для III варіанту (прямокутник) діапазон 67,3–97,4 %. Тому, враховуючи теоретичний висновок (розділ 2) і отримані експериментальні дані, в подальших дослідженнях прийнято I варіант отворів (трикутні). Враховуючи умову компромісної задачі (2.34), складено алгоритм і програму в Wolfram Cloud для визначення режимних параметрів дозатора висівного апарату (кут повороту заслінки α , проміжку часу, коли заслінка відкрита або закрита Δt) з урахуванням заданих середнього ефективного діаметра насіння D_{μ} , норми висіву N і швидкості переміщення сівалки V . У подальшому дану програму буде використано при створенні виробничого зразка дозатора висівного апарату.

6. Результати випробування експериментального зразка удосконаленого висівного апарату у виробничих умовах показують, що точність його висіву вища (89,3–95,1 %), ніж у базової сівалки «Клен-4,2» (85,2–92,0 %). Також про якість висіву свідчить отримана густина розміщення рослин: для вдосконаленого висівного апарату – 982,0–1057,5 тис. шт./га, а для базового – 940,9–1029,8 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 1000 тис. шт./га. Урожайність озимої гірчиці становила: для удосконаленого висівного апарату – 0,92–1,07 т/га, а для базового – 0,89–1,03 т/га. Найменша істотна різниця для урожайності становила 0,03 т/га, що підтверджує статистичну адекватність результатів вимірювань.

7. Застосування удосконалених висівних апаратів у складі базової навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасіневих культур «Клен-4,2» під час висіву елітного насіння озимої гірчиці дозволяє одержати питомий річний економічний ефект у розмірі 2920 грн./га порівняно з базовими висівними апаратами за рахунок збільшення врожайності на 4,0 %. Встановлено, що термін окупності додаткових капіталовкладень при вдосконаленні 6 висівних апаратів на площі посіву 300 га елітного насіння гірчиці становить 0,27 року, тобто за перший сезон.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Молоцький М.Я., Васильківський С.П., Князюк В.І., Власенко В.А. Селекція і насінництво сільськогосподарських рослин: Підручник. Київ: Вища освіта, 2006. 463 с.
2. Finch H.J.S., Samuel A.M., Lane G.P.F. Plant breeding and seed production. In Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. *Lockhart & Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland*. 9th Edition. London: Woodhead Publishing, 2014. P. 263–283. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781782423928.2.245>.
3. Mellon M., Rissler J. Appendix A: Plant Breeding and Seed Production in Corn, Soybeans, and Canola. *Gone to Seed: Transgenic Contaminants in the Traditional Seed Supply*. Union of Concerned Scientists. 2004. P. 57–60.
4. Zolkin A.L., Matvienko E.V., Shavanov M.V. Innovative technologies in agricultural crops breeding and seed farming. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. 022092. DOI: 10.1088/1755-1315/677/2/022092
5. Welbaum G.E. Seed Production. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. 2nd Edition. Amsterdam: Academic Press, 2017. P. 546–552. DOI: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00213-6.
6. Chable V., Louwaars N., Hubbard K., Baker B., Bocci R. Plant Breeding, Variety Release, and Seed Commercialization: Laws and Policies Applied to the Organic Sector. *Organic Crop Breeding*. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012. DOI: 10.1002/9781119945932.ch8
7. Kumar S., Sripathy K.V., Udaya Bhaskar K., Vinesh B. Principles of Quality Seed Production. *Seed Science and Technology*. Dadlani, M., Yadava, D.K. (eds). Singapore: Springer. 2023. P. 109-132. DOI: 10.1007/978-981-19-5888-5_6
8. Зозуля О.Л., Мамалига В.С. Селекція і насінництво польових культур. Київ: Урожай, 1993. 416 с.
9. Groot S.P.C., Raaijmakers M.H.J.E. Organic seed production, certification and availability: Corp Breeding and cultivation. *Improving organic crop cultivation*.

In U. Köpke (Ed.). Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing. 2018. URL: <https://research.wur.nl/en/publications/organic-seed-production-certification-and-availability-corp-breed>.

10. Colley M.R., Tracy W.F. Lammerts van Bueren E.T., Diffley M, Almekinders C.J.M. How the Seed of Participatory Plant Breeding Found Its Way in the World through Adaptive Management. *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (4): 2132. DOI: 10.3390/su14042132.

11. Білуха М.Т. Методологія наукових досліджень : підручник. Київ : АБУ, 2002. 480 с.

12. Gerber A.S., Green D.P. Field Experiments: Design, Analysis, and Interpretation. London : W.W. Norton & Company, 2012. 512 p.

13. Duflo E., Banerjee A. (Eds.) Handbook of Field Experiments. Amsterdam : Elsevier, 2017. 528 p.

14. Лісовська Т.П., Кузьмішина І.І., Коцун Л.О. Генетика і селекція рослин : методичні рекомендації до виконання практичних занять для студентів V-го курсу біологічного факультету денної і заочної форми навчання. Луцьк : Друк ПП Івнюк В.П., 2015. 75 с.

15. Довгопола Л.І. Генетика з основами селекції. Методичні рекомендації до лабораторних робіт для студентів біологічних спеціальностей педагогічних закладів вищої освіти. Переяслав-Хмельницький (Київська обл.) : Домбровська Я.М., 2018. 74 с.

16. Молоцький М.Я., Васильківський С.П., Князюк В.І., Власенко В.А. Селекція і насінництво сільськогосподарських рослин : Підручник. Київ : Вища освіта, 2006. 463 с.

17. Лагутенко О.Т., Чепурна Н.П. Генетика з основами селекції : Лабораторний практикум. Київ : Видавництво НПУ імені М.П. Драгоманова, 2017. 160 с.

18. Насінництво й насіннезнавство зернових культур / За ред. М.О. Кіндрука. Київ : Аграрна наука, 2003. 240.

19. Опалко А.І., Заплічко Ф.О. Селекція плодових і овочевих культур. Київ : Вища школа, 2000. 440 с.
20. Основи управління продукційним процесом польових культур : монографія / В.В. Кириченко, В.П. Петренкова, Л.Н. Кобизєва [та ін.] ; за редакцією В.В. Кириченка. Харків : НААН, Ін-т рослинництва ім. В.Я. Юр'єва, 2016. 712 с.
21. Çıtlı E., Kırılmaz H., Marakoğlu T. Evaluation of Energy Efficiency of Different Sowing Methods in Grain Corn Production. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*. 2023. Vol. 37 (1). P. 179–187. DOI: 10.15316/SJAIFS.2023.018
22. Куценко В.С. Картопля. Хвороби і шкідники / За ред. В.В. Кононученка, М.Я. Молоцького. Київ : Аграрна наука, 2003. Т. 2. 240 с.
23. Nemenushchaya L., Konovalenko L., Shchegolikhina T. Development of Russian selection and seed production under the Federal scientific and technical program for agricultural development. *Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering*. 2020. Vol. 164. 06014. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016406014>.
24. Гуринович С.Й., Рожкован В.В., Обух Г.Й., Мойсей С.І. Генетичні ресурси хрестоцвітих культур України. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2013. № 18. С. 31–37.
25. Журавель В.М., Буділка Г.І. Гібридизація як один із ефективних методів створення вихідного матеріалу для селекції гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2015. № 22. С. 70–74.
26. Parimala K., Subramanian K., Mahalinga Kannan S., Vijayalakshmi K. A Manual on Seed Production and Certification. Centre for Indian Knowledge Systems, Chennai Revitalising Rainfed Agriculture Network, 2013. 27 p.
27. Pryshliak N., Dankevych V., Tokarchuk D., Shpykuliak O. The sowing and harvesting campaign in Ukraine in the context of hostilities: challenges to global energy and food security. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2023. Vol. 26 (1). P. 145–168. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/161794>.

28. Lamichhane J.R., Soltani E. Sowing and seedbed management methods to improve establishment and yield of maize, rice and wheat across drought-prone regions: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2020. Vol. 2. 100089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100089>.

29. Li B., Li J. Optimized Deep Neural Network and Its Application in Fine Sowing of Crops. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022. Vol. 2022. 3650702. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3650702>.

30. Kadu A.V., Rathod V., Matre V.A. Review on Seed Sowing Method and Alternative Method for Small Farmers. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*. 2019. Vol. 2. № 7. P. 194–196.

31. Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г., Павх І.І. Система машин і механізмів АПК. Тернопіль : ТДПУ, 2002. 264 с.

32. Амосов В.В. Обґрунтування параметрів універсального висівного апарата для просапних культур : дис. канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2007. 131 с.

33. Twizerimana A., Niyigaba E., Mugenzi I., Ngnadong W.A., Li C., Hao T.Q., Shio B.J., Hai J.B. The Combined Effect of Different Sowing Methods and Seed Rates on the Quality Features and Yield of Winter Wheat. *Agriculture*. 2020. Vol. 10. № 5. 153. DOI: [10.3390/agriculture10050153](https://doi.org/10.3390/agriculture10050153).

34. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини : підручник. 2-е вид. Київ : Каравела, 2008. 552 с.

35. Aulin V.V., Chernovol M.I., Pankov A.O., Zamota T.M., Panayotov K.K. Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 53. № 3. P. 21–28.

36. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навч. посіб. / В. Сало, С. Лещенко, П. Лузан, Л. Сало. Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2022. 220 с.

37. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини. Київ : Каравела, 2015. 552 с.

38. Чехов А.В., Жернова Н.П. Технологічні аспекти вирощування гірчиці білої в умовах південного степу України. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2009. № 14. С. 238–247.

39. Жернова Н.П. Вплив елементів технології на продуктивність гірчиці сарептської сорту Світлана. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2009. № 14. С. 143–149.

40. Зінченко О.І. Кормовиробництво : Навчальне видання. 2-е вид., доп. і перероб. Київ : Вища освіта, 2005. 448 с.

41. Поляков О.І., Вахненко С.В., Нікітенко О.В., Вендель В.В. Особливості формування продуктивності гірчиці ярої під впливом мінеральних добрив за різних норм висіву. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2016. № 23. С. 155–161.

42. Поляков О.І., Нікітенко О.В., Вендель В.В. Особливості формування продуктивності гірчиці ярої під впливом стимуляторів росту за різних способів сівби. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2017. № 24. С. 181–187.

43. Поляков О.І., Нікітенко О.В., Вендель В.В. Вплив мінерального живлення на продуктивність гірчиці ярої за різних норм висіву. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2018. № 26. С. 89–97. DOI: 10.36710/іос-2018-26-10

44. Багаторічні трави в інтенсивному кормовиробництві : наукове видання / За ред. Б.С. Зінченка. Київ : Урожай, 1991. 192 с.

45. Поляков О.І., Вахненко С.В. Водоспоживання ріпака ярого в залежності від строків, способів сівби та норм висіву насіння. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2012. № 17. С. 130–133.

46. Куцегуб Г.О., Рожков А.О. Формування врожайності ріпака ярого в залежності від норми висіву та способу сівби. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2014. № 20. С. 163–169.

47. Вахненко С.В., Поляков О.І. Формування врожайності ріпаком ярим в залежності від строків сівби та норм висіву в умовах Південного Степу України. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2010. № 15. С. 73–77.

48. Поляков О.І. Особливості росту, розвитку та формування врожайності ріпаку озимого залежно від норми висіву за різних строків сівби. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2022. № 33. С. 99–110. DOI: 10.36710/ІОС-2022-33-10.

49. Гуцол О. П., Ковбаса В. П. Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: монографія. Ніжин: ПП Лисенко М. М. 2016. 148 с.

50. Алієв Е.Б., Теслюк Г.В., Белка О.В., Пацула О.М. Чисельне моделювання процесу роботи ґрунтообробного модуля для передпосівного обробітку ґрунту. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2023. № 34. С. 132–145. DOI: 10.36710/ІОС-2023-34-12.

51. Aliiev E., Tesliuk H., Puhach A., Kobets O., Zolotovska O., Boiko V. Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 4 (1 (124)). P. 60–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.284597.

52. Головчук А.Ф., Марченко В.І., Орлов В.Ф. *Машини сільськогосподарські : підручник*. Київ : Грамота. 575 с.

53. Aliiev E. Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. *Scientific Horizons*. 2019. Vol. 5 (78). P. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30>.

54. Aliiev E. Lupko K. Kobets O. Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*. 2023. Vol. 16 (65). № 1. P. 103–126. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8>.

55. Алієв Е.Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику : монографія. Запоріжжя : СТАТУС, 2019. 196 с.

56. Алієв Е.Б., Лупко К.О. Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7 (38), ч. II. С. 67–74. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.67-74](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.67-74).

57. Алієв Е.Б., Безверхній П.Є. Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* 2022. Вип. 52. С. 86–98. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2022.52.86-98>.

58. Алієв Е.Б., Безверхній П.Є. Дослідження чинників погіршення точності висіву пневматичними сівалками. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2023. № 2 (121). С. 51–61. DOI: [10.37128/2520-6168-2023-2-6](https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-6).

59. Dobrzański B., Stępniewski A. Physical Properties of Seeds in Technological Processes. *Advances in Agrophysical Research.* 2013. DOI: [10.5772/56874](https://doi.org/10.5772/56874).

60. Kaliniewicz Z., Jadwisienczak K., Żuk Z., Lipinski A. Selected physical and mechanical properties of hemp seeds. *BioResources.* 2021. Vol. 16. № 1. P. 1411–1423. DOI: [10.15376/biores.16.1.1411-1423](https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1411-1423).

61. Peng F, Fang F, Xiang R, Liu D. Engineering properties of Cassia tora L. seeds and meal as a function of moisture content. *Scientific Reports.* 2022. Vol. 12 (1). 8651. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12748-7>.

62. Rybiński W., Szot B., Rusinek R. Estimation of morphological traits and mechanical properties of grasspea seeds (*Lathyrus sativus* L.) originating from EU countries. *International Agrophysics.* 2008. Vol. 22 (3). P. 261–275.

63. Ahmadi R., Kalbasi-Ashtari A. Gharibzahedi SMT. Physical properties of psyllium seed. *International Agrophysics.* 2012. Vol. 26 (1). P. 91–93. DOI: [10.2478/v10247-012-0013-y](https://doi.org/10.2478/v10247-012-0013-y)

64. Lorestani A.N., Gholami R., Zareie M. Physical and mechanical properties of milk thistle seeds. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods.* 2014. Vol. 6 (4). P. 377–382. DOI: [10.3920/QAS2012.0184](https://doi.org/10.3920/QAS2012.0184)

65. Jain R.K., Bal S. Properties of pearl millet. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 1997. Vol. 66. № 2. P. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>

66. Niveditha V.R., Sridhar K.R., Balasubramanian D. Physical and mechanical properties of seeds and kernels of *Canavalia* of coastal sand dunes. *International Food Research Journal*. 2013. Vol. 20 (4). P. 1547–1554.
67. Singh K.K., Goswami T.K. Physical Properties of Cumin Seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1996. Vol. 64. № 2. P. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.004>
68. Togo J.M., Wang D., Ma W., He C. Effects of Moisture Content on Selected Physical and Mechanical Properties of Alfalfa Seeds. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2018. Vol. 8. № 14. P. 8–18.
69. Nimkar M.P., Chattopadhyay K.P. PH—Postharvest Technology: Some Physical Properties of Green Gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 2001. Vol. 80 (2). P. 183–189. DOI: 10.1006/jaer.2000.0664
70. Joshi D.C., Das S.K., Mukherjee R.K. Physical properties of pumpkin seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1993. Vol. 54. № 3. P. 219–229. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1993.1016>.
71. Ogunjimi L., Aviara N., Aregbesola O. Some engineering properties of locust bean seed. Some engineering properties of locust bean seed. *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 55 (2). P. 95–99. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00021-3.
72. Kovalyshyn S., Ptashnyk V., Shvets O., Ivashchyshyn F., Nester B., Kasner R., Urbańska P. The separation assessment of small-seeded mixtures of agricultural crops. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1781. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1781/1/012020.
73. Karaj S., Müller J. Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of *Jatropha curcas* L. *Industrial Crops and Products*. 2010. Vol. 32. № 2. P. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.04.001>.
74. Giczewska A., Borowska J. Physical properties of selected legume seeds as indicators of technological suitability of small-seed broad bean. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2003. Vol. 12/53. № 2. P. 9–13.
75. Rybiński W., Bańda M., Bocianowski J. Estimation of mechanical properties of seeds of common vetch accessions (*Vicia sativa* L.) and their chemical

composition. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2015. Vol. 62. P. 361–375. DOI: 10.1007/s10722-014-0157-7.

