

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЕЗВЕРХНІЙ ПЕТРО ЄВГЕНОВИЧ

УДК 631.331:681.587.35 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

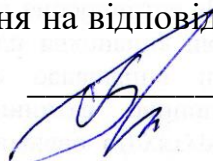
**Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної
сівалки точного висіву**

Галузь знань 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

 Петро БЕЗВЕРХНІЙ

Науковий керівник:

Алієв Ельчин Бахтияр огли, доктор
технічних наук, старший дослідник

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Безверхній П. Є. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної сівалки точного висіву. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія») – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти та науки України, Дніпро, 2024.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу сівби насіння культурних рослин шляхом удосконалення конструкцій елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів, та конструкційними матеріалами, які обумовлюють підвищений ресурс їх експлуатації.

Об'єкт дослідження – технологічний процес взаємодії елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із насінням культурних рослин.

Предмет досліджень – залежність показників якості висіву і ресурсу експлуатації від властивостей конструкційних матеріалів та конструктивно-технологічних параметрів елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву у відповідності із технологічними вимогами.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження були спрямовані на вивчення закономірностей взаємодії робочих елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву з насінням за допомогою методів системного аналізу, теоретичної механіки, механіки суцільного середовища, а також інструментів інтегральних і диференціальних обчислень та чисельного моделювання в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+. Експериментальні дослідження передбачали застосування як стандартних, так і спеціально розроблених методик, з використанням фізичних моделей і дослідних зразків робочих елементів, приладів та обладнання. Експерименти проводилися як в лабораторії, так і в умовах

виробництва, з застосуванням методики планування багатofакторних експериментів. Обробка отриманих даних виконувалася за допомогою статистичних методів дисперсійного і регресійного аналізів та програмного забезпечення Wolfram Cloud і Microsoft Excel.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше:

– отримані аналітичні і емпіричні закономірності у вигляді рівнянь регресії другого порядку взаємозв'язку відношення площі випускних отворів до площі входу на сповільнювачі насіння удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки, швидкості її переміщення, швидкості потоку повітря і норми висіву, що дозволяє досягти максимальної точності висіву і мінімальної швидкості насіння на виході з висівного башмака;

– отримані аналітичні залежності впливу конструктивних параметрів заспокоювача насіння із профілем параболічної форми (товщина, кут нахилу, висота розміщення заспокоювача, висота п'яти і відстань її розміщення, координата фокуса параболи) удосконаленої висівної секції пневматичної зернової сівалки на напруження і значення коефіцієнта запасу його міцності, а також кінематику руху насінини після вильоту її з висівного башмака і взаємодії із дном борозенки і заспокоювачем;

Отримали подальший розвиток:

– фізико-математичний апарат руху насінин, як дискретних елементів на основі пружно-демпферної контактної моделі Герца-Міндліна, в удосконаленій системі подачі насіння пневматичної сівалки, який покладено в основу методики чисельного моделювання процесу точного висіву в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Практичне значення одержаних результатів. Удосконалену пневматичну сівалку John Deere 1890 впроваджено у ПП «Архангельське». Результати вимірювань показують, що точність висіву удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 (із встановленим сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння) вища (92,1–95,2 %), ніж базова (82,1–87,3 %). Результати науково-технічної роботи, у вигляді технічної і конструкторської документації на

дослідний зразок сповільнювача насіння системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series, прийняті на ТОВ «Агротек-Інвест». Конструкція заспокоювача насіння прийнята і впроваджена на ТОВ «НВП» СОЮЗ-КОМПОЗИТ». Розроблені стенди для досліджень зусилля кручення і згину, методики моделювання процесу висіву насіння висівною секцією пневматичної зернової сівалки впроваджені в освітні компоненти ОПП «Агроінженерія» і ОНП «Галузеве машинобудування» для студентів другого (магістерського) і третього (освітньо-наукового) освітніх рівнів вищої освіти ДДАЕУ.

Технологія No-till, серед інших систем ґрунтозахисного та ресурсозберігаючого землеробства (Conservation Agriculture), є найбільш перспективною з точки зору мінімізації пошкодження ґрунту. Вона зменшує механічне втручання та ерозію, а також знижує потребу у великому парку техніки. Ключовим аспектом цієї технології є якість сівби, тому велика увага приділяється посівним машинам. Основним недоліком пневматичних посівних машин є нерівномірний розподіл насіння між сошниками. Це призводить до нераціонального використання насіння, зниження врожайності та збільшення кількості бур'янів, що вимагає удосконалення систем висіву. Конфігурація елементів пневматичної системи сівалки, таких як насіннепровід та розподільник, значно впливає на точність висіву. Елементи сівалки, як сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) і заспокоювач (seed bounce flap), забезпечують не лише точність розподілу насіння, але й правильне укладання його в борозну, що є важливим для рівномірного проростання та захисту від впливу зовнішніх факторів.

Обґрунтована конструктивно-технологічна схема удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки, що включає раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння, яка відрізняється тим, що додатково містить верхній датчик висіву, який встановлений на насіннепроводі; нижній датчик висіву, який встановлений на висівному башмаку; сповільнювач насіння, який встановлений між насінневою трубкою і насіннепроводом і складається з перфорованого циліндра із отворами, верхнього

звужувального патрубку, нижнього звужувального патрубку, циліндричної шторки із жорстко закріпленою вигнутої зубчастої рейки, сервопривода із зубчастим колесом; блок керування, який по засобах електричних проводів приєднаний до верхнього датчика висіву, нижнього датчика висіву і сервопривода.

В результаті чисельного моделювання сповільнювача насіння пневматичної зернової сівалки в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ отримано візуалізацію процесу руху насіння і повітряного потоку в робочій області сповільнювача. За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку в розкодованому вигляді без урахуванням значущих коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента залежностей швидкості повітряного потоку V_a^{out} , швидкості насіння V_p^{out} на виході сповільнювача насіння і коефіцієнта зміни норми висіву η від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} і відношення площі випускних отворів до площі входу ε . Згідно агротехнічних вимог відхилення норми висіву повинно не перевищувати 1 %. Розраховане рівняння показує залежність відношення площі випускних отворів до площі входу ε від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} при забезпечені умови $\eta \leq 1,01$. При зазначеному діапазоні швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} необхідно корегувати ε , яка знаходиться в межах від 1,60 до 2,26.

В результаті аналітичних досліджень розглянуто кінематику руху насінини після вильоту її з висівного башмака, відбиття від дна борозенки і заспокоювача насіння. Отримані залежності максимальної висоти параболічної траєкторії руху насіння u_3' , різниці відстані між точками відбиття від поверхні ґрунту і відстані, яку проходить при цьому сівалка Δx від початкової швидкості руху насінини V_{p0} , кута їх вильоту α , висоти розміщення заспокоювача H_u і кута його нахилу β . Виконуючи умови $u_3' < H_u$ і $\Delta x \rightarrow \min$ для отриманих залежностей в Wolfram Cloud отримані наступні раціональні параметри: $\alpha = 47^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $H_u < 0,134$ м. Для забезпечення постійного потрапляння насінин до середини дна борозенки після відбиття їх від сповільнювача при невеликому відхиленні траєкторії ($\pm 0,01$ м), форма профілю його робочої поверхні повинна бути параболічною із фокусом в точці $r_f = 0,134$ м.

З використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведено симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. В результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруження σ_f , що виникає в кожній комірці створеної сітки заспокоювача. Отримані залежності максимального значення напруження σ_{fmax} і коефіцієнта запасу міцності k_f від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів (ABS, поліамід 6, двокомпонентний поліуретан). Вирішуючи багатокритеріальну задачу оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох критеріїв, отримані значення геометричних параметрів заспокоювача насіння: $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм.

В результаті дослідження деформації кручення заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці отримано значення зусилля, яке необхідно прикласти для його кручення на кут 70° : найбільше значення зусилля кручення $112,8$ Н має Nylon, найменші, на рівні $32-33$ Н – Elastan D100 та Elastan D70. Nylon-CCF та TPU 40A мають приблизно рівні значення зусилля кручення – $52,2 \pm 2,8$ та $59,8 \pm 3,0$ Н. При цьому зразки з ABS руйнувалися при крученні на кут біля $44 \pm 1^\circ$. В результаті дослідження деформації при згині заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці встановлено динаміку зусилля, яке необхідно прикласти для згину різних зразків на величину $\pm 0,015$ м. Найбільші значення сил має заспокоювач з Nylon-CCF ($2,368 \pm 0,018$), а найменше значення – Elastan D70 ($0,655 \pm 0,012$). За результатами тривалих випробувань побудована крива втоми заспокоювачів для різних матеріалів для сил в верхній F_{max}^u і нижній F_{max}^d точках коливання. Для встановлення найбільш раціонального матеріалу для заспокоювача скористаємося умовою, що сила коливань при тривалих випробуваннях не повинна зменшуватися більш ніж на 25% . Найбільшу кількість коливань витримує заспокоювач виготовлений з TPU 40A – 3701 тис. шт., а найменшу – з ABS – 818 тис. шт. Тому для подальших досліджень раціонально використовувати матеріал TPU 40A. При перерахунку отримуємо, що заспокоювач з TPU 40A здатний

витримувати 1028 год або 6750 га експлуатації. Це значення перевищує ресурс сівалки John Deere 90 Series до поточного ремонту в 6000 га на 12,5 %.

В результаті експериментальних досліджень удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву на базі John Deere серії 90 в лабораторних умовах встановлені закономірності зміни швидкості потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} , швидкості потоку насіння ріпаку і гороху V_p^{out} , норми N і точності висіву (коефіцієнт варіації) δ від відношення площі випускних отворів до площі входу сповільнювача насіння ε , швидкостей потоку повітря на вході V_a^{in} , переміщення сівалки V_s і інжекції (дозування) насіння Q_p . Результати показали, що збільшення швидкості повітряного потоку на вході веде до збільшення швидкості потоку на виході, що, в свою чергу, впливає на точність і норму висіву. Швидкість переміщення сівалки і швидкість інжекції насіння суттєво впливають на норму висіву, але водночас можуть знижувати точність. Встановлено залежність взаємозв'язку між відношенням площі випускних отворів до площі входу на сповільнювачі насіння ε , швидкістю переміщення сівалки V_s та нормою висіву N_t , що дозволяє досягти максимальної точності висіву (89,6 % до 94,3 %) і швидкості насіння на виході з висівного башмака в межах від 1,1 м/с до 2,4 м/с. Отримані рівняння використані для автоматизованої системи керування заслінкою на сповільнювачі насіння.

На основі проведених польових експериментальних досліджень висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series виявлено значний вплив заспокоювача і удосконаленої конструкції сповільнювача на точність висіву δ , густоту стояння рослин N' та урожайність P . Статистичний аналіз результатів експериментів, зокрема дисперсійний аналіз, показав, що найбільший вплив на точність висіву мають такі фактори, як наявність сповільнювача насіння (42,09 %), удосконаленого заспокоювача насіння (29,52 %) та швидкість руху сівалки (20,43 %). Висока точність висіву ($\delta = 94,7-95,5$ %) була досягнута при використанні удосконаленої конструкції заспокоювача насіння та сповільнювача на швидкості 1 м/с, тоді як відсутність сповільнювача та базовий заспокоювач призводили до суттєвого зниження точності висіву ($\delta = 70,6-71,3$ %) при швидкості 4 м/с. Аналіз

впливу факторів на густоту стояння рослин і урожайність також вказав на перевагу використання удосконаленої конструкції. Аналіз отриманих даних продемонстрував різний ступінь впливу конструкцій сповільнювача і заспокоювача насіння на урожайність для різних культур (ріпак і горох). Для гороху найважливішим фактором виявився сповільнювач (вплив – 46,94 %), тоді як для ріпаку – удосконалений заспокоювач насіння (вплив – 44,71 %). Отже, результати досліджень підтверджують ефективність удосконаленої конструкції сповільнювача і заспокоювача насіння, що може значно підвищити точність висіву на 24,9 % та урожайність гороху і ріпаку на 4,1 % і 4,9 % відповідно.

Техніко-економічна оцінка показала, що застосування удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 суттєво підвищує економічний ефект, особливо за наявності сповільнювача насіння і удосконаленого заспокоювача насіння. Найбільший економічний ефект спостерігається при середній швидкості посіву, зокрема для гороху при швидкості 2 м/с він досягає 1188,14 грн/га, а для ріпаку при швидкості 3 м/с — 1667,83 грн/га. Точка беззбитковості при якій окупаються додаткові капіталовкладення на удосконалення сівалки для цих культур становить відповідно 351 га і 250 га.

Ключові слова: насіння, насінневий матеріал, ґрунт, посів, висів, концентрація насіння, властивості, посівні машини, сівалка, посівна секція, висівний апарат, сошник, диск, насіннепровід, заспокоювач, сповільнювач, висівний башмак, рух, точність висіву, норма висіву, ґрунтове середовище, орний горизонт, передпосівний обробіток, урожайність, якість, розділення, ефективність, чисельне моделювання, симуляція, метод дискретних елементів, модель, експеримент, параметри, матеріал, полімер, показники, кінематичні рівняння, компромісна задача

ANNOTATION

Bezverkhniy P. E. Justification of the structural and technological parameters of the precision seeding pneumatic 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») – Dnipro State Agrarian and Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro – 2024.

Purpose of the work – to improve the efficiency of the seed sowing process for cultivated plants by optimizing the design of elements in the seed feeding system of a pneumatic precision seeder, with justified structural and technological parameters that ensure accurate sowing, and using structural materials that provide an extended service life.

Object of research – the technological process of interaction between the elements of the seed feeding system of a pneumatic precision seeder and the seeds of cultivated plants.

Subject of research – the dependence of the sowing quality indicators and service life on the properties of structural materials and the structural-technological parameters of the seed feeding system elements of a pneumatic precision seeder in accordance with technological requirements.

Research methods. Theoretical research focused on studying the patterns of interaction between the working elements of the seed feeding system of a pneumatic precision seeder and the seeds using methods of systems analysis, theoretical mechanics, continuum mechanics, as well as tools of integral and differential calculus and numerical modeling in the Simcenter Star-CCM+ software environment. Experimental research involved the application of both standard and specially developed methodologies, using physical models and prototypes of working elements, instruments, and equipment. Experiments were conducted both in the laboratory and in production settings, employing multi-factor experimental design methodologies. Data processing was carried out using statistical methods of variance and regression analysis, along with Wolfram Cloud and Microsoft Excel software.

Scientific novelty of the obtained results. For the first time:

– Analytical and experimental dependencies in the form of second-order regression equations were obtained, showing the relationship between the ratio of the outlet area to the inlet area on the seed decelerator of the improved seeding section of the pneumatic seeder, its movement speed, air flow rate, and seeding rate, which allows for achieving maximum sowing accuracy and minimal seed speed at the exit from the seeding shoe.

– Analytical dependencies were derived regarding the influence of the structural parameters of the seed decelerator with a parabolic-shaped profile (thickness, inclination angle, placement height of the decelerator, heel height and its placement distance, and the focus coordinate of the parabola) in the improved seeding section of the pneumatic seeder on the stress and safety factor, as well as the kinematics of seed movement after exiting the seeding shoe and its interaction with the furrow bottom and decelerator.

Further developed:

– The physical and mathematical framework for seed movement as discrete elements, based on the Hertz-Mindlin elastic-damping contact model, in the improved seed feeding system of the pneumatic seeder, which forms the basis of the numerical modeling methodology for precision sowing in the Simcenter STAR-CCM+ software package.

Practical significance of the obtained results. The improved John Deere 1890 pneumatic seeder has been implemented at PP «Arkhangelske». Measurement results indicate that the precision of sowing with the improved John Deere 1890 pneumatic seeder (with the installed seed brake and enhanced seed bounce flap) is higher (92.1–95.2 %) compared to the base model (82.1–87.3 %). The scientific and technical results, in the form of technical and design documentation for a prototype seed brake for the John Deere 90 Series pneumatic seeder's seed feeding system, have been accepted by LLC «Agrotek-Invest». The design of the seed bounce flap has been adopted and implemented at LLC «NVP SOYUZ-KOMPOZIT». Developed testing stands for torsion and bending force research, along with sowing process modeling methodologies for the pneumatic seeder's sowing section, have been incorporated into the educational components of the «Agroengineering» and «Industrial engineering» programs for second (master's) and third (doctoral) educational levels at DDAEU.

The No-till technology, among other soil-protective and resource-saving farming systems (Conservation Agriculture), is one of the most promising in terms of minimizing soil damage. It reduces mechanical intervention and erosion, as well as decreases the need for a large fleet of machinery. The key aspect of this technology is the quality of sowing, which is why great attention is paid to seeding machines. One of the main drawbacks of pneumatic seeders is the uneven distribution of seeds between openers, leading to inefficient seed usage, lower yields, and increased weeds, which necessitates improving the seeding systems. The configuration of the pneumatic seeder's elements, such as the seed tube and distributor, significantly affects sowing accuracy. Elements like the seed brake, seed boot, and seed bounce flap ensure not only accurate seed distribution but also proper placement of seeds in the furrow, which is crucial for even germination and protection from external factors.

The developed structural and technological scheme of the improved pneumatic seeder's sowing section includes a frame with a clamp, a single-disc opener, a bearing unit, a press wheel, a closing wheel, a seed boot with a seed channel, a seed tube, a seed conveyor, and a seed bounce flap. Additionally, it features an upper seeding sensor mounted on the seed conveyor, a lower seeding sensor installed on the seed boot, and a seed brake located between the seed tube and the seed conveyor. The brake consists of a perforated cylinder with holes, an upper narrowing pipe, a lower narrowing pipe, a cylindrical shutter with a rigidly attached curved gear rack, and a servo motor with a gear wheel. A control unit, connected by electrical wires to the upper and lower seeding sensors and the servo motor, regulates the system.

As a result of numerical modeling of the seed brake in the Simcenter Star-CCM+ software package, a visualization of the seed movement and airflow in the seed brake's working area was obtained. Based on the numerical modeling and data processing in Wolfram Cloud, second-order regression equations were derived in decoded form without considering significant coefficients by the Student's t-test, describing the dependencies of the airflow velocity V_a^{out} , seed velocity V_p^{out} at the seed brake's exit, and the sowing rate change coefficient η on the airflow velocity at the inlet V_a^{in} and the ratio of the outlet area to the inlet area ε . According to agro-technical requirements, the sowing rate deviation should

not exceed 1 %. The calculated equation shows the dependence of the ratio of the outlet area to the inlet area ε on the airflow velocity at the inlet V_a^{in} while ensuring the condition $\eta \leq 1.01$. For the specified airflow velocity range at the inlet V_a^{in} , it is necessary to adjust ε , which ranges from 1.60 to 2.26.

As a result of the analytical research, the kinematics of seed motion after its release from the seed boot, its rebound from the bottom of the furrow, and interaction with the seed bounce flap were examined. The dependencies of the maximum height of the parabolic trajectory of seed movement y_3' , the difference between the rebound points from the soil surface, and the distance traveled by the seeder Δx on the initial seed velocity V_{p0} , release angle α , the height of the seed brake H_u , and its inclination angle β were obtained. By satisfying the conditions $y_3' < H_u$ and $\Delta x \rightarrow \min$, the following optimal parameters were derived using Wolfram Cloud: $\alpha = 47^\circ$, $\beta = 0^\circ$, and $H_u < 0.134$ m. To ensure consistent seed placement at the center of the furrow after rebound from the seed brake with minimal trajectory deviation (± 0.01 m), the working surface profile of the seed brake should be parabolic, with its focus at $p_f = 0.134$ m.

Using the Simcenter STAR-CCM+ software package, a simulation of the seed bounce flap oscillation process, which occurs between the press wheel and the soil, was conducted. The simulation results determined the distribution of absolute deformation Δy_f and stress σ_f arising in each cell of the bounce flap's mesh. The dependencies of the maximum stress value $\sigma_{f\text{max}}$ and the safety factor k_f on the thickness of the bounce flap T_f , the heel height H_f , and its placement distance from the free end L_f were obtained for different materials (ABS, polyamide 6, and two-component polyurethane). By solving the multi-objective optimization problem, which focused on finding optimal values for two criteria, the following geometric parameters for the seed bounce flap were derived: $T_f = 6.5$ mm, $H_f = 12.4$ mm, and $L_f = 14.6$ mm.

As a result of studying the torsional deformation of the seed bounce flap on a specially designed laboratory setup, the torque required to twist the bounce flap by 70° was measured. The highest torque value, 112.8 N, was observed for Nylon, while the lowest values, ranging from 32–33 N, were recorded for Elasthan D100 and Elasthan D70. Nylon-CCF and TPU 40A exhibited similar torque values of 52.2 ± 2.8 N and 59.8 ± 3.0 N,

respectively. Meanwhile, the ABS samples failed at a twisting angle of $44 \pm 1^\circ$. In a study of bending deformation on the same laboratory setup, the force required to bend various samples by ± 0.015 m was determined. The highest force was recorded for the Nylon-CCF bounce flap (2.368 ± 0.018 N), while the lowest value was for Elastan D70 (0.655 ± 0.012 N). Based on long-term tests, fatigue curves were constructed for the bounce flaps made from different materials, considering forces at the upper F_{max} and lower F_{dmax} points of oscillation. To determine the most rational material for the seed bounce flap, the criterion that oscillation force should not decrease by more than 25 % during prolonged testing was used. The bounce flap made from TPU 40A withstood the highest number of oscillations, 3,701,000 cycles, while the ABS material endured the lowest, 818,000 cycles. Thus, TPU 40A was selected as the most rational material for further studies. It was calculated that the TPU 40A bounce flap can withstand 1,028 hours or 6,750 hectares of operation, exceeding the John Deere 90 Series seeder's maintenance interval of 6,000 hectares by 12.5 %.

As a result of experimental studies of the improved seed delivery system of the precision pneumatic seeder based on the John Deere 90 Series in laboratory conditions, patterns of change in the air flow velocity at the seed boot outlet (V_a^{out}), seed flow velocity for rapeseed and peas (V_p^{out}), seeding rate (N), and planting accuracy (coefficient of variation) δ were established. These parameters depended on the ratio of the seed brake outlet area to the inlet area (ε), air flow velocity at the inlet (V_a^{in}), seeder movement speed (V_s), and seed injection (metering) rate (Q_p). The results showed that increasing the air flow velocity at the inlet leads to an increase in the outlet flow velocity, which in turn affects the seeding accuracy and rate. The seeder's movement speed and seed injection rate significantly influenced the seeding rate but could reduce accuracy. The relationship between the ratio of the outlet area to the inlet area of the seed brake (ε), seeder movement speed (V_s), and seeding rate (N_t) was established, allowing for the achievement of maximum seeding accuracy (from 89.6 % to 94.3 %) and seed velocity at the seed boot outlet within a range of 1.1 m/s to 2.4 m/s. The resulting equations were used in the automated control system for the seed brake shutter.

Based on field experimental studies of the John Deere 90 Series precision pneumatic seeder's seeding section, the significant influence of the seed bounce flap and improved seed

brake design on planting accuracy (δ), plant stand density (N'), and yield (P) was observed. Statistical analysis of the experimental results, including variance analysis, showed that the most significant factors affecting seeding accuracy were the presence of the seed brake (42.09 %), the improved seed bounce flap (29.52 %), and the seeder's movement speed (20.43 %). High seeding accuracy ($\delta = 94.7\text{--}95.5$ %) was achieved when using the improved seed bounce flap and seed brake at a speed of 1 m/s, while the absence of the seed brake and the use of the standard bounce flap resulted in a significant reduction in accuracy ($\delta = 70.6\text{--}71.3$ %) at a speed of 4 m/s. The analysis of factors affecting plant stand density and yield also indicated the advantage of using the improved design. Data analysis showed varying degrees of influence of the seed brake and bounce flap designs on yield for different crops (rapeseed and peas). For peas, the most important factor was the seed brake (impact 46.94 %), while for rapeseed, the improved seed bounce flap was key (impact 44.71 %). Thus, the research results confirm the effectiveness of the improved seed brake and bounce flap designs, which can significantly increase planting accuracy by 24.9 % and yield of peas and rapeseed by 4.1 % and 4.9 %, respectively.

The techno-economic assessment showed that the use of the improved John Deere 1890 pneumatic seeder significantly increases the economic effect, especially with the presence of a seed brake and an improved seed bounce flap. The highest economic effect was observed at moderate seeding speeds: for peas at 2 m/s, it reached 1,188.14 UAH/ha, and for rapeseed at 3 m/s, it reached 1,667.83 UAH/ha. The break-even point for the additional capital investment in improving the seeder for these crops was 351 hectares for peas and 250 hectares for rapeseed.

Keywords: seed, seed material, soil, sowing, sowing, seed concentration, properties, sowing machines, seeder, sowing section, sowing device, coulter, disc, seed line, tranquilizer, retarder, sowing shoe, movement, sowing accuracy, sowing rate, soil environment, arable horizon, pre-sowing treatment, productivity, quality, separation, efficiency, numerical modeling, simulation, discrete element method, model, experiment, parameters, material, polymer, indicators, kinematic equations, compromise problem.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2022). Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 52: 86–98. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52.86-98. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу роботи сповільнювача насіння пневматичної сівалки).*

2. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2023). Дослідження чинників погіршення точності висіву пневматичними сівалками. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (121): 51–61. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-6. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і польових досліджень процесу висіву).*

3. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.**, Алієва О.Ю. (2024). Результати аналітичних досліджень заспокоювача насіння удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 1 (124): 73–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-8 *(Здобувачу належить проведення аналітичних досліджень роботи заспокоювача насіння).*

4. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Безверхній П. Є.**, Шаповал О. М. (2024). Обґрунтування конструктивних параметрів заспокоювача насіння висівної секції пневматичної сівалки. Вібрації в техніці та технологіях, 2 (113): 43–54. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і лабораторних досліджень коливань заспокоювача насіння).*

5. Aliiev E, **Bezverkhniy P.**, Dudin V., Aliieva O. (2024). Results of experimental studies on the improved seed delivery system of a pneumatic precision seeder. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2 (125): 7–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-1. *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень удосконаленої системи подачі насіння пневматичної сівалки).*

Патент України на корисну модель:

6. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Безверхній П. Є.** (2024). Патент на корисну модель України 157302, МПК А01С 7/20 (2006.01). Висівна секція пневматичної зернової сівалки. Заявник: Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Безверхній П. Є., № u202401647. Заявл. 02.04.2024. Опубл. 25.09.2024, бюл. № 39. *(Здобувачу належить ідея додати до складу висівної секції заспокоювач і сповільнювач насіння).*

Тези і матеріали конференцій:

7. Алієв Е., **Безверхній П.** (2022). Аналіз проблем пневматичних сівалок та шляхи їх вирішення. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина (15 березня 2022 р.). ІОК НААН, 61–62. *(Здобувачу належить проведення аналізу проблем пневматичних сівалок).*

8. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2022). 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 (20 травня 2022 року, м. Херсон). Херсон: ІЗЗ НААН, 158–159. *(Здобувачу належить аналіз шляхів підвищення ефективності пневматичних сівалок).*

9. Алієв Е., **Безверхній П.** (2022). Дослідження сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Шляхи інноваційного розвитку агровиробництва в Україні»: збірник наукових праць. Аграрна наука Західного Полісся. Рівне, 88–89. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу роботи сповільнювача насіння пневматичної сівалки).*

10. **Безверхній П.** (2022). Симуляція сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез

Міжнародної наукової інтернет-конференції (21 березня 2023 р.).ІОК НААН, 122–123.