76. Elkaoud N. Physical, mechanical and aerodynamic properties of *Jatropha* seeds. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 33 (4). P. 1477–1496. DOI: 10.21608/mjae.2016.97617.

77. Kaliniewicz Z., Anders A., Markowski P., Tylek P., Owoc D. Analysis of the physical properties of spindle seeds for seed sorting operations. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. 13625. DOI: 10.1038/s41598-021-93166-z

78. Осейко М.І. Технологія рослинних олій : підручник. Київ : Варта, 2006. 280 с.

79. Пешук Л.В., Носенко Т.Т. Біохімія та технологія оліє-жирової сировини. Навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2011. 296 с.

80. Калошин Ю.А. Фізико-механічні властивості сировини і готової продукції. Делі Принт. 2011. 176 с.

81. Алієв Е. Б., Лупко К. О., Долгіх Д. О. Фізико-математична модель взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих олійних культур із робочим органом трієра. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2022. Вип. 32. С. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.36710/ЛОС-2022-32-12>

82. Алієв Е.Б., Дудін В.Ю., Гаврильченко О.С., Івлєв В.В. Моделювання процесу сепарації сипкого матеріалу залежно від його фізико-механічних властивостей. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. Вип. 4. С. 114–121. DOI: 10.31521/2313-092X/2019-4(104)-13.

83. Алієв Е.Б., Лупко К.О. Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 50. С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>.

84. Лупко К.О. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів селекційно-насінницького трієра для сепарації насіння дрібнонасінневих

культур : дис ... доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія»). Дніпро, 2023. 240 с.

85. Алієв Е.Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Запоріжжя, 2020. 530 с.

86. Aydin C. Physical properties of almond nut and kernel. *Journal of Food Engineering*. 2003. Vol. 60. № 3. P. 315–320. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00053-0)

87. Банний О.О. Удосконалення конструкції і підвищення технологічної надійності пневмомеханічного висівного апарату з резервним дозатором для точного посіву просапних культур : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2013. 21 с.

88. Матухно Н.В., Роговський І.Л., Тітова Л.Л. Синтез механізмів приводу висівних апаратів посівних машин : монографія. Київ : АграрМедіаГруп, 2018. 356 с.

89. Бойко А.І., Свірень М.О., Шмат С.І., Ножнов М.М. Нові конструкції ґрунтообробних та посівних машин: навч. посіб. Кіровоград : ТОВ Центрально-Українське видавництво, 2003. 203 с.

90. Заришняк А.С. Теорія і проектування робочих органів сівалок для селекції та насінництва зернових культур : монографія. Київ : Аграрна наука, 2017. 316 с.

91. Гевко Б.М. Технологічні основи проектування та виготовлення посівних машин : монографія. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2014. 238 с.

92. Васильковська К.В. Системний аналіз конструкцій пневмомеханічних висівних апаратів для точного висіву насіння просапних культур. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2018. Вип. 48. С. 22–35. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.22-35>

93. Сисолін П.В., Свірень М.О. Висівні апарати сівалок (еволюція конструкцій, розрахунки параметрів) : навч. посіб. Кіровоград : ТОВ Центрально-Українське видавництво, 2004. 160 с.

94. Бакум М.В., Пастухов В.І., Кириченко Р.В., Крохмаль Д.В., Басов О.І., Касаткін А.С. Котушковий висівний апарат *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: Технічні науки*. 2017. Вип. 180. С. 24–29.

95. Гевко Б.М., Павельчук Ю.Ф., Заяць М.М., Дзюра В.О., Лотоцький Р.І. Обґрунтування параметрів механічних однозернових висівних апаратів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 11. Т. 2 (66). С. 142–146.

96. Кюрчев В., Сербій Є. Експериментальні дослідження механічного висівного апарату. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 3–13. DOI: 10.31388/2078-0877-19-3-3-13.

97. Бойко В.Б., Алієв Е.Б. Теоретичні дослідження руху рідини в ємності гідропневматичного висівного апарата. *Інженерія природокористування*. 2015. № 2 (4). С. 78–84.

98. Бойко В.Б., Алієв Е.Б. Дослідження процесу зарядження насінини в насіннепровід гідропневматичного висівного апарата // Перспективи та стратегія адаптивного і ресурсозберігаючого вирощування олійних культур в умовах зміни клімату : збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції. Запоріжжя, 2015. С. 148–149.

99. Pastukhov V., Boiko V., Tesliuk H., Ulexin V., Kyrychenko R. Study of seed agitation in the fluid of a hydropneumatic precision seeder. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5/1 (107). P. 36–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.212517.

100. Бойко В.Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів гідропневматичного апарата точного висіву насіння овочевих культур : дис. ... канд. тех. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2021. 249 с.

101. Прасолов Є.Я., Рижкова Т.Ю., Величко К.С. Особливості модернізації гідро-пневматичного висівного апарату. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3 (17). С. 65–69. DOI: [https://doi.org/10.37700/enm.2020.3\(17\).65-69](https://doi.org/10.37700/enm.2020.3(17).65-69)

102. Сисолін П.В. Обґрунтування конструктивних параметрів апарату точного висіву зернових культур : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 1999. 19 с.

103. Алієв Е.Б., Безверхній П.Є. Шляхи підвищення ефективності пневматичних сівалок точного висіву // Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, присвяченої Дню науки. Херсон, 2022. С. 158–159.

104. Горобей В.П. (2017). Механіко-технологічні і конструктивні основи підвищення ефективності робочих органів для сівби в селекції і насінництві: дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2017. 428 с.

105. Leela C., Saravanakumar M. Development of Electronically Meterized Maize Planter. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2019. Vol. 8. № 4. P. 2432–2440. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.283>.

106. Alhassan E.A., Adewumi A.D., Okpodjah B. Development of a self-propelled multi-crop two rows precision planter: a new design concept for the metering mechanism. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. № (10). P. 349–358.

107. Lavrov A., Smirnov I., Litvinov M. Justification of the construction of a self-propelled selection seeder with an intelligent seeding system. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment*. 2018. Vol. 224. 05011. DOI: [10.1051/mateccconf/201822405011](https://doi.org/10.1051/mateccconf/201822405011).

108. Zhai J.B., Xia J.F., Zhou Y., Zhang S. Design and experimental study of the control system for precision seed-metering device. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2014. Vol. 7. № 3. P. 13-18.

109. Сенчук М.М. Демешук В.А. Сільськогосподарські машини в насінництві: Навчально-методичний посібник для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять за кредитно-модульною системою навчання студентів агрономічного факультету. Біла Церква : БНАУ, 2014. 164 с.

110. Васильковська К.В. Обґрунтування параметрів універсального пневмомеханічного висівного апарата точного висіву : дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград, 2014. 200 с.

111. Сівалка «Клен-1.5». Селекційна, порційна. Інструкція з експлуатації. Паспорт. Луганськ, 2018. 35 с.

112. Сівалка Клен-2,8. 4 секції. Селекційна, порційна. Інструкція з експлуатації. Паспорт. Луганськ, 2018. 38 с.

113. Сівалка навісна «Клен». URL: <https://agropro.biz/product/sivalka-selektsiyna-klen> (дата звернення: 20.03.2021).

114. Сівалка селекційна касетна: пат. 132589 Україна: МПК (2006) A01C 7/04 (2006.01), A01B 49/06 (2006.01), A01B 11/00 № а201710930; заявл. 09.11.2017; опубл. 11.09.2019, Бюл. № 5.

115. Сівалка навісна селекційна «СНС-16А»: пат. 55609 Україна: МПК (2006) A01C 7/00 № 2001128540; заявл. 12.12.2001; опубл. 16.08.2004, Бюл. № 8.

116. Свірень М.О., Петренко М.М., Богатирьов Д.В., Павленко І.І. Теоретичні дослідження процесу дозування насіння під час висіву пневмомеханічними апаратами. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2012. Вип. 42 (1). С. 152–160.

117. Рудь А.В., Павельчук Ю.Ф., Мошенко І.О. Теоретичні дослідження процесу розподілу насіння зернових культур при підґрунтово-розкидному способі сівби. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2009. Вип. 39. С. 250–256.

118. Шведик М.С., Гунько Ю.Л., Теслюк В.В. Визначення сили присмоктування насінини до комірчини висівного елемента з нахиленою віссю обертання, що рухається вниз. *Наукові горизонти*. 2018. № 4 (67). С. 39–44.

119. Aliev E.B., Bandura V.M., Pryshliak V.M., Yaropud V.M., Trukhanska O.O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH-Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, № 1. P. 95-104.

120. Aliev E.B., Yaropud V.M., Dudin V.Yr., Pryshliak V.M., Pryshliak N.V., Ivlev V.V. Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56. № 3. P. 119-128.

121. Алієв Е. Б. Фізико-математичний апарат пружно-демпферної взаємодії насінин під дією віброуючого решета. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47, ч. I. Кропивницький: ЦНТУ. С. 31–39. http://aliev.in.ua/doc/stat/2017/stat_17.pdf

122. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshulko V. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF* 2019. Vol. 50. P. 12–22.

123. Алієв Е.Б. Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2017. № 1 (58). Т. 1. С. 173–180.

124. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Результати чисельного моделювання процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 4 (99). С. 18–23.

125. Алієв Е.Б., Пацула О.М., Кутіщев В.Л. Методика чисельного моделювання процесу переміщення насінневого матеріалу олійних культур під дією віброуючого решета. Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур: збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції. Запоріжжя, 2017. С. 170–171.

126. Бойко А.І., Амосов В.В. Експериментальне визначення раціональних параметрів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2006. Вип. 36 (1). С. 108–110.

127. Аулін В., Панков А., Щеглов А. Дослідження пневмоструминних висівних апаратів дискретної дії для швидкісної сівби в інформаційній системі землеробства. *Вісник Львівського національного університету природокористування «Агроінженерні дослідження»*. 2018. № 22. С. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.031>.

128. Karayel D., Wiesehoff M., Özmerzi A., Müller J. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2006. Vol. 50. № 2. P. 89–96. DOI: 10.1016/J.COMPAG.2005.05.005.

129. Kachman S.D., Smith J.A. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. *Transactions of the ASAE*. 1995. Vol. 38 № 2. P. 379–387. DOI: 10.13031/2013.27843.

130. Cujbescu D., Găgeanu I., Persu C., Matache M., Vlăduț V., Voicea I., Paraschiv G., Biriș S.Ș., Ungureanu N., Voicu G. Simulation of Sowing Precision in Laboratory Conditions. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 14. 6264. DOI: 10.3390/app11146264.

131. Gierz Ł., Markowski P., Choszcz D. J., Wojcieszak D. Effect of using deflector in the distributor head of a pneumatic seed drill on the oat seed sowing unevenness. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13 (1). 15471. DOI: 10.1038/s41598-023-42476-5.

132. Думич В., Сало Я. Дослідження нових зернових сівалок українських виробників. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2020. Вип. 26 (40). С. 162–169. DOI: 10.31473/2305-5987-2020-1-26(40)-15.

133. Легкодух І., Демидов С., Стародубцева М. Дослідження ефективності застосування електропривода висівних апаратів під час роботи сівалки універсальної пневматичної «VEGA-8» (результати випробувань). *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2019. Вип. 24 (38). С. 113–123. DOI: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24\(38\)-10](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2019-1-24(38)-10).

134. Шустік Л., Мариніна Л., Степченко С., Нілова Н., Супрун В. Дослідження конструкційно-технологічних принципів роботи сівалок для сівби за шаховим типом. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2018. Вип. 22 (36). С. 54–60. DOI: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22\(36\)-52-58](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-1-22(36)-52-58).

135. Малярчук В., Легкодух І., Демидов С. Дослідження ефективності використання системи контролю та керування висівом SCSO-25 на сівалці СЗ-3 «АСТРА-3». *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2021. Вип. 28 (42). С. 116–126. DOI: [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28\(42\)-9](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-28(42)-9).

136. Лузан О.Р., Сало В.М., Лузан П.Г., Гайденко О.М. Польові випробування експериментальної сівалки прямого посіву зернових культур. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25 (2). С. 348–353.

137. Зубко В.М., Соколік С.П. Дослідження показників точності посіву кукурудзи на зерно пневматичними сівалками. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2017. Вип. 10 (32). С. 50–54.

138. Voiko A., Popyk P., Gerasymchuk I., Bannyi O., Gerasymchuk N. Application of the new structural solutions in the seeders for precision sowing as a resource saving direction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5. № 1 (95). P. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142023>.

139. Яропуд В.М., Дацюк Д.А. Шляхи удосконалення висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 156–166. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15.

140. Дацюк Д.А., Яропуд В.М., Алієв Е.Б. Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасінневих культур: пат. 149682 Україна: МПК А01С 7/04, А01В 49/06. № 202101285; заявл. 15.03.2021. опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48. 4 с.

141. Долгов О.М. Механіка руйнування : підручник. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 166 с.

142. Broas P. Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. *VTT Technical Research Centre of Finland*. 2001, P. 73–81.

143. Bai C. Modelling of spray impingement processes. Ph.D Thesis. University of London, 1996. 450 p.

144. Bai C., Gosman A.D. Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Transactions*. 1995. Vol. 104. P. 550-568.
145. Johnson K.L. Contact Mechanics, Cambridge University Press. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 452 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>
146. Walton O.R. Numerical simulation of inelastic, frictional particle-particle interactions. *Particulate Two-Phase Flow*. 1993. Vol. 25. P. 884–911.
147. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. Boca Raton: CRC Press, 2011. 509 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11103>.
148. Aliiev E.B. Automatic Phenotyping Test of Sunflower Seeds. *Helia*. 2020. Vol. 43. № 72. P. 51–66. DOI: <https://doi.org/10.1515/helia-2019-0019>.
149. Dinesh J. Modelling and Simulation of a Single Particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*. Bangalore, 2009. P. 1–9.
150. Alberto Di.R., Francesco P.Di.M. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*. 2004. Vol. 59. № 1. P. 525–541.
151. Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation. *Granular Matter*. 2006. Vol. 8 (1). P. 41–54.
152. Conway J.H., Sloane N.J. Sphere Packings, Lattices and Groups. New York: Springer, 1998. 692 p.
153. Weaire D., Aste T. The Pursuit of Perfect Packing. Boca Raton: Taylor & Francis, 2000. 136 p.
154. Kubicki D., Lo S. Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Melbourne: Australia, 2012. P. 1–6.
155. Won H.S., Lee W.J., Lee S.J. Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 6. P. 411–415. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1330605>.

156. Satish G., Kumar K., Prasad V., Pasha M. Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2. P. 41–45.

157. Manabu I., Olusegun J. *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering*. Springer, 2014. 260 p.

158. Козаченко О.В., Алієв Е.Б., Бакум М.В., Михайлов А.Д., Кречот М.М. Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насіннєвого матеріалу гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*. 2021. Вип. 31. С. 142–151. DOI: 10.36710/ioc-2021-31-13.

159. Wallin S. *Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models*. Doctoral thesis. Stockholm, Sweden: Norstedts truckeri, 2000. 124 p.

160. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus*. 2022. Vol. 33 (1). P. 199–208. DOI: 10.15159/jas.22.08.

161. Яропуд В.М., Алієв Е.Б., Дацюк Д.А. Методика чисельного моделювання висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Техніка та енергетика*. 2021. Т. 12. № 3. С. 121–127. DOI: 10.31548/machenergy2021.03.121

162. Яропуд В.М., Дацюк Д.А., Теслюк Г.В. Використання методу дискретних елементів у моделюванні руху та укладання насіння дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 73–82. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8

163. Яропуд В.М., Дацюк Д.А. Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінних культур. *Сільськогосподарські машини*. 2023. № 49. С. 7–14. DOI: 10.36910/acm.vi49.945

164. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. [Чинний від 2004-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України. 2003. 74 с.

165. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України. 2002. 173 с.

166. Спосіб автоматичного фенотипування насіння і пристрій для його здійснення: пат. 120231 Україна: МПК (2006) A01C 1/00, G01B 11/00, G01B 11/02 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01), G06T 7/00. № a201808708; Алієв, Е.Б. (2019). Патент України на винахід, заявл. 25.10.2019. опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.