11. **Безверхній П.** (2023). Результати чисельного моделювання процесу роботи пневматичної сівалки точного висіву. Інноваційні екологічнобезпечні технології рослинництва в умовах воєнного стану: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції (31 серпня 2023 року), 24–26.

12. **Безверхній П. Є.** (2023). Методика чисельного моделювання процесу висіву насіння пневматичною сівалкою точного висіву. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 4–6.

13. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2024). Експериментальні дослідження процесу висіву насіння базовою висівною секцією пневматичної сівалки John Deere 90 Series. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Наукові основи адаптивного землеробства» (16-17 травня 2024 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 353–355. *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і аналіз результатів).*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	25
1.1 Conservation agriculture – технології ґрунтозахисного та ресурсозберігаючого землеробства в Україні та Світі	25
1.2 Вплив сівби на ефективність вирощування сільськогосподарських культур ..	28
1.3 Аналіз конструкцій зернових сівалок точного висіву технології No-till	34
1.4 Аналіз конструкцій системи висіву пневматичних зернових сівалок точного висіву	45
1.5 Огляд аналітичних і експериментальних досліджень пневматичних систем зернових сівалок точного висіву	53
1.6 Висновки з розділу	58
1.7 Мета і задачі досліджень.....	60
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ	61
2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки.....	61
2.2 Фізико-математичний апарат руху насіння в системі подачі насіння пневматичної сівалки	64
2.3 Чисельне моделювання процесу висіву насіння базовою висівною секцією пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series.....	66
2.4 Моделювання функціонування сповільнювача системи подачі насіння	74
2.5 Аналітичні дослідження заспокоювача насіння	86
2.6 Симуляція коливань заспокоювача насіння.....	95
2.7 Чисельне моделювання процесу висіву насіння удосконаленою висівною секцією пневматичної сівалки.....	105
2.8 Висновки з розділу	110
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ	113

3.1	Мета і програма експериментальних досліджень.....	113
3.2	Методика лабораторних досліджень процесу деформації заспокоювача насіння	114
3.2.1	Виготовлення дослідних зразків заспокоювача насіння	114
3.2.2	Дослідження деформації кручення.....	116
3.2.3	Дослідження деформації згину	119
3.3	Методика експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної системи подачі насіння секції	122
3.4	Методика порівняльних виробничих випробувань удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву	126
3.5	Методика статистичної обробки експериментальних даних.....	131
3.6	Висновки з розділу	133
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВИСІВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЮ СИСТЕМОЮ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ	135
4.1	Результати лабораторних досліджень процесу деформації заспокоювача насіння	135
4.1.1	Дослідження деформації кручення.....	135
4.1.2	Дослідження деформації згину	135
4.2	Результати експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної системи подачі насіння.....	138
4.3	Результати порівняльних виробничих випробувань удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву	150
4.4	Висновки з розділу	155
5	РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	158
5.1	Впровадження результатів досліджень	158
5.2	Техніко-економічна ефективність	159
5.3	Висновки з розділу	163
	ВИСНОВКИ	164
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	169
	ДОДАТКИ	188

ВСТУП

Актуальність теми. Згідно даних FAO за останні 40 років, через ерозію і деградацію ґрунтів, світ втратив третину орних земель, а це близько 430 мільйонів гектарів. Ґрунтозахисне та ресурсозберігаюче землеробство (conservation agriculture (CA) – це система землеробства, яка може запобігти таким втратам за рахунок регенерації деградованих земель. CA базується на трьох принципах: мінімальний обробіток і порушення ґрунту, постійне покриття ґрунту поживними рештками та обов'язкові сівозміни. З відомих технологій вирощування с.-г. культур саме no-till завдає найменших пошкоджень ґрунту, а, отже, є найбільш перспективною з цієї точки зору. При цьому ключове місце в технології вирощування займає сівба, тому особливої уваги потребують саме посівні машини та комплекси.

Основним недоліком сучасних посівних машин з пневматичною системою висіву є висока нерівномірність розподілу посівного матеріалу по сошникам, що призводить до зменшення точності висіву, і як наслідок, нераціонального використання посівного матеріалу, зниження врожайності та зростання засміченості полів. При цьому на відстань між окремими насінинами впливає конфігурація елементів пневмосистеми сівалки, а саме насіннепроводу та розподільника потоку насіння. Сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) та заспокоювач (seed bounce flap) крім вказаного показника точності висіву в більшій мірі забезпечують вкладання насіння в борозну, що особливо актуально при використанні технології No-till, через високу концентрацію поживних залишків на поверхні ґрунту. Тому вирішення завдання по удосконаленню елементів пневматичної системи сівалки точного висіву та обґрунтуванню їх параметрів є актуальним і має важливе господарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, на яких базується дисертація, виконані у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) відповідно до програми науково-дослідних робіт: «Розробка наукових засад ризик-орієнтованого керування складними людино-технічними сільськогосподарськими системами» (№ ДР 0120U104862, 2021–2024 рр.).

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу сівби насіння культурних рослин шляхом удосконалення конструкцій елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів, та конструкційними матеріалами, які обумовлюють підвищений ресурс їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети було висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою підвищення ефективності процесу сівби насіння культурних рослин, а саме забезпечення високої точності висівів і підвищення ресурсу експлуатації елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки можна досягти за рахунок використання розробленого сповільнювача і удосконаленого заспокоювача насіння із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами.

Задачі дослідження:

– на основі патентно-інформаційного аналізу способів та засобів висіву насіння культурних рослин обґрунтувати шляхи підвищення ефективності пневматичних сівалок;

– удосконалити конструкцію системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву і обґрунтувати її конструктивно-технологічну схему;

– на основі аналітичних досліджень і чисельного моделювання процесу висіву насіння обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри сповільнювача і заспокоювача насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву;

– на основі лабораторних досліджень і чисельного моделювання обґрунтувати конструкційний матеріал заспокоювача насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву;

– розробити методику і провести багатофакторні дослідження із встановлення впливу режимних параметрів удосконаленої пневматичної системи подачі насіння висівної секції на показники якості процесу висіву;

– визначити економічну ефективність удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву і впровадити результати досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження: технологічний процес взаємодії елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із насінням культурних рослин.

Предмет дослідження: залежність показників якості висіву і ресурсу експлуатації від властивостей конструкційних матеріалів та конструктивно-технологічних параметрів елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву у відповідності із технологічними вимогами.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження були спрямовані на вивчення закономірностей взаємодії робочих елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву з насінням за допомогою методів теоретичної механіки, системного аналізу, механіки суцільного середовища, а також інструментів диференціальних і інтегральних обчислень та чисельного моделювання в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+. Експериментальні дослідження передбачали застосування як стандартних, так і спеціально розроблених методик, з використанням фізичних моделей і дослідних зразків робочих елементів, приладів та обладнання. Експерименти проводилися як в лабораторії, так і в умовах виробництва, з застосуванням методики планування багатофакторних експериментів. Обробка отриманих даних виконувалася за допомогою статистичних методів дисперсійного і регресійного аналізів та програмного забезпечення Microsoft Excel і Wolfram Cloud.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше:

– отримані аналітичні і емпіричні закономірності у вигляді рівнянь регресії другого порядку взаємозв'язку відношення площі випускних отворів до площі входу на сповільнювачі насіння удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки, швидкості її переміщення, швидкості потоку повітря і норми висіву, що дозволяє досягти максимальної точності висіву і мінімальної швидкості насіння на виході з висівного башмака;

– отримані аналітичні залежності впливу конструктивних параметрів заспокоювача насіння із профілем параболічної форми (товщина, кут нахилу, висота розміщення заспокоювача, висота п'яти і відстань її розміщення, координата фокуса

параболи) удосконаленої висівної секції пневматичної зернової сівалки на напруження і значення коефіцієнта запасу його міцності, а також кінематику руху насіння після вильоту її з висівного башмака і взаємодії із дном борозенки і заспокоювачем;

Отримали подальший розвиток:

– фізико-математичний апарат руху насіння, як дискретних елементів на основі пружно-демпферної контактної моделі Герца-Міндліна, у удосконаленій системі подачі насіння пневматичною сівалкою, який покладено в основу методики чисельного моделювання процесу точного висіву в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Практичне значення одержаних результатів. Удосконалену пневматичну сівалку John Deere 1890 введено у ПП «Архангельське». Результати вимірювань показують, що точність висіву удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 (із встановленим сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння) вища (92,1–95,2 %), ніж базової (82,1–87,3 %). Результати науково-технічної роботи у вигляді технічної і конструкторської документації на дослідний зразок сповільнювача насіння системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series прийняті на ТОВ «Агротек-Інвест». Конструкція заспокоювача насіння прийнята і введена на ТОВ «НВП» СОЮЗ-КОМПОЗИТ». Розроблені стенди для досліджень зусилля кручення і згину, методики моделювання процесу висіву насіння висівною секцією пневматичної зернової сівалки введено в освітні компоненти ОПП «Агроінженерія» і ОНП «Галузеве машинобудування» для студентів другого (магістерського) і третього (освітньо-наукового) освітніх рівнів вищої освіти ДДАЕУ.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконані спільно з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [118, 119, 120, 121] – аналіз техніко-технологічного оснащення процесу посіву насіння культурних рослин; [119] – конструктивно-технологічна схема удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки; [163, 164, 166, 167, 168, 169] – теоретичне обґрунтування конструктивно-

технологічних параметрів елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву; [188, 189] – проведення лабораторних і експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної сівалки.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались та отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науковій інтернет-конференції присвяченій 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (Україна, м. Запоріжжя, ІОК НААН, 15 березня 2022 р.); Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу» (Україна, м. Херсон, ІЗЗ НААН, 20 травня 2022 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Шляхи інноваційного розвитку агровиробництва в Україні» (Україна, м. Рівне, ІСГЗП НААН, 15 червня 2022 р.); Міжнародній науковій інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (Україна, м. Запоріжжя, ІОК НААН, 21 березня 2023 р.); II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні екологічнобезпечні технології рослинництва в умовах воєнного стану» (Україна, м. Київ, ІАП НААН, 31 серпня 2023 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (Україна, м. Дніпро, ДДАЕУ, 1 грудня 2023 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові основи адаптивного землеробства» (Україна, м. Дніпро, ДДАЕУ, 16-17 травня 2024 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження оприлюднені в 13 наукових публікаціях, серед яких: 5 статей у фахових наукових журналах України (категорія Б); 1 патент України на корисну модель; 7 матеріалів та тез у збірниках конференцій та інших наукових виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 248 сторінок, у тому числі 13 додатків на 61 сторінці. Обсяг основного тексту дисертації становить 187 сторінок, містить 73 рисунка, 28 таблиць. Список використаних джерел нараховує 193 найменування на 19 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Conservation agriculture – технології ґрунтозахисного та ресурсозберігаючого землеробства в Україні та Світі

Згідно даних FAO [1] за останні 40 років, через ерозію і деградацію ґрунтів, світ втратив третину орних земель, а це близько 430 мільйонів гектарів. Ґрунтозахисне та ресурсозберігаюче землеробство (conservation agriculture (CA) – це система землеробства, яка може запобігти таким втратам за рахунок регенерації деградованих земель. CA базується на трьох принципах: мінімальний обробіток і порушення ґрунту, постійне покриття ґрунту поживними рештками та обов'язкові сівозміни [2]. Розглянемо приведені принципи [3–5].

1. Скорочення обробки ґрунту – мета полягає в досягненні нульової обробки ґрунту (тобто без оранки і без передпосівної обробки ґрунту, посів проводиться прямим способом по поживних залишках), при цьому система може включати в себе прийоми з регульованою або стрічковою обробкою ґрунту, при яких обробляється не більше 20–25 % поверхні ґрунту;

2. Збереження відповідного рівня рослинних залишків та покриву на поверхні ґрунту (мульчування) що забезпечує:

- захист ґрунту від водної та вітрової ерозії;
- зменшення поверхневих стоків води та випаровування з поверхні поля;
- підвищення продуктивності ґрунту;
- поліпшення фізичних, хімічних та біологічних властивостей ґрунту,

пов'язаних з його довгостроковою та стійкою продуктивністю.

3. Використання сівозмін, у тому числі диверсифікованих (збагачені за видовим складом рослин сівозміни, що включають різні види культур (мінімум 3 види), що забезпечує:

- сприяння скороченню/пом'якшенню проблем, пов'язаних з можливою появою бур'янів, хвороб та шкідників;

– використання позитивного впливу окремих культур на ґрунт і на продуктивність наступної культури.

Щодо реалізації принципів СА, то до ґрунтозахисних та ресурсозберігаючих технологій землеробства можна віднести No-till, її розвиток Strip-till та Mini-till, які з'явилися у США. У 1930-х роках на територію США та Канади обрушилися численні пилові бурі, що стали наслідком екстенсивного сільського господарства та деградації ґрунтів. Після цього виникла ідея відмовитися від технології глибокої оранки. Широке поширення технології СА набули у 1980-х роках – за даними The Washington Post [6] внаслідок їх застосування ерозія сільськогосподарських земель у США у період 1982 по 1997 рік зменшилася на 40 %.

Якщо охарактеризувати приведені технології то:

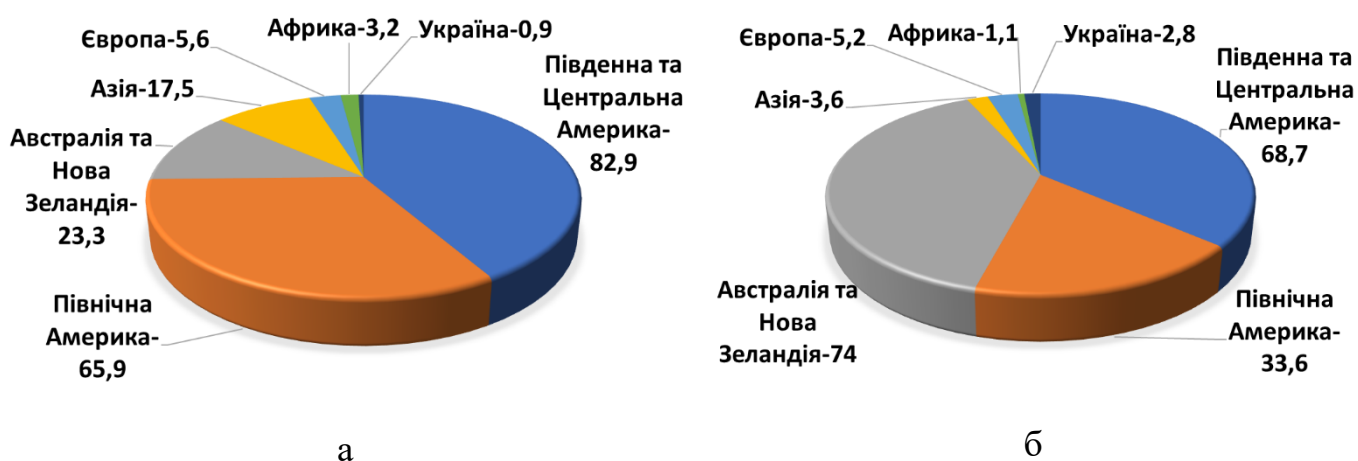
– технологія No-till (нульовий обробіток ґрунту) – це агротехнічна система вирощування сільськогосподарських культур, за якої посів проводиться без попередньої механічної обробки ґрунту (без оранки, боронування тощо). Насіння висівається безпосередньо в необроблений ґрунт через рослинні залишки попередньої культури. Основною метою No-till є збереження структури ґрунту, підвищення його родючості, мінімізація ерозії, покращення водозатримання і зниження витрат на паливо та робочу силу [7–17];

– технологія Strip-till (смуговий обробіток ґрунту) – це агротехнічна система, що поєднує елементи традиційної та нульової обробки ґрунту. Вона передбачає обробку ґрунту лише в вузьких смугах, де буде висіватися насіння, залишаючи міжряддя необробленими. Ширина оброблених смуг зазвичай становить 10-20 см, а глибина може варіюватися залежно від культур і умов вирощування. Найбільшого поширення ця технологія набула при вирощуванні просапних культур [18–21];

– технологія Mini-till (мінімальний обробіток ґрунту) – це система мінімального обробітку ґрунту, яка передбачає його поверхневе розпушування на глибину не більше 10–15 см. Основною метою цієї технології є зменшення механічного втручання у ґрунт, що дозволяє зберегти його природну структуру, підвищити вміст органічних речовин та зменшити ерозію [22–25].

Щодо розповсюдження у світі, то за даними [26] загальна площа ріллі, де використовується СА на 2019 рік склала біля 200 млн. га (рис. 1.1, а) або 10,7 % від загальної кількості – 1,87 млрд. га. Для порівняння у 2009 році загальна площа ріллі з використанням СА складала 106,5 млн. га, тобто спостерігається зростання на рівні майже 100 %. При цьому лідерами у розповсюдженні СА [27] є США – 43,2 млн. га, Бразилія – 32,0 млн. га, Аргентина – 31,0 млн. га, Канада – 19,9 млн. га та Австралія – 22,3 млн. га, що в сумі складає 148,4 млн. га, або майже 75 % від загального застосування СА у світі.

Що стосується питомої частки орних земель із застосуванням СА до загальної їх кількості по регіонам, то тут лідерами є Австралія та Нова Зеландія – 74 % (рис. 1.1, б).



а – площа орних земель з використанням СА за регіонами, млн. га; б - питома частка орних земель із застосуванням СА до загальної їх кількості за регіонами, %

Рисунок 1.1 – Розповсюдження СА у світі

В Україні площі орних земель на яких використовують СА з 0,1 млн. га у 2009 році зросла до 0,9 млн. га у 2023 році, що склало 2,8 % від загальної їх площі. Таким чином, динаміка поширення СА в Україні значно випереджає світову.

Якщо оцінювати різні технології ґрунтозахисного та ресурсозберігаючого землеробства (Conservation Agriculture), то саме No-till завдає найменших

пошкоджень ґрунту, а, отже, є найбільш перспективною з цієї точки зору. Крім того, за цією технологією різко зменшується парк техніки, необхідний для вирощування с.-г. культур. При цьому ключове місце в технології вирощування займає сівба, тому особливої уваги потребують саме посівні машини та комплекси.

1.2 Вплив сівби на ефективність вирощування сільськогосподарських культур

Вирощування сільськогосподарських культур складається з продовження різних фаз і процесів. У найширшому сенсі воно починається з виробництва насіння і закінчується, коли наступне покоління вже стало [28]. Якщо говорити спрощено, то на початку розвитку рослини присутні окремі фази, такі як проростання, сходи та становлення. Це робиться частково через те, що проростання та сходи легко визначаються як окремі точки в цьому процесі, а також для зручності обговорення. Обмеженням такого підходу є те, що фактори насіння, зокрема, мають значний вплив на всі фази [29, 30].

Розглянемо приведені фази детальніше. Проростання – це стадія розвитку насіння, коли вперше стає помітним активне зростання. Процес проростання починається з поглинання насінням води (імбібіція) і завершується початком подовження ембріональної осі, зазвичай корінця [31]. На практиці вважається, що насіння проросло, коли корінець прорвався на 2–3 мм із насінної оболонки [32]. Спочатку насіння поглинає воду за допомогою фізичного процесу, і хоча потреба в кисні збільшується на пізніших етапах проростання, поживні речовини з ґрунту не потрібні [33]. І проростання, і швидкість поглинання води залежать від температури. Основні агрономічні вимоги до проростання можна згрупувати як фактори, пов'язані з насінням, або як екологічні фактори, що впливають на доступність води, кисню та температуру [34–36].

Рівень порушення ґрунту в зоні насіння під час нарізання борозни має великий вплив на доступність вологи для проростаючого насіння. Природа та ступінь порушення в значній мірі залежать від конструкції сошника [37]. Коли пріоритетом

є становлення культури, ступінь порушення слід обмежити лише тим, що необхідно для досягнення достатньої структури ґрунту, щоб допомогти покрити насіння, забезпечити достатній контакт насіння з ґрунтом і, за необхідності, поліпшити зростання, пригнічене жорстким ґрунтом [38]. Загалом, менше за розміром насіння потребує дрібнішої структури посівного ложа для оптимального проростання та становлення [39].

Порушення ґрунту, яке перевищує ці вимоги, збільшує потенційні проблеми, такі як:

- втрати вологи з зони насіння через збільшене випаровування [38];
- змішування вологого та сухого ґрунту в безпосередній зоні насіння [37];
- зменшення водопроникнення з нижчих шарів профілю ґрунту [40].

У глибоких, рихлих посівних ложах сошник можна вибрати так, щоб ущільнити основу борозни, оскільки це зазвичай обмежує насіння вузькою вертикальною смугою і покращує перспективи для підйому води.

Конструкція сошника повинна бути такою, щоб:

- насіння розміщувалося у вологому ґрунті в основі борозни;
- сухий ґрунт не був поміщений безпосередньо на насіння під час етапу покриття.

При сівбі через пожнивні залишки, недопустимо, щоб сошник та загортач подавали їх в борозну для насіння. Потрапляння залишків у борозну може зменшити ступінь контакту насіння з ґрунтом [41], перешкоджати процесу покриття насіння і збільшити ймовірність фітотоксичних ефектів.

При виборі та налаштуванні пристроїв для ущільнення посівного ложа слід орієнтуватися на оптимізацію щільності ґрунту в зоні насіння для забезпечення контакту насіння з ґрунтом, переміщення води до насіння та мінімізації загальної втрати вологи з зони насіння [42]. Ущільнення посівного ложа також може зменшити ймовірність пошкодження комахами [43] і запобігти виштовхуванню насіння з ґрунту корінцями [41].

Основне порушення посівного ложа відбувається, коли потрібен повнозахватний обробіток для контролю бур'янів під час посадки. Щоб уникнути сівби насіння на межі оброблених і необроблених шарів, функції обробітку ґрунту та сівби слід розділити за глибиною. Інструменти для нарізання борозен повинні

бути налаштовані на трохи більшу глибину, ніж ті, що виконують лише обробіток ґрунту [44]. Це забезпечує розміщення насіння нижче за глибину обробітку і в умовах відносно неушкодженого ґрунту. Загальна концепція розділення глибини обробітку і сівби ілюструється на рис. 1.2.

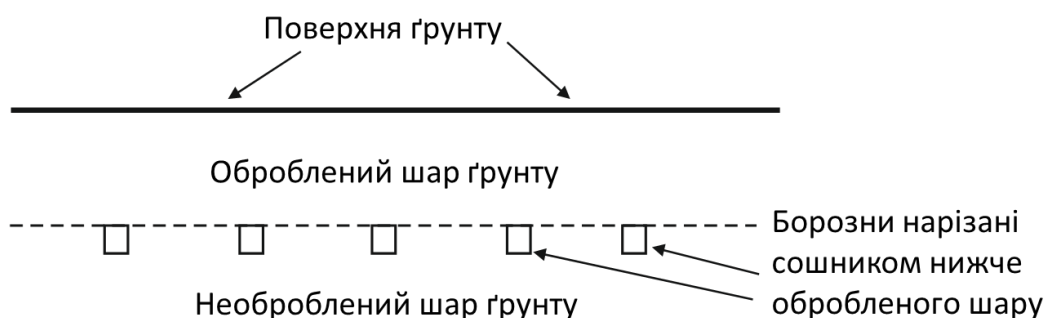


Рисунок 1.2 – Концепція розділення функцій обробітку ґрунту та посіву

Сходи, коли розвивається паросток і виходить на поверхню ґрунту [32], є одним із найбільш помітних етапів розвитку культури [45]. Між проростанням і сходами насіння повинно містити достатню кількість запасених мінеральних поживних речовин, щоб підтримувати ріст до того моменту, коли коренева система встановить достатній контакт із ґрунтом для забезпечення рослини поживними речовинами. Насіння також повинно мати достатню кількість запасеного вуглецю для підтримки росту, доки пагін не вийде на поверхню і не буде утворено ефективну фотосинтетичну площу [46].

Основними характеристиками цього етапу є ріст і розвиток кореня та пагона. Важливими стають фактори, які впливають на ріст і рух коренів і пагонів у ґрунті поблизу зони насіння, а також фактори, що впливають на постачання поживних речовин до кореневої системи та їхнє поглинання.

Оптимальна глибина посіву має два важливі компоненти: глибину борозни відносно початкової поверхні ґрунту і глибину шару ґрунту, що покриває насіння. Глибина від початкової поверхні ґрунту впливає на рівень та тривалість наявності вологи для насіння. Глибина шару ґрунту над насінням впливає на його

проростання. Якщо в поверхневому шарі ґрунту достатньо вологи, глибина борозни може бути встановлена для оптимального покриття насіння для проростання. Однак, якщо необхідно висівати глибше для того, щоб насіння опинилося у вологому шарі ґрунту, надмірне покриття може обмежити його проростання.

Для вирішення цієї проблеми використовуються різні способи. Наприклад, зайвий ґрунт, який не потрібен для оптимального покриття, можна перемістити в міжряддя за допомогою спеціального пристрою, що йде перед сошником (рис. 1.3).