167. Aliiev E. Production testing of tape device for automatic penotyping of sunflower seeds. *Scientific Horizons*. 2019. № 12 (85). P. 75–83. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-85-12-75-83.

168. Алієв Е.Б. Результати досліджень процесу автоматичного фенотипування насіння соняшник // Наукові читання до 100-річчя від дня народження професора Івана Вікторовича Яшовського: Матеріали міжнародної наукової конференції. Чабани, 2019. С. 90–92.

169. Алієв Е.Б. Пристрій для автоматичного фенотипування насіння соняшнику // Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XX Міжнародної наукової конференції, присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Миколаїв, 2019. С. 82–83.

170. Алієв Е.Б. Розробка пристрою для автоматичного фенотипування насінневого матеріалу соняшнику. *Техніка та енергетика*. 2019. Т. 10. № 1. С. 11–17. DOI: 10.31548/machenergy.2019.01.011-017.

171. Алієв Е.Б. Автоматичне фенотипування насінневого матеріалу соняшнику : монографія. Київ : Аграрна наука, 2022. 104 с.

172. Алієв Е.Б., Яропуд В.М. Визначення фракційного складу насіння за фотозображенням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. № 3 (94). С. 102–109.

173. Wang S., Wu K., Yuan Q., Liu X., Liu Z., Lin X., Zeng R., Zhu H., Dong G., Qian Q. Control of grain size, shape and quality by OsSPL16 in rice. *Nat Genet*. 2012. Vol. 44 (8). P. 950–954. DOI: 10.1038/ng.2327.

174. OpenCV Developers Team. OpenCV Reference Manual. URL: <http://opencv.org/documentation.html> (дата звернення: 23.09.2022).

175. Suzuki S., Abe K. Topological structural analysis of digital binary image by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1985. Vol. 30. P. 32–46.

176. Tanabata T., Yamada T., Shimizu Y., Shinozaki Y., Kanekatsu M., Takano M. Development of automatic segmentation software for efficient measurement of area on the digital images of plant organs. *Horticultural Research*. 2010. Vol. 9 (4). P. 501–506.

177. Шейко В.М., Кушнарєнко Н.М. Організація та методика науково-дослідницької діяльності : підручник. Київ : Знання, 2004. 307 с.

178. Горбатєнко І.Ю. Основи наукових досліджень. Київ : Вища школа, 2001. 92 с.

179. Кисельов О.В., Комарова І.Б., Мілько Д.О., Бакарджієв Р.О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт) : Навчальний посібник / за заг. ред. Д.О. Мілька. Запоріжжя : СТАТУС, 2017. 1181 с.

180. Фетісов В.С. Математичні та статистичні пакети. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2011. 324 с.

181. Бакарджієв Р.О., Комаров А.О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2015. № 28. С. 255–260.

182. Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексєєва І.В. Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій : підручник. Київ : НАУ, 2017. 212 с.

183. Распопова В.Б. Розробка моделей та методів аналізу складних систем засобами комп'ютерної математики. Київ : НУЦПІ НАНУ, 2016. 122 с.

184. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Експериментальні дослідження дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіненних культур. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 43-52. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-5.

185. Яропуд В.М., Говоруха В.Б., Дацюк Д.А. Випробування математичної моделі роботи дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 52–60. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-6.

186. ДСТУ 4397. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. [Чинний від 2006-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України. 2005. 15 с.

187. ДСТУ 3-37-4-94. Трактори та машини сільськогосподарські. Методи економічної оцінки. Вид. офіц. Київ : Мінагрополітики України. 1995. 18 с.

188. Данильченко М.Г., Гладич Б.Б., Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г. Експертно-аналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки : Навчально-методичний посібник для студентів економічних спеціальностей. Тернопіль : Економічна думка, 2001. 61 с.

189. Ісіченко І.П., Галай І.Є. Методичні рекомендації до практичних занять з курсу «Аграрні соціально-трудова відносини» (Блок: Організація і нормування праці в сільськогосподарському виробництві. Тема: Організація і нормування праці на механізованих процесах у рільництві. Ч.1. Визначення норм виробітку на механізованих польових роботах за типовими нормами) / За редакцією П.М. Макаренка. Дніпропетровськ : ДДАУ, 2003. 29 с.

190. Витрати палива і норми продуктивності для сільськогосподарської техніки, яка використовується для проведення кваліфікаційної експертизи сортів рослин у філіях Українського інституту експертизи сортів рослин / Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України; Український інститут експертизи сортів рослин. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 68 с.

191. Дацюк Д.А. Техніко-економічна ефективність застосування розробленого висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 2023. С. 13-15.

ДОДАТКИ

Додаток А



Додаток Б

Таблиця Б.1 – Результати чисельного моделювання висівного апарату
селекційної сівалки дрібнонасіневих культур

№	D, м	x ₁	Δt, с	x ₂	α _{max} , рад	x ₃	V, м/с	x ₄	Норма висіву N, тис. шт./га					δ _N , %
									1	2	3	\bar{N}	σ _N	
1	0,001	-1	0,2	-1	0,3491	-1	1	-1	626,4	627,1	624,8	626,1	1,14	99,8
2	0,001	-1	0,2	-1	0,3491	-1	2	0	613,2	636,4	589,6	613,0	23,39	96,2
3	0,001	-1	0,2	-1	0,3491	-1	3	1	606,1	653,4	565,7	608,4	43,92	92,8
4	0,001	-1	0,2	-1	0,576	0	1	-1	1818,6	1869,0	1765,8	1817,8	51,60	97,2
5	0,001	-1	0,2	-1	0,576	0	2	0	1209,1	1312,4	1102,2	1207,9	105,14	91,3
6	0,001	-1	0,2	-1	0,576	0	3	1	1006,5	1149,9	865,4	1007,3	142,28	85,9
7	0,001	-1	0,2	-1	0,8029	1	1	-1	5676,4	5964,2	5390,6	5677,1	286,80	94,9
8	0,001	-1	0,2	-1	0,8029	1	2	0	3139,2	3549,2	2728,0	3138,8	410,60	86,9
9	0,001	-1	0,2	-1	0,8029	1	3	1	2295,2	2776,4	1811,9	2294,5	482,22	79,0
10	0,001	-1	0,4	0	0,3491	-1	1	-1	611,9	596,6	626,0	611,5	14,66	97,6
11	0,001	-1	0,4	0	0,3491	-1	2	0	607,3	611,9	603,4	607,5	4,28	99,3
12	0,001	-1	0,4	0	0,3491	-1	3	1	604,5	631,0	584,0	606,5	23,57	96,1
13	0,001	-1	0,4	0	0,576	0	1	-1	1210,9	1206,5	1203,6	1207,0	3,67	99,7
14	0,001	-1	0,4	0	0,576	0	2	0	902,4	954,6	852,3	903,1	51,19	94,3
15	0,001	-1	0,4	0	0,576	0	3	1	803,0	893,7	711,1	802,6	91,28	88,6
16	0,001	-1	0,4	0	0,8029	1	1	-1	3137,5	3203,0	3080,2	3140,2	61,48	98,0
17	0,001	-1	0,4	0	0,8029	1	2	0	1869,4	2057,7	1677,4	1868,2	190,14	89,8
18	0,001	-1	0,4	0	0,8029	1	3	1	1447,9	1708,0	1176,1	1444,0	265,97	81,6
19	0,001	-1	0,6	1	0,3491	-1	1	-1	608,0	574,5	641,5	608,0	33,50	94,5
20	0,001	-1	0,6	1	0,3491	-1	2	0	605,8	591,8	611,7	603,1	10,21	98,3
21	0,001	-1	0,6	1	0,3491	-1	3	1	601,3	611,5	589,0	600,6	11,26	98,1
22	0,001	-1	0,6	1	0,576	0	1	-1	1005,5	973,7	1042,5	1007,2	34,47	96,6
23	0,001	-1	0,6	1	0,576	0	2	0	801,9	823,4	781,0	802,1	21,21	97,4
24	0,001	-1	0,6	1	0,576	0	3	1	735,1	796,3	670,3	733,9	62,99	91,4
25	0,001	-1	0,6	1	0,8029	1	1	-1	2291,0	2270,6	2318,3	2293,3	23,91	99,0
26	0,001	-1	0,6	1	0,8029	1	2	0	1445,0	1548,5	1339,6	1444,4	104,45	92,8
27	0,001	-1	0,6	1	0,8029	1	3	1	1164,3	1339,9	988,7	1164,3	175,64	84,9
28	0,002	0	0,2	-1	0,3491	-1	1	-1	349,4	347,9	344,8	347,4	2,37	99,3
29	0,002	0	0,2	-1	0,3491	-1	2	0	471,0	491,9	454,6	472,5	18,73	96,0
30	0,002	0	0,2	-1	0,3491	-1	3	1	519,9	553,9	480,5	518,1	36,74	92,9
31	0,002	0	0,2	-1	0,576	0	1	-1	1539,3	1583,5	1504,4	1542,4	39,67	97,4
32	0,002	0	0,2	-1	0,576	0	2	0	1068,5	1161,7	981,0	1070,4	90,36	91,6
33	0,002	0	0,2	-1	0,576	0	3	1	915,3	1044,1	775,9	911,8	134,15	85,3
34	0,002	0	0,2	-1	0,8029	1	1	-1	5401,0	5672,5	5130,7	5401,4	270,89	95,0
35	0,002	0	0,2	-1	0,8029	1	2	0	2999,7	3392,2	2613,7	3001,9	389,25	87,0
36	0,002	0	0,2	-1	0,8029	1	3	1	2199,8	2664,2	1729,4	2197,8	467,45	78,7
37	0,002	0	0,4	0	0,3491	-1	1	-1	473,1	461,2	485,0	473,1	11,87	97,5
38	0,002	0	0,4	0	0,3491	-1	2	0	536,7	541,8	532,7	537,1	4,58	99,1
39	0,002	0	0,4	0	0,3491	-1	3	1	556,3	582,6	528,0	555,7	27,32	95,1
40	0,002	0	0,4	0	0,576	0	1	-1	1069,7	1067,9	1076,7	1071,5	4,65	99,6
41	0,002	0	0,4	0	0,576	0	2	0	834,6	881,4	794,2	836,7	43,61	94,8
42	0,002	0	0,4	0	0,576	0	3	1	756,2	842,2	677,9	758,8	82,17	89,2
43	0,002	0	0,4	0	0,8029	1	1	-1	3001,4	3061,3	2938,7	3000,5	61,30	98,0
44	0,002	0	0,4	0	0,8029	1	2	0	1798,1	1981,3	1619,5	1799,6	180,90	89,9
45	0,002	0	0,4	0	0,8029	1	3	1	1399,3	1653,4	1150,6	1401,1	251,40	82,1
46	0,002	0	0,6	1	0,3491	-1	1	-1	517,8	487,0	547,7	517,5	30,35	94,1

47	0,002	0	0,6	1	0,3491	-1	2	0	556,2	546,4	577,7	560,1	15,97	97,1
48	0,002	0	0,6	1	0,3491	-1	3	1	573,3	580,2	569,5	574,4	5,42	99,1
49	0,002	0	0,6	1	0,576	0	1	-1	911,6	884,1	943,6	913,1	29,79	96,7
50	0,002	0	0,6	1	0,576	0	2	0	755,8	775,9	738,6	756,8	18,66	97,5
51	0,002	0	0,6	1	0,576	0	3	1	706,6	762,9	644,5	704,7	59,20	91,6
52	0,002	0	0,6	1	0,8029	1	1	-1	2202,7	2178,9	2225,6	2202,4	23,33	98,9
53	0,002	0	0,6	1	0,8029	1	2	0	1402,6	1499,0	1306,6	1402,7	96,16	93,1
54	0,002	0	0,6	1	0,8029	1	3	1	1133,8	1304,4	968,0	1135,4	168,19	85,2
55	0,003	0	0,2	-1	0,3491	-1	1	-1	70,6	68,8	69,2	69,5	0,98	98,6
56	0,003	1	0,2	-1	0,3491	-1	2	0	335,2	347,5	320,1	334,3	13,76	95,9
57	0,003	1	0,2	-1	0,3491	-1	3	1	421,3	454,4	385,1	420,3	34,68	91,7
58	0,003	1	0,2	-1	0,576	0	1	-1	1261,7	1298,1	1237,1	1265,6	30,70	97,6
59	0,003	1	0,2	-1	0,576	0	2	0	929,3	1011,0	849,8	930,0	80,62	91,3
60	0,003	1	0,2	-1	0,576	0	3	1	820,4	938,3	708,9	822,5	114,73	86,1
61	0,003	1	0,2	-1	0,8029	1	1	-1	5124,2	5380,7	4866,1	5123,7	257,34	95,0
62	0,003	1	0,2	-1	0,8029	1	2	0	2861,8	3235,2	2490,7	2862,6	372,24	87,0
63	0,003	1	0,2	-1	0,8029	1	3	1	2108,5	2552,1	1659,6	2106,8	446,25	78,8
64	0,003	1	0,4	0	0,3491	-1	1	-1	335,1	325,8	340,4	333,8	7,36	97,8
65	0,003	1	0,4	0	0,3491	-1	2	0	466,8	471,7	458,3	465,6	6,76	98,5
66	0,003	1	0,4	0	0,3491	-1	3	1	509,7	534,3	494,4	512,8	20,10	96,1
67	0,003	1	0,4	0	0,576	0	1	-1	930,4	929,4	931,9	930,6	1,27	99,9
68	0,003	1	0,4	0	0,576	0	2	0	766,1	808,1	727,7	767,3	40,18	94,8
69	0,003	1	0,4	0	0,576	0	3	1	710,1	790,7	624,8	708,5	82,95	88,3
70	0,003	1	0,4	0	0,8029	1	1	-1	2863,3	2919,6	2797,6	2860,2	61,06	97,9
71	0,003	1	0,4	0	0,8029	1	2	0	1728,7	1904,8	1557,0	1730,2	173,92	89,9
72	0,003	1	0,4	0	0,8029	1	3	1	1353,3	1598,7	1115,5	1355,8	241,64	82,2
73	0,003	1	0,6	1	0,3491	-1	1	-1	422,3	399,5	439,1	420,3	19,87	95,3
74	0,003	1	0,6	1	0,3491	-1	2	0	510,8	501,1	528,2	513,4	13,73	97,3
75	0,003	1	0,6	1	0,3491	-1	3	1	541,3	548,9	538,6	542,9	5,35	99,0
76	0,003	1	0,6	1	0,576	0	1	-1	823,3	794,5	848,8	822,2	27,17	96,7
77	0,003	1	0,6	1	0,576	0	2	0	710,7	728,4	695,4	711,5	16,51	97,7
78	0,003	1	0,6	1	0,576	0	3	1	673,8	729,5	619,3	674,2	55,07	91,8
79	0,003	1	0,6	1	0,8029	1	1	-1	2106,6	2087,2	2127,6	2107,2	20,21	99,0
80	0,003	1	0,6	1	0,8029	1	2	0	1356,3	1449,4	1262,2	1356,0	93,59	93,1
81	0,003	1	0,6	1	0,8029	1	3	1	1103,7	1268,9	936,8	1103,1	166,05	84,9

Таблиця Б.2 – Розрахунок рівнянь регресії другого порядку для норми висіву насіння N в Wolfram Cloud

$M = \{ \{-1, -1, -1, -1, 626.089917855113\}, \{-1, -1, -1, 0, 613.044958927556\}, \{-1, -1, -1, 1, 608.396639285038\}, \{-1, -1, 0, -1, 1817.7999887485\}, \{-1, -1, 0, 0, 1207.89999437425\}, \{-1, -1, 0, 1, 1007.26666291617\}, \{-1, -1, 1, -1, 5677.07377882006\}, \{-1, -1, 1, 0, 3138.83688941003\}, \{-1, -1, 1, 1, 2294.49125960669\}, \{-1, 0, -1, -1, 611.494958927556\}, \{-1, 0, -1, 0, 607.547479463778\}, \{-1, 0, -1, 1, 606.498319642519\}, \{-1, 0, 0, -1, 1206.99999437425\}, \{-1, 0, 0, 0, 903.099997187126\}, \{-1, 0, 0, 1, 802.633331458084\}, \{-1, 0, 1, -1, 3140.23688941003\}, \{-1, 0, 1, 0, 1868.16844470502\}, \{-1, 0, 1, 1, 1444.04562980334\}, \{-1, 1, -1, -1, 607.996639285038\}, \{-1, 1, -1, 0, 603.098319642519\}, \{-1, 1, -1, 1, 600.615546428346\}, \{-1, 1, 0, -1, 1007.21666291617\}, \{-1, 1, 0, 0, 802.083331458084\}, \{-1, 1, 0, 1, 733.922220972056\}, \{-1, 1, 1, -1, 607.996639285038\}, \{-1, 1, 1, 0, 603.098319642519\}, \{-1, 1, 1, 1, 600.615546428346\}, \{-1, 1, 1, 0, 1007.21666291617\}, \{-1, 1, 1, 1, 600.615546428346\} \}$

```

1,2293.29125960669},{-1,1,1,0,1444.39562980334},{-
1,1,1,1,1164.29708653556},{0,-1,-1,-1,347.362140077335},{0,-1,-
1,0,472.506070038667},{0,-1,-1,1,518.104046692445},{0,-1,0,-
1,1542.42221097073},{0,-1,0,0,1070.41110548536},{0,-
1,0,1,911.774070323575},{0,-1,1,-1,5401.39600104229},{0,-
1,1,0,3001.89800052114},{0,-1,1,1,2197.7986670141},{0,0,-1,-
1,473.106070038667},{0,0,-1,0,537.053035019334},{0,0,-
1,1,555.652023346222},{0,0,0,-
1,1071.46110548536},{0,0,0,0,836.705552742681},{0,0,0,1,758.787035161788},{0,
0,1,-
1,3000.49800052114},{0,0,1,0,1799.62400026057},{0,0,1,1,1401.09933350705},{0,
1,-1,-1,517.504046692445},{0,1,-1,0,560.102023346222},{0,1,-
1,1,574.351348897482},{0,1,0,-
1,913.074070323575},{0,1,0,0,756.787035161788},{0,1,0,1,704.658023441192},{0,
1,1,-
1,2202.39866701409},{0,1,1,0,1402.74933350705},{0,1,1,1,1135.4328890047},{1,-
1,-1,-1,69.5343622995569},{1,-1,-1,0,334.267181149778},{1,-1,-
1,1,420.261454099852},{1,-1,0,-1,1265.64443319295},{1,-
1,0,0,930.022216596474},{1,-1,0,1,822.531477730982},{1,-1,1,-
1,5123.66822326451},{1,-1,1,0,2862.55911163225},{1,-
1,1,1,2106.7560744215},{1,0,-1,-1,333.767181149778},{1,0,-
1,0,465.608590574889},{1,0,-1,1,512.805727049926},{1,0,0,-
1,930.572216596474},{1,0,0,0,767.311108298237},{1,0,0,1,708.540738865491},{1,
0,1,-
1,2860.15911163225},{1,0,1,0,1730.17955581613},{1,0,1,1,1355.80303721075},{1,
1,-1,-1,420.311454099852},{1,1,-1,0,513.355727049926},{1,1,-
1,1,542.937151366617},{1,1,0,-
1,822.181477730982},{1,1,0,0,711.540738865491},{1,1,0,1,674.193825910328},{1,
1,1,-
1,2107.1560744215},{1,1,1,0,1355.95303721075},{1,1,1,1,1103.11869147383}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
  a23* x2*x3+a24* x2*x4+
  a34* x3*x4+
  a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44* x4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[x1_,x2_,x3_,x4_] :=703.1305834263354` -103.47781207133083` x1-
372.5017523024314` x2+186.77078355862352` x2^2+943.6983752727759` x3-
514.6219673205044` x2 x3+497.98844138975113` x3^2-372.6600856357637`
x4+203.50019822556857` x2 x4-514.8747450982817` x3 x4+186.36245022528877`
x4^2

```



```

θ[x1,x2,x3,x4]
"Закодоване скорочене для Excel"
θ[D3,F3,H3,I3]
θ[C4,D4,E4,F4]
"Розкадоване скорочене"
x10=0.002;
dx1=0.001;
x20=0.4;
dx2=0.2;
x30=0.575958653;
dx3=0.226892803;
x40=2;
dx4=1;
θθ [D _ ,Δt _ , α _ , V _ ] := θ [ (D - x10 )/ dx1 , (Δt - x20 )/ dx2 , (α-x30)/ dx3 , (V -
x40 )/ dx4 ] ;
Expand[ θθ [D ,Δt , α , V ] ]
"Графики"
Plot3D[{ θθ[D ,Δt ,x30-dx3 ,x40], θθ[D ,Δt ,x30 ,x40], θθ[D ,Δt ,x30+dx3
,x40]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{Δt,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{{Opacity[0.8],Magenta },{Opacity[0.8],Green},{Opacity[0.8],Yellow}},
AxesLabel->{"D, м","Δt, с " ,"N, тис. шт./га"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"]]
Plot3D[{ θθ[x10 ,x20-dx2 , α ,V], θθ[x10 ,x20 , α ,V], θθ[x10 ,x20+dx2 , α ,V]},{α,x30-
dx3,x30+dx3},{
V,x40-dx4,x40+dx4},PlotStyle->{{Opacity[0.8],Magenta
},{Opacity[0.8],Green},{Opacity[0.8],Yellow}}, AxesLabel->{"α, рад","
V,
м/с","N, тис. шт./га"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"]]

```

Таблиця Б.3 – Розрахунок рівнянь регресії другого порядку для точності висіву

δ_N в Wolfram Cloud

```

M={{-1,-1,-1,-1,99.8176594203954},{-1,-1,-1,0,96.1844853679441},{-1,-1,-
1,1,92.7802780157507},{-1,-1,0,-1,97.1616233041414},{-1,-
1,0,0,91.2959669372},{-1,-1,0,1,85.8742387001841},{-1,-1,1,-
1,94.9480385566054},{-1,-1,1,0,86.9185850566258},{-1,-
1,1,1,78.9836214431161},{-1,0,-1,-1,97.6024109001491},{-1,0,-
1,0,99.295982688},{-1,0,-1,1,96.1130359798323},{-1,0,0,-1,99.6957233457312},{-
1,0,0,0,94.3322390972255},{-1,0,0,1,88.626919491953},{-1,0,1,-
1,98.0423008704912},{-1,0,1,0,89.8223342475392},{-
1,0,1,1,81.5816760431046},{-1,1,-1,-1,94.4906585039886},{-1,1,-
1,0,98.3064023748295},{-1,1,-1,1,98.1252285681155},{-1,1,0,-
1,96.5781406132741},{-1,1,0,0,97.3559210658294},{-
1,1,0,1,91.4170181900472},{-1,1,1,-1,98.9574711590718},{-
1,1,1,0,92.7684213405033},{-1,1,1,1,84.9144563224781},{0,-1,-1,-
1,99.3170127474937},{0,-1,-1,0,96.0358281774532},{0,-1,-

```

```

1,1,92.9079987011887},{0,-1,0,-1,97.428278980779},{0,-
1,0,0,91.5580401169348},{0,-1,0,1,85.2874108582776},{0,-1,1,-
1,94.9849064356284},{0,-1,1,0,87.033242889804},{0,-
1,1,1,78.7310752159411},{0,0,-1,-1,97.4906585039887},{0,0,-
1,0,99.1474938811323},{0,0,-1,1,95.0830562166079},{0,0,0,-
1,99.5657872150497},{0,0,0,0,94.7874180502946},{0,0,0,1,89.1713342408835},{0,
0,1,-
1,97.9571709023456},{0,0,1,0,89.9476937394189},{0,0,1,1,82.0566478490617},{0,
1,-1,-1,94.1359915180978},{0,1,-1,0,97.1488252623868},{0,1,-
1,1,99.056567006514},{0,1,0,-
1,96.7379252187419},{0,1,0,0,97.5344211075785},{0,1,0,1,91.5985436594848},{0,
1,1,-
1,98.9408353529033},{0,1,1,0,93.1449630474277},{0,1,1,1,85.1871279161728},{1,
-1,-1,-1,98.5957773840731},{1,-1,-1,0,95.8847678067736},{1,-1,-
1,1,91.7481625393943},{1,-1,0,-1,97.5746190550703},{1,-
1,0,0,91.3315201760069},{1,-1,0,1,86.0515538701669},{1,-1,1,-
1,94.9773838716454},{1,-1,1,0,86.9964169583063},{1,-
1,1,1,78.8181999863522},{1,0,-1,-1,97.7963188998348},{1,0,-
1,0,98.5472506587435},{1,0,-1,1,96.0803798821787},{1,0,0,-
1,99.8633744848781},{1,0,0,0,94.7635474347583},{1,0,0,1,88.2925919416364},{1,
0,1,-
1,97.8652867596846},{1,0,1,0,89.9478724761058},{1,0,1,1,82.1775901596672},{1,
1,-1,-1,95.2726098123987},{1,1,-1,0,97.3259367269745},{1,1,-
1,1,99.0155054916971},{1,1,0,-
1,96.6949950665345},{1,1,0,0,97.6790801618883},{1,1,0,1,91.8310462692317},{1,
1,1,-
1,99.0410452962056},{1,1,1,0,93.0976839835153},{1,1,1,1,84.9468451629585}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
  a23* x2*x3+a24* x2*x4+
  a34* x3*x4+
  a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44* x4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[x1_,x2_,x3_,x4_] :=94.80472279720266` +1.705129141214748` x2-
0.7551450583053712` x2^2-3.5280998146899507` x3+1.083378446185444` x2 x3-
4.353257304763051` x4+1.6351507353039922` x2 x4-3.4641198282385663` x3 x4-
0.8961586622445135` x4^2
θ[x1,x2,x3,x4]
"Закодоване скорочене для Excel"
θ[D3,F3,H3,J3]
θ[C4,D4,E4,F4]

```

```

"Розкадоване скорочене"
x10=0.002;
dx1=0.001;
x20=0.4;
dx2=0.2;
x30=0.575958653;
dx3=0.226892803;
x40=2;
dx4=1;
 $\theta$  [D_,  $\Delta t$ _,  $\alpha$ _, V_] :=  $\theta$  [(D - x10) / dx1, ( $\Delta t$  - x20) / dx2, ( $\alpha$  - x30) / dx3, (V - x40) / dx4];
Expand[ $\theta$  [D,  $\Delta t$ ,  $\alpha$ , V]]
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{ $\theta$  [D,  $\Delta t$ ,  $\alpha$ , V], x10-dx1<=D<=x10+dx1, x20-dx2<= $\Delta t$ <=x20+dx2, x30-dx3<= $\alpha$ <=x30+dx3, x40-dx4<=V<=x40+dx4}, {D, x10-dx1}, { $\Delta t$ , x20-dx2}, { $\alpha$ , x30-dx3}, {V, x40-dx4}]
Dopt=D/.Last[Opt];
 $\Delta t$ opt= $\Delta t$ /.Last[Opt];
 $\alpha$ opt= $\alpha$ /.Last[Opt];
Vopt=V/.Last[Opt];
"Графики"
Plot3D[{ $\theta$ [D,  $\Delta t$ ,  $\alpha$ opt, Vopt]}, {D, x10-dx1, x10+dx1}, { $\Delta t$ , x20-dx2, x20+dx2}, PlotStyle->{Green}, AxesLabel->{"D, м", " $\Delta t$ , с", " $\delta$ , %"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"]]
Plot3D[{ $\theta$ [Dopt,  $\Delta t$ opt,  $\alpha$ , V]}, { $\alpha$ , x30-dx3, x30+dx3}, {V, x40-dx4, x40+dx4}, PlotStyle->{Green}, AxesLabel->{" $\alpha$ , рад", "V, м/с", " $\delta$ , %"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"]]
"Оптимум D = 0,001 м"
Opt=FindMaximum[{ $\theta$  [0.001,  $\Delta t$ ,  $\alpha$ , V], x20-dx2<= $\Delta t$ <=x20+dx2, x30-dx3<= $\alpha$ <=x30+dx3, x40-dx4<=V<=x40+dx4}, { $\Delta t$ , x20-dx2}, { $\alpha$ , x30-dx3}, {V, x40-dx4}]
"Оптимум D = 0,002 м"
Opt=FindMaximum[{ $\theta$  [0.002,  $\Delta t$ ,  $\alpha$ , V], x20-dx2<= $\Delta t$ <=x20+dx2, x30-dx3<= $\alpha$ <=x30+dx3, x40-dx4<=V<=x40+dx4}, { $\Delta t$ , x20-dx2}, { $\alpha$ , x30-dx3}, {V, x40-dx4}]
"Оптимум D = 0,003 м"
Opt=FindMaximum[{ $\theta$  [0.003,  $\Delta t$ ,  $\alpha$ , V], x20-dx2<= $\Delta t$ <=x20+dx2, x30-dx3<= $\alpha$ <=x30+dx3, x40-dx4<=V<=x40+dx4}, { $\Delta t$ , x20-dx2}, { $\alpha$ , x30-dx3}, {V, x40-dx4}]

```

Таблиця Б.4 – Вирішення компромісної задачі (2.34) в Wolfram Cloud

```

x10=0.002;
dx1=0.001;
x20=0.4;
dx2=0.2;
x30=0.575958653;
dx3=0.226892803;

```

```

x40=2;
dx4=1;
N0=1000;
D0=0.001;
V0=1.8;
NN [DD _ ,Dt _ , α _ ,VV _ ] :=293.65740259535414` -103477.81207133083` DD-
218.12054717645026` VV+186.36245022528877` VV2+2091.04381928945` α-
2269.2422954388803` VV α+9673.370497974114` α2-1101.1860692113264`
Dt+1017.5009911278428` VV Dt-11340.641054192107` α Dt+4669.269588965588`
Dt2;
Solve[NN [DD ,Dt , α ,VV ]==NNNN,Dt];
Print["N = ",N0," тис. шт./га"]
Print["V = ",V0," м/с"]
Δtt [DD _ ,N00 _ , α _ ,VV _ ] :=6.453981437308362`*^-22
(1.8270652245113402`*^20-1.6882166681666752`*^20
VV+1.8816157843896294`*^21 α-2.792546544905542`*^-23 \[Sqrt](-
1.508072881352829`*^86+6.822476102394772`*^88
DD+6.593177770024557`*^83 N00+6.470439633129055`*^85 VV-
8.632475716285548`*^85 VV2-4.96975938204578`*^86
α+6.814694756822422`*^86 VV α-1.8377707585645203`*^87 α2));
dd [DD _ ,Dt _ , α _ ,VV _ ] :=96.90547200820968` +4.754610810468266` VV-
0.8961586622445135` VV2+5.435972111536275` α-15.26764966731257` VV α-
6.473533048693827` Dt+8.17575367651996` VV Dt+23.874235583079383` α Dt-
18.87862645763428` Dt2;
Opt=FindMaximum[{ dd [D0 ,Δtt [D0 ,N0 , α , V0 ] , α , V0 ],x20-dx2<= Δtt[D0 ,N0
, α , V0]<=x20+dx2,x30-dx3<= α<=x30+dx3},{ α,x30-dx3}];
Print["α = ",αopt=α.Last[Opt]," рад"]
Print["α = ",180 αopt/Pi," °"]
Print [ "Δt = " , Δtt [D0 , N0 , αopt ,V0 ] , " с" ]
Print["δ = ",dd[D0,Δtt[D0 ,N0 , αopt , V0],αopt ,V0]," %"]

```

Таблиця Б.5 – Розрахунок рівнянь регресії другого порядку для пропускну
здатності висівного апарату Q_d в Wolfram Cloud

```

M={{-1,-1,-1,7.722222222222222},{-1,-1,0,13.066666666666667},{-1,-
1,1,15.622222222222222},{-1,0,-1,9.244444444444444},{-1,0,0,14.655555555555556},{-
1,0,1,17.177777777777778},{-1,1,-1,9.833333333333333},{-
1,1,0,14.966666666666667},{-1,1,1,17.688888888888889},{0,-1,-
1,23.233333333333333},{0,-1,0,38.688888888888889},{0,-
1,1,46.811111111111111},{0,0,-
1,27.455555555555556},{0,0,0,43.1},{0,0,1,50.977777777777778},{0,1,-
1,29.033333333333333},{0,1,0,44.477777777777778},{0,1,1,52.433333333333333},{1,-1,-
1,38.655555555555555},{1,-1,0,64.644444444444444},{1,-
1,1,77.722222222222222},{1,0,-
1,45.877777777777778},{1,0,0,71.744444444444444},{1,0,1,84.855555555555555},{1,1,-