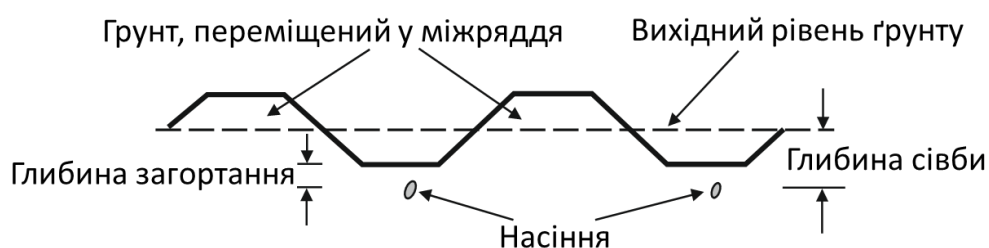


Рисунок 1.3 – Зміна профілю поверхні ґрунту для полегшення глибшого посіву до вологого шару

На етапі становлення паросток стає незалежним від запасів поживних речовин насінини. Його виживання значною мірою залежить від здатності адаптуватися до змін у наземному та підземному середовищі, а також конкурувати з іншими рослинами за воду, поживні речовини та світло. Методи попередньої підготовки ґрунту можуть суттєво вплинути на цей етап розвитку. Наприклад, ущільнені шари, утворені внаслідок обробітку або руху техніки, можуть обмежувати ріст коренів і рух вологи в зоні нижче від насіння. Поживність ґрунту залежить від внесення добрив і попередньої історії сівозміни.

Конкуренція між рослинами за воду, поживні речовини та світло має важливе значення для закріплення культури. У своєму огляді [45] дійшов висновку, що розкид у часі появи сходів становить значну частину варіації у вазі дорослих рослин, оскільки різниця в часі появи сходів має великий вплив на розмір паростка в момент, коли рослини починають змагатися за ресурси для зростання. Час появи

сходів має найбільший вплив, коли розкид великий, паростки мають високу відносну швидкість росту, густина рослин висока, а період до збирання врожаю короткий.

Густина рослин (тобто кількість встановлених рослин на гектар) впливає на ступінь конкуренції за ресурси під час становлення культури. На практиці потреби окремих рослин мають бути збалансовані з вимогами щодо максимізації врожаю [47]. Агронімічні дослідження показали, що потенціал багатьох видів культур залежить як від густоти рослин, так і від рівномірності їхнього розташування в посівах.

При визначенні оптимальної густоти посівів і відстані між рослинами (тобто відстані між рядами та між рослинами в ряду) для конкретної культури необхідно врахувати багато факторів. До факторів, що впливають на потенційну врожайність, належать кліматичні умови, час посадки, тип ґрунту та рівень вологості ґрунту. Інші фактори стосуються зручності виконання агротехнічних заходів. Наприклад, відстань між рядами може впливати на легкість міжрядної обробки та збір врожаю. Густина посівів і відстань між рядами можуть впливати на ріст і контроль бур'янів, ступінь вилягання рослин, розмір насінневих голівок, тощо, що, у свою чергу, може мати наслідки для росту культури, врожайності та збирання врожаю.

У деяких культур (зазвичай одностеблових, наприклад, соняшник і кукурудза) існує порівняно вузький діапазон густоти рослин, за якого можна очікувати оптимальних врожаїв, враховуючи певні кліматичні умови, тип ґрунту, вологість тощо. Для інших культур (особливо тих, що мають здатність кущитися, наприклад, пшениця, ячмінь, овес) існує ширший діапазон густоти, в межах якого потенційна врожайність значно не змінюється; головна вимога для досягнення врожайності - це густина рослин, яка перевищує мінімальне значення для конкретних умов.

Відстань між рослинами, як у рядках, так і між ними, може мати значення. Багато культур можуть переносити певні відхилення у рівномірності розміщення рослин без втрати потенційної врожайності, за умови, що загальна густина посівів перебуває в необхідних межах. Проте для деяких культур, таких як соняшник, сорго та більшість овочевих культур, потенціал врожайності може покращуватися за рахунок рівномірного розміщення рослин в межах оптимальної густоти [48].

Поєднання густоти посівів, вимог до відстані та методів розміщення насіння призводить до різних схем сівби. Можливі схеми сівби, що визначають просторову орієнтацію та розміщення насіння на полі, коротко описані нижче. До них належать: суцільний спосіб сівби; рядковий спосіб сівби; точний рядковий спосіб сівби; гніздовий спосіб сівби; квадратно-гніздовий спосіб сівби; рядково-лунковий спосіб сівби.

Суцільний спосіб сівби – це схема, що утворюється в результаті випадкового розкидання насіння на поверхні ґрунту (рисунок 1.4, а).

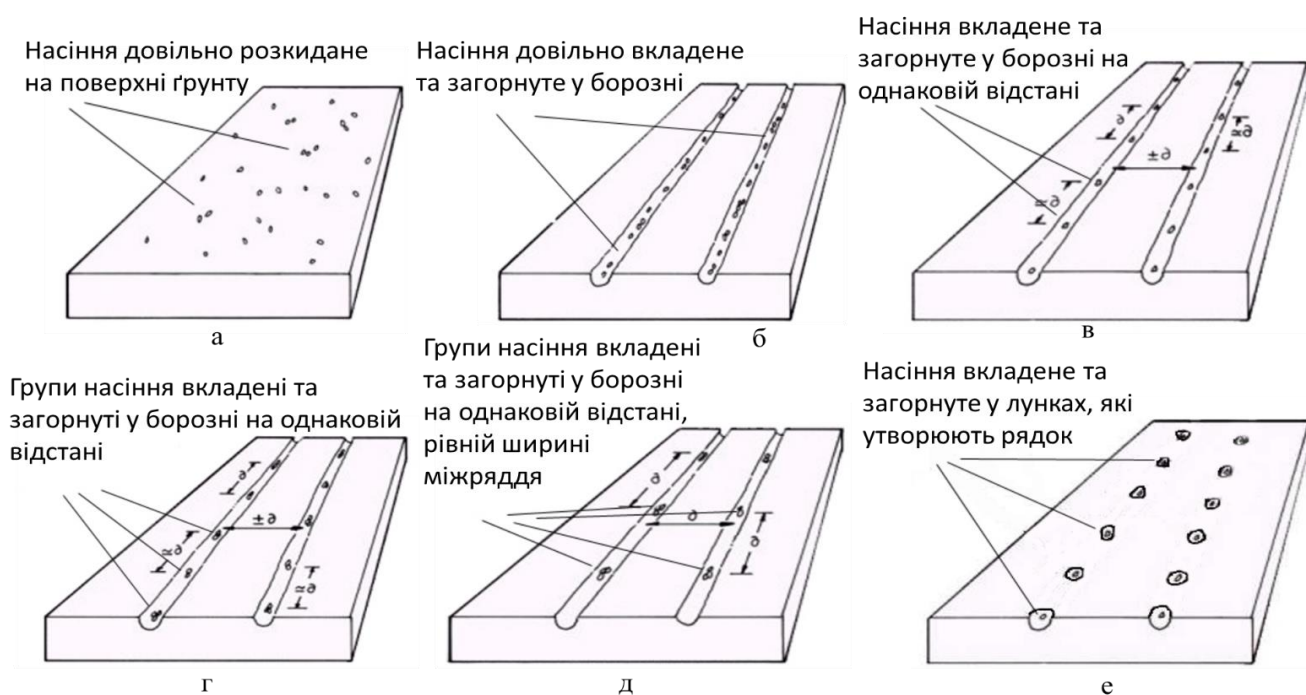
Рядковий спосіб сівби – схема, що утворюється в результаті випадкового розміщення (та подальшого загортання) насіння в борознах, що утворює певні ряди з випадково розташованими рослинами (рис. 1.4, б).

Точний рядковий спосіб сівби – схема, що утворюється в результаті точного розміщення (та подальшого прикриття) окремих насінин у борознах на приблизно рівних інтервалах, утворюючи певні ряди з майже рівномірно розташованими окремими рослинами (рис. 1.4, в).

Гніздовий спосіб сівби – схема, що утворюється в результаті точного розміщення (та подальшого загортання) груп (або гнізд) насіння у борознах на приблизно рівних інтервалах, утворюючи певні ряди з майже рівномірно розташованими групами рослин (рис. 1.4, г).

Квадратно-гніздовий спосіб сівби – схема посадки за квадратною сіткою, що утворюється в результаті точного та індексованого розміщення (та подальшого загортання) окремих насінин або груп насіння. Окремі рослини або групи рослин розташовані на рівній відстані одна від одної та вирівняні в перпендикулярні ряди (рис. 1.4, д).

Рядково-лунковий спосіб сівби – схема, що утворюється в результаті розміщення окремих або кількох насінин в індивідуальні лунки, які були «пробиті» або викопані в посівному шарі. Як показано рис. 1.4, е, лунки зазвичай вирівнюються, щоб утворити ряди з висадженими рослинами. Проте, коли використовуються ручні методи посадки, а не машинні, лунки можуть бути розташовані випадково по всій поверхні посівного шару.



а – суцільний спосіб сівби; б – рядковий спосіб сівби; в – точний рядковий спосіб сівби; г – гніздовий спосіб сівби; д – квадратно-гніздовий спосіб сівби; е – рядково-лунковий спосіб сівби

Рисунок 1.4 – Схеми розміщення насіння при різних способах посіву [49]

Таким чином можна стверджувати, що при будь якій технології вирощування сільськогосподарських культур сівба є визначальним фактором, який впливає на продуктивність рослин. При цьому найбільш використовувані способи сівби (точний рядковий, гніздовий, квадратно-гніздовий, рядково-лунковий) є різновидами рядкового. Окремо треба виділити точний рядковий спосіб так як він найкраще забезпечує становлення паростків при рівних умовах для глибини сівби та організації насінневого ложа. У зв'язку з цим далі проведемо аналіз конструкцій сучасних зернових сівалок точного висіву, які використовують в технології No-till.

1.3 Аналіз конструкцій зернових сівалок точного висіву технології No-till

Посівні машини можна розглядати як сукупність компонентів, кожен з яких використовується для виконання певної функції, наприклад, відкриття борозни,

дозування насіння, подачі насіння в борозну, закриття борозни та ущільнення насінневого ложа [50–59].

Компоненти сівалки можна згрупувати за функціоналом у наступні категорії:

- ґрунтообробна система;
- система регулювання глибини висіву;
- система дозування насіння;
- система подачі насіння.

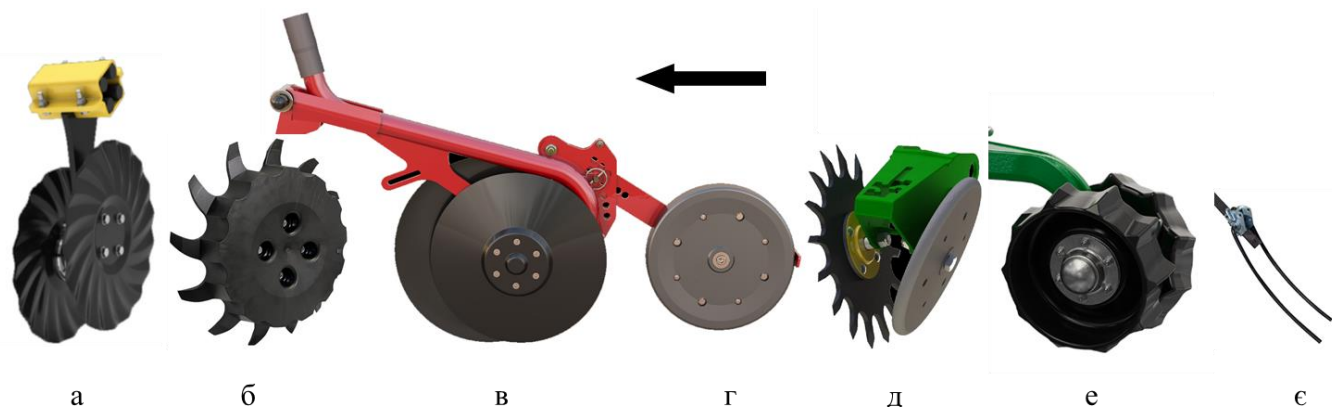
Однакові компоненти можуть виконувати різні функції (наприклад, дисковий сошник може використовуватися для розрізання залишків, відкриття або закриття борозни). Більше того, певний компонент може бути налаштований для досягнення різних результатів під час виконання конкретної функції (наприклад, нарізання борозни, але з можливістю регулювання для різного ступеня порушення ґрунту) [60, 61].

Функції, які виконують ґрунтообробні компоненти сівалки, включають нарізання борозни, розміщення насіння, закриття борозни та ущільнення насінневого ложа.

У випадку технології No-till, коли є високий рівень рослинних залишків і невідготовлений ґрунт, можуть знадобитися пристрої для розрізання або обробки ґрунту та залишків (пристрої для підготовки рядків) на додаток до пристрою для нарізання борозни. Подібним чином, ущільнення або вирівнювання насінневого ложа після висіву і закриття борозни може вимагати використання пристрою, що не прив'язаний до рядка (тобто пристрої для обробки всієї ширини, такі як борони або катки), на додаток до рядкового ущільнюючого пристрою (наприклад, котків). Ґрунтообробні компоненти іноді виконують кілька функцій, наприклад, одинарний дисковий сошник, що використовується для нарізання борозни, також може виконувати функцію розрізання рослинних залишків і ґрунту.

Відносно положення ґрунтообробних компонентів щодо напрямку руху сівалки приведено на рис. 1.5 [62–64, 134].

Для технології No-till всі приведені компоненти ґрунтообробної системи сівалки можуть бути використані, так як сівба проводиться по необробленому ґрунту [65, 66].



а – розрізання ґрунту та залишків; б – підготовка рядків; в – нарізання борозни;
 г – вдавлювання насіння в дно борозни; д – загортання борозни; е – прикочування
 (формування насіннєвого ложа); є – вирівнювання

Рисунок 1.5 – Відносне положення компонентів ґрунтообробної системи сівалки

Система регулювання глибини висіву забезпечує відповідність агротехнічним вимогам саме за цим показником. Оскільки глибина борозни вимірюється відносно поверхні насіннєвого ложа, до системи регулювання глибини висіву можна сформулювати наступні технологічні вимоги:

- нарізати борозну на необхідну глибину;
- підтримувати рівномірність глибини вздовж усієї довжини борозни;
- на багаторядних машинах підтримувати однакову глибину для всіх сошників по ширині машини.

Ефективна глибина посіву вимірюється як вертикальна відстань від насіння до поверхні ґрунту безпосередньо над насінням. Як було сказано в п. 1.2, для кожного виду рослин існує оптимальна ефективна глибина посіву, і для певних умов ця глибина зазвичай пов'язана з розміром насіння.

Крім впливу на загальний відсоток проростання і становлення рослин, рівномірність ефективної глибини посіву також впливає на однорідність проростання, оскільки насіння, посаджене на меншій глибині, зазвичай проростає швидше, ніж насіння, висіяне глибше.

Для виконання своїх функціональних завдань, вимоги до експлуатації механізмів регулювання глибини висіву можна сформулювати наступні технічні вимоги:

- підтримувати необхідну точність контролю глибини за різних типів ґрунту і умов поверхні ґрунту, які можуть виникнути під час посіву;
- легко налаштовувати всі сошники для зміни глибини борозни відповідно до вимог конкретної культури, типу ґрунту і умов, а також можливість регулювати окремі сошники для компенсації колій, утворених колесами, тощо.

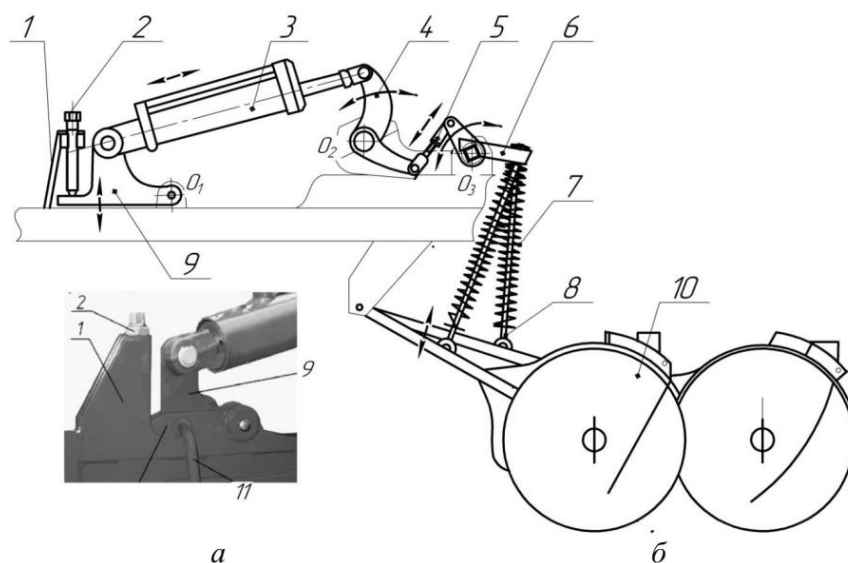
Існує велика кількість механізмів контролю глибини висіву, більшість з яких можна загалом розділити на системи «регулювання на рівні секції рами» та системи «регулювання на рівні окремого рядка».

До першого типу можна віднести універсальні зернові сівалки, наприклад, ASTRA-6 (рис. 1.6), ASTRA 3.6 STANDART, СЗД-У 25V, СЗД-360 [67, 68] які мають групове регулювання глибини висіву. Звичайно, за традиційної технології ґрунту, такий спосіб регулювання забезпечує встановлену глибину висіву, так як профіль рельєфу поля достатньо вирівняний [69, 70].

За технології No-till профіль рельєфу поля нерівномірний, особливо, якщо попередником були просапні культури, зокрема через наявність колій від попередніх операцій. В цьому випадку дотримання відповідної глибини висіву можна забезпечити лише використанням індивідуального регулювання глибини висіву для кожного сошника. Такий спосіб регулювання дозволяє забезпечити рівномірну глибину висіву по всій довжині борозни незалежно від рельєфу поверхні поля та ступеня підготовки ґрунту перед сівбою [71, 72].

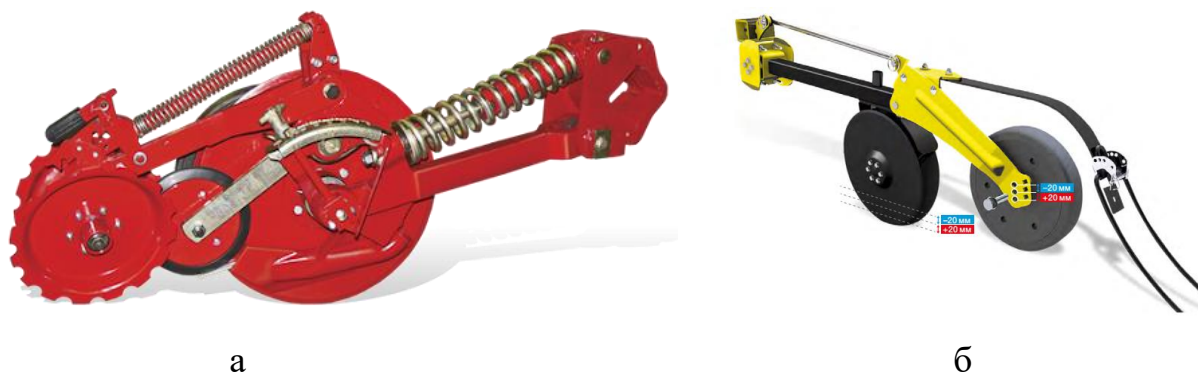
Як правило, у випадку індивідуального регулювання глибини висіву, ґрунтообробні елементи (нарізання борозни, вдавлення насіння в дно борозни, загортання борозни) компонуються в окрему висівну секцію, яка кріпиться до рами сівалки паралелограмною підвіскою (рис. 1.7).

Системи дозування насіння відбирають насіння з насінневого бункера та передають його в систему подачі, що транспортує насіння для розміщення в насінневе ложе.



а – гвинт регулювання глибини висіву; б – схема системи регулювання глибини висіву; 1 – кронштейн; 2 – гвинт; 3 – гідроциліндр підймання; 4 і 9 – важелі кріплення гідроциліндру; 5 – гвинтова передача; 6 – важелі підняття/опускання сошників; 7 – пружина; 8 – натискна штанга; 10 – сошник; 11 – фіксатор

Рисунок 1.6 – Система регулювання глибини висіву сівалки ASTRA-6 [142]



а – висівна секція сівалки ORION 9,6 (Ельворті, Україна); б – висівна секція сівалки OMEGA OO_L (BEDNAR FMT, Чехія)

Рисунок 1.7 – Висівні секції з індивідуальним регулюванням глибини висіву

Основні функціональні вимоги до систем дозування насіння полягають у тому, щоб [49, 73]:

- відбирати насіння з попередньо визначеною нормою/продуктивністю (наприклад, кг/га або насіння/метр довжини рядка);

- забезпечувати необхідну точність (розташування насіння) для виконання вимог схеми посадки (наприклад, звичайний посів, точний висів тощо);

- мінімізувати пошкодження насіння під час процесу дозування.

Для виконання своїх функціональних завдань експлуатаційні вимоги для систем дозування насіння включають:

- здатність дозувати різні типи насіння, які будуть висіватися машиною (наприклад, асортимент літніх культур або поєднання літніх і зимових культур);

- здатність дозувати насіння з різною нормою висіву, необхідною для відповідних культур і/або конкретних умов середовища (наприклад, зернові зазвичай висіваються з більшою нормою, ніж бобові; норми висіву зазвичай вищі для культур, що вирощуються на зрошуваних землях, ніж для культур, вирощуваних на сухих землях);

- здатність підтримувати попередньо визначену норму (продуктивність) і точність (відстань між насінням) за різних умов, які можуть виникнути під час посіву (наприклад, різні ґрунтові умови, нерівності поверхні, нахил поверхні, швидкість руху в полі, рівень насіння в бункері, залишки на поверхні, які можуть блокувати або зупиняти ланцюгові приводи тощо);

- високу надійність у роботі, що є важливим, враховуючи загалом вузькі терміни для проведення посівних робіт.

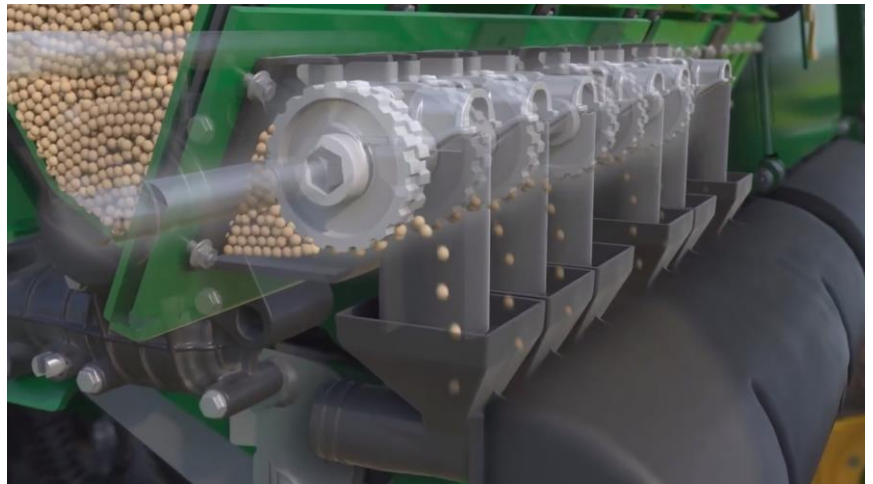
На сьогодні для дозування насіння у зернових сівалках використовують катушкові висівні апарати, при цьому їх можна розділити на дві основні групи – індивідуальні та централізованого дозування [142] (рис. 1.8). Регулювання норми висіву в сучасних зернових сівалках здійснюють шляхом безступінчастої зміни частоти обертання катушок [74].

Обидва типи використовують у сівалках, які працюють за технології No-till, індивідуальні – у механічних сівалках, централізовані – у пневматичних.

Системи подачі насіння включають пристрої, які транспортують насіння від дозатора до пристрою, що вкладає насіння на поверхню ґрунту або в борозну.



а



б

а – індивідуальний висівний апарат сівалки СЗМ «Велес-Агро»; б – висівний апарат централізованого дозування сівалки JD N500

Рисунок 1.8 – Котушкові висівні апарати

Основні функціональні вимоги до систем подачі насіння [49]:

- транспортувати насіння від місця виходу з дозатора до пристрою розміщення насіння;
- підтримувати точність дозування (розташування насіння) під час транспортування насіння;
- забезпечувати правильне розміщення насіння на поверхні ґрунту або в борозні, враховуючи як положення насіння в борозні, так і відстань між насінням вздовж рядка.

У сівалках, де зазвичай використовуються системи масового дозування, конструкція системи подачі насіння мало впливає на загальний результат, якщо потік насіння через систему не надмірно перешкоджається, а швидкість виходу насіння достатньо низька, щоб насіння вкладалося на дно борозни, а не поруч або на стінки борозни через відскок чи інші зсуви насіння при контакті з ґрунтом.

У точних сівалках конструкція системи подачі насіння має важливе значення, оскільки функціонально необхідно перенести точність дозування насіння (тобто

рівномірність у часовому інтервалі між окремими насінинами) на точність розміщення (тобто рівномірність відстані між насінням уздовж борозни або рядка).

Більшість систем подачі насіння можна умовно класифікувати на такі типи:

– Гравітаційне падіння: насіння падає під дією сили тяжіння без додаткової механічної допомоги. Ця система є простою та часто використовується в менш складних сівалках.

– Пневматична: насіння транспортується потоком повітря. Такі системи використовуються в точних сівалках, оскільки дозволяють забезпечити високу точність подачі насіння та рівномірність його розміщення в борозні.

Саме за системою подачі насіння зернові сівалки поділяють на механічні та пневматичні. Основними механічними сівалками (рис. 1.9), які застосовуються в Україні за технології No-till, є причіпні сівалки серії Alfa (Alfa-4, Alfa-6) АТ «Ельворті» (Україна), а також причіпні та навісні сівалки іноземних виробників, таких як Amazone (Німеччина), Kuhn (Німеччина), John Deere та Great Plains (США). Ці сівалки в основному використовуються в складі агрегатів для обробки ґрунту та сівби.

Хоча механічні сівалки мають просту конструкцію та надійно працюють, вони мають суттєві недоліки. Головними з них є обмежена ширина захвату та висока матеріалоемність.

Потенціал модернізації традиційних механічних сівалок, у яких ширина бункера для насіння дорівнює робочій ширині захвату, а також присутній індивідуальний висівний пристрій на кожен сошник, є досить обмеженим і фактично вичерпаним. Широкозахватні агрегати, створені на базі механічних сівалок, окрім вже згаданої високої матеріалоемності, страждають від значних додаткових витрат часу, пов'язаних з технічним обслуговуванням, переміщеннями та заправкою бункера насінням, а також мають низьку робочу швидкість (7–10 км/год).

Слід зазначити, що частка моделей закордонних сівалок з механічною системою висіву зменшується зі збільшенням їх ширини захвату. Наприклад, при ширині захвату до 3 м ці моделі складають 75 % усіх вироблених, тоді як при ширині захвату 3–4 м їх частка зменшується до 50 %. Останнім часом провідні

світові виробники механічних сівалок удосконалюють конструкцію бункера для насіння з метою збільшення його обсягу, додаючи додаткові елементи, що, в свою чергу, ще більше підвищує матеріалоемність сівалки.



а



б



в



г



д



е

а – Alfa-6 (Ельворті); б – JD 1590 (John Deere); в – SDM (Kuhn); г – PREMIA (Kuhn);
д – Cataya (Amazone); BD7410 (Great Plains)

Рисунок 1.9 – Механічні зернові сівалки технології No-till

Беручи до уваги недоліки посівних машин з механічними висівними системами, низка вчених вважає доцільним обмежити їхню робочу ширину певними рамками (максимум 5,4 м). Для створення широкозахватних посівних машин, здатних працювати на підвищених швидкостях, пропонується розробити принципово нову конструктивну схему.

Аналізуючи виробничий досвід провідних сільськогосподарських підприємств країни, можна зробити висновок, що одним із перспективних напрямків у розвитку посівних машин є розробка широкозахватних високопродуктивних сівалок і посівних комплексів із пневматичною системою висіву [75–78].

Поява в 60-х роках ХХ століття посівних машин із пневматичними системами висіву пов'язана з розробками шведської компанії Arvika Thermenius (сівалка EB із шириною захвату 2,52 м) та німецької компанії H. Weiste and Co (сівалка Accord із шириною захвату до 6 м).

Пізніше розробкою і виробництвом машин цього типу почали займатися компанії США (John Deere, Great Plains) та Європи (Kverneland, Gaspardo, Amazone, Kuhn, RabeWerk, Horsch, Kockerling, Lemken, Unia, Roge), які представлені на рис. 1.10.

Використання посівних машин з висівними системами пневматичного типу обумовлено такими перевагами (у порівнянні з аналогічними машинами з механічними системами висіву):

- продуктивність на 15–20 % вища, навіть при однаковій ширині захвату;
- можливість конструктивно створювати широкозахватні (від 6 м) високопродуктивні посівні машини та комплекси;
- не потрібно проводити додаткові операції для переведення машини з транспортного положення в робоче і назад;
- можливість використання бункера великого об'єму для посівного матеріалу, що зменшує кількість заправок під час роботи;
- низька питома матеріаломісткість.

Разом з перевагами, сівалки з пневматичною системою висіву мають такі недоліки:

- необхідність створення і підтримки повітряного потоку з постійними параметрами, індивідуально налаштованими для певних груп культур;

– ретельна підготовка посівного матеріалу для уникнення сторонніх предметів, що можуть призвести до забивання пневмотранспортних трубопроводів.



а



б



в



г



д



е

а – ORION 9.6 (Ельворті); б – N500 (John Deere); в – AUROCK 6000 R (Kuhn);
г – Boss (Agrisem); д – Primera DMC (Amazone); е – HTA-3510 (Great Plains)

Рисунок 1.10 – Пневматичні зернові сівалки технології No-till

Основним недоліком посівних машин з пневматичною системою висіву є висока нерівномірність розподілу посівного матеріалу по сошникам. У деяких випадках нерівномірність може досягати 15,5 % і більше при агротехнічно допустимих 5 % для зернових і 6 % для зернобобових культур, що призводить до нераціонального використання посівного матеріалу, зниження врожайності та

зростання засміченості полів. Це зменшує ефективність використання пневматичних сівалок. Тому удосконалення систем висіву пневматичних сівалок є актуальним завданням у сфері механізації посіву.

1.4 Аналіз конструкцій системи висіву пневматичних зернових сівалок точного висіву

Пневматичні системи подачі насіння зазвичай використовуються на багаторядних сівалках, оснащених одним центрально розташованим бункером для насіння. Насіння дозується в подаючу трубу, де його транспортує повітряний потік до окремих сошників, рівномірно розміщених по всій ширині машини. Пневматичні системи подачі насіння можна розділити на два загальні типи:

- системи, призначені тільки для «подачі» насіння;
- системи, призначені для «подачі та розподілу» насіння.

У системах «тільки подача» насіння дозується безпосередньо в трубу, яка доставляє його до борозни за допомогою повітряного потоку в трубі. Система дозування насіння з барабанним типом подає насіння в окремі труби, що транспортують насіння до відповідного сошника. Кожен дозатор, розташований під загальним центрально розташованим бункером для насіння, подає насіння в трубу, яка пневматично транспортує його до сошника. У цьому випадку вентилятор має чотиристоронній колектор, який подає повітря в чотири окремі труби. Кожен дозатор насіння призначений для кожної труби, і кожна труба безпосередньо доставляє насіння до сошника.

Пневматичні системи подачі та розподілу насіння складають основу пневматичних сівалок, які можуть бути як окремими машинами, так і додатковим обладнанням для ґрунтообробної техніки, такої як чизелі, культиватори та скарифікатори.

Конструкція таких систем може значно відрізнятися, але суть полягає в тому, що насіння для всіх або кількох сошників дозується в одну трубу, де його пневматично транспортують до розподільчої головки. Розподільча головка рівномірно розподіляє

потік повітря (а отже й насіння) між кількома виходами, які розташовані симетрично навколо головки. Кожен вихід доставляє насіння безпосередньо до сошника або до вторинної розподільчої головки, де процес повторюється.

Впровадження сівалок з централізованим дозуванням почалося завдяки норвезькому агроному В. Стокланду, який розробив центробіжний висіваючий апарат, що пізніше був використаний компанією «Глобус Maschinenfabrik» на сівалці Stokland. Проте через значні конструктивні та технологічні недоліки його ідея не отримала широкого застосування.

Подальший розвиток пневматична висівна система централізованого дозування отримала в Німеччині у 80-х роках ХХ століття на сівалках Accord, коли вперше почалося масове виробництво сівалок з пневмомеханічним висівним апаратом. Одноступеневе розподілення насіння було реалізоване також на сівалках і посівних агрегатах таких фірм, як Kverneland, Gaspardo, Amazone, Kuhn, Rabe.

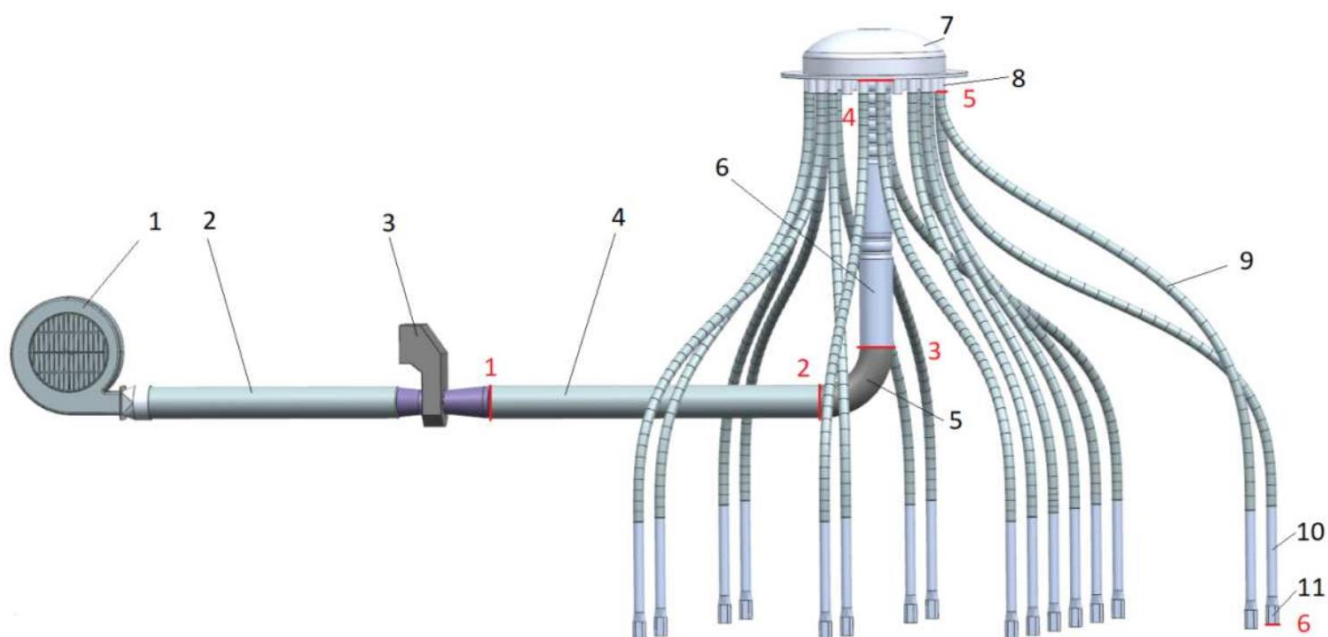
Перевага цієї системи полягає в її універсальності, оскільки вона дозволяє висівати насіння з різними фізико-механічними властивостями. Використання комбінованої котушки дозволяє висівати як великі насінини зернових, середні насінини бобових, так і дрібні насінини трав і проміжних культур.

Основними елементами системи висіву з пневматичним транспортуванням посівного матеріалу в сошники є бункер, дозатор, пристрій для введення посівного матеріалу в повітряний потік (живильник), вентилятор, пневмопровід, розподільний пристрій і насіннепровід (рис. 1.11). Схема, приведена на рис. 1.12 ілюструє технологічний процес роботи пневматичної сівалки.

Якщо розглянути приведені на рис. 1.11 та 1.12 схеми з точки зору рівномірності подачі насіння, то можна виділити складові, які на неї впливають найбільше. Це транспортування – пневмонасіннепровід; розподіл – розподільник; подача до сошників – насіннепровід до сошників; вкладання в борозну – сошник (башмак). Розглянемо ці складові детальніше.

Рівномірний розподіл насіння в більшості машин залежить від однакової кількості повітря, що проходить через кожен сегмент системи після кожного

наступного поділу. Найважливіше, що слід враховувати, це те, що повітря і насіння будуть рухатися шляхом найменшого опору [79, 80].



1 – вентилятор; 2 – повітропровід; 3 – ежектор для подачі посівного матеріалу;
 4 – горизонтальний трубопровід; 5 – шарнірне коліно; 6 – вертикальний трубопровід;
 7 – розподільник; 8 – розподільна труба; 9 – насіннева трубка; 10 – сошник; 11 – сопло сошника

Рисунок 1.11 – Пневматична система сівалки з пневматичним висівом [100]

Якщо один із вихідних насіннепроводів буде значно коротшим за інший, то через коротший насіннепровід буде проходити більше повітря та насіння, оскільки в ньому менший опір. Якщо обидва вихідні насіннепроводи мають однакову довжину, але один йде прямо, а інший має кілька вигинів і змін напрямку, то через прямий насіннепровід пройде більше повітря і насіння, оскільки в ньому менший опір. Якщо обидва насіннепроводи мають однакову довжину, але один лежить горизонтально, а інший направлений вертикально вгору, це створить більший опір потоку повітря та насіння [81, 82].

Розподільчі пристрої пневматичних зернових сівалок мають значний вплив на якість розподілу насіння між насінневими лініями. Конструкція розподільчих систем

визначає поперечну та поздовжню рівномірність висіву, а також ступінь травмування насіння. Виробники посівної техніки спрямовані на покращення рівномірності розподілу насіння через насінневі лінії.

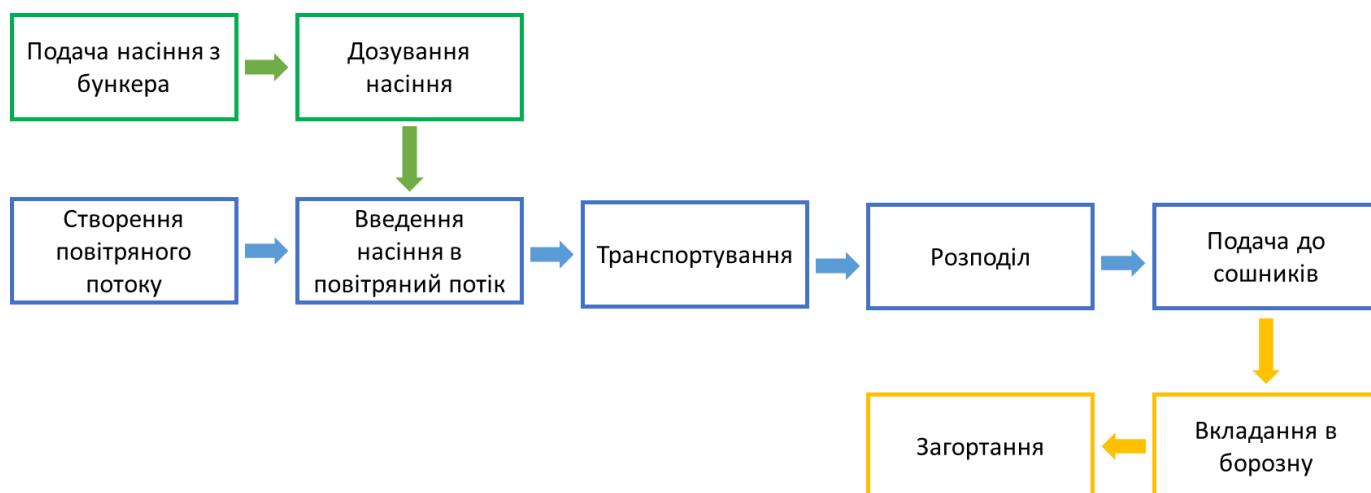


Рисунок 1.12 – Схема технологічного процесу сівалки з пневматичною системою висіву

На основі аналізу літературних джерел [83–86] встановлено, що існує два основні типи розподільчих пристроїв пневматичних зернових сівалок: вертикальні (рис. 1.13, а) та горизонтальні (рис. 1.13, б).

Вертикальна розподільча система складається з пневматичної труби, що обертається під прямим кутом, та головки, яка являє собою тіло обертання з радіальними вихідними трубками і відбивною поверхнею всередині. Вертикальні дозатори насіння зазвичай відрізняються за формою відбивної поверхні подаючої колони. Існують конструкції вертикальних дозаторів, у яких зерново-повітряна суміш рухається вгору по падаючій колоні, а також такі, де вона рухається вниз. Різні схеми розподільників насіння показані на рис. 1.13. Вертикальні розподільчі пристрої є простими та надійними, проте вони характеризуються високим енергоспоживанням, яке пов'язане з необхідністю підняття зерново-повітряної суміші на висоту відбивної поверхні [87, 88].

Конструкції дозаторів насіння з фіксованими відбивними поверхнями (рис. 1.14, а, б) широко використовуються завдяки їх простоті та надійності. Форма

відбивної поверхні може бути різною: плоскою, пірамідальною, сферичною, конічною тощо. Використання дозаторів цього типу дозволяє досягти рівномірності розподілу насіння між насінневими лініями, за умови використання турбулізаторів, на рівні 90%.



а



б

а – вертикальний; б – горизонтальний

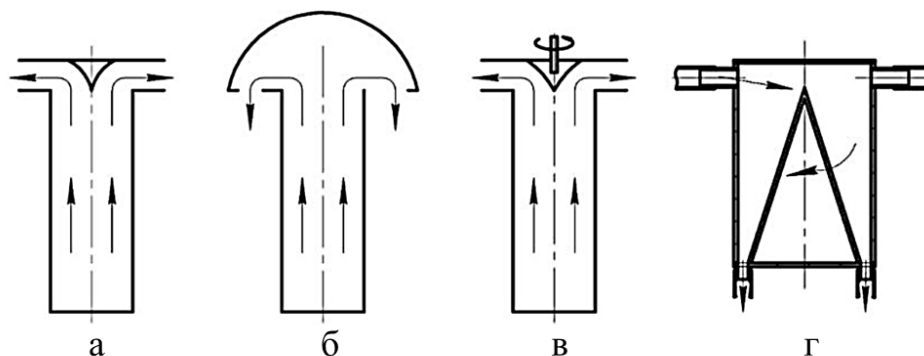
Рисунок 1.13 – Типи розподільчих пристроїв [88]

Активні системи розподілу (рис. 1.14, в) мають обертову або вібруючу відбивну поверхню з лопатями та направляючими в конструкції, вони можуть бути реактивними або приводними. Розподільчі пристрої цього типу складні за конструкцією та технологічним налаштуванням, їх надійність нижча, вони незначно покращують рівномірність розподілу насіння в зоні живлення.

Важливий вплив на рівномірність розподілу насіння має також рівномірність розподілу в поперечному перерізі подаючої пневмотруби. Для симетричного подавання зерново-повітряної суміші використовуються різні турбулізатори та направляючі насіння.

Горизонтальні розподільники агрегату складаються з горизонтальної пневмотруби, з'єднаної з розширювальною камерою, в якій розташовані випускні труби. Горизонтальні розподільники насіння забезпечують належну рівномірність

розподілу насіння між насінневими лініями, мають низьке енергоспоживання, але неефективно працюють на схилах та не здатні обслуговувати велику кількість сошників. Незважаючи на описані переваги, горизонтальні системи розподілу не отримали широкого застосування на пневматичних зернових сівалках.



а, б – з нерухомими відбивними поверхнями;

в – з обертовою відбивною поверхнею; г – центрифужного типу

Рисунок 1.14 – Схема вертикальних розподільників насіння [88]

Використання сумісного внесення добрив разом із насінням потребує вищої швидкості потоку повітря у насіннепроводі для доставки обох продуктів до сошників, особливо для широкозахватних сівалок і вищих швидкостей сівби. Однак із підвищенням швидкості потоку повітря зростає ризик того, що насіння (добрива) будуть видуватись із борозни. Щоб уникнути засмічення насіннепроводів, також збільшують швидкість потоку повітря, що призводить до зростання випадків викиду насіння із посівного ложа. Останнім часом в пневматичних сівалках почали застосовувати сповільнювачі насіння (seed brake), які забезпечують зниження швидкості насіння перед подачею в борозну.

Відома висівна секція сівалки [89], яка містить раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння. Недоліком такої висівної секції є висока швидкість повітряного потоку у

насіннєвому каналі висівного башмака. Через це підвищується ризик того, що насіння буде травмуватися при ударі і може вилетіти з борозенки, тим самим не потрапити у посівне ложе.

Наприклад, фірма Needham Ag Technologies (США) пропонує сповільнювач насіння, який представляє собою перфоровану ємність з відводами для підключення насіннєпроводу (рис. 1.15, а) [90]. Зігнута форма сповільнювача насіння зумовлена ергономічним розташуванням його під елементами рами пневматичної зернової сівалки. Однак дана форма призводить до нерівномірного проходження потоку повітря крізь сповільнювач, виникнення турбулентності, що спричиняє хаотичний рух насіння і, відповідно до цього, зменшення точності висіву. Перфорація в корпусі сповільнювача дозволяє скидати надлишковий тиск, тим самим сповільнюючи насіння перед подачею до сошника. Недолік такої конструкції – відсутність регулювання ступеня скидання тиску в насіннєпроводі залежно від виду насіння, норми висіву тощо.

Ще одне рішення пропонує фірма RED E, LLC (США) (рис. 1.15, б) [91]. Це рішення побудовано на принципі дії циклона і являє собою закручену спіраль з верхнім відводом повітря. Даний сповільнювач також нерегульований, крім того, при високих швидкостях потоку повітря та сівбі дрібнонасінних культур, можливе видування насіння разом з надлишками повітря.

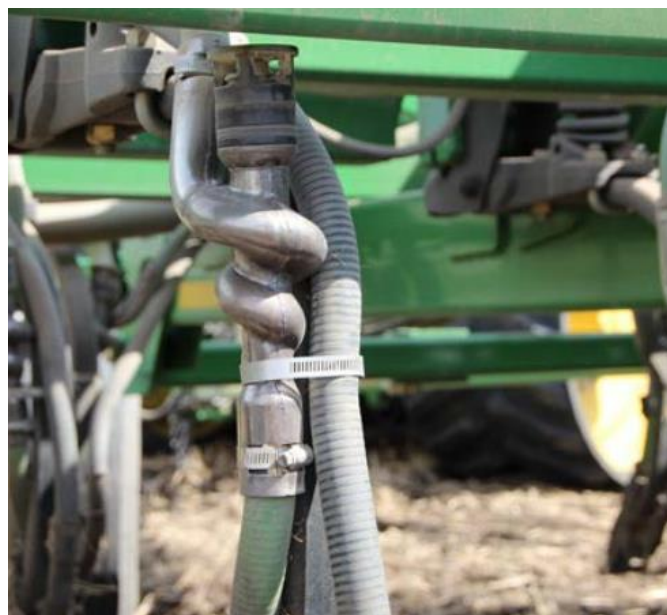
При сівбі пневматичними сівалками виникають труднощі «утримання» насіння в посівній борозні, особливо при їх використанні в технології No-till, при сівбі в ґрунт з великою кількістю пожнивних залишків. Ця проблема стає ще більш актуальною під час роботи на високих швидкостях та з малою глибиною загортання насіння. З висівного каналу сошника насіння вилітає у борозну з високою швидкістю, обумовленою повітряним потоком, яким воно транспортується. Залежно від напрямку вильоту насіння можливі два варіанти: насінина відбивається від стінок борозни і вилітає за її межі, або одразу спрямовується поза межі борозни.

Для контролю потрапляння насіння від системи дозування в борозну поруч із лезом сошника використовують насіннєпровід або «башмак» (seed boot). Часто до

його задньої частини підвішується гнучкий подовжувач – заспокоювач насіння (seed bounce flap) (рис. 1.16), щоб зменшити виліт насіння з борозни [92, 93].



а



б

а – Needham Ag Technologies; б – RED E, LLC

Рисунок 1.15 – Сповільнювач насіння

Проблема ускладнюється тим, що насіннепровід і внутрішній канал башмака виготовлені під кутом назад, щоб створити заднє «виштовхування» насіння на дні насіннепроводу. Це робиться для мінімізації відскоку насіння, викликаного різницею між швидкістю руху сівалки і нерухомим ґрунтом. Однак такий сильний нахил назад посилює проблему, викликаючи відскок насіння, його видування повітряним потоком або викидання насіння із борозни обертанням леза сошника.

Додатковою вимогою, яку можна поставити до заспокоювача є його надійність та довговічність. Існуючі заспокоювачі виготовляють з полімерних матеріалів, при цьому вони працюють в умовах жорстких механічних навантажень та піддаються підсиленій дії абразивного тертя. Вихід з ладу заспокоювача під час сівби призводить до погіршення її якості та додаткових витрат часу на заміну.



Рисунок 1.16 – Заспокоювач насіння [90, 132]

Таким чином, на точність висіву, а саме на відстань між окремими насінинами, впливає конфігурація насіннепроводу та розподільника потоку насіння. Сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) та заспокоювач (seed bounce flap) крім вказаного показника точності висіву в більшій мірі забезпечують вкладання насіння в борозну. В зв'язку з цим, проведемо огляд досліджень пневмосистеми зернової сівалки точного висіву та її елементів.

1.5 Огляд аналітичних і експериментальних досліджень пневматичних систем зернових сівалок точного висіву

На сьогоднішній день однією з найгостріших проблем сучасних пневматичних сівалок є низька точність поперечного розподілу (поперечна нерівномірність висіву) [94]. Точність розподілу насіння між рядами зазвичай оцінюють за коефіцієнтом варіації (ISO-7256/2). Відповідно до агротехнічних вимог, коефіцієнт варіації розподілу насіння має бути нижче 8 % для зернових культур і нижче 12 % для добрив [95]. Яцкул А. [96] зазначив, посилаючись на дослідження Маккея [97], що через фундаментальну неможливість досягти на той час показників рівномірності розподілу насіння, наближених до нормативних вимог (оскільки вони базувалися на

показниках механічних сівалок), самі вимоги було змінено. У оновлених технічних вимогах вибіркоче значення коефіцієнта варіації було збільшено до 15 % [96, 98].

Незважаючи на те, що пневматичний висів використовується вже більше 50 років, було реалізовано невелику кількість технічних рішень для збільшення рівномірності розподілу насіння. Існує два основні типи розподільників – горизонтальні та вертикальні [99, 100].

Найбільшою перевагою горизонтальних розподільників є відносно низьке енергоспоживання при створенні більшого обсягу повітряного потоку. Втрати енергії в цьому випадку складаються з лінійних втрат тиску та втрат через поздовжнє розширення розподільника. Відсутність вигинів у насінневих трубах полегшує їх встановлення та зменшує їхню довжину, що позитивно впливає на енергоефективність. Основна проблема полягає в розподілі насіння в розподільнику вздовж насінневих труб через вплив сили тяжіння [101].

Вертикальні розподільники застосовуються частіше. Ряд дослідників вивчають вертикальні розподільники, розташовані безпосередньо над ежектором подачі насіння [102, 103]. Однак такі конструкції зменшують корисний об'єм бункерів, робочу ширину агрегату та знижують термін служби насінневих труб. Тому використовується віддалене розташування розподільника. У цьому випадку застосовуються панорамні пристрої або коліна. Велика кількість дослідників займалася вдосконаленням пневматичних систем висіву цього типу. У роботах [104] досліджували вплив радіуса вигину коліна панорамного пристрою та висоти вертикального трубопроводу з турбулізуючими пристроями.

У роботах [84, 105–107] з використанням чисельного моделювання досліджували вплив швидкості потоку та параметрів насіння і нахилу сівалки на нерівномірність розподілу насіння (рис. 1.17).

Авторами [108, 109] було проведено чисельне моделювання характеристик руху насіння ріпаку у двофазному потоці розподільної головки централізованого дозувального пристрою з пневматичним приводом на основі сполученого моделювання з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD) та методу дискретних елементів (DEM).