```

```

1,48.0888888888889},{1,1,0,74.2777777777778},{1,1,1,87.0444444444444}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+
  a23* x2*x3+
  a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33
},{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[x1_,x2_,x3_] :=43.132098765432126` +26.274074074074058`
x1+2.870987654320981` x2+1.8592592592592765` x1 x2-1.4537037037037561`
x2^2+11.732716049382702` x3+7.775925925925909` x1 x3-3.8759259259259498`
x3^2
"Закодоване скорочене для Excel"
θ[J3,K3,L3]
"Розкадоване скорочене"
x10=60;
dx1=40;
x20=0.785;
dx2=0.262;
x30=0.785;
dx3=0.262;
θθ [Qd_,β_,γ_] := θ [ (Qd - x10) / dx1 , (β - x20) / dx2 , (γ-x30)/ dx3 ] ;
Expand[ θθ [Qd,β,γ ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{ θθ [Qd_,β_,γ_],x10-dx1<=Qd<=x10+dx1,x20-
dx2<=β<=x20+dx2,x30-dx3<= γ<=x30+dx3},{Qd,x10-dx1},{β,x20-dx2},{ γ,x30-
dx3}]
Qdopt=Qd/.Last[Opt];
βopt=β/.Last[Opt];
γopt= γ/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot[ θθ[Qd,βopt,γopt],{Qd,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle->{Green}, AxesLabel->{"
Qd, шт./с ", "Qd', шт./с "},LabelStyle->(FontSize->14)]
Plot3D[{ θθ[Qdopt,β,γ]},{β,x20-dx2,x20+dx2},{ γ,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Green}, AxesLabel->{" β, рад ", " γ, рад ", "Qd', шт./с "},LabelStyle-
>(FontSize->14)]

```

Таблиця Б.6 – Розрахунок рівнянь регресії другого порядку для коефіцієнта
варіації пропускнуої здатності висівного апарату $\Delta(Q_d)$

в Wolfram Cloud

```

M={{-1,-1,-1,0.5866666666666667},{-1,-1,0,0.6233333333333333},{-1,-
1,1,0.8133333333333333},{-1,0,-1,0.6066666666666667},{-
1,0,0,0.6633333333333333},{-1,0,1,0.87},{-1,1,-1,0.7066666666666667},{-
1,1,0,0.7333333333333333},{-1,1,1,0.9266666666666667},{0,-1,-
1,0.5866666666666667},{0,-1,0,0.6233333333333333},{0,-1,1,0.83},{0,0,-
1,0.63},{0,0,0,0.6566666666666667},{0,0,1,0.87},{0,1,-
1,0.7},{0,1,0,0.7466666666666667},{0,1,1,0.9366666666666667},{1,-1,-1,0.6},{1,-
1,0,0.6366666666666667},{1,-1,1,0.8233333333333333},{1,0,-
1,0.63},{1,0,0,0.6566666666666667},{1,0,1,0.8533333333333333},{1,1,-
1,0.6966666666666667},{1,1,0,0.76},{1,1,1,0.9333333333333333}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+
  a23* x2*x3+
  a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33
},{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стьюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
 $\theta[x1\_ ,x2\_ ,x3\_ ] := 0.664814814814815' + 0.056481481481481514' x2 + 0.0216666666666666744' x2^2 + 0.1174074074074072' x3 + 0.07777777777777799' x3^2$ 
"Закодоване скорочене для Excel"
 $\theta[J3,K3,L3]$ 
"Розкадоване скорочене"
x10=60;
dx1=40;
x20=0.785;
dx2=0.262;
x30=0.785;
dx3=0.262;
 $\theta\theta [Qd\_ ,\beta\_ ,\gamma\_ ] := \theta [ (Qd - x10) / dx1 , (\beta - x20) / dx2 , (\gamma - x30) / dx3 ] ;$ 
Expand[  $\theta\theta [Qd ,\beta ,\gamma ] ]$ 
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{  $\theta\theta [Qd ,\beta ,\gamma ]$  ,x10-dx1<=Qd<=x10+dx1,x20-
dx2<= $\beta$ <=x20+dx2,x30-dx3<=  $\gamma$ <=x30+dx3},{Qd,x10-dx1},{ $\beta$ ,x20-dx2},{  $\gamma$ ,x30-
dx3}]
Qdopt=Qd/.Last[Opt];
 $\beta$ opt= $\Delta t$ /.Last[Opt];
 $\gamma$ opt=  $\alpha$ /.Last[Opt];

```


Додаток В

Таблиця В.1 – Матриця D-оптимального
плану Бокса-Бенкіна другого порядку для 4 факторів

№ досліду	Блок	Фактор			
		x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	-1	-1	0	0
2	1	1	-1	0	0
3	1	-1	1	0	0
4	1	1	1	0	0
5	1	0	0	-1	-1
6	1	0	0	1	-1
7	1	0	0	-1	1
8	1	0	0	1	1
9	1	0	0	0	0
10	2	-1	0	0	-1
11	2	1	0	0	-1
12	2	-1	0	0	1
13	2	1	0	0	1
14	2	0	-1	-1	0
15	2	0	1	-1	0
16	2	0	-1	1	0
17	2	0	1	1	0
18	2	0	0	0	0
19	3	-1	0	-1	0
20	3	1	0	-1	0
21	3	-1	0	1	0
22	3	1	0	1	0
23	3	0	-1	0	-1
24	3	0	1	0	-1
25	3	0	-1	0	1
26	3	0	1	0	1
27	3	0	0	0	0

Таблиця В.2 – Результати лабораторних досліджень пакування насіння дрібнонасінневих культур у ємності висівного апарату селекційної сівалки

D_{μ} , мм	σ_D , мм	D_{μ} , м	σ_D , м	δ	ϕ_e
0,94	0,11	0,000940	0,000113	0,120	0,5666
1,83	0,22	0,001830	0,000223	0,122	0,5759
2,87	0,32	0,002870	0,000321	0,112	0,5489
0,84	0,24	0,000840	0,000241	0,287	0,6106
1,85	0,54	0,001850	0,000542	0,293	0,6129
2,88	0,86	0,002880	0,000861	0,299	0,5907
0,76	0,15	0,000760	0,000150	0,197	0,5977
1,76	0,38	0,001760	0,000378	0,215	0,6049
2,74	0,52	0,002740	0,000523	0,191	0,5802
0,69	0,18	0,000690	0,000181	0,263	0,6114
1,66	0,43	0,001660	0,000430	0,259	0,6173
2,65	0,70	0,002650	0,000700	0,264	0,5920
0,59	0,09	0,000590	0,000086	0,145	0,5773
1,53	0,24	0,001530	0,000239	0,156	0,5892
2,52	0,41	0,002520	0,000408	0,162	0,5725
0,42	0,03	0,000420	0,000027	0,065	0,5420
1,41	0,08	0,001410	0,000078	0,055	0,5382
2,47	0,18	0,002470	0,000175	0,071	0,5313
0,34	0,08	0,000340	0,000081	0,237	0,6081
1,32	0,20	0,001320	0,000199	0,151	0,5853
2,28	0,16	0,002280	0,000158	0,069	0,5350
0,14	0,01	0,000140	0,000005	0,038	0,5237
1,11	0,20	0,001110	0,000199	0,179	0,5975
2,11	0,58	0,002110	0,000584	0,277	0,5942
0,68	0,20	0,000680	0,000200	0,294	0,6112
1,54	0,27	0,001540	0,000268	0,174	0,5957
2,65	0,16	0,002650	0,000162	0,061	0,5267
0,49	0,02	0,000490	0,000021	0,042	0,5215
1,64	0,31	0,001640	0,000313	0,191	0,6012
2,51	0,64	0,002510	0,000635	0,253	0,5919
0,59	0,11	0,000590	0,000106	0,180	0,5870
1,64	0,17	0,001640	0,000173	0,105	0,5710
2,49	0,25	0,002490	0,000254	0,102	0,5443
0,65	0,09	0,000650	0,000085	0,131	0,5777
1,54	0,09	0,001540	0,000092	0,060	0,5413
2,58	0,24	0,002580	0,000237	0,092	0,5377

Таблиця В.3 – Результати експериментальних досліджень дозатора висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур

№	Фактори розкодовані				I (трикутник)					II (напівколо)					III (прямокутник)				
					N, тис. шт./га				δ, %	N, тис. шт./га				δ, %	N, тис. шт./га				δ, %
	D _в , м	Δt, с	α, °	V, м/с	1	2	3	Сер		1	2	3	Сер		1	2	3	Сер	
1	0,001	0,2	0,5760	2	1755,5	1607,0	1527,5	1630,0	92,9	1647,5	1482,7	1371,6	1500,6	90,7	1570,5	1396,8	1286,1	1417,8	89,9
2	0,003	0,2	0,5760	2	1510,2	1388,5	1307,9	1402,2	92,7	1299,8	1160,0	1076,0	1178,6	90,4	1406,4	1250,2	1130,9	1262,5	89,1
3	0,001	0,6	0,5760	2	935,0	884,7	872,2	897,3	96,3	944,1	868,4	814,6	875,7	92,6	1174,5	1072,1	1003,9	1083,5	92,1
4	0,003	0,6	0,5760	2	725,5	677,7	685,7	696,3	96,3	643,0	575,5	541,0	586,5	91,2	835,8	738,9	694,2	756,3	90,4
5	0,002	0,4	0,3491	1	466,5	442,3	467,3	458,7	96,9	442,5	394,3	376,4	404,4	91,6	563,9	481,5	445,9	497,1	87,8
6	0,002	0,4	0,8029	1	3458,2	3379,0	3354,1	3397,1	98,4	3797,2	3681,6	3617,3	3698,7	97,5	4327,6	4192,8	4105,7	4208,7	97,3
7	0,002	0,4	0,3491	3	980,9	923,6	938,6	947,7	96,9	739,4	662,8	648,9	683,7	92,9	778,3	682,4	652,2	704,3	90,6
8	0,002	0,4	0,8029	3	2127,5	1802,3	1506,8	1812,2	82,9	1873,9	1557,6	1276,1	1569,2	80,9	2112,4	1752,4	1416,7	1760,5	80,2
9	0,002	0,4	0,5760	2	1006,4	949,4	914,3	956,7	95,1	943,1	859,8	799,6	867,5	91,7	1098,3	991,9	905,6	998,6	90,3
10	0,001	0,4	0,5760	1	1540,4	1502,7	1501,0	1514,7	98,5	1644,9	1565,6	1548,4	1586,3	96,8	1973,9	1883,9	1823,9	1893,9	96
11	0,003	0,4	0,5760	1	1342,6	1302,8	1315,2	1320,2	98,5	1533,1	1460,0	1435,8	1476,3	96,6	1813,4	1718,9	1674,2	1735,5	95,9
12	0,001	0,4	0,5760	3	1091,5	966,1	908,5	988,7	90,5	771,9	651,3	587,7	670,3	86,0	1006,0	849,6	757,4	871,0	85,6
13	0,003	0,4	0,5760	3	868,4	768,7	722,7	786,6	90,5	654,5	552,8	484,1	563,8	84,8	623,7	506,6	437,8	522,7	82
14	0,002	0,2	0,3491	2	563,3	534,0	543,4	546,9	97,3	265,9	247,4	256,8	256,7	96,4	372,6	345,0	350,7	356,1	95,9
15	0,002	0,6	0,3491	2	862,2	829,9	848,9	847,0	98,1	764,7	700,8	694,8	720,1	94,6	798,1	717,6	681,8	732,5	91,9
16	0,002	0,2	0,8029	2	3925,6	3474,2	3087,0	3495,6	88,0	3760,9	3309,9	2894,6	3321,8	87,0	3859,7	3379,3	2960,7	3399,9	86,8
17	0,002	0,6	0,8029	2	1838,4	1713,1	1617,5	1723,0	93,6	2086,1	1914,5	1777,7	1926,1	92,0	2441,7	2238,9	2060,4	2247,0	91,5
18	0,002	0,4	0,5760	2	1002,2	941,4	914,5	952,7	95,3	900,6	811,4	769,3	827,1	91,9	1096,7	987,5	910,4	998,2	90,6
19	0,001	0,4	0,3491	2	610,9	590,7	600,5	600,7	98,3	506,8	451,3	445,9	468,0	92,8	441,5	395,4	373,3	403,4	91,4
20	0,003	0,4	0,3491	2	410,9	386,4	414,7	404,0	96,2	171,5	130,5	141,4	147,8	85,6	331,0	252,5	223,2	268,9	79,3
21	0,001	0,4	0,8029	2	2736,8	2508,9	2307,7	2517,8	91,5	2845,3	2578,8	2341,1	2588,4	90,3	3025,3	2734,5	2465,0	2741,6	89,8
22	0,003	0,4	0,8029	2	2513,5	2299,0	2124,4	2312,3	91,6	2531,6	2288,7	2080,0	2300,1	90,2	2878,4	2595,2	2350,1	2607,9	89,9
23	0,002	0,2	0,5760	1	2247,4	2169,0	2154,8	2190,4	97,7	2280,9	2181,2	2117,2	2193,1	96,2	2485,8	2358,7	2293,4	2379,3	95,9
24	0,002	0,6	0,5760	1	1057,7	1021,8	1019,2	1032,9	97,9	1291,2	1210,6	1189,1	1230,3	95,6	1764,6	1669,1	1600,3	1678,0	95,1
25	0,002	0,2	0,5760	3	1400,6	1204,9	1064,1	1223,2	86,2	1082,8	918,4	805,9	935,7	85,1	1179,3	994,8	863,4	1012,5	84,3
26	0,002	0,6	0,5760	3	990,3	893,9	869,2	917,8	93,0	692,7	593,7	551,4	612,6	88,2	829,1	704,0	645,2	726,1	87,1
27	0,002	0,4	0,5760	2	1011,3	946,4	926,2	961,3	95,4	857,3	767,8	730,5	785,2	91,7	1092,1	981,6	910,4	994,7	90,8

Таблиця В.4 – Розрахунок рівнянь регресії другого порядку
для норми висіву насіння N в Wolfram Cloud

```

M1={{-1,-1,0,0,1500.6},{1,-1,0,0,1402.2},{-1,1,0,0,897.3},{1,1,0,0,696.3},{0,0,-1,-1,458.7},{0,0,1,-1,3397.1},{0,0,-1,1,947.7},{0,0,1,1,1812.2},{0,0,0,0,956.7},{-1,0,0,-1,1514.7},{1,0,0,-1,1320.2},{-1,0,0,1,988.7},{1,0,0,1,786.6},{0,-1,-1,0,546.9},{0,1,-1,0,847},{0,-1,1,0,3495.6},{0,1,1,0,1723},{0,0,0,0,952.7},{-1,0,-1,0,600.7},{1,0,-1,0,404},{-1,0,1,0,2517.8},{1,0,1,0,2312.3},{0,-1,0,-1,2190.4},{0,1,0,-1,1032.9},{0,-1,0,1,1223.2},{0,1,0,1,917.8},{0,0,0,0,961.3}};
M2={{-1,-1,0,0,1500.6},{1,-1,0,0,1178.6},{-1,1,0,0,875.7},{1,1,0,0,586.5},{0,0,-1,-1,404.4},{0,0,1,-1,3698.7},{0,0,-1,1,683.7},{0,0,1,1,1569.2},{0,0,0,0,867.5},{-1,0,0,-1,1586.3},{1,0,0,-1,1476.3},{-1,0,0,1,670.3},{1,0,0,1,563.8},{0,-1,-1,0,256.7},{0,1,-1,0,720.1},{0,-1,1,0,3321.8},{0,1,1,0,1926.1},{0,0,0,0,827.1},{-1,0,-1,0,468},{1,0,-1,0,147.8},{-1,0,1,0,2588.4},{1,0,1,0,2300.1},{0,-1,0,-1,2193.1},{0,1,0,-1,1230.3},{0,-1,0,1,935.7},{0,1,0,1,612.6},{0,0,0,0,785.2}};
M3={{-1,-1,0,0,1417.8},{1,-1,0,0,1262.5},{-1,1,0,0,1083.5},{1,1,0,0,756.3},{0,0,-1,-1,497.1},{0,0,1,-1,4208.7},{0,0,-1,1,704.3},{0,0,1,1,1760.5},{0,0,0,0,998.6},{-1,0,0,-1,1893.9},{1,0,0,-1,1735.5},{-1,0,0,1,871},{1,0,0,1,522.7},{0,-1,-1,0,356.1},{0,1,-1,0,732.5},{0,-1,1,0,3399.9},{0,1,1,0,2247},{0,0,0,0,998.2},{-1,0,-1,0,403.4},{1,0,-1,0,268.9},{-1,0,1,0,2741.6},{1,0,1,0,2607.9},{0,-1,0,-1,2379.3},{0,1,0,-1,1678},{0,-1,0,1,1012.5},{0,1,0,1,726.1},{0,0,0,0,994.7}};
"Закодоване повне 1"
nlm1=NonlinearModelFit[M1,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
  a23* x2*x3+a24* x2*x4+
  a34* x3*x4+
  a11*          x1^2+a22          *x2^2+a33          *x3^2+a44*          x4^2,
{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 }, {x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm1]
"Критерій Стюдента 1"
nlm1["ParameterTable"]
"Закодоване повне 2"
nlm2=NonlinearModelFit[M2,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
  a23* x2*x3+a24* x2*x4+
  a34* x3*x4+
  a11*  x1^2+a22  *x2^2+a33  *x3^2+a44*  x4^2, {a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm2]
"Критерій Стюдента 2"
nlm2["ParameterTable"]
"Закодоване повне 3"
nlm3=NonlinearModelFit[M3,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
  a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
  a23* x2*x3+a24* x2*x4+