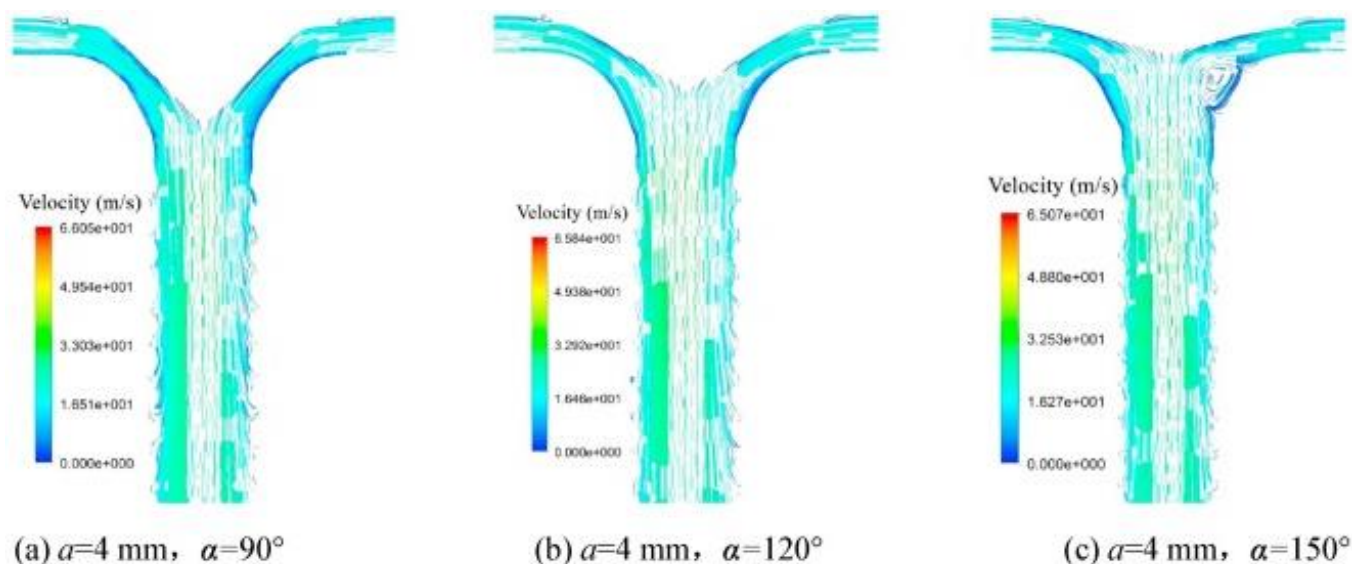


Рисунок 1.17 – Результати чисельного моделювання перерозподілу швидкості насіння в розподільнику при різних кутах нахилу [108]

Дослідження роботи пневматичних систем проводили як експериментальним шляхом, так і чисельно на 3D-моделях [110] (рис. 1.18), щоб встановити нерівномірність процесу висіву. Вони отримали результати з гарною збіжністю отриманих даних та експериментальних результатів [111].

Відомі результати взаємодії повітряного потоку із зернами різної щільності при різній турбулентності потоку (рис. 1.19) [112].

Результати чисельного моделювання в роботах [84, 113–116] стали основою для визначення функціональних залежностей взаємозв'язку між швидкістю аеропродуктового потоку та концентрацією висівного матеріалу в продуктопотоці за показниками його руху. У числовому моделюванні передбачалося, що швидкість потоку на поперечному перерізі початкової ділянки моделювання є постійною та дорівнює заданому значенню.

Тобто розглядався випадок ідеальної подачі аеропродуктового потоку через його рівномірність на зазначеному поперечному перерізі. Під час створення числових моделей використовувалися конструкції розподільників (рис. 1.20) з увігнутою поверхнею ковпака [114], плоским ковпаком [84] та ковпаком з направляючим конусом [113].

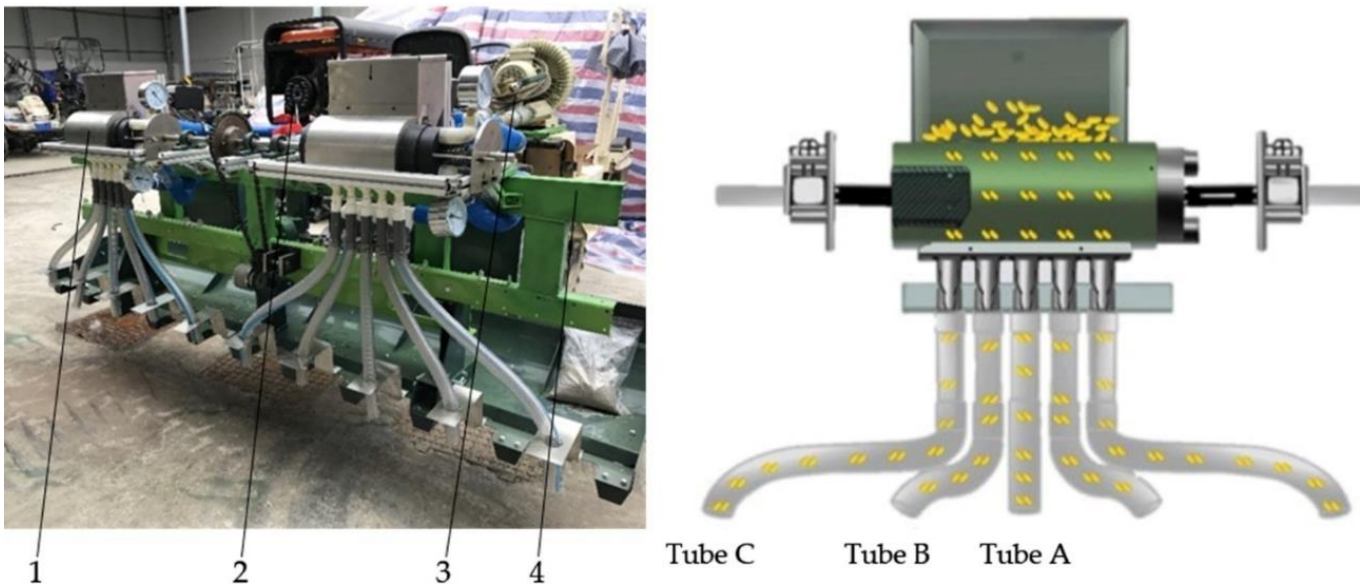


Рисунок 1.18 – Експериментальна та віртуальна модель розподільника [110]

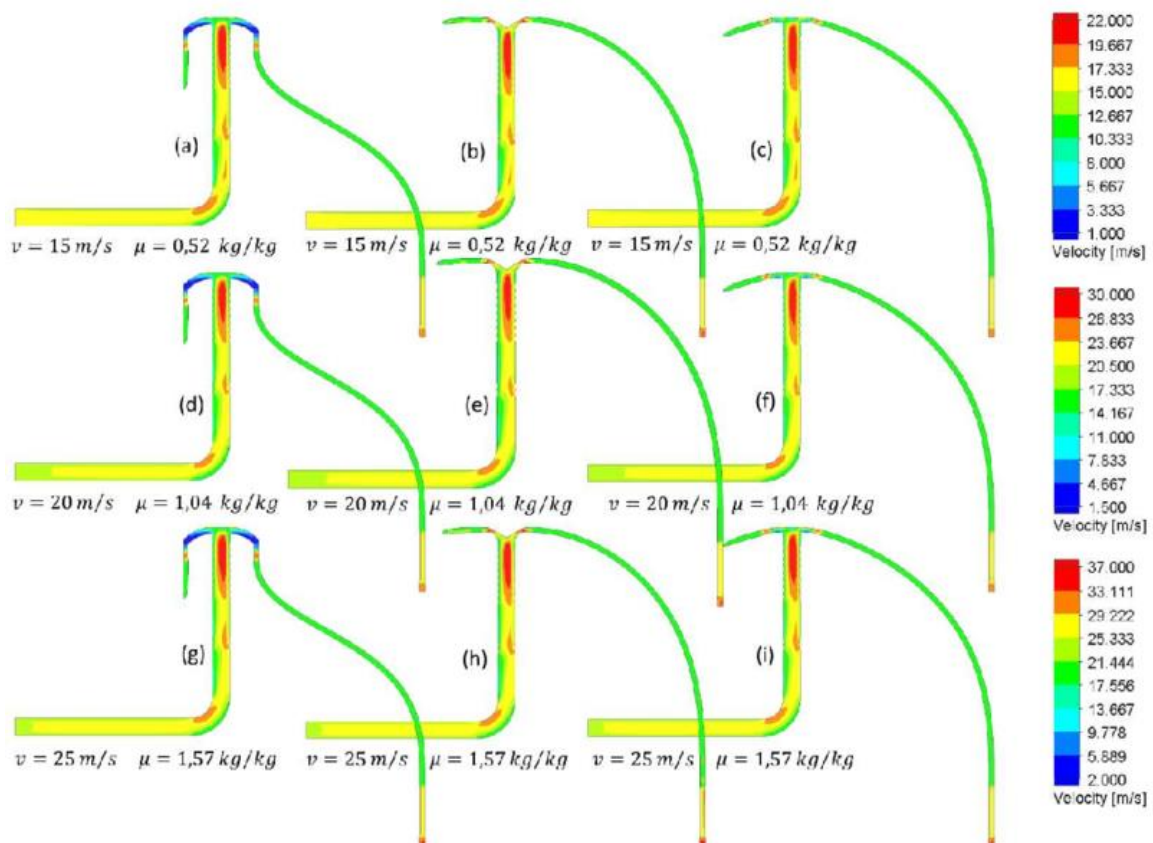
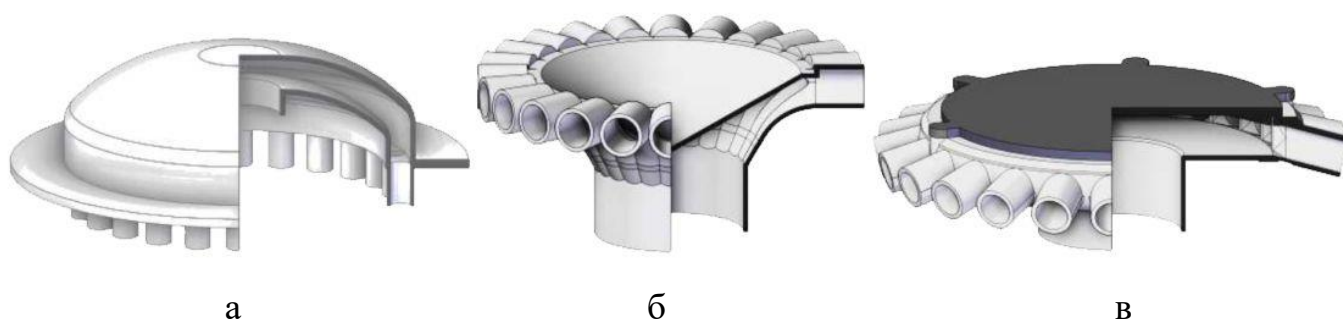


Рисунок 1.19 – Результати чисельного моделювання швидкості аеропродуктового потоку сівалки залежно від витрати на вході в горизонтальний трубопровід v (м/с) та концентрації висівного матеріалу μ [112]

Щоб можна було порівняти конструктивні параметри різних розподільників, модель розподільника для 24 вихідних труб була модернізована, а структура масштабована для відповідності діаметру вхідного вертикального трубопроводу діаметром 104 мм. Швидкість аеропродуктового потоку під час моделювання змінювалася в інтервалі $v = 15\text{--}25$ м/с, концентрація висівного матеріалу в повітряному потоці знаходилася в межах $\mu = 0,54\text{--}1,57$.



а – з увігнутою поверхнею ковпака розподільника [114]; б – ковпак з направляючим конусом [113]; в – плоский ковпак [84]

Рисунок 1.20 – Досліджувані розподільники пневматичної системи сівалки

У роботі [117] моделювання методом обчислювальної гідродинаміки (CFD) насіння сої представлені як сферичні, тверді та рівномірні за розміром частинки (рис. 1.21). CFD-моделювання суміші повітря і насіння виконувалось за допомогою програмного забезпечення ANSYS Fluent, а траєкторії частинок обчислювались з використанням підходу Лагранжа. Використовується, також, метод двостороннього зв'язку, названий дискретною фазовою моделлю (DPM).

Таким чином, можна стверджувати, що моделювання методом обчислювальної гідродинаміки (CFD) та чисельне моделювання показали, що такі параметри, як швидкість потоку повітря і насіння, концентрація висівного матеріалу та конструктивні особливості розподільників значно впливають на рівномірність висіву. Отримані результати чисельного моделювання, як у експериментальних, так і в контрольованих умовах, продемонстрували високу збіжність з лабораторними

даними, що підтверджує ефективність використання CFD для оцінки характеристик пневматичних сівалок.

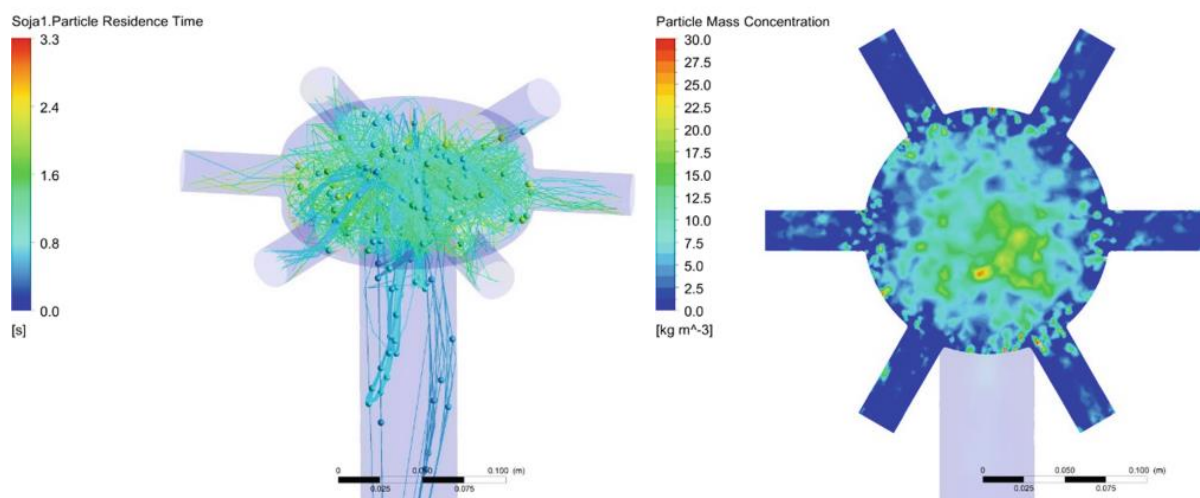


Рисунок 1.21 – Результати чисельного моделювання руху насіння сої у розподільнику [117]

Що стосується таких складових пневмосистеми сівалки, як сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) та заспокоювач (seed bounce flap), то в доступних джерелах інформація про дослідження саме цієї частини пневмосистеми сівалки відсутні. Тому обґрунтування параметрів вказаних елементів пневматичної системи зернової сівалки є актуальним питанням.

1.6 Висновки з розділу

1. Якщо оцінювати різні технології ґрунтозахисного та ресурсозберігаючого землеробства (Conservation Agriculture), то саме No-till завдає найменших пошкоджень ґрунту, а, отже, є найбільш перспективною з цієї точки зору. Крім того, за цією технологією різко зменшується парк техніки, необхідний для вирощування сільськогосподарських культур. При цьому ключове місце в технології вирощування займає сівба, тому особливої уваги потребують саме посівні машини та комплекси.

2. При будь якій технології вирощування сільськогосподарських культур сівба є визначальним фактором, який впливає на продуктивність рослин. При цьому найбільш використовувані способи сівби (точний рядковий, гніздовий, квадратно-гніздовий, рядково-лунковий) є різновидами рядкового. Окремо треба виділити точний рядковий спосіб так як він найкраще забезпечує становлення паростків при рівних умовах для глибини сівби та організації насінневого ложа. Саме такий спосіб висіву забезпечують сучасні зернові сівалки точного висіву, які використовують в технології No-till.

3. Основним недоліком посівних машин з пневматичною системою висіву є висока нерівномірність розподілу посівного матеріалу по сошникам. У деяких випадках нерівномірність може досягати 15,5 % і більше при агротехнічно допустимих 5 % для зернових і 6 % для зернобобових культур, що призводить до нераціонального використання посівного матеріалу, зниження врожайності та зростання засміченості полів. Це зменшує ефективність використання пневматичних сівалок. Тому удосконалення систем висіву пневматичних сівалок є актуальним завданням у сфері механізації посіву.

4. Встановлено, що на точність висіву, а саме на відстань між окремими насінинами впливає конфігурація елементів пневмосистеми сівалки, а саме насіннепроводу та розподільника потоку насіння. Сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) та заспокоювач (seed bounce flap) крім вказаного показника точності висіву в більшій мірі забезпечують вкладання насіння в борозну. В зв'язку з цим, проведено огляд досліджень пневмосистеми зернової сівалки точного висіву та її елементів.

5. Огляд досліджень пневматичних систем зернових сівалок точного висіву показав, що найбільшій уваги приділено розподільникам насіння, при цьому аналітичні дослідження базуються на чисельному моделюванні, з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD) та методу дискретних елементів (DEM). Що стосується таких складових пневмосистеми сівалки, як сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) та заспокоювач (seed bounce flap), то в доступних джерелах інформація про дослідження саме цих частин пневмосистеми сівалки

відсутні. Тому обґрунтування параметрів вказаних елементів пневматичної системи зернової сівалки є актуальним питанням.

1.7 Мета і задачі досліджень

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу сівби насіння культурних рослин шляхом удосконалення конструкцій елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів, та конструкційними матеріалами, які обумовлюють підвищений ресурс їх експлуатації.

Задачі дослідження:

– на основі патентно-інформаційного аналізу способів та засобів висіву насіння культурних рослин обґрунтувати шляхи підвищення ефективності пневматичних сівалок;

– удосконалити конструкцію системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву і обґрунтувати її конструктивно-технологічну схему;

– на основі аналітичних досліджень і чисельного моделювання процесу висіву насіння обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри сповільнювача і заспокоювача насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву;

– на основі лабораторних досліджень і чисельного моделювання обґрунтувати конструкційний матеріал заспокоювача насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву;

– розробити методику і провести багатофакторні дослідження із встановлення впливу режимних параметрів удосконаленої пневматичної системи подачі насіння висівної секції на показники якості процесу висіву;

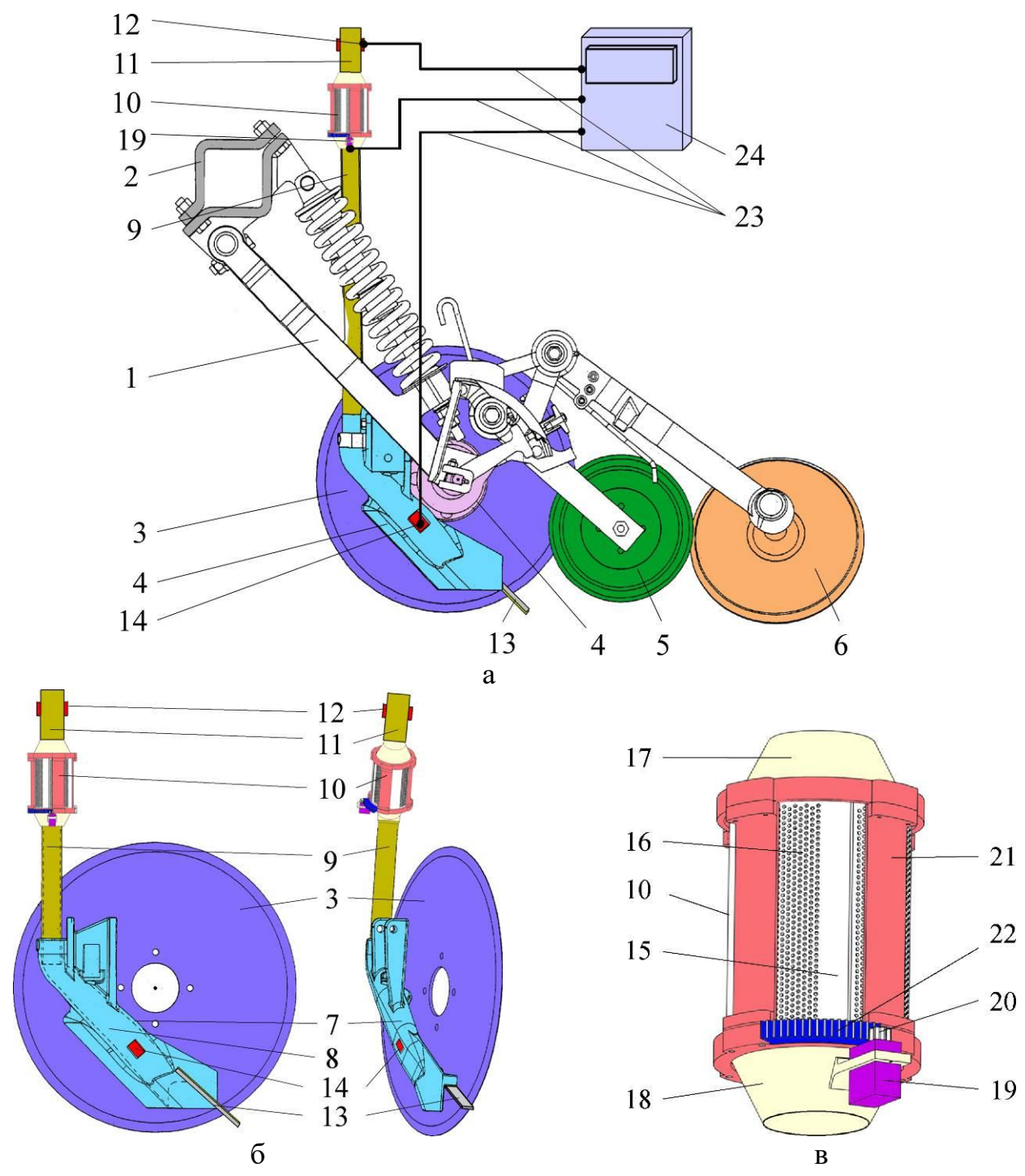
– визначити економічну ефективність удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву і впровадити результати досліджень у виробництво.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [118–121].

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ

2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки

Удосконалена висівна секція пневматичної зернової сівалки (рис. 2.1, а) складається (додаток А) з рами 1, яка з'єднана з рамою сівалки (на рис. 2.1 не показано) за допомогою хомута 2. Однодисковий сошник 3 встановлено на рамі 1 з можливістю обертання, яку забезпечує підшипниковий вузол 4. Прикочувальне колесо 5 встановлено за однодисковим сошником 3 з можливістю обертання на рамі 1. За прикочувальним колесом 5 встановлено загортаюче колесо 6, яке закріплено на рамі 1 з можливістю обертання. На рамі 1 закріплено висівний башмак 7, який одним боком щільно прилягає до однодискового сошника 3. Через всю довжину висівного башмака 7 виконано канал для насіння 8 (рис. 2.1, б). До верхньої частини каналу для насіння 8 висівного башмака 7 приєднано насіннєву трубку 9. До верхньої частини насіннєвої трубки 9 приєднано сповільнювач насіння 10, до верхньої частини якого приєднано насіннєпровід 11 з верхнім датчиком висіву 12. На виході з каналу для насіння 8 висівного башмака 7 встановлено заспокоювач насіння 13. В середній частині каналу для насіння 8 висівного башмака 7 встановлено нижній датчик висіву 14. Сповільнювач насіння 10 (рис. 2.1, в) складається з перфорованого циліндра 15 із отворами 16, до якого зверху і знизу жорстко закріплені верхній розтруб 17 і нижній розтруб 18. На нижньому розтрубі 18 жорстко зафіксовано сервопривід 19. На валу сервопривода 19 встановлено зубчасте колесо 20. На перфорованому циліндрі 15 встановлено циліндричну шторку 21 з можливістю обертання навколо власної осі. На циліндричній шторці 21 жорстко закріплено зубчастий сектор 22. Зубчастий сектор 22 і зубчасте колесо 20 сервопривода 19 утворюють механічну передачу. Сервопривід 19, верхній датчик висіву 12 і нижній датчик висіву 14 за допомогою електричних проводів 23 з'єднані із блоком керування 24.



1 – рама; 2 – хомут; 3 – однодисковый сошник; 4 – підшипниковий вузол; 5 – прикочувальне колесо; 6 – загортаюче колесо; 7 – висівний башмак; 8 – канал для насіння; 9 – насіннева трубка; 10 – сповільнювач насіння; 11 – насіннепровід; 12 – верхній датчик висіву; 13 – заспокоювач насіння; 14 – нижній датчик висіву; 15 – перфорований циліндр; 16 – отвори; 17 – верхній розтруб; 18 – нижній розтруб; 19 – сервопривід; 20 – зубчасте колесо; 21 – циліндрична шторка; 22 – зубчастий сектор; 23 – електричні провода; 24 – блок керування; а – загальний вигляд секції; б – загальний вигляд системи подачі насіння; в – загальний вигляд сповільнювача

Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологічна схема удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки

Висівна секція пневматичної зернової сівалки працює наступним чином. Рама 1 висівної секції пневматичної зернової сівалки закріплюється на рамі сівалки (на рис. 2.1 не показано) з використанням хомута 2. Під час руху сівалки однодисковий сошник 3, обертаючись у підшипниковому вузлі 4 під дією сил тертя, розрізає ґрунт. Висівний башмак 7 відгортає по боках ґрунт, утворюючи борозенку трапецієподібної форми.

Під дією потоку повітря насіння через насіннепровід 11 переміщується до верхнього розтрубу 17 сповільнювача насіння 10. Верхній датчик висіву 12 фіксує час проходження насіння і передає інформацію за допомогою електричних проводів 23 до блока керування 24. В початковий момент в сповільнювачі насіння 10 циліндрична шторка 21 встановлена таким чином, що всі отвори 16 на перфорованому циліндрі 15 є відкритими. Частина повітря виходить крізь отвори 16, зменшуючи швидкість потоку повітря на виході з нижнього розтрубу 18. Швидкість насіння, яке при цьому рухається під дією повітряного потоку зменшується. Сповільнене насіння потрапляє до насінневої трубки 9 і каналу для насіння 8 висівного башмака 7. Нижній датчик висіву 15 фіксує час проходження насіння і передає інформацію за допомогою електричних проводів 23 до блока керування 24.

Далі насіння вилітає з каналу для насіння 8 висівного башмака 7 і потрапляє у утворену борозенку. У разі відскакування від дна борозни насіння летить у бік заспокоювача насіння 13, який притиснутий прикочувальним колесом 5, відбивається від нього і потрапляє на дно борозенки. Тим самим зменшується ймовірність вильоту насіння за межі борозенки. Далі загортаюче колесо 6 засипає борозенку із насінням ґрунтом.

За отриманими даними часу проходження насіння у верхньому датчику висіву 12 і нижньому датчику висіву 15 блок керування 24 розраховує норму і точність висіву до і після сповільнювача насіння 10. У разі відхилення норми висіву до і після сповільнювача насіння 10 блок керування 24 за допомогою електричних проводів 23 передає сигнал до сервопривода 19, який за рахунок механічної передачі між зубчастим колесом 20 і зубчастим сектором 22 повертає циліндричну шторку 21 поступово закриваючи отвори 16 перфорованого циліндра 15. Це призводить до

збільшення швидкості насіння і запобігає його турбулентному і хаотичному руху. При досягненні однакової норми висіву до і після сповільнювача насіння 10 блок керування 24 за допомогою електричних проводів 23 передає сигнал до сервопривода 19, який за рахунок механічної передачі між зубчастим колесом 20 і зубчастим сектором 22 повертає циліндричну шторку 21 поступово відкриваючи отвори 16 перфорованого циліндра 15. Це в свою чергу призводить до зменшення швидкості насіння і запобігає його відскоку від дна борозенки.

Використання висівної секції пневматичної зернової сівалки дозволяє оперативно регулювати швидкість руху насіння, що забезпечить зменшення ймовірності його травмування та вильоту з борозенки і, як наслідок, призведе до запобігання зменшення врожаю.

2.2 Фізико-математичний апарат руху насіння в системі подачі насіння пневматичної сівалки

У зв'язку з тим, що в пневматичній сівалці John Deere 90 Series, пристрій для дозування знаходиться достатньо далеко (4–8 м) від місця остаточного позиціонування насіння в борідці, то важливим є дослідження процесу його руху в повітропроводі пневматичної сівалки. Тому для подальших теоретичних досліджень визначимо відповідний фізико-математичний апарат.

Загальну систему диференціальних рівнянь руху насіння в повітропроводі пневматичної зернової сівалки можна представити у вигляді:

$$\Omega_p \cdot \rho_p \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \bar{F}, \quad \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \quad \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \nabla, \quad (2.1)$$

де Ω_p – об'єм насіння, м³; ρ_p – густина насіння, кг/м³; \bar{V}_p – швидкість-вектор переміщення насіння, м/с; \bar{S}_p – переміщення-вектор насіння, м; \bar{F} – результуюча сила-вектор на насіння, Н.

Форму насіння приймаємо кулеподібною. Тоді його об'єм можна розрахувати за формулою:

$$\Omega_p = \frac{1}{6} \pi \cdot D_p^3 \quad (2.2)$$

Розглянемо сили, які найбільше впливають на насінини під час їх руху в повітропроводі пневматичної зернової сівалки (табл. 2.1) [122–130].

Таблиця 2.1 – Сили, які найбільше впливають на насінини під час їх руху в повітропроводі пневматичної сівалки

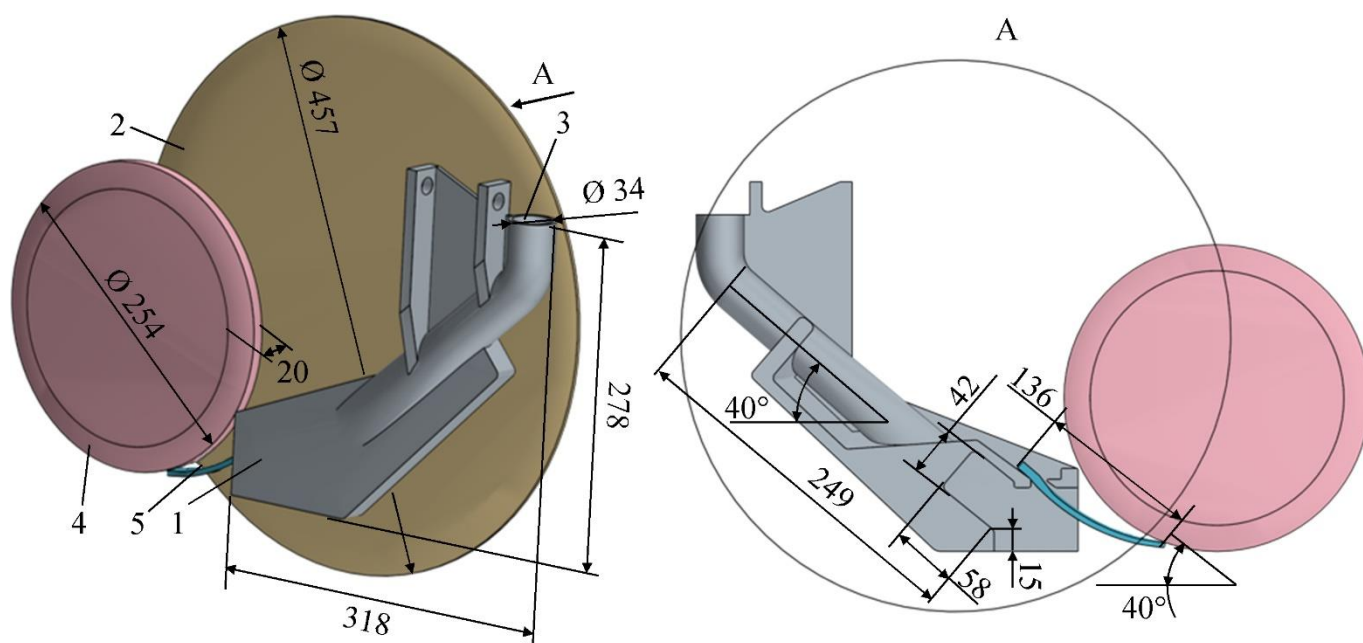
Назва	Формула	Позначення
Сила тяжіння \overline{F}_g	$\overline{F}_g = \frac{1}{6} \pi \cdot D_p^3 \rho_p \overline{g}, \quad (2.3)$	\overline{g} – прискорення вільного падіння, м ³ ; $f_M(Re)$ –
Сила в'язкого опору \overline{F}_D	$\overline{F}_D = \frac{1}{2} \pi D_p^2 \rho_a f_M(Re) (\overline{V}_a - \overline{V}_p) \overline{V}_a - \overline{V}_p \quad (2.4)$	коефіцієнт в'язкого опору; \overline{V}_a – швидкість-вектор повітря, м/с; C_{rest} –
Зусилля зумовлене зміною тиску \overline{F}_{ac}	$\overline{F}_{ac} = \frac{1}{6} \pi \cdot D_p^3 \rho_a \frac{d_a \overline{V}_a}{dt}, \quad \frac{d_a}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \overline{V}_a \cdot \nabla, \quad (2.5)$	коефіцієнт відновлення; D_A, D_B – ефективні діаметри насінин А і В, м; для стінки $D_{wall} = \infty$;
Сила взаємодії насіння між собою та стінками повітропроводу на основі пружно-демпферної контактної моделі Герца-Міндліна $\overline{F}_{contact}$	$\overline{F}_{contact} = 2 \frac{\ln(C_{rest})}{\sqrt{\pi^2 + \ln(C_{rest})^2}} \sqrt{\frac{5\pi\rho_p \cdot D_A^3 D_B^3}{6 D_A^3 + D_B^3}} \times$ $\times 4 \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{D_A D_B}{D_A + D_B} \left(\overline{V}_n \sqrt{\frac{1}{3} E_{eq} \sqrt{d_n}} + \right.$ $\left. + \overline{V}_t \sqrt{\frac{E_B E_A}{(2-v_A)(1+v_A)E_B + (2-v_B)(1+v_B)E_A}} \sqrt{d_t} \right) -$ $- 4 E_B E_A \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{D_A D_B}{D_A + D_B} \left(\frac{1}{3} \frac{d_n \sqrt{d_n}}{(1-v_A^2)E_B + (1-v_B^2)E_A} + \right.$ $\left. + \frac{d_t \sqrt{d_t}}{(2-v_A)(1+v_A)E_B + (2-v_B)(1+v_B)E_A} \right) \quad (2.6)$	d_n, d_t , – віртуальне перекриття насінин А і В в нормальному і тангенціальному напрямках, м; E_A, E_B – модулі Юнга насінин А і В, Па; v_A, v_B – коефіцієнти Пуассона насінин А і В; $\overline{V}_n, \overline{V}_t$ – нормальний і тангенціальний компонент відносної швидкості поверхні насінини в точці контакту, м/с.

Спільне рішення системи рівнянь (2.1)–(2.6) аналітичним способом, з урахуванням складних граничних умов, що зумовлені формою повітропроводу пневматичної сівалки, в явному вигляді потребує багато часу. Тому зазначену систему диференціальних рівнянь будемо вирішувати чисельним методом кінцевих

елементів. Для кожної насінини розраховуються її координати і швидкості, а також вирішується задача Коші на зазначеному відрізку часу, результуючі дані якої є початковими даними для наступної ітерації (кроку). Такий метод закладений в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+, який і будемо використовувати в подальшому моделюванні процесу переміщення насіння в повітропроводі пневматичної зернової сівалки [131].

2.3 Чисельне моделювання процесу висіву насіння базовою висівною секцією пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series

Чисельне моделювання процесу функціонування висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series передбачало створення 3D-моделі основних елементів висівної секції (рис. 2.2) згідно даних [132, 133].



- 1 – висівний башмак (Seed Boot); 2 – однодисковий сошник (Single Disc Furrow Opener); 3 – насіннепровід (Seed Tube); 4 – фіксуюче колесо (Seedlock Wheel);
5 – заспокоювач насіння (Seed Flap)

Рисунок 2.2 – Геометричні розміри 3D-моделі висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series

Для створення сіткових моделей в Simcenter STAR-CCM+ було вибрано наступне: генератор поверхневої сітки та модель тримірної сітки. Поверхнева сітка необхідна для забезпечення високоякісної триангуляції на довільно складній геометрії елементів висівної секції. Модель тримірної сітки використовує шаблонну сітку, що складається з шестигранних комірок, відповідних до цільового розміру. Ця модель вирізає або обрізає основну сітку залежно від початкової поверхні введення. Базовий розмір сітки було встановлено на рівні 0,01 м.

Для чисельної моделі в Simcenter STAR-CCM+ було використано наступні фізичні моделі: тривимірна, нестационарна неявна, модель реального газу (повітря) Ван-дер-Ваальса, модель k - ϵ -турбулентності, модель роздільної течії, Лагранжева багатофазність, багатофазна взаємодія та сила тяжіння. В якості Лагранжевої фази ґрунту було обрано частинки DEM з такими моделями: сферична частинка, суцільна, постійна густина. Взаємодія насінин одне з одним і з непроникливими стінками сповільнювача насіння підпорядковані моделі контакту Герца-Міндліна.

Фізико-механічні властивості частинок ґрунту було прийнято відповідно до досліджень [134–136] і мають наступні значення: густина – 1100 кг/м^3 , коефіцієнт Пуассона – 0,41, модуль пружності Юнга – $1,5 \cdot 10^7$. Для взаємодії частинок між собою було прийнято наступні значення: коефіцієнт тертя спокою – 0,732, нормальний і дотичний коефіцієнти відновлення – 0,5, множник лінійного зчеплення – 1,5, робота когезії – 0,5 Н/м. Для взаємодії частинок зі стінкою сталевого органу було прийнято: коефіцієнт тертя спокою – 0,61, нормальний і дотичний коефіцієнти відновлення – 0,5, відсутність лінійного зчеплення. Відповідно до досліджень [134], фракційний склад ґрунту підпорядковується нормальному розподілу Гауса в діапазоні від 10 мм до 36 мм. Розподіл частинок ґрунту в області досліджень (надпосівний, посівний і підпосівний шари) за розміром показано на рис. 2.3. Глибина ґрунту була розділена на 10 шарів товщиною 0,02 м.

Для повітря прийнято наступні фізико-механічні властивості: динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$; турбулентне число Прандтля – 0,9; молекулярна маса – 28,9664 кг/кмоль.

Швидкість повітряного потоку на вході в висівний башмак становила 20 м/с.

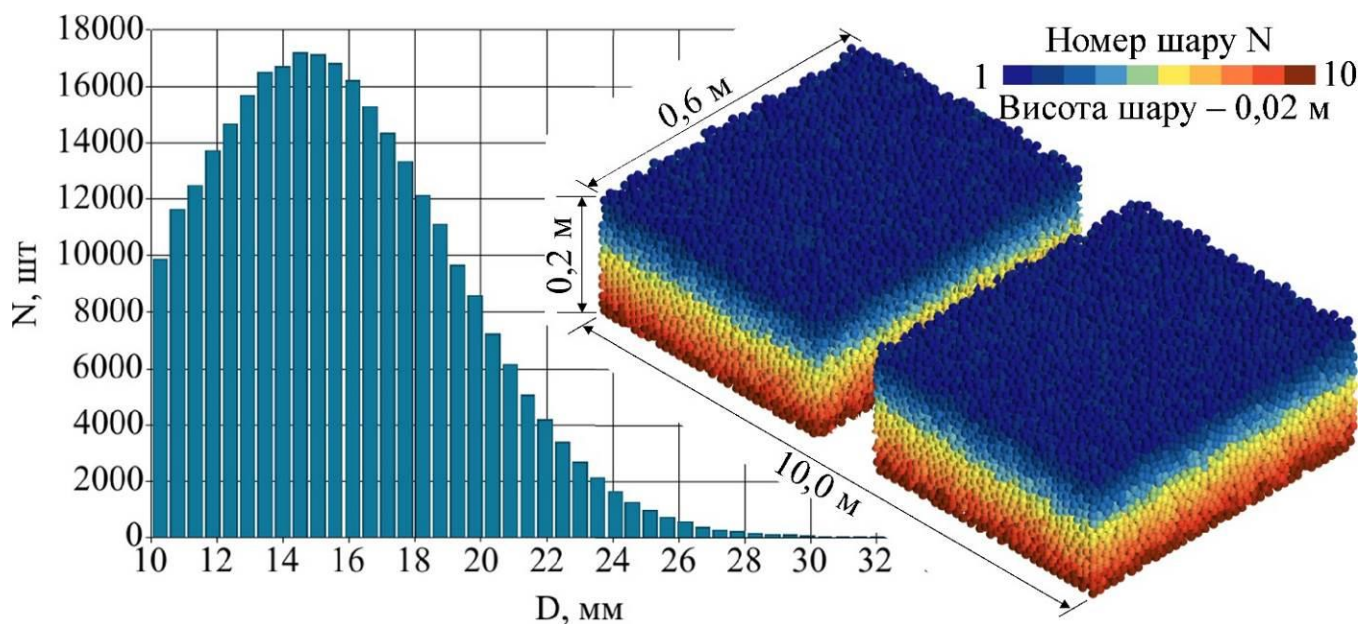


Рисунок 2.3 – Розподіл сферичних частинок DEM ґрунту за розміром в області досліджень

Параметри нестационарного неявного вирішувача Simcenter STAR-CCM+ були наступні:

- інтервал часу між кроками – 0,01 с;
- максимальна кількість ітерацій на один крок – 5;
- дискретизація за часом – перший порядок точності;
- мінімальні і максимальні значення числа Куранта для Лагранжевої багатофазності – 0,2 і 0,5 відповідно;
- загальний час моделювання становив – 10 с.

В якості моделі насінин прийнято суцільні сферичні частинки DEM із постійною густиною. Фізико-механічні властивості насінин прийнято спираючись на лабораторні дослідження насіння гороху [137–139]: ефективний діаметр – 0,008 м; густина – 1180 кг/м³; коефіцієнт Пуассона – 0,32; модуль пружності Юнга – 70 МПа. Для взаємодії частинок між собою було прийнято наступні значення: коефіцієнт тертя спокою – 0,52, нормальний і дотичний коефіцієнти відновлення – 0,3, відсутність лінійного зчеплення.

Для взаємодії частинок зі стінкою сталевого органу було прийнято: коефіцієнт тертя спокою – 0,41, нормальний і дотичний коефіцієнти відновлення – 0,5, відсутність лінійного зчеплення.

Згідно досліджень [140, 141] норма висіву гороху по класичній технології становить 1,2 млн. шт./га. Враховуючи відстань між рядками – 0,19 м, отримуємо 22,8 шт./м або відстань між насінинами в рядку – 0,044 м. Швидкість руху сівалки приймаємо 1,5 м/с [142]. Тоді швидкість інжекції насінин в верхній частині насіннепроводу складає 34,2 шт./с. Початкова швидкість насіння дорівнювала швидкості потоку повітря і становила 20 м/с. Глибина посіву – 0,05 м. Поперечний переріз області моделі ґрунту, де проходив висівний башмак і однодисковий сошник висівної секції пневматичної сівалки, наведено на рис. 2.4. На рис. 2.4 відмічено насінини, які потрапили у орний горизонт ґрунту, який складається з надпосівного (0–0,04 м), посівного (0,04–0,08 м) і підпосівного (0,08–0,24) шарів.

За критерії оцінки якості посіву обрано рівномірність розподілу насіння вздовж лінії посіву $\epsilon_{\Delta y}$ і розкид насіння по глибині Δz і ширині Δx посіву.

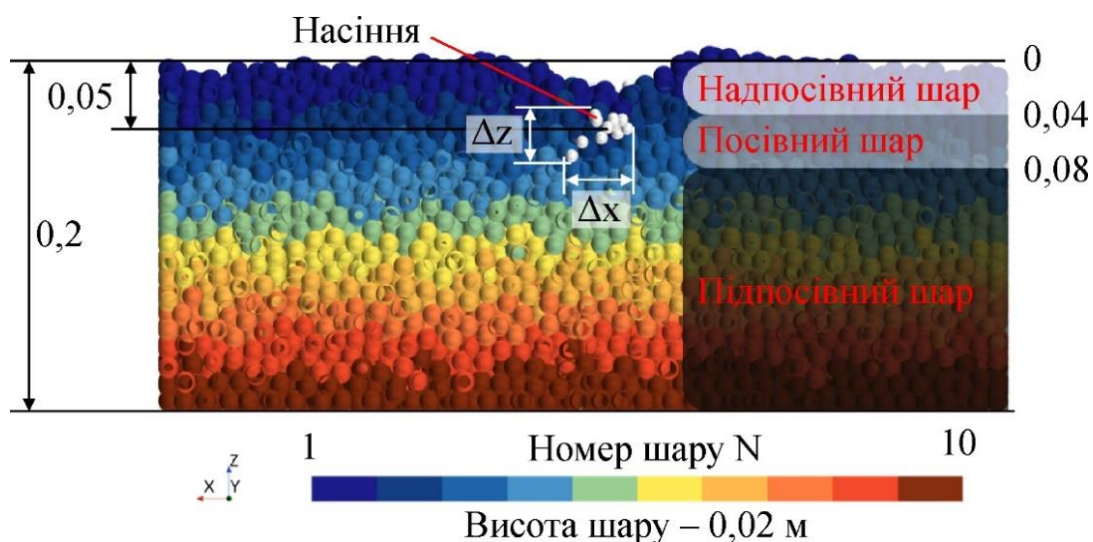


Рисунок 2.4 – Поперечний переріз області моделі ґрунту

В результаті чисельного моделювання роботи висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series отримано візуалізацію

розподілу агрегатів ґрунту та їх швидкостей, яку представлено на рис. 2.5. Максимальна швидкість переміщення агрегатів ґрунту складає 1,5 м/с. Враховуючи візуалізацію на рис. 2.4 видно розподіл насінини в орному горизонті ґрунту і отриману борозну в результаті прикочування фіксуєчим колесом.

Візуалізація розподілу насіння вздовж лінії посіву (y) і по глибині (z) наведено на рис. 2.6. Графічна інтерпретація розподілу насіння в області орного горизонту ґрунту представлено на рис. 2.7. З рис. 2.6 і 2.7 було визначено основні статистичні показники точності висіву в трьох координатах простору, такі як мінімальне, максимальне і середнє значення, межа, середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації. Ці показники зведено в табл. 2.2.

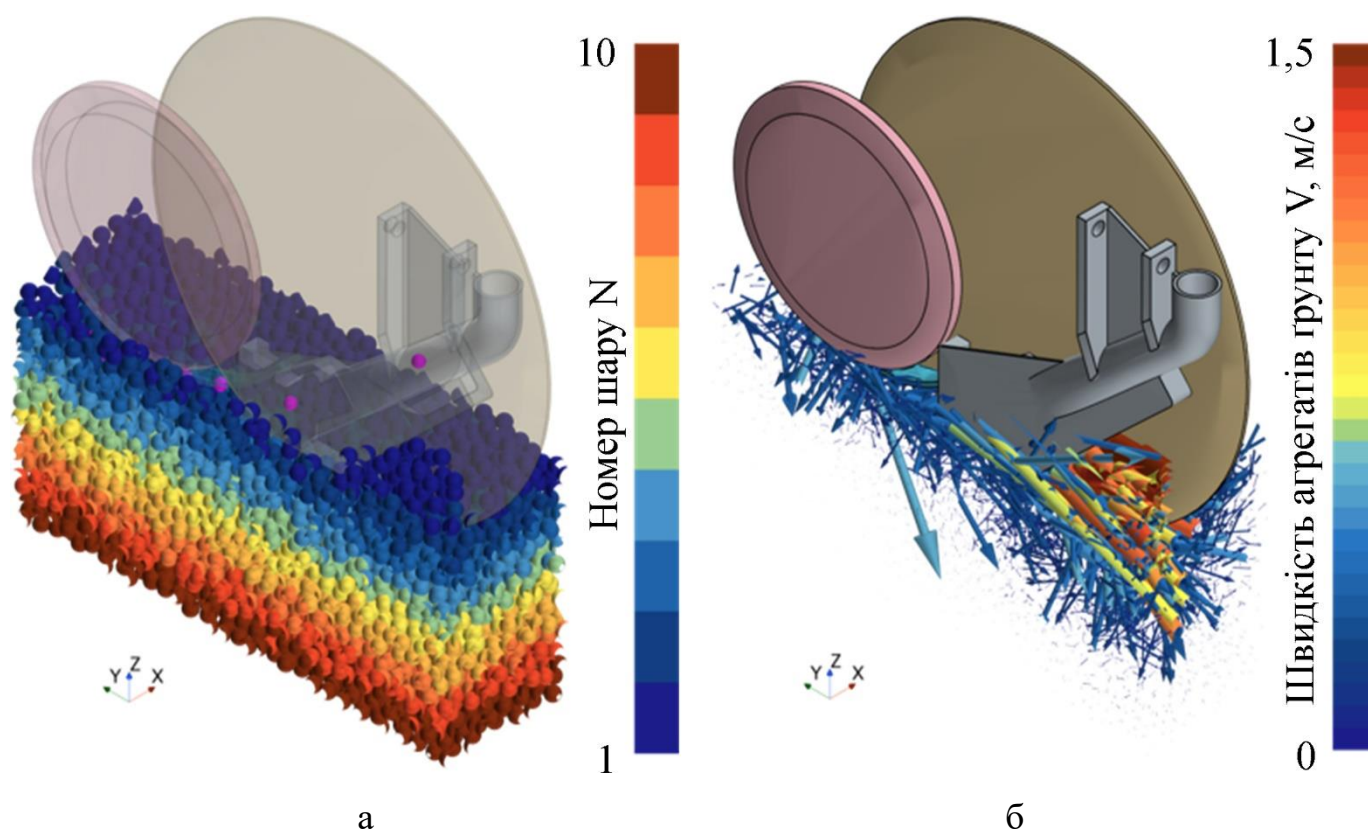


Рисунок 2.5 – Візуалізація розподілу агрегатів ґрунту (а) та їх швидкостей (б) під дією висівної секції пневматичної сівалки

Порівнюючи отримані значення показників із нормованими встановлено, що розподіл насіння вздовж осі x відповідає зазначеним вимогам. Вздовж глибини

посіву (вісь z) розподіл насіння є досить високий, що виходить за нормовані значення. Так, отримане середнє значення глибини посіву складає $0,041 \pm 0,03$ м, а нормоване – $0,05 \pm 0,01$.

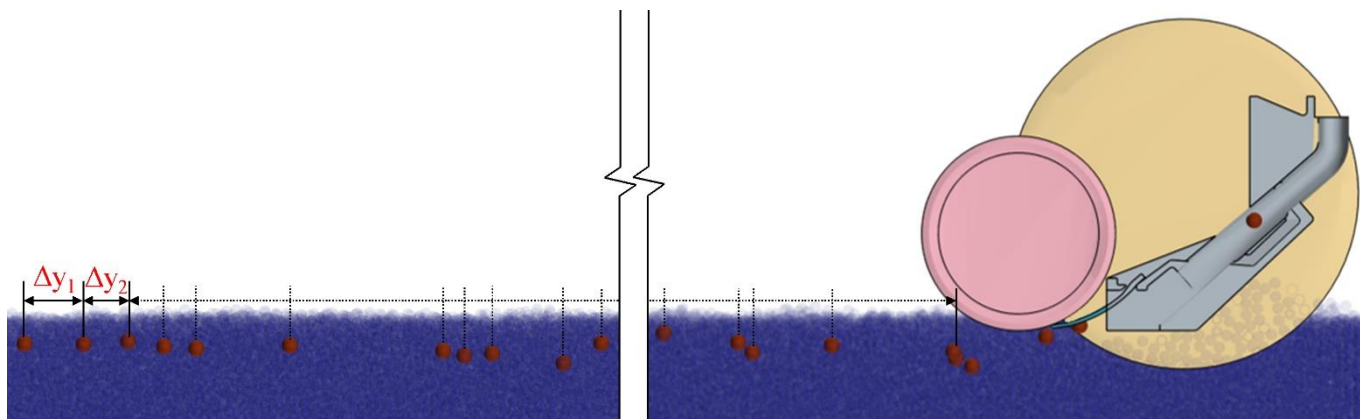


Рисунок 2.6 – Візуалізація розподілу насіння в результаті висіву пневматичною сівалкою

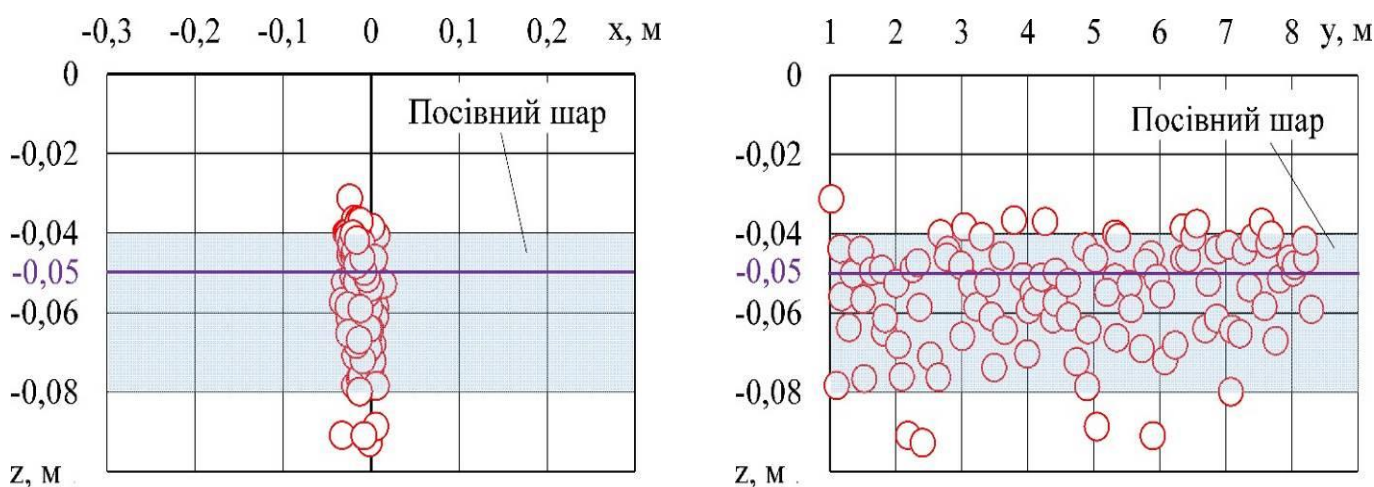


Рисунок 2.7 – Розподіл насіння в області орного горизонту ґрунту

Наочний аналіз рис. 2.7 показує, що деякі насінини навіть не потрапляють у посівний шар (0,04–0,08 м) орного горизонту. Ще гірша ситуація із відстанню між насінинами вздовж лінії висіву.