```

```

a34* x3*x4+
a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44* x4^2, {a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm3]
"Критерій Стюдента 3"
nlm3["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене 1"
θ1[x1_,x2_,x3_,x4_] :=956.8999999999996` -91.51666666666668` x1-
353.716666666666704` x2-25.649999999999352` x1 x2+183.454166666666776`
x2^2+954.41666666666669` x3-518.1750000000002` x2 x3+507.17916666666688` x3^2-
269.81666666666665` x4+213.02499999999978` x2 x4-518.4749999999997` x3
x4+198.079166666666517` x4^2;
θ1[x1,x2,x3,x4]
"Закодоване скорочене 2"
θ2[x1_,x2_,x3_,x4_] :=826.6` -119.68333333333364` x1-286.266666666666694`
x2+191.641666666666802` x2^2+1060.2999999999997` x3-464.7749999999995` x2
x3+535.04166666666688` x3^2-462.81666666666655` x4+159.92500000000004` x2 x4-
602.1999999999995` x3 x4+227.46666666666648` x4^2;
θ2[x1,x2,x3,x4]
"Закодоване скорочене 3"
θ3[x1_,x2_,x3_,x4_] :=997.16666666666665` -104.78333333333333` x1-
217.058333333333368` x2+163.395833333333496` x2^2+1166.94166666666673` x3-
382.32500000000002` x2 x3+522.94583333333356` x3^2-566.2833333333331` x4-
47.47499999999995` x1 x4+103.72499999999977` x2 x4-663.8499999999998` x3
x4+280.658333333333137` x4^2;
θ3[x1,x2,x3,x4]
"Розкадоване скорочене теорія"
θθt [DD_,Δt_,α_,VV_] :=293.65740259535414` -103477.81207133083` DD-
218.12054717645026` VV+186.36245022528877` VV^2+2091.04381928945` α-
2269.2422954388803` VV α+9673.370497974114` α^2-1101.1860692113264`
Δt+1017.5009911278428` VV Δt-11340.641054192107` α Δt+4669.269588965588` Δt^2
Expand[ θθt [D,Δt,α,V] ]
x10=0.002;
dx1=0.001;
x20=0.4;
dx2=0.2;
x30=0.575958653;
dx3=0.226892803;
x40=2;
dx4=1;
"Розкадоване скорочене 1"
θθ1 [D_,Δt_,α_,V_] := θ1 [(D - x10) / dx1, (Δt - x20) / dx2, (α-x30)/ dx3, (V - x40)
/ dx4];
Expand[ θθ1 [D,Δt,α,V] ]
"Розкадоване скорочене 2"

```

```

θ02 [D_ ,Δt_ , α_ ,V_ ] := θ2 [ (D - x10) / dx1 , (Δt - x20) / dx2 , (α-x30)/ dx3 , (V - x40) / dx4 ] ;
Expand[ θ02 [D ,Δt , α ,V ] ]
"Розкадроване скорочене 3"
θ03 [D_ ,Δt_ , α_ ,V_ ] := θ3 [ (D - x10) / dx1 , (Δt - x20) / dx2 , (α-x30)/ dx3 , (V - x40) / dx4 ] ;
Expand[ θ03 [D ,Δt , α ,V ] ]
"Графики"
Plot3D[{ θ01[D ,Δt ,x30 ,x40], θ02[D ,Δt ,x30 ,x40], θ03[D ,Δt ,x30 ,x40], θ0t[D ,Δt ,x30 ,x40]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{Δt,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{{Opacity[0.8],Magenta},{Opacity[0.8],Green},{Opacity[0.8],Yellow},Gray}, AxesLabel->{"D, м","Δt, с" ,"N, тис. шт./га "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"]]
Plot3D[{ θ01[x10 ,x20 , α,V], θ02[x10 ,x20 , α,V], θ03[x10 ,x20 , α,V], θ0t[x10 ,x20 , α,V]},{α,x30-dx3,x30+dx3},{ V,x40-dx4,x40+dx4},PlotStyle->{{Opacity[0.8],Magenta},{Opacity[0.8],Green},{Opacity[0.8],Yellow},Gray},AxesLabel->{"α, рад","V, м/с","N, тис. шт./га "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"]]
θ1[C4,D4,E4,F4]
θ2[C4,D4,E4,F4]
θ3[C4,D4,E4,F4]
Qd1 [ α_ ] :=494.05 α^3-387.74 α^2+130.04 α-13.729+10;
Qd2 [ α_ ] :=220.92 α^3+213.26 α^2-34.755 α;
Qd3 [ α_ ] :=-57.688 α^3+753.18 α^2-150.99 α;
kk1=10/0.9/0.45;
kk2=10/1.6/0.45;
kk3=10/1.9/0.45;
Plot[{ θ01[x10+dx1 ,x20+dx2 , α,x30+dx3], θ02[x10+dx1 ,x20+dx2 , α , x30+dx3], θ03[x10+dx1 ,x20+dx2 , α,x30+dx3],kk1 Qd1[ α],kk2 Qd2[ α],kk3 Qd3[ α]},{α,x30-dx3,x30+dx3}, PlotStyle-> {{Magenta},{Green},{Yellow},{Dashed,Magenta},{Dashed,Green}, {Dashed,Yellow}}, AxesLabel->{"α, рад","N, тис. шт./га "},LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], GridLines->Automatic, GridLinesStyle->Directive[Black]]

```

Таблиця В.5 – Розрахунок рівнянь регресії другого порядку
для точності висіву δ_N в Wolfram Cloud

```

M1={{-1,-1,0,0,90.7},{1,-1,0,0,92.7},{-1,1,0,0,96.3},{1,1,0,0,96.3},{0,0,-1,-1,96.9},{0,0,1,-1,98.4},{0,0,-1,1,96.9},{0,0,1,1,82.9},{0,0,0,0,95.1},{-1,0,0,-1,98.5},{1,0,0,-1,98.5},{-1,0,0,1,90.5},{1,0,0,1,90.5},{0,-1,-1,0,97.3},{0,1,-1,0,98.1},{0,-1,1,0,88},{0,1,1,0,93.6},{0,0,0,0,95.3},{-1,0,-1,0,98.3},{1,0,-1,0,96.2},{-1,0,1,0,91.5},{1,0,1,0,91.6},{0,-1,0,-1,97.7},{0,1,0,-1,97.9},{0,-1,0,1,86.2},{0,1,0,1,93},{0,0,0,0,95.4}};
M2={{-1,-1,0,0,90.7},{1,-1,0,0,90.4},{-1,1,0,0,92.6},{1,1,0,0,91.2},{0,0,-1,-1,91.6},{0,0,1,-1,97.5},{0,0,-1,1,92.9},{0,0,1,1,80.9},{0,0,0,0,91.7},{-1,0,0,-1,96.8},{1,0,0,-1,96.6},{-1,0,0,1,86},{1,0,0,1,84.8},{0,-1,-1,0,96.4},{0,1,-1,0,94.6},{0,-

```

```

1,1,0,87},{0,1,1,0,92},{0,0,0,0,91.9},{-1,0,-1,0,92.8},{1,0,-1,0,85.6},{-
1,0,1,0,90.3},{1,0,1,0,90.2},{0,-1,0,-1,96.2},{0,1,0,-1,95.6},{0,-
1,0,1,85.1},{0,1,0,1,88.2},{0,0,0,0,91.7}};
M3={{-1,-1,0,0,89.9},{1,-1,0,0,89.1},{-1,1,0,0,92.1},{1,1,0,0,90.4},{0,0,-1,-
1,87.8},{0,0,1,-1,97.3},{0,0,-1,1,90.6},{0,0,1,1,80.2},{0,0,0,0,90.3},{-1,0,0,-
1,96},{1,0,0,-1,95.9},{-1,0,0,1,85.6},{1,0,0,1,82},{0,-1,-1,0,95.9},{0,1,-1,0,91.9},{0,-
1,1,0,86.8},{0,1,1,0,91.5},{0,0,0,0,90.6},{-1,0,-1,0,91.4},{1,0,-1,0,79.3},{-
1,0,1,0,89.8},{1,0,1,0,89.9},{0,-1,0,-1,95.9},{0,1,0,-1,95.1},{0,-
1,0,1,84.3},{0,1,0,1,87.1},{0,0,0,0,90.8}};
"Закодоване повне 1"
nlm1=NonlinearModelFit[M1,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
a23* x2*x3+a24* x2*x4+
a34* x3*x4+
a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44* x4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm1]
"Критерій Стьюдента 1"
nlm1["ParameterTable"]
"Закодоване повне 2"
nlm2=NonlinearModelFit[M2,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
a23* x2*x3+a24* x2*x4+
a34* x3*x4+
a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44* x4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm2]
"Критерій Стьюдента 2"
nlm2["ParameterTable"]
"Закодоване повне 3"
nlm3=NonlinearModelFit[M3,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a40 *x4+
a12* x1*x2+a13 *x1*x3+ a14* x1*x4+
a23* x2*x3+a24* x2*x4+
a34* x3*x4+
a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44* x4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,
a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm3]
"Критерій Стьюдента 3"
nlm3["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене 1"
θ1[x1_,x2_,x3_,x4_] :=95.26666666666665` +1.88333333333333413` x2-
0.76250000000000108` x2^2-3.1416666666666667` x3+1.1999999999999984` x2 x3-
3.9916666666666667` x4+1.6499999999999984` x2 x4-3.8749999999999987` x3 x4-
0.74999999999999808` x4^2;
θ1[x1,x2,x3,x4]

```

```

"Закодоване скорочене 2"
θ2[x1_,x2_,x3_,x4_] :=91.76666666666667' -1.333333333333335' x3-
4.699999999999999' x4-4.475' x3 x4;
θ2[x1,x2,x3,x4]
"Закодоване скорочене 3"
θ3[x1_,x2_,x3_,x4_] :=90.56666666666668' +3.0500000000000034' x1 x3-
4.850000000000005' x4-4.974999999999998' x3 x4;
θ3[x1,x2,x3,x4]
"Розкадоване скорочене теорія"
θθt [DD_,Δt_,α_,VV_] :=96.90547200820968' +4.754610810468266' VV-
0.8961586622445135' VV^2+5.435972111536275' α-15.26764966731257' VV α-
6.473533048693827' Δt+8.17575367651996' VV Δt+23.874235583079383' α Δt-
18.87862645763428' Δt^2
Expand[ θθt [D,Δt,α,V] ]
x10=0.002;
dx1=0.001;
x20=0.4;
dx2=0.2;
x30=0.575958653;
dx3=0.226892803;
x40=2;
dx4=1;
"Розкадоване скорочене 1"
θθ1 [D_,Δt_,α_,V_] := θ1 [(D - x10) / dx1, (Δt - x20) / dx2, (α-x30)/ dx3, (V - x40)
/ dx4 ];
Expand[ θθ1 [D,Δt,α,V] ]
"Розкадоване скорочене 2"
θθ2 [D_,Δt_,α_,V_] := θ2 [(D - x10) / dx1, (Δt - x20) / dx2, (α-x30)/ dx3, (V - x40)
/ dx4 ];
Expand[ θθ2 [D,Δt,α,V] ]
"Розкадоване скорочене 3"
θθ3 [D_,Δt_,α_,V_] := θ3 [(D - x10) / dx1, (Δt - x20) / dx2, (α-x30)/ dx3, (V - x40)
/ dx4 ];
Expand[ θθ3 [D,Δt,α,V] ]
"Графики"
Plot3D[{ θθ1[D,Δt,x30,x40], θθ2[D,Δt,x30,x40], θθ3[D,Δt,x30,x40], θθt[D,Δt,x30,x40]
},{D,x10-dx1,x10+dx1},{Δt,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{{Opacity[0.8],Magenta
},{Opacity[0.8],Green},{Opacity[0.8],Yellow},Gray}, AxesLabel->{"D, м","Δt, с","δ, %
"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"]]
Plot3D[{ θθ1[x10,x20,α,V], θθ2[x10,x20,α,V], θθ3[x10,x20,α,V], θθt[x10,x20,α,V]
},{α,x30-dx3,x30+dx3},{V,x40-dx4,x40+dx4},PlotStyle->{{Opacity[0.8],Magenta
},{Opacity[0.8],Green},{Opacity[0.8],Yellow},Gray},AxesLabel->{"α, рад","V, м/с","δ, %
"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"]]
θ1[C4,D4,E4,F4]
θ2[C4,D4,E4,F4]
θ3[C4,D4,E4,F4]