Аналіз табл. 2.2 і рис. 2.7–2.8 дає змогу стверджувати про достатньо високу нерівномірність посіву: відстань між насінинами знаходиться в межах від 0,0017 м

до 0,1192 м, коефіцієнт варіації – 0,672. При цьому нормованим значенням є відстань $0,044 \pm 0,015$ м. Менше значення відстані між насінинами ($< 0,029$ м) пояснює виникнення «двійників», а більше ($> 0,059$ м) – виникненням «пропусків». Згідно рис. 2.8 лише 47,5 % насінин посіяно з нормованим значенням точності висіву.

Таблиця 2.2 – Результати чисельного моделювання процесу висіву пневматичною сівалкою John Deere 90 Series

Показник	x	Δy	z
Мінімальне значення	-0,03308	0,001752	-0,09262
Максимальне значення	0,014296	0,119157	-0,03118
Межа	0,023688	0,058703	0,030719
Середньоквадратичне відхилення	0,009868	0,029303	0,013423
Середнє значення	-0,00851	0,043593	-0,04164
Коефіцієнт варіації	-1,15896	0,672183 (67,2 %)	-0,32239 (32,2 %)
Нормоване значення	$\pm 0,025$	$0,044 \pm 0,015$	$-0,05 \pm 0,01$

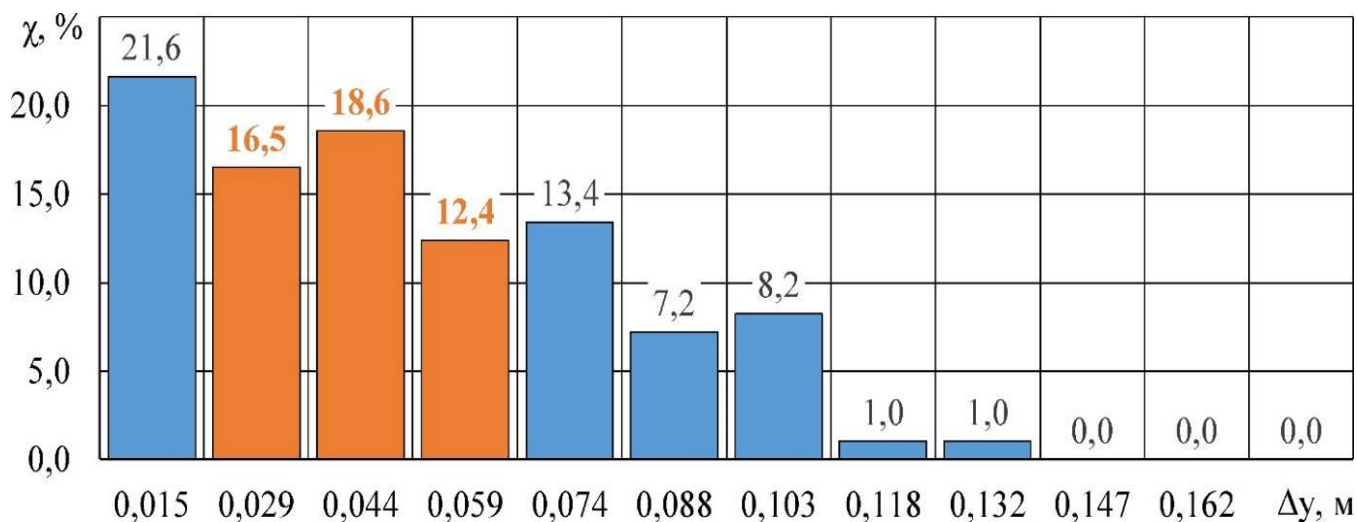


Рисунок 2.8 – Розподіл відстані між насінням вздовж лінії посіву

Перейдемо до визначення основних чинників, що спричиняють незадовільну роботу висівної секції пневматичної зернової сівалки з точки зору забезпечення високої точності висіву.

Перший чинник пов'язаний із високою швидкістю повітряного потоку. Через неї підвищується ризик того, що насіння вилетять із висівного башмака і потраплять не у посівне ложе. Рішенням даної проблеми є використання сповільнювача насіння, який встановлюється вертикально над висівним башмаком. Він повинен мати відповідну форму, що дозволить йому бути розташованим ергономічно під елементами рами, зберігаючи близьку вертикальну орієнтацію, що сприяє рівномірному потоку насіння. Проте, конструкція сповільнювачів насіння повинна забезпечувати не лише зниження швидкості повітряного потоку, але й вільний потік насіння до сошника без утворення заторів. Крім того, враховуючи постійне коливання рами сівалки, вона також повинна запобігати травмуванню насіння під час його переміщення. Також сповільнювач насіння повинен забезпечувати динамічну зміну швидкості потоку повітря, якої можна досягти застосовуючи керовані сервоприводи.

Другий чинник – недосконала форма насінневого каналу висівного башмака. Розробники сівалок, вирішуючи задачу створення «ідеального» посівного ложе в орному горизонті ґрунту, недостатньо уваги приділяють формі насінневого каналу. Через те, що сучасні пневматичні сівалки переміщуються з достатньо високими швидкостями (1,5–4,2 м/с), насіння, яке рухається у насінневому каналі висівного башмака, постійно стикається зі стінками, змінюючи свій напрям і швидкість руху. Такий хаотичний рух насіння призводить до погіршення точності висіву. Тому удосконалення форми насінневого каналу висівного башмака та/або матеріалу його поверхні є актуальною задачею.

Третій чинник пов'язаний з формою заспокоювача насіння. Як вже було зазначено, його форма сильно впливає на наявність випадкового вилітання насіння із посівного ложе. Спостереження, які були проведені, підтверджують необхідність розробки нової конструкції заспокоювача насіння, використовуючи нові матеріали, що дозволять запобігти вильоту насіння з посівного ложе і матимуть тривалий термін експлуатації при низьких виробничих витратах.

2.4 Моделювання функціонування сповільнювача системи подачі насіння

Спираючись на дослідження [131, 143–146], для досягнення поставленої мети було побудовано модель в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+. Конструкцію і згенеровану сітку внутрішньої області сповільнювача насіння із зазначенням геометричних розмірів наведено на рис. 2.9.

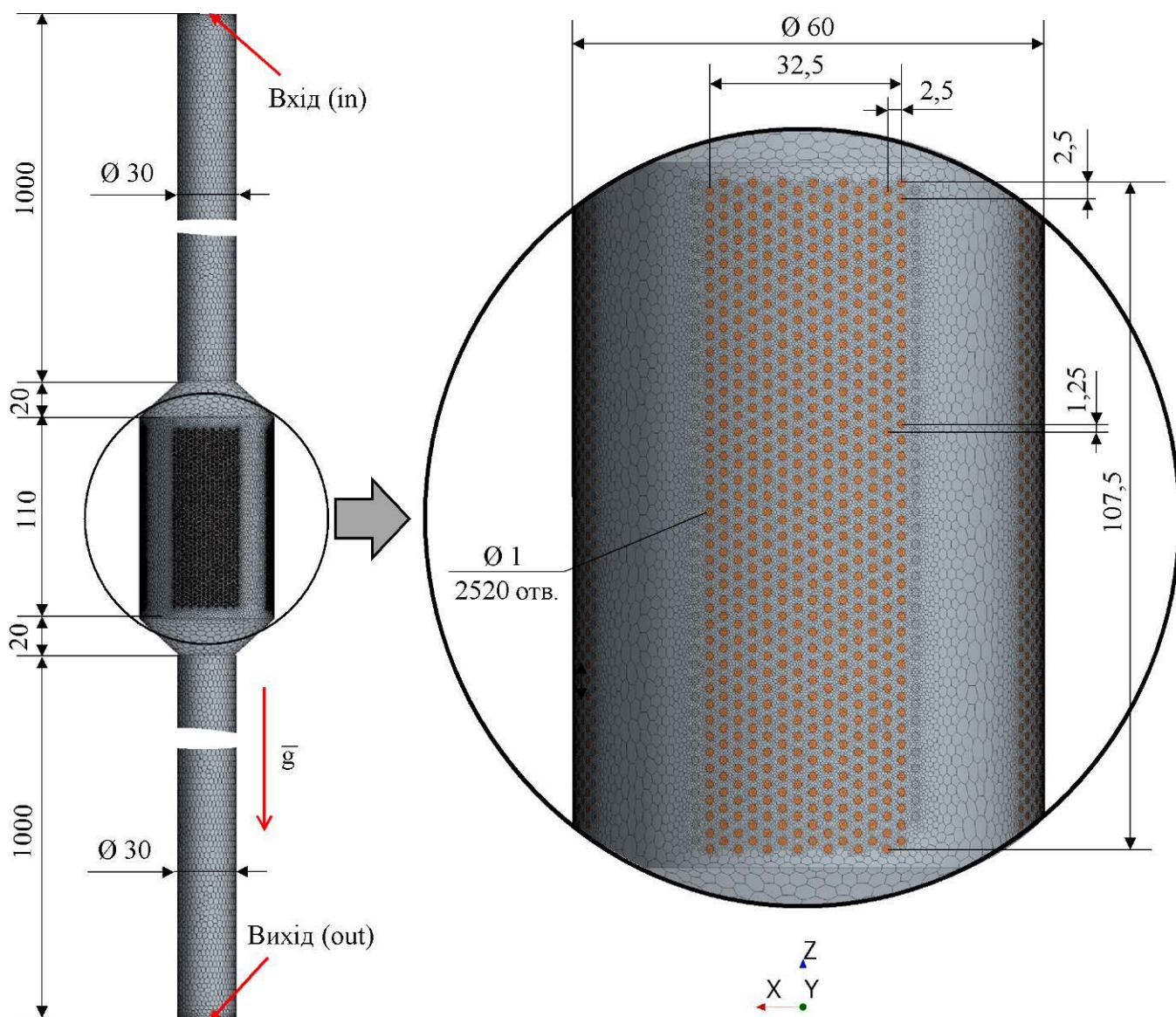


Рисунок 2.9 – Конструкція і згенерована сітка внутрішньої області сповільнювача насіння (значення в мм)

Геометричні розміри сповільнювача насіння були обрані з урахуванням можливостей його розташування і конструктивних особливостей пневматичної зернової сівалки John Deere. В якості моделей генерації об'ємної сітки в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+ було обрано наступні: генератор багатограних комірок, генератор поверхневої сітки, екструдер. Опорними величинами зазначених генераторів є наступні: базовий розмір – 0,004 м; швидкість роста поверхні – 1,3; відносний мінімум розміру для подрібнення комірок – 10 %; мінімальна допустима якість грані – 0,001 м.

В якості фізичних моделей для чисельного моделювання обрано наступні: модель реального газу (повітря) Ван-дер-Ваальса; модель k - ε -турбулентності; модель роздільної течії; модель Лагранжевої багатофазності, зокрема метод дискретних елементів (DEM) з урахування багатофазної взаємодії. Симуляцію процесу виконано у тривимірному просторі з нестационарним неявним вирішувачем.

Для повітря прийнято наступні фізико-механічні властивості: динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; молекулярна маса – 28,9664 кг/кмоль.

В якості DEM-частинок обрано насіння гороху, які мали сферичну форму. Фізико-механічні властивості насіння гороху наведені в розділі 2.3. Ефективний діаметр насіння гороху знаходиться в межах від 0,007 м до 0,009 м і підпорядковується нормальному розподілу; стандартне відхилення діаметра насіння – 0,001 м.

Взаємодія насінин одне з одним і з непроникливими стінками сповільнювача насіння підпорядковані моделі контакту Герца-Міндліна. При цьому коефіцієнт тертя спокою прийнятий 0,61, нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5, дотичний коефіцієнт відновлення – 0,3.

Вектор сили тяжіння згідно рис. 2.9 мав координати (0; 0,0; -9,81) м/с².

В якості граничних умов обрано наступні моделі (відповідно до рис. 2.9): границя «Вхід (in)» (діаметр – 30 мм) – модель швидкості повітря на вході (V_{in}); границя «Вихід (out)» діаметр – 30 мм – модель неявного виходу; границя «отвори» (діаметр – 1 мм, загальна кількість – 2520 шт) – модель неявного виходу; інші

границі – модель стінки. Всі границі, окрім границі «Вихід (out)» є непроникливі для DEM-частинок (насінин).

Інжектор DEM-частинок (насінин) в кількості 100 точок розміщено на границі «Вхід (in)». Ймовірність використання точки для генерації насінини складає 0,5. Швидкість інжекції DEM-частинок обрано у відповідності до розділу 2.3 і становила $Q_{in} = 34,09$ шт./с. Початкова швидкість насіння дорівнювала швидкості потоку.

Крок з часом вирішувача дорівнював 0,01 с, максимальне значення внутрішніх ітерацій – 10, час експозиції 10 с.

В якості факторів досліджень обрано швидкість повітряного потоку на вході V_a^{in} (5–25 м/с, крок – 5 м/с, закодоване позначення – x_1), відношення площі випускних отворів до площі входу ε (закодоване позначення – x_2)

$$\varepsilon = \frac{S_h N_h}{S_{in}} = \frac{N_h}{900}, \quad (2.1)$$

де S_h – площа випускного отвору, $S_h = \pi(1/2)^2$ мм²;

N_h – кількість випускних отворів;

S_{in} – площа входу, $S_{in} = \pi(30/2)^2$ мм².

Змінюючи кількість випускних отворів отримуємо діапазон фактору ε : $N_h = 0 \rightarrow \varepsilon = 0$; $N_h = 360 \rightarrow \varepsilon = 0,4$; $N_h = 720 \rightarrow \varepsilon = 0,8$; $N_h = 1080 \rightarrow \varepsilon = 1,2$; $N_h = 1440 \rightarrow \varepsilon = 1,6$; $N_h = 1800 \rightarrow \varepsilon = 2$; $N_h = 2160 \rightarrow \varepsilon = 2,4$; $N_h = 2520 \rightarrow \varepsilon = 2,8$.

Почергово задаючи значення факторів отримуємо $8 \times 5 = 40$ дослідів.

Критеріями досліджень є швидкість повітряного потоку на виході V_a^{out} , швидкість насіння на виході V_p^{out} і коефіцієнт зміни норми висіву η :

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}, \quad (2.2)$$

де Q_{out} – норма висіву на виході, шт./с;

Q_{in} – норма висіву на вході, шт./с.

В результаті чисельного моделювання отримано візуалізації процесу руху насіння у сповільнювачі, приклади яких приведені на рис. 2.10–2.12. На рисунках представлено лінії потоку повітря і розміщення насіння та швидкості насінин в процесі їх руху. З рисунків наочно можна визначити максимальні і мінімальні

швидкості потоку повітря на вході і виході сповільнювача насіння. Окрім цього візуалізація демонструє максимальне і мінімальне значення швидкостей насіння в процесі їх руху.

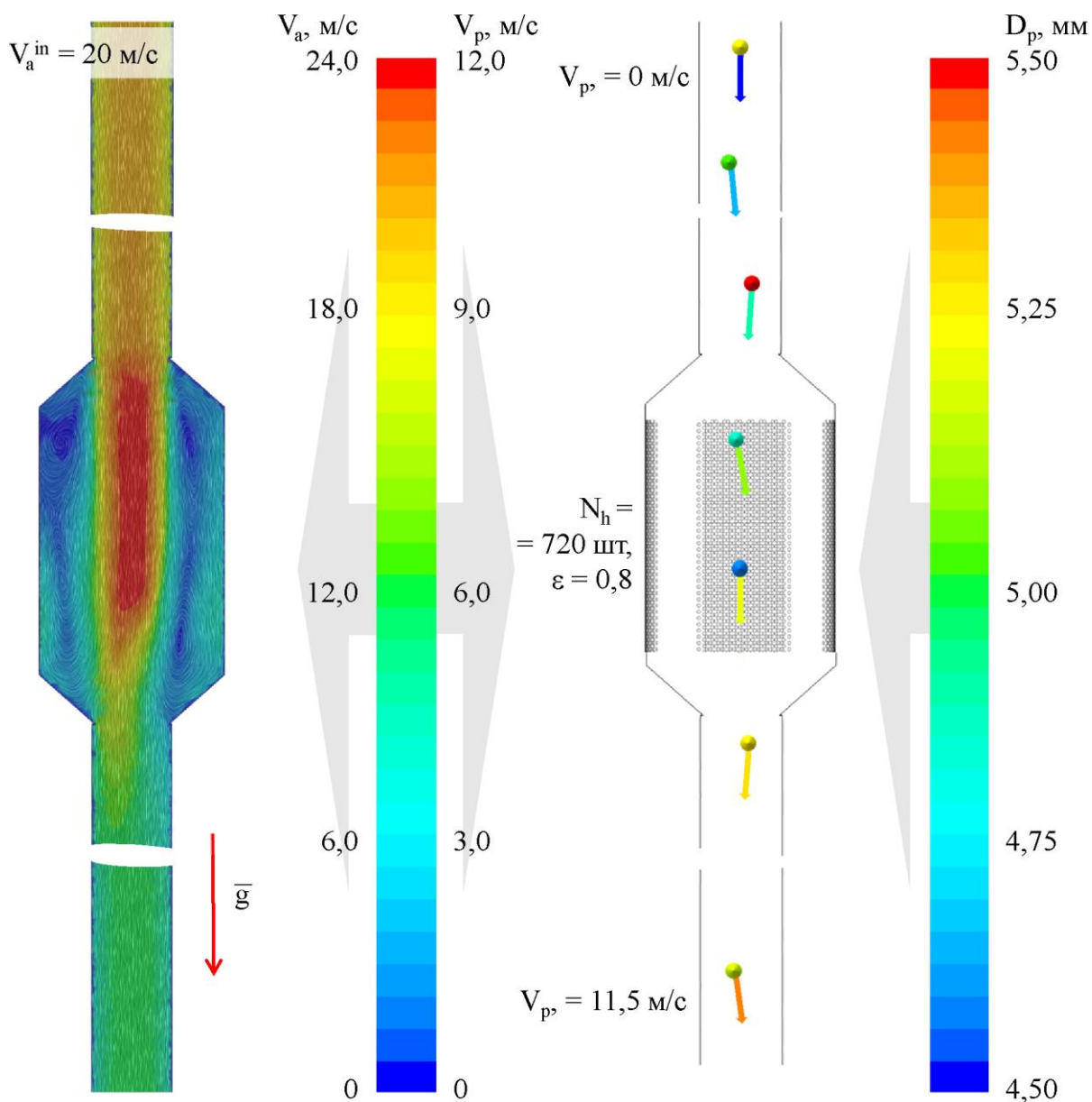


Рисунок 2.10 – Візуалізація процесу руху насіння у сповільнювачі при $V_a^{\text{in}} = 20 \text{ м/с}$, $\varepsilon = 0,8$

Аналізуючи рис. 2.10–2.12 можна стверджувати, що при збільшенні кількості випускних отворів сповільнювача насіння, окрім зменшення швидкості повітряного потоку на виході, спостерігається утворення вихрового руху. Наявність такого руху

додатково зменшує швидкість насіння і змінює траєкторію його руху з лінійної до обертової навколо центра сповільнювача насіння.

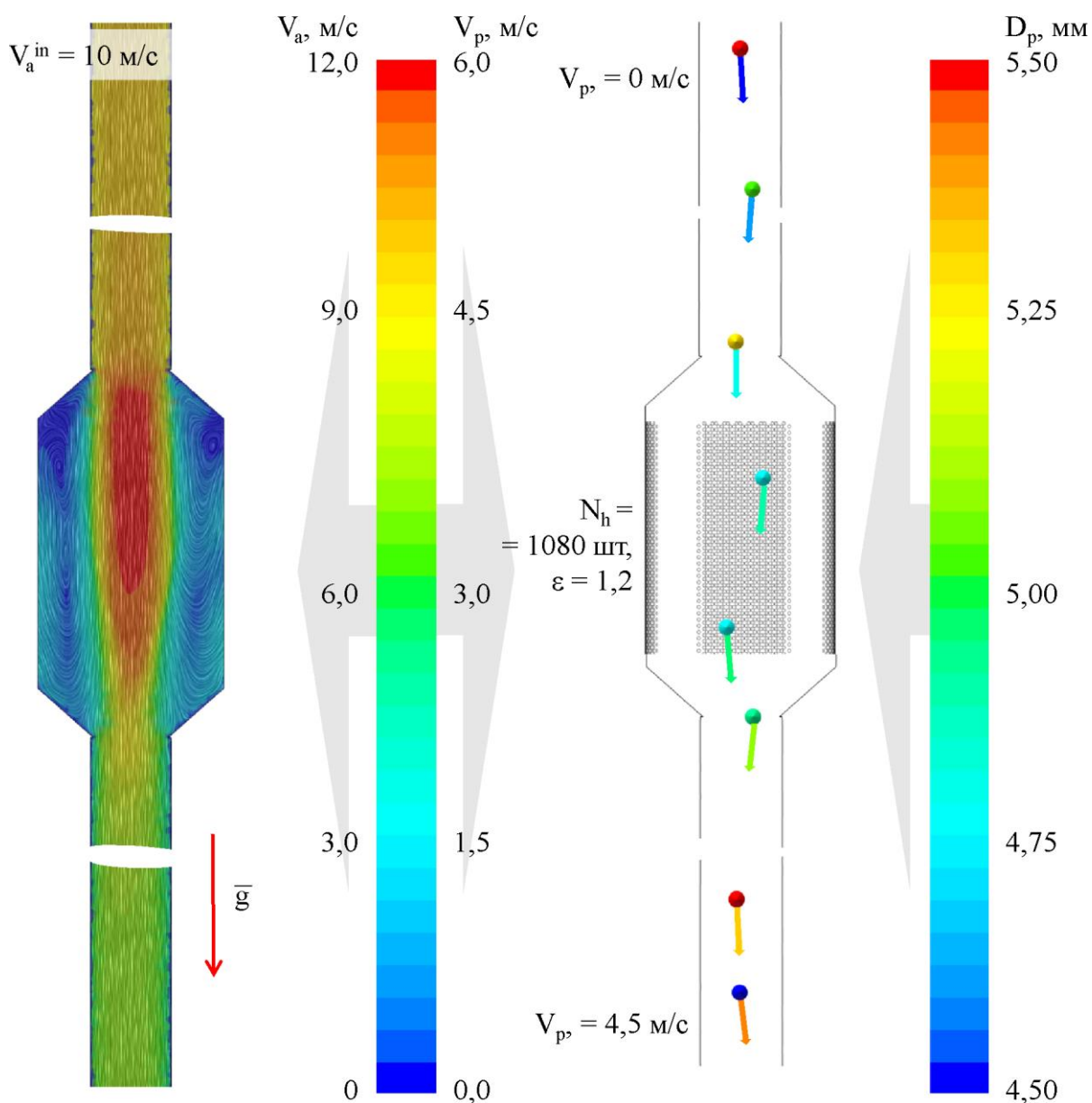


Рисунок 2.11 – Візуалізація процесу руху насіння у сповільнювачі при $V_a^{in} = 10$ м/с, $\epsilon = 1,2$

При великій кількості випускних отворів сповільнювача насіння спостерігається скупчення насінин на виході, що призводить до збільшення норми висіву на виході Q_{out} в порівнянні із нормою висіву на вході Q_{in} . Тобто застосування сповільнювача насіння вирішує поставлену задачу зменшення швидкості насінин,

однак змінює норму висіву. Тому для використання подібних сповільнювачів необхідно корегувати норму висіву висівного апарата сівалки залежно від їх конструктивних особливостей.