```

Таблиця В.6 – Програма для обчислення раціональних параметрів
дозатора висівного апарату в Wolfram Cloud

```

x10=0.002;
dx1=0.001;
x20=0.4;
dx2=0.2;
x30=0.575958653;
dx3=0.226892803;
x40=2;
dx4=1;
N0=100;
D0=0.001;
V0=1;
Slider[Dynamic[D0],{x10-dx1,x10+dx1}]
Print["D = ",Dynamic[D0]," м"]
NN [DD _ ,Δt _ , α _ ,VV _ ] :=245.04553901050303` -40216.66666666798` DD-
172.0544889372581` VV+198.07916666666517` VV2+1995.687164748906` α-
2285.1099424251006` VV α+9851.899321857274` α2-734.5801369889527` Δt-
128249.99999999675` DD Δt+1065.1249999999989` VV Δt-11418.93866065025` α
Δt+4586.3541666666694` Δt2;
Solve[NN [DD ,Δt , α ,VV ]==NNNN,Δt];
NNOptMin=FindMinimum[{ NN [DD ,Δt , α ,VV ],x10-dx1<=DD<=x10+dx1,x20-
dx2<=Δt<=x20+dx2,x30-dx3<= α<=x30+dx3,x40-dx4<=VV<=x40+dx4},{DD,x10-
dx1},{Δt,x20-dx2},{ α,x30-dx3},{VV,x40-dx4}];
NNmin= First[NNOptMin];
NNOptMax=FindMaximum[{ NN [D ,Δt , α ,V ],x10-dx1<=D<=x10+dx1,x20-
dx2<=Δt<=x20+dx2,x30-dx3<= α<=x30+dx3,x40-dx4<=V<=x40+dx4},{D,x10-
dx1},{Δt,x20-dx2},{ α,x30-dx3},{V,x40-dx4}];
NNmax= First[NNOptMax];
Slider [ Dynamic[N0] , {NN min ,NN max } ]
Print["N = ",Dynamic[N0]," тис. шт./га"]
Slider[Dynamic[V0],{x40-dx4,x40+dx4}]
Print["V = ",Dynamic[V0]," м/с"]
Δtt [DD _ ,N0 _ , α _ ,VV _ ] :=9.905919845630202`-19
(8.084381265093568`16+1.4114483159021801`19 DD-1.1722174561210992`17
VV+1.2567050091200852`18 α-1.6531435747426586`-15 \[Sqrt](-
1.753211775067837`64+4.104914786497042`66 DD+7.28968585081283`67
DD2+8.13058220700863`61 N00+7.05375453175759`63 VV-
1.2108267667597686`66 DD VV-1.1076990026814366`64 VV2-
8.790961440250108`64 α+1.2980970851593253`67 DD
α+7.798489382563222`64 VV α-2.2312628633664834`65 α2));
Dynamic[Expand[Δtt [D0 ,N0 , α , V0 ]]];
Dynamic[Plot[{Δtt [D0 ,N0 , α , V0 ]},{α,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Green},AxesLabel->{"α, паd","Δt, c"},LabelStyle->Directive[FontSize-
```



```

>14,FontFamily->"Times"],GridLines->Automatic,GridLinesStyle->Directive[Black]]];
Dynamic[Expand[NN [D0 ,Δt , α , V0 ] ] ] ;
Dynamic[Plot3D[{N0, NN[D0 ,Δt , α , V0]},{Δt,x20-dx2,x20+dx2},{α,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{{Opacity[0.8],Yellow},{Opacity[0.8],Cyan},{Opacity[0.8],Green},Red}, AxesLabel-
>{"Δt, c","α, °", "N, тис. шт./га "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"]]]
dd [DD _ ,Δt _ , α _ ,VV _ ] :=94.42756411005098` +5.544871781734372` VV-
0.74999999999999808` VV2+9.732936894139096` α-17.078549644432744` VV α-
7.064102543760573` Δt+8.249999999999991` VV Δt+26.444205901057124` α Δt-
19.062500000000027` Δt2;
Dynamic[Opt=FindMaximum[{ dd [D0 ,Δt [D0 ,N0 , α , V0 ] , α , V0 ],x20-dx2<=
Δt[D0 ,N0 , α , V0]<=x20+dx2,x30-dx3<= α<=x30+dx3},{ α,x30-dx3}]];
Print["α = ",Dynamic[ αopt=α/.Last[Opt]]," рад"]
Print["α = ",Dynamic[180 αopt/Pi]," °"]
Print [ "Δt = ", Dynamic [ Δt [D0 , N0 , αopt ,V0 ] ] , " c" ]
Print["δ = ",Dynamic[dd[D0,Δt[D0 ,N0 , αopt ,V0],αopt,V0]]," %"]
Dynamic[Plot3D[{ dd[D0 ,Δt , α , V0]},{Δt,x20-dx2,x20+dx2},{α,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{{Opacity[0.8],Yellow},{Opacity[0.8],Cyan},{Opacity[0.8],Green},Red}, AxesLabel-
>{"Δt, c","α, °", "δ, % "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"]]];
Dynamic[Expand[ dd [D0 ,Δt [D0 ,N0 , α , V0 ] , α , V0 ] ] ] ;
Dynamic[Plot[{ dd [D0 ,Δt [D0 ,N0 , α , V0 ] , α , V0 ]},{α,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Green},AxesLabel->{"α, рад", "δ, % "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],GridLines->Automatic,GridLinesStyle->Directive[Black]]]

```

Додаток Г

Таблиця Г.1 – Код програми роботи експериментального
зразка висівного апарату

```

#include <Q2HX711.h>
#include <parameter.h>
const byte hx711_data_pin = A1;
const byte hx711_clock_pin = A0;
Q2HX711 hx711(hx711_data_pin, hx711_clock_pin);
float W0;
float W;
float M;
int PUL = 5;
int DIR = 6;
int ENA = 7;
float shag = 0;
long D = 0;
long V = 0;
long t = 0;
long a = 0;
void setup() {
  pinMode(PUL, OUTPUT);
  pinMode(DIR, OUTPUT);
  pinMode(ENA, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  W0 = 0;
  W = 0;
  for (int i = 0; i < 20; i++) {
    delay(100);
    W = hx711.read() + W;
  }
  W0 = W / 20.0;
  Serial.print("Mass tary, g: ");
  Serial.println(W0);
}
void loop() {
  parameter();
  if (Serial.available() >= 4 * sizeof(long)) {
    D = Serial.parseInt();
    V = Serial.parseInt();
    t = Serial.parseInt();
    a = Serial.parseInt();
    Serial.println(D);
    Serial.println(V);
  }
}

```

```

Serial.println(t);
Serial.println(a);
}
shag = 245.046 - 40216.7 * D - 172.054 * V + 198.079 * V * V + 1995.69 * a - 2285.11
* V * a + 9851.9 * a * a - 734.58 * t - 128250 * D * t + 1065.12 * V * t - 11418.9 * a * t +
4586.35 * t * t;
W = 0;
for (int i = 0; i < 20; i++) {
  W = hx711.read() + W;
}
M = 486.1878094889 * (W / 20.0 - W0) / 1000000.0;
Serial.println(M);
for (int i = 0; i < abs(shag); i++) {
  digitalWrite(DIR, HIGH);
  digitalWrite(ENA, HIGH);
  digitalWrite(PUL, HIGH);
  delayMicroseconds(1000);
  digitalWrite(PUL, LOW);
  delayMicroseconds(1000);
}
for (int i = 0; i < abs(shag); i++) {
  digitalWrite(DIR, LOW);
  digitalWrite(ENA, HIGH);
  digitalWrite(PUL, HIGH);
  delayMicroseconds(1000);
  digitalWrite(PUL, LOW);
  delayMicroseconds(1000);
}
}
}

```

Додаток Д

Таблиця Д.1 – Результати налагодження роботи висівного апарату
на стенді із імітацією рухомого поля

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
0,5	14,6	0,6	95,8
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
16	8	0	0
18	9	0	0
20	10	0	0
22	11	0	0
24	12	0	0
26	13	260	2,6
28	14	4150	41,5
30	15	5250	52,5
32	16	340	3,4
34	17	0	0
36	18	0	0
38	19	0	0
40	20	0	0
42	21	0	0
44	22	0	0

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
1,0	14,0	1,1	92,4
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
8	8	0	0
9	9	0	0
10	10	0	0
11	11	50	0,5
12	12	780	7,8
13	13	2310	23,1
14	14	3790	37,9
15	15	2280	22,8
16	16	700	7
17	17	90	0,9
18	18	0	0
19	19	0	0
20	20	0	0
21	21	0	0
22	22	0	0

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
1,5	15,1	1,2	91,4
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
5,3	8	0	0
6,0	9	0	0
6,7	10	0	0
7,3	11	0	0
8,0	12	160	1,6
8,7	13	730	7,3
9,3	14	2290	22,9
10,0	15	3500	35
10,7	16	2120	21,2
11,3	17	910	9,1
12,0	18	290	2,9
12,7	19	0	0
13,3	20	0	0
14,0	21	0	0
14,7	22	0	0

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
2,0	14,0	1,5	89,5
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
4,0	8	0	0
4,5	9	0	0
5,0	10	90	0,9
5,5	11	390	3,9
6,0	12	1130	11,3
6,5	13	1780	17,8
7,0	14	3010	30,1
7,5	15	1960	19,6
8,0	16	1190	11,9
8,5	17	390	3,9
9,0	18	60	0,6
9,5	19	0	0
10,0	20	0	0
10,5	21	0	0
11,0	22	0	0

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
2,5	15,1	1,9	86,5
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
3,2	8	0	0
3,6	9	0	0
4,0	10	50	0,5
4,4	11	240	2,4
4,8	12	530	5,3
5,2	13	1260	12,6
5,6	14	1630	16,3
6,0	15	2300	23
6,4	16	1480	14,8
6,8	17	1410	14,1
7,2	18	760	7,6
7,6	19	220	2,2
8,0	20	120	1,2
8,4	21	0	0
8,8	22	0	0

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
3,0	15,1	2,8	80,5
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
2,7	8	120	1,2
3,0	9	150	1,5
3,3	10	280	2,8
3,7	11	450	4,5
4,0	12	760	7,6
4,3	13	1130	11,3
4,7	14	1030	10,3
5,0	15	1970	19,7
5,3	16	1140	11,4
5,7	17	1130	11,3
6,0	18	700	7
6,3	19	500	5
6,7	20	390	3,9
7,0	21	190	1,9
7,3	22	60	0,6

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
3,5	14,1	4,1	71,1
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
2,3	8	250	2,5
2,6	9	520	5,2
2,9	10	450	4,5
3,1	11	570	5,7
3,4	12	1150	11,5
3,7	13	730	7,3
4,0	14	1480	14,8
4,3	15	800	8
4,6	16	700	7
4,9	17	640	6,4
5,1	18	440	4,4
5,4	19	420	4,2
5,7	20	400	4
6,0	21	340	3,4
6,3	22	280	2,8

V, м/с	Сер.	Відх.	δ_N , %
4,0	16,2	5,7	60,3
ΔT , мс	Δ , мм	N, шт	%
2,0	8	240	2,4
2,3	9	290	2,9
2,5	10	340	3,4
2,8	11	310	3,1
3,0	12	360	3,6
3,3	13	480	4,8
3,5	14	770	7,7
3,8	15	500	5
4,0	16	1650	16,5
4,3	17	600	6
4,5	18	630	6,3
4,8	19	470	4,7
5,0	20	310	3,1
5,3	21	340	3,4
5,5	22	310	3,1

Таблиця Д.2 – Результати вимірювань густоти стояння росли і точності висіву

V, м/с	V, км/ГОД	Повт.	Базовий висівний апарат				Удосконалений висівний апарат			
			N(5 м), шт	N, тис. шт./га	δ_N , %	У, т/га	N(5 м), шт	N, тис. шт./га	δ_N , %	У, т/га
0,5	1,8	1	367	1048,7	93,8	1,06	378	1079,7	95,8	1,10
		2	363	1036,8	92,0	0,86	370	1057,2	94,6	1,05
		3	354	1010,7	90,5	1,18	361	1032,9	93,2	1,10
		4	347	992,5	89,2	0,96	374	1067,3	97,8	0,97
		5	371	1060,4	94,3	1,11	368	1050,3	94,2	1,15
		Сер.	360	1029,8	92,0	1,03	370	1057,5	95,1	1,07
1	3,6	1	353	1007,7	90,2	1,01	362	1035,4	92,4	1,07
		2	359	1025,1	91,2	0,91	359	1026,2	91,3	0,97
		3	343	978,9	88,2	1,02	366	1044,9	93,2	1,05
		4	334	955,0	86,4	0,93	363	1036,7	93,8	0,92
		5	353	1009,9	89,9	1,04	371	1060,8	94,6	1,10
		Сер.	348	995,3	89,2	0,98	364	1040,8	93,1	1,02
1,5	5,4	1	340	971,0	88,9	0,99	352	1006,3	91,4	1,01
		2	323	923,2	84,4	0,84	371	1061,3	93,9	0,96
		3	341	973,5	87,2	0,96	352	1004,5	91,5	1,03
		4	338	964,5	87,2	0,89	348	993,5	89,8	0,96
		5	345	984,9	88,2	1,02	353	1009,3	91,4	0,96
		Сер.	337	963,4	87,2	0,94	355	1015,0	91,6	0,98
2	7,2	1	329	940,7	85,7	0,92	342	978,4	89,5	0,97
		2	337	962,1	86,2	0,87	358	1023,3	91,1	0,90
		3	333	950,7	85,2	0,92	336	959,3	87,8	0,97
		4	328	936,0	84,7	0,79	332	949,5	87,2	0,85
		5	320	915,3	84,2	0,96	350	999,3	91,1	0,92
		Сер.	329	940,9	85,2	0,89	344	982,0	89,3	0,92

Додаток Е
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03,
email: office@vnsau.org, rector@vnsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

22 травня 2023 р. № 01.1-60-531
на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукових досліджень
дисертаційної роботи Дацюка Дмитра Анатолійовича
на тему: «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів
висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасінневих культур»

Повідомляємо, що наукові розробки Дацюка Дмитра Анатолійовича за вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовило їх впровадження у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва інженерно-технологічного факультету.

Положення дисертаційної роботи використовується при викладанні окремих частин навчальної дисципліни «Сільськогосподарські машини».

Довідка видана Дацюку Д.А. для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 12 травня 2023р., протокол №7.

Ректор



Віктор МАЗУР

Вик.: Ірина РОМИГАЙЛО

№ 01445

Додаток Ж
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Вінницького національного
аграрного університету


Віктор МАЗУР
«02» вересня 2023р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Френдт»


Богдан КРУГЛИК
«02» вересня 2023р.



А К Т

**про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи**

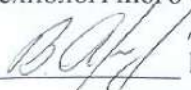
Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які отримані здобувачем третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дацюком Дмитром Анатолійовичем під керівництвом кандидата технічних наук, доцента, декана інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету, Яропуда Віталія Миколайовича впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Френдт» (ЄДРПОУ 38782983, Вінницька обл., Вінницький р-н, місто Вінниця, вул. Юності, буд. 10а). ТОВ «Френдт» в особі директора Круглика Богдана Валерійовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньневих культур, який розроблено в межах виконання дисертаційної роботи «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіньневих культур» Дацюком Д.А. і Яропудом В.М.

Підприємство ТОВ «Френдт» зацікавлене у виготовленні дослідної партії висівного апарата у кількості 20 штук для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.


Від ВНАУ

К.т.н., доцент, декан інженерно-технологічного факультету ВНАУ

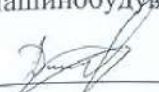

Віталій ЯРОПУД

Від ТОВ «Френдт»

Керівник сервісного центру


Олександр ПЕРЕПЕЛИЦЯ

Здобувач третього (освітньо-наукового)
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»


Дмитро ДАЦЮК

«04» вересня 2023р.

«04» вересня 2023р.

Додаток И

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного аграрного університету


Віктор МАЗУР
« 18 » вересня 2023р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор НСП «Агрофірма Нападівська»


Сергій ПЕТРЕНКО
« 18 » вересня 2023р.



А К Т

про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Вінницького національного аграрного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дацюк Дмитро Анатолійович під керівництвом декана інженерно-технологічного факультету ВНАУ, к.т.н., доцента Яропуда Віталія Миколайовича, з однієї сторони, і представник ПСП «Агрофірма Нападівська» (ЄДРПОУ 32292489, Вінницька область, Вінницький район, с. Нападівка, вул. Центральна, 7) головний інженер Балко Руслан Іванович, з другої сторони, склали цей акт про те, що удосконалений Дацюком Д. А. висівний апарат селекційної сівалки проходив виробничу перевірку у складі навісної рядкової сівалки для овочевих і дрібнонасіненних культур «Клен-4,2» під час сівби озимої гірчиці сорту «Новинка» 04.09.2022 р. Місце проведення дослідів – с. Нападівка, Вінницький район. Грунт ділянок для дослідів – чорнозем звичайний важкосуглинистий (вміст гумусу в орному горизонті – 3,5 %. рН – 6,5-7,0). Основний обробіток ґрунту – полищевий на глибину 20-22 см. Передпосівний обробіток проводили на глибину загортання насіння. Проводили допосівне та післяпосівне коткування. Погодні умови були сприятливі для сівби озимої гірчиці. Виконання дослідів відбувались відповідно до загальноприйнятих методів польових дослідів в галузі сільського господарства та рослинництва.

Виробнича перевірка проводилась для декількох швидкостей руху сівалки – 0,5 м/с (1,8 км/год), 1 м/с (3,6 км/год), 1,5 м/с (5,4 км/год), 2 м/с (7,2 км/год). В якості критерію випробувань прийнято густоту розміщення рослин на 5 м контрольного рядка і відстань між рослинами на 2 м контрольного рядка в п'ятиразовій повторності.


Збирання проводили на ділянці вручну, шляхом формування снопів, при досягненні вологості насіння 10-12%. Дата збирання урожаю – 11-13.07.2023. Далі сформовані снопи обмолочували і визначали масу отриманих насінин. Врожайність визначалася суцільним поділяночним методом з подальшим перерахуванням на стандартну вологість та 100 % чистоту.

За результатами досліджень встановлені показники роботи висівного апарату, які зведені в таблиці.

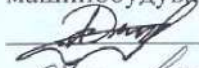
V, м/с	V, км/год	Повт.	Базовий висівний апарат				Удосконалений висівний апарат			
			N(5 м), шт	N, тис. шт/га	δ_n , %	У, т/га	N(5 м), шт	N, тис. шт/га	δ_n , %	У, т/га
0.5	1.8	1	367	1048.7	93.8	1.06	378	1079.7	95.8	1.10
		2	363	1036.8	92.0	0.86	370	1057.2	94.6	1.05
		3	354	1010.7	90.5	1.18	361	1032.9	93.2	1.10
		4	347	992.5	89.2	0.96	374	1067.3	97.8	0.97
		5	371	1060.4	94.3	1.11	368	1050.3	94.2	1.15
		Сер.	360	1029.8	92.0	1.03	370	1057.5	95.1	1.07
1	3.6	1	353	1007.7	90.2	1.01	362	1035.4	92.4	1.07
		2	359	1025.1	91.2	0.91	359	1026.2	91.3	0.97
		3	343	978.9	88.2	1.02	366	1044.9	93.2	1.05
		4	334	955.0	86.4	0.93	363	1036.7	93.8	0.92
		5	353	1009.9	89.9	1.04	371	1060.8	94.6	1.10
		Сер.	348	995.3	89.2	0.98	364	1040.8	93.1	1.02
1.5	5.4	1	340	971.0	88.9	0.99	352	1006.3	91.4	1.01
		2	323	923.2	84.4	0.84	371	1061.3	93.9	0.96
		3	341	973.5	87.2	0.96	352	1004.5	91.5	1.03
		4	338	964.5	87.2	0.89	348	993.5	89.8	0.96
		5	345	984.9	88.2	1.02	353	1009.3	91.4	0.96
		Сер.	337	963.4	87.2	0.94	355	1015.0	91.6	0.98
2	7.2	1	329	940.7	85.7	0.92	342	978.4	89.5	0.97
		2	337	962.1	86.2	0.87	358	1023.3	91.1	0.90
		3	333	950.7	85.2	0.92	336	959.3	87.8	0.97
		4	328	936.0	84.7	0.79	332	949.5	87.2	0.85
		5	320	915.3	84.2	0.96	350	999.3	91.1	0.92
		Сер.	329	940.9	85.2	0.89	344	982.0	89.3	0.92

Результати вимірювань показують, що точність висіву удосконаленого висівного апарата вища (89,3–95,1 %), ніж базового (85,2–92,0 %). Також про якість висіву свідчить отримана густина розміщення рослин: для удосконаленого висівного апарата – 982,0–1057,5 тис. шт./га, а для базового – 940,9–1029,8 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 1000 тис. шт./га. Урожайність гірчиці озимої складала: для удосконаленого висівного апарата – 0,92–1,07 т/га, а для базового – 0,89–1,03 т/га. Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що удосконалений висівний апарат є більш ефективним, ніж базовий.


Від ВНАУ

Декан інженерно-технологічного
факультету ВНАУ, к.т.н., доцент
 Віталій ЯРОПУД

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»

 Дмитро ДАЦІОК
«07» вересня 2023р.

Від ПСП «Агрофірма Нападівська»

Головний інженер
ПСП «Агрофірма Нападівська»
 Р. І. БАЛІКО

«07» вересня 2023р.

Додаток К

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Вінницького національного
аграрного університету


Віктор МАЗУР
« 11 » _____ 2023 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Агромаш-Калина»


Юрій ВАСКІВНЮК
« 11 » _____ 2023 р.



АКТ

про впровадження/використання результатів науково-дослідної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-дослідної роботи, які були отримані здобувачем третього (освітньо-науково) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дацюком Дмитром Анатолійовичем та його науковим керівником к.т.н., доцентом, деканом інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету Яропудом Віталієм Миколайовичем впроваджені і використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Україна, 22400, Вінницька область, Калинівський район, місто Калинівка, вулиця Незалежності, 46).

ТОВ «Агромаш-Калина» в особі головного інженера Барановського Сергія отримало конструкторську та технічну документацію на виготовлення експериментального зразка висівного апарата селекційної сівалки, який призначений для висіву насіння дрібнонасіньєвих культур.

Отримана конструкторська та технічна документація буде використовуватися для виготовлення дослідних зразків вищезазначеного обладнання для проведення дослідно-виробничих випробувань.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУ

К.т.н., доцент, декан інженерно-технологічного факультету ВНАУ,


Віталій ЯРОПУД

Здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»


Дмитро ДАЦЮК

« 05 » _____ 2023р.

Від ТОВ «Агромаш-Калина»

Головний інженер Барановський
Сергій Леонтійович


Барановський Сергій

« 05 » _____ 2023р.

Додаток Л

AGROKALINA

ТОВ «АГРОМАШ-КАЛИНА» 22403, м.Калинівка, Вінницька обл., вул. Незалежності, 46
 Код ЄДРПОУ 32320510, р/рах UA273026889000026009055319717, ІПН 323205102079, № свідоцтва 01408014.
 тел. +38 (04333) 60-50-30, факс +38 (04333) 2-25-35, моб. +38 (067) 433-48-87

 www.agrokalina.com | ҐРУНТООБРОБНА ТЕХНІКА ПОСІВНА ТЕХНІКА | agrokalina@gmail.com 

Довідка про використання результатів досліджень

Результати науково-дослідної роботи, які були отримані здобувачем третього (освітньо-науково) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дацюком Дмитром Анатолійовичем та його науковим керівником к.т.н., доцентом, деканом інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету Яропудом Віталієм Миколайовичем впроваджені і використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Україна, 22400, Вінницька область, Калинівський район, місто Калинівка, вулиця Незалежності, 46).

ТОВ «Агромаш-Калина» отримало рекомендації з налагодження висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіневих культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем.

Отримані рекомендації використовуються у наукових дослідженнях технологічного процесу висівних апаратів селекційних сівалок, закономірностей виникнення відмов, розроблення заходів їх попередження (усунення) та оцінювання працездатності цих апаратів в умовах ТОВ «Агромаш-Калина». В результаті використання розроблених методичних засад налаштування висівних апаратів селекційних сівалок дрібнонасіневих культур встановлено, що точність висіву експериментального зразка удосконаленого висівного апарата вища (89,3–95,1 %), ніж у базового «Клен-4,2» (85,2–92,0 %). Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що удосконалений висівний апарат є більш ефективним, ніж базовий.

Директор
ТОВ «Агромаш-Калина»



Юрій ВАСКІВНЮК

Додаток М

Таблиця К.1 – Результати розрахунку техніко-економічної ефективності

Показник	Позн.	Базовий варіант					Удосконалений варіант				
Марка трактора	–	МТЗ-82					МТЗ-82				
Марка сівалки	–	Клен-4,2					Клен-4,2 із удосконаленими висівними апаратами				
Балансова ціна трактора, грн.	Б _т	1000000					1000000				
Балансова ціна сівалки, грн.	Б _м	600000					720000				
Нормативне річне завантаження трактора, год.	T _{зт}	1200					1200				
Нормативне річне завантаження сівалки, год.	T _{зм}	100					100				
Ширина захвату, м	В	4,2					4,2				
Швидкість руху агрегату, м/с	v _а	0,5	1,0	1,5	2,0	1,26	0,5	1,0	1,5	2,0	1,26
Продуктивність агрегату за годину роботи, га/год.	W _{тч}	0,8	1,5	2,3	3,0	1,9	0,8	1,5	2,3	3,0	1,9
Коефіцієнт використання часу зміни	k _{зм}	0,85					0,85				
Продуктивність агрегату за годину змінного часу, га/год.	W _{зч}	0,64	1,29	1,93	2,57	1,62	0,64	1,29	1,93	2,57	1,62
Коефіцієнт використання експлуатаційного часу зміни	k _{еч}	0,80					0,80				
Продуктивність агрегату за годину експлуатаційного часу, га/год.	W _{еч}	0,51	1,03	1,54	2,06	1,30	0,51	1,03	1,54	2,06	1,30
Кількість обслуговуючого персоналу, люд.	N _і	1					1				
Погодинна ставка оплати по відповідному розряду, грн./год	τ _і	200,00					200,00				
Коефіцієнт, що враховує різні доплати	k _д	1,4					1,4				
Витрати на оплату праці, грн/га	З	544,66	272,33	181,55	136,17	216,14	544,66	272,33	181,55	136,17	216,14

Показник	Позн.	Базовий варіант					Удосконалений варіант				
Годинна витрата палива, кг/год	G _T	5,50					5,50				
Питомі витрати палива, кг/га	q	10,70	5,35	3,57	2,67	4,25	10,70	5,35	3,57	2,67	4,25
Ціна одного кілограму палива, грн/кг	Ц _п	63,95					63,95				
Витрати на паливо, грн/га	П	684,22	342,11	228,07	171,06	271,52	684,22	342,11	228,07	171,06	271,52
Коефіцієнт, що враховує вартість мастильних матеріалів	k _{ПМ}	1,3					1,3				
Витрати на паливо-мастильні матеріали	ПМ	889,49	444,74	296,50	222,37	352,97	889,49	444,74	296,50	222,37	352,97
Коефіцієнти відрахувань на реновацію, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання сівалки	V _{рм} + V _{тм}	0,30					0,30				
Витрати на реновацію, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання для сівалки, грн/га	P _м	3524,74	1762,37	1174,91	881,19	1398,71	4229,69	2114,85	1409,90	1057,42	1678,45
Коефіцієнти відрахувань на реновацію, капітальний ремонт, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання трактора	V _{рТ} + V _{кТ} + V _{тТ}	0,39					0,39				
Витрати на реновацію, капітальний ремонт, технічне обслуговування, поточний ремонт і зберігання для трактора, грн/га	P _Т	624,09	312,05	208,03	156,02	247,66	624,09	312,05	208,03	156,02	247,66
Питомі капітальні вкладення, грн/га	K	13292,35	6646,18	4430,78	3323,09	5274,74	15626,62	7813,31	5208,87	3906,66	6201,04
Нормативні коефіцієнти ефективності капітальних вкладень	E	0,15					0,15				

Показник	Позн.	Базовий варіант					Удосконалений варіант				
Питомі експлуатаційні витрати, грн/га	С	5582,98	2791,49	1860,99	1395,75	2215,47	6287,93	3143,97	2095,98	1571,98	2495,21
Урожайність, т/га	У	1,03	0,98	0,94	0,89	0,96	1,07	1,02	0,98	0,92	1,00
Коефіцієнт втрат маси насіння при очищенні	к _н	0,80					0,80				
Ціна елітного насіння, грн/т	Ц _у	100000,00					100000,00				
Вартість продукції, грн	ВП	82400,00	78400,00	75200,00	71200,00	76800,00	85600,00	81600,00	78400,00	73600,00	80000,00
Додатковий чистий дохід, грн/га	Д	–					3200,00	3200,00	3200,00	2400,00	3200,00
Питомий економічний ефект за рік, грн/га	ПЕ _р	–					2144,91	2672,46	2848,30	2136,23	2920,26
Обсяг робіт за рік, га	Q _п	100,00					100,00				
Економічний ефект за рік, грн/га	Е _р	–					214491,13	267245,56	284830,38	213622,78	292025,85
Термін окупності, років	О	–					1,09	0,44	0,27	0,27	0,32

Додаток Н

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Дацюка Дмитра Анатолійовича
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

№ п/п	Назва	Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від інших	Кількість друківаних сторінок / друк. арк.)	Співавтори
1	2	3	4	5
Статті у наукових фахових виданнях віднесених до міжнародної наукометричної бази Scopus				
1.	Methods of numerical modeling of sowing apparatus of selection seeder of small-seed crops	<i>Machinery and Energetics.</i> 2021. №12 (3). DOI: 10.31548/machenergy2021.03.121 URL: https://technicalscience.com.ua/uk/journals/t-12-3-2021/myetodika-chisyelnogo-modyelyuvannya-visivnogo-aparata-syelyektsiynoyi-sivalki-dribnonasinnyevikh-kultur	<u>P. 121-127</u> 0,66 (0,44)	Yaropud V., Aliiev E.
2.	The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeder's sowing unit	<i>Agraarteadus.</i> 2022. Vol. 33, №1. DOI: 10.15159/jas.22.08 URL: https://dx.doi.org/10.15159/jas.22.08	<u>P. 199-208</u> 0,88 (0,52)	Yaropud V., Honcharuk I., Aliiev E.
Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б»				
1.	Шляхи удосконалення висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіневих культур	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2021. № 1 (100). DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-15 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/May2021/1f6GGKeMQpWv4eEUOqgc.pdf	<u>C. 156-166</u> 0,92 (0,68)	Яропуд В.М.
2.	Використання методу дискретних елементів у моделюванні руху та укладання насіння дрібнонасіневих культур	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2023. № 1 (108). DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/May2023/4B95OP5vBUVxyu8hIvcu.pdf	<u>C. 73-82</u> 0,69 (0,43)	Яропуд В.М. Теслюк Г.В.

1	2	3	4	5
3.	Дослідження руху насіння у розподільнику висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінних культур	<i>Сільськогосподарські машини.</i> 2023. № 49. DOI: 10.36910/acm.vi49.945 URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/article/view/945	<u>С. 7-14</u> 0,46 (0,38)	Яропуд В.М.
4.	Експериментальні дослідження дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2023. № 3 (122). DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-5 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2023/pal5k2JR9bRa0FPrBjzx.pdf	<u>С. 43-52</u> 0,73 (0,51)	Яропуд В.М., Говоруха В.Б.
5.	Випробування математичної моделі роботи дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2023. № 3 (110). DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-6 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/January2024/DCJh2nl9nYIGECrRHOGZ.pdf	<u>С. 52-60</u> 0,68 (0,47)	Яропуд В.М., Говоруха В.Б.
Патенти. Об'єкти права інтелектуальної власності:				
1.	Висівний апарат селекційної сівалки дрібнонасінневих культур	Пат. 149682 Україна : МПК А01С 7/04, А01В 49/06. № u 2021 01285; заявл. 15.03.2021 ; опубл. 01.12.2021, Бюл. № 48 URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1664319/	<u>С. 1-5</u> 0,38 (0,3)	Яропуд В.М. Алієв Б.Е.
Матеріали наукових конференцій				
1.	Техніко-економічна ефективність застосування розробленого висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасінневих культур	<i>Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу:</i> збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених 1 грудня 2023 р. Дніпро. URL: https://drive.google.com/file/d/1kYAXikTvviWCN9iqMT2FxZN7fhlvoTkz/view?usp=sharing	<u>С. 13-15</u> 0,10	Дацюк Д.А.

Усього за темою дисертаційної роботи «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів висівного апарату селекційної сівалки дрібнонасіневих культур» опубліковано 9 наукових праць загальним обсягом 5,5 умовн. друк. арк. (власний доробок автора 3.83 умовн. друк. арк.) у тому числі 0,96 умовн. друк. арк. у наукометричній базі Scopus; 2,47 умовн. друк. арк. у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародних наукометричних баз; 0,4 умовн. друк. арк. у інших виданнях.

Автор

Дмитро ДАЦЮК

в.о. вченого секретаря

Лариса ФЕНЯК



2024 р.

Додаток О

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ
НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
Дацюка Дмитра Анатолійовича

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, місце проведення, дата
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1.	Особливості конструкцій висівних апаратів для висіву дрібнонасіненних сільськогосподарських культур та шляхи їх вдосконалення	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інженерно-технологічне забезпечення аграрного сектору економіки: сучасний стан, проблеми та перспективи». м. Вінниця. 21-22 жовтня 2020 р.
2.	Шляхи удосконалення висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіненних культур для технологій органічного землеробства	Всеукраїнська науково-практична конференція «Реалізація європейського зеленого курсу в Україні: погляд молодих учених». м. Вінниця. 14-15 травня 2021 р.
3.	Теоретичні дослідження конструктивно-технологічних параметрів робочого органу висівного апарата селекційної сівалки з використанням програми Star CCM+	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи та цифровізація агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку». м. Вінниця. 27-28 жовтня 2021 р.
4.	Симуляція технологічного процесу висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіненних культур	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». м. Вінниця. 20-21 жовтня 2022 р.
5.	Обґрунтування раціональних параметрів розподільника висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіненних культур.	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції». м. Вінниця. 19-20 жовтня 2023 р.

Автор



І.В.І. ІННОВАЦІЙНИЙ СЕКРЕТАР

2024 р.

Дмитро ДАЦЮК

Лариса ФЕНЯК