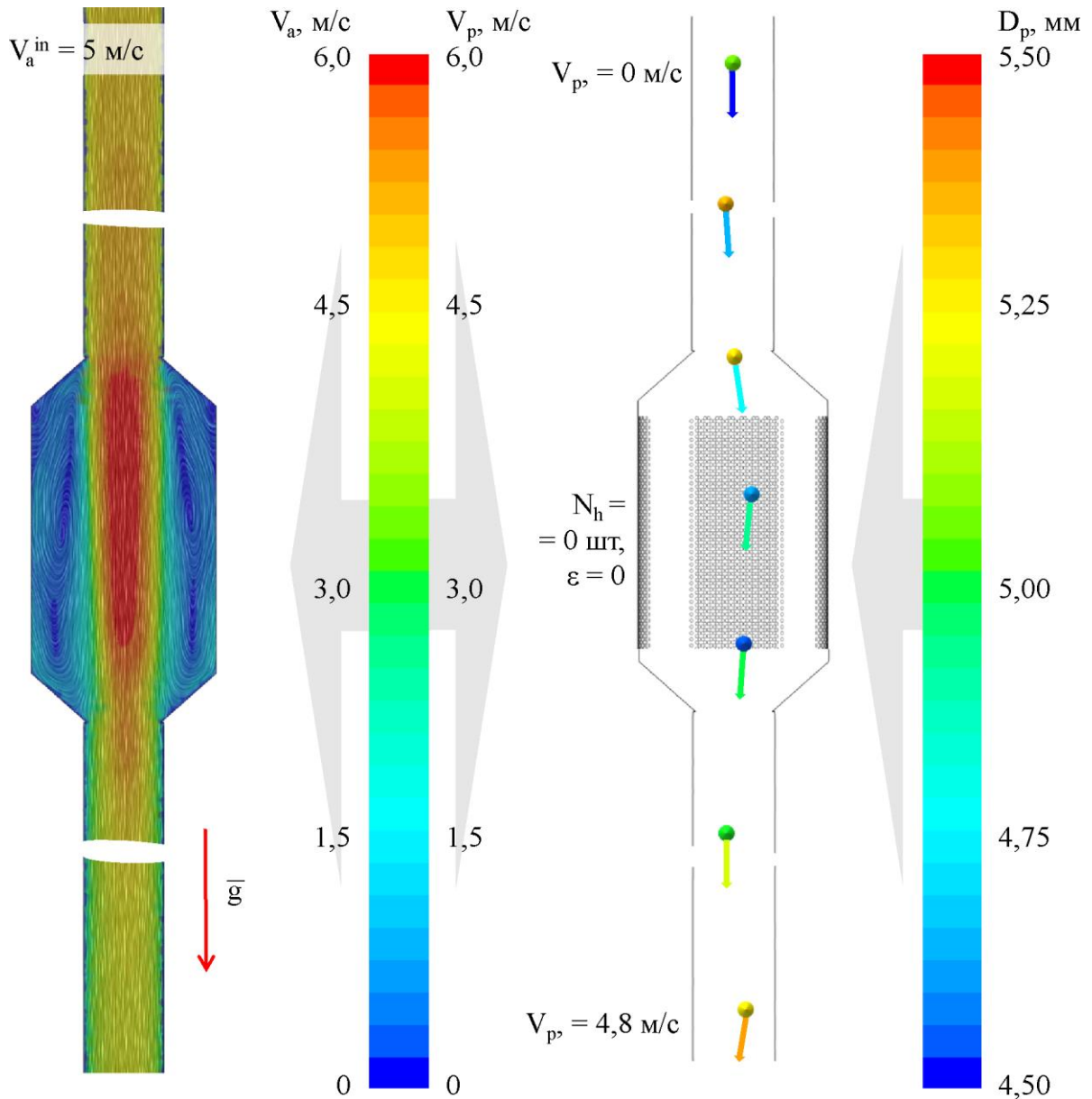


Рисунок 2.12 – Візуалізація процесу руху насіння у сповільнювачі при $V_a^{in} = 5 \text{ м/с}$, $\epsilon = 0$

В результаті чисельного моделювання отримано гістограми динаміки кількості насіння на вході і виході сповільнювача насіння. Приклад такого розподілу наведено на рис. 2.13. Норма висіву на виході Q_{out} можна розрахувати з рис. 7 наступним чином:

$$Q_{out} = \frac{\sum N_{out}}{10}, \quad (2.3)$$

де N_{out} – кількість насіння, яке перетнуло площину виходу сповільнювача насіння за 10 с.

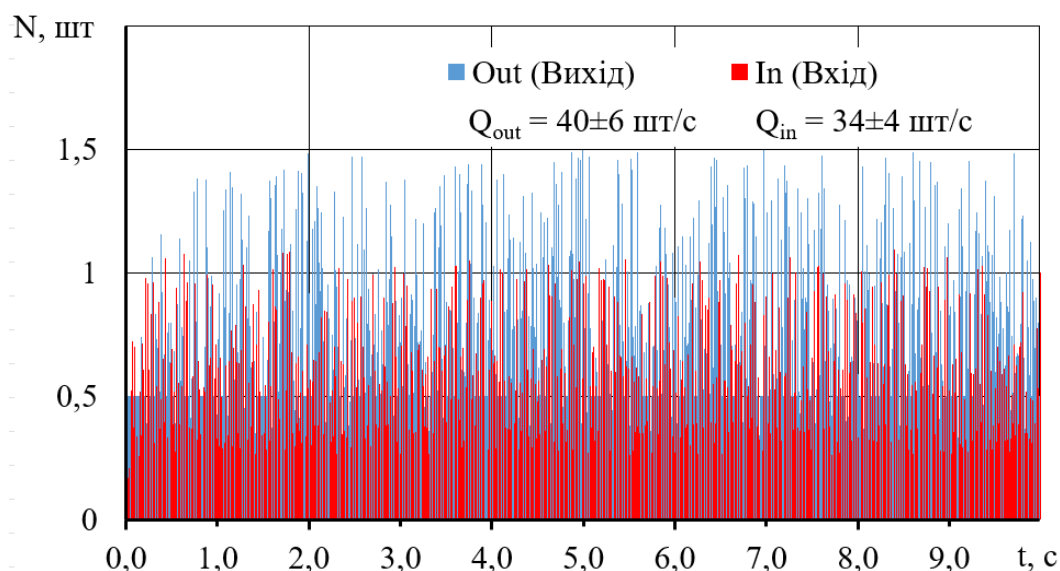


Рисунок 2.13 – Гістограми динаміки кількості насіння на вході і виході сповільнювача насіння при $V_a^{in} = 20$ м/с, $\varepsilon = 2,8$

За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Б) отримано рівняння регресії третього порядку $V_a^{out}(V_a^{in}, \varepsilon)$ в закодованому вигляді

$$\begin{aligned} V_a^{out} = & 6,23437 + 4,11161 x_1 + 0,0153571 x_1^2 + 0,055 x_1^3 - 3,64148 x_2 - \\ & - 3,22802 x_1 x_2 - 0,0139713 x_1^2 x_2 + 2,97602 x_2^2 + 1,98032 x_1 x_2^2 - \\ & - 1,59029 x_2^3. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Статистична обробка даних отриманого рівняння (2.4) наведена в табл. 2.3.

В розкодованому вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів за t -критерієм Стьюдента ($> t_{0,05}(40) = 2,02$):

$$\begin{aligned} V_a^{out} = & 0,462235 + 0,931994 V_a^{in} - 2,55814 \varepsilon - 0,513475 V_a^{in} \varepsilon + \\ & + 2,43694 \varepsilon^2 + 0,101037 V_a^{in} \varepsilon^2 - 0,579551 \varepsilon^3. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таблиця 2.3 – Статистична обробка даних отриманого рівняння (2.4)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
a ₀₀	6,23437	0,0596006	104,602	5,16473 · 10 ⁻⁴⁰
a ₁₀	4,11161	0,14021	29,3247	1,211 · 10 ⁻²³
a ₂₀	-3,64148	0,136863	-26,6067	2,01798 · 10 ⁻²²
a ₁₂	-3,22802	0,0667359	-48,37	4,999 · 10 ⁻³⁰
a ₁₁	0,0153571	0,0737252	0,208303	0,8364
a ₂₂	2,97602	0,0825112	36,068	2,8776 · 10 ⁻²⁶
a ₂₁₁	-0,0139713	0,112804	-0,123855	0,902256
a ₁₂₂	1,98032	0,116688	16,971	6,30965 · 10 ⁻¹⁷
a ₁₁₁	0,055	0,145388	0,378298	0,707873
a ₂₂₂	-1,59029	0,153039	-10,3914	1,857 · 10 ⁻¹¹

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

Побудувавши тривимірний графік рівняння (2.5) на рис. 2.14 видно, що із збільшенням швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} при фіксованих значеннях відношення площі випускних отворів до площі входу ϵ швидкість повітряного потоку на виході V_a^{out} сповільнювача насіння збільшується. Це спостереження є цілком логічним, так як потік повітря лише частково проходить крізь випускні отвори сповільнювача повітря і здійснює подальший рух в напрямку насіннепроводу. Збільшення відношення площі випускних отворів до площі входу ϵ при фіксованих значеннях швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} призводить до зменшення швидкості повітряного потоку на виході V_a^{out} .

Перевірка отриманого рівняння за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,95$ дає змогу стверджувати про адекватність рівняння (2.5) на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Б) отримано рівняння регресії третього порядку $V_p^{\text{out}}(V_a^{\text{in}}, \epsilon)$ в розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 V_p^{\text{out}} = & 4,45937 + 2,97988 x_1 - 0,00214286 x_1^2 - 0,00416667 x_1^3 - \\
 & - 3,34759 x_2 - 3,40118 x_1 x_2 - 0,000953161 x_1^2 x_2 + 4,07925 x_2^2 + \\
 & + 2,71255 x_1 x_2^2 - 2,32645 x_2^3.
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

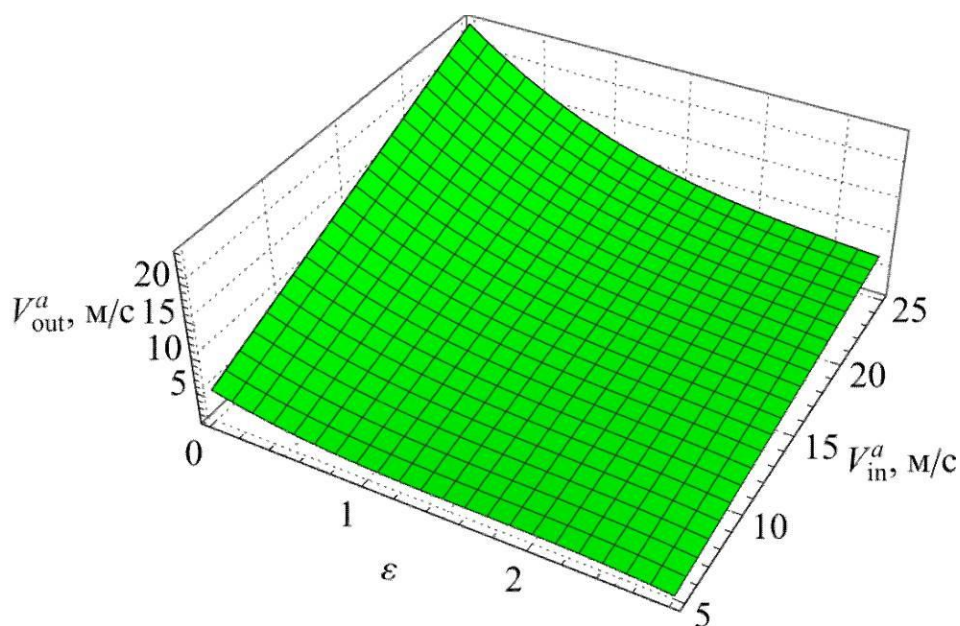


Рисунок 2.14 – Залежність швидкості повітряного потоку на виході V_a^{out} сповільнювача насіння від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} і відношення площі випускних отворів до площі входу ε

Статистичну обробку даних отриманого рівняння (2.6) наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Статистична обробка даних отриманого рівняння (2.6)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
a_{00}	4,45937	0,0963674	46,2747	$1,85554 \cdot 10^{-29}$
a_{10}	2,97988	0,226703	13,1444	$5,54357 \cdot 10^{-14}$
a_{20}	-3,34759	0,221292	-15,1275	$1,39984 \cdot 10^{-15}$
a_{12}	-3,40118	0,107904	-31,5203	$1,48289 \cdot 10^{-24}$
a_{11}	-0,00214286	0,119205	-0,0179762	0,985777
a_{22}	4,07925	0,133411	30,5765	$3,59443 \cdot 10^{-24}$
a_{211}	-0,000953161	0,182392	-0,0052259	0,995865
a_{122}	2,71255	0,188672	14,3771	$5,38367 \cdot 10^{-15}$
a_{111}	-0,00416667	0,235076	-0,0177248	0,985976
a_{222}	-2,32645	0,247446	-9,40185	$1,886 \cdot 10^{-10}$

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

В розкодованому вигляді без урахуванням незначущих коефіцієнтів за t -критерієм Стьюдента ($> t_{0,05}(40) = 2,02$):

$$V_p^{\text{out}} = 0,572252 + 0,909361 V_a^{\text{in}} - 3,74716 \varepsilon - 0,630449 V_a^{\text{in}} \varepsilon + 3,56621 \varepsilon^2 + \quad (2.7)$$

$$+ 0,138395 V_a^{\text{in}} \varepsilon^2 - 0,847833 \varepsilon^3.$$

Побудувавши тривимірний графік рівняння (2.6) на рис. 2.15 видно, що зміна швидкості насіння на виході V_p^{out} сповільнювача насіння схожа із зміною швидкості повітряного потоку на виході V_a^{out} (рис. 2.14). Це можна пояснити тим фактом, що насінини під дією повітряного потоку, який є нерівномірним у поперечному перерізі, здійснюють окрім поступального руху, ще й обертовий навколо власної осі симетрії, що зменшує лінійну швидкість насінини.

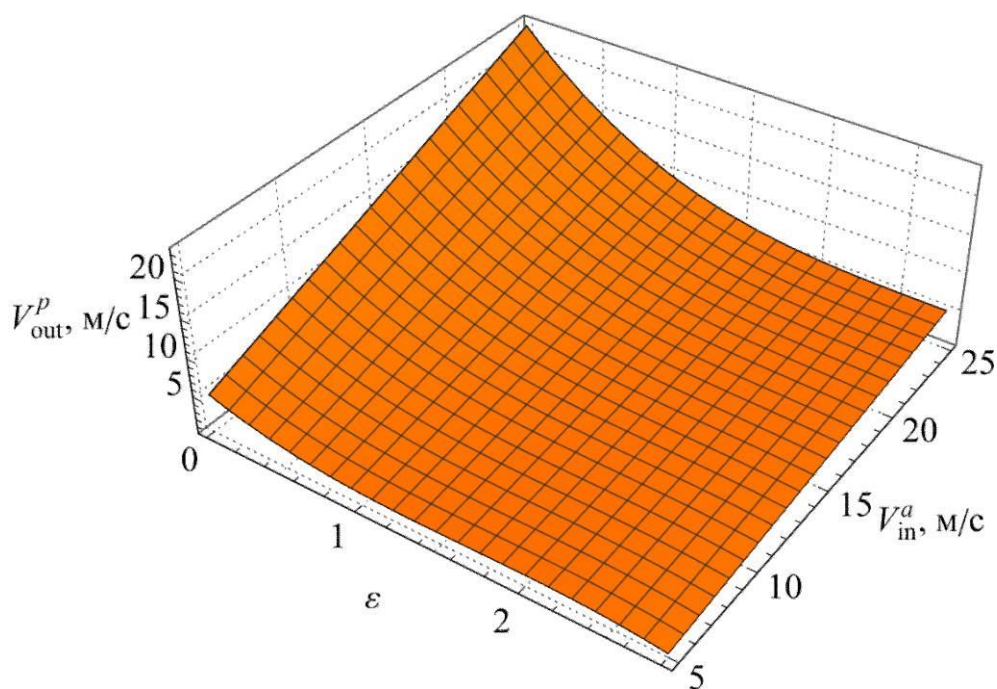


Рисунок 2.15 – Залежність швидкості насіння на виході V_p^{out} сповільнювача насіння від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} і відношення площі випускних отворів до площі входу ε

Перевірка отриманого рівняння за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,94$ дає змогу стверджувати про адекватність рівняння (2.7) на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії третього порядку η ($V_a^{\text{in}}, \varepsilon$) в розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \eta = & 0,994366 + 0,0187704 x_1 + 0,00285714 x_{12} - 0,005 x_1^3 + \\ & + 0,0396745 x_2 + 0,0457743 x_1 x_2 - 0,00738282 x_1^2 x_2 + 0,0718848 x_2^2 + \\ & + 0,0467741 x_1 x_2^2 + 0,0455108 x_2^3. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Статистичну обробку даних отриманого рівняння (2.8) наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Статистична обробка даних отриманого рівняння (2.8)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
a ₀₀	0,994366	0,00490177	202,858	1,24792 · 10 ⁻⁴⁸
a ₁₀	0,0187704	0,0115314	1,62777	0,114031
a ₂₀	0,0396745	0,0112561	3,5247	0,00138296
a ₁₂	0,0457743	0,00548861	8,33988	2,61765 · 10 ⁻⁹
a ₁₁	0,00285714	0,00606343	0,471209	0,6409
a ₂₂	0,0718848	0,00678603	10,5931	1,17591 · 10 ⁻¹¹
a ₂₁₁	-0,00738282	0,00927744	-0,795782	0,432411
a ₁₂₂	0,0467741	0,00959689	4,87388	0,0000332565
a ₁₁₁	-0,005	0,0119572	-0,418157	0,678811
a ₂₂₂	0,0455108	0,0125865	3,61585	0,00108416

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

В розкодованому вигляді без урахуванням незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента ($> t_{0,05}(40) = 2,02$):

$$\begin{aligned} \eta = & 0,979566 + 0,0000999788 V_a^{\text{in}} + 0,0743557 \varepsilon - 0,00341242 V_a^{\text{in}} \varepsilon - \\ & 0,0687799 \varepsilon^2 + 0,00238643 V_a^{\text{in}} \varepsilon^2 + 0,0165856 \varepsilon^3. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Побудувавши тривимірний графік рівняння (2.9) на рис. 2.16 видно, що із збільшенням швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} , при фіксованих значеннях відношення площі випускних отворів до площі входу ε , коефіцієнт зміни норми висіву η збільшується. Збільшення відношення площі випускних отворів до площі входу ε при фіксованих значеннях швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} призводить до збільшення коефіцієнта зміни норми висіву η . Це відбувається через те, що швидкість насіння на виході зменшується (рис. 2.15) і відбувається скупчення насіння на виході.

Задана норма висіву повинна зберігатися після проходження насіння через сповільнювач. Згідно агротехнічних вимог відхилення норми висіву повинно не

перевищувати 1 %. Тоді умовою роботи сповільнювача є $\eta \leq 1,01$, що відображено на рис. 2.16, як не прозора область.

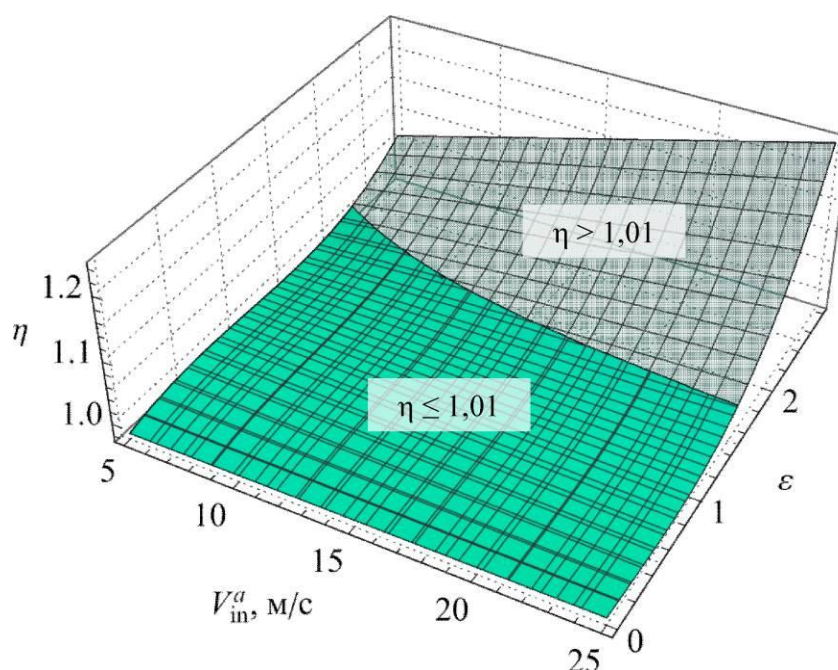


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнту зміни норми висіву η від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} і відношення площі випускних отворів до площі входу ε сповільнювача насіння

Перевірка отриманого рівняння за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,92$ дає змогу стверджувати про адекватність рівняння (2.9) на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

Так як для кожного критерію оцінки дослідів визначені оптимальні значення факторів, які не співпадають, вирішимо компромісну задачу, яка має вигляд:

$$\begin{cases} V_p^{\text{out}}(V_a^{\text{in}}, \varepsilon) \rightarrow \min, \\ \eta(V_a^{\text{in}}, \varepsilon) \leq 1,01. \end{cases} \quad (2.10)$$

Задачу (2.10) вирішено в програмному пакеті Wolfram Cloud. Графічну інтерпретацію рішення рівнянь (2.10) спільно з (2.7) і (2.9) наведено на рис. 2.17. Межа розділення двох областей і визначає рівняння залежності між відношенням

площі випускних отворів до площі входу ε сповільнювача насіння і швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} :

$$\varepsilon = 0,567137 + 0,172935 V_a^{\text{in}} + 0,00344297 (V_a^{\text{in}})^2 - 0,0000296843 (V_a^{\text{in}})^3. \quad (2.11)$$

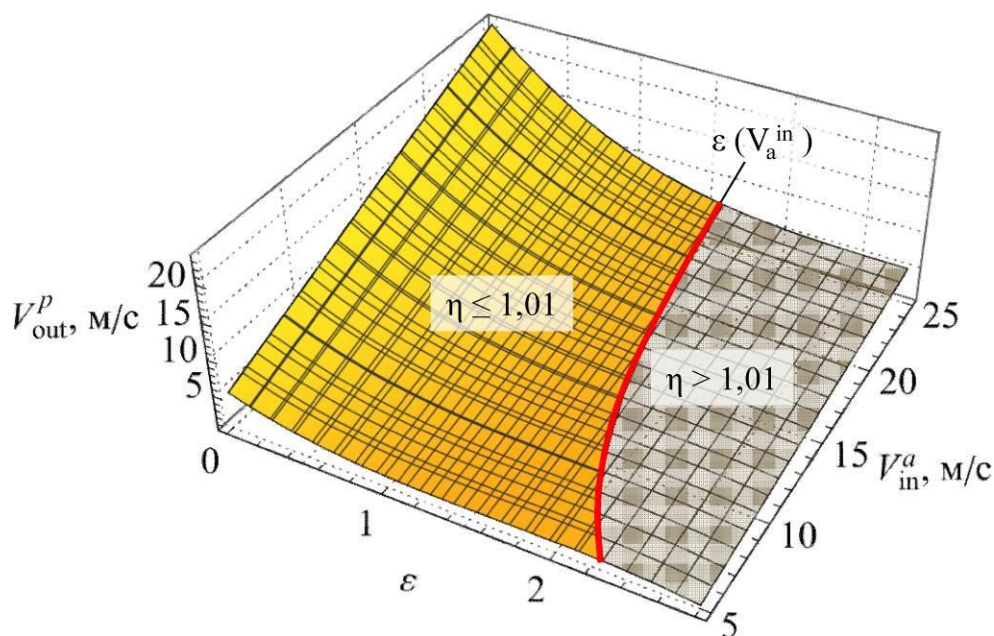


Рисунок 2.17 – Графічна інтерпретація рішення рівнянь (2.10) спільно з (2.7) і (2.9)

Підставляючи отримане рівняння (2.11) у (2.5), (2.7), (2.9) отримуємо наступні діапазони зміни критеріїв досліджень: $V_a^{\text{out}} \in [1,8; 9,4]$ м/с, $V_p^{\text{out}} \in [1,5; 6,6]$ м/с, $\varepsilon \in [1,60; 2,26]$.

Рівняння (2.11) показує залежність відношення площі випускних отворів до площі входу ε від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} , при забезпечені умови (2.10). При зазначеному діапазоні швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} необхідно корегувати ε , яка знаходиться в межах від 1,60 до 2,26.

2.5 Аналітичні дослідження заспокоювача насіння

Заспокоювач насіння (рис. 2.1) виконує функцію обмежувача руху насіння після його відбиття від дна борозенки. Для обґрунтування форми зазначеного

заспокоювача розглянемо кінематику руху насінини після вильоту з висівного башмака. Складемо розрахункову схему (рис. 2.18) і приймемо наступні припущення і спрощення:

- насінини представляється у вигляді матеріальної точки;
- розглядається плоска задача;
- опір повітря на насінину не діє;
- в результаті відскоку насіння від поверхні, її швидкість зменшується на коефіцієнт відновлення [147].

Розіб'ємо траєкторію руху насінини на декілька ділянок:

– 01 – виліт з висівного башмака, характеризується початковою швидкістю руху насінини \overline{V}_{p0} , кутом вильоту α і координатами початкового розміщення x_0, y_0 ;

– 12 – відбиття насінини від дна борозенки, характеризується коефіцієнтом відновлення для ґрунту k_s і горизонтальною відносною швидкістю руху поверхні ґрунту \overline{V}_s ;

– 23 – відбиття насінини від заспокоювача насіння, характеризується коефіцієнтом відновлення для матеріалу заспокоювача k_u , висотою його розміщення H_u і кутом нахилу β ;

– 34 – повторне відбиття насінини від дна борозенки, характеризується коефіцієнтом відновлення швидкості для ґрунту k_s і горизонтальною відносною швидкістю руху поверхні \overline{V}_s .

Спираючись на загальноприйняті положення кінематики [148, 149] розглянемо кінематичні рівняння руху насінини для кожної зазначеної вище ділянки.

Для ділянки 01:

$$\begin{cases} x_1(t_{01}) = x_0 + V_{p0} \cos \alpha t_{01}, \\ y_1(t_{01}) = y_0 - V_{p0} \sin \alpha t_{01} - gt_{01}^2/2, \\ V_{p1x}(t_{01}) = V_{p0} \cos \alpha, \\ V_{p1y}(t_{01}) = -V_{p0} \sin \alpha - gt_{01}. \end{cases} \quad (2.12)$$

де x_1, y_1 – поточні значення координат насіння на ділянці 01, м; x_0, y_0 – початкові значення координат насіння на ділянці 01, м; V_{p0} – початкова швидкість вильоту

насінини на ділянці 01, м/с; α – початковий кут вильоту насінни на ділянці 01, м/с;
 t_{01} – поточний час на ділянці 01, с; V_{plx} , V_{ply} – поточні значення проєкцій
швидкостей руху насіння на ділянці 01, м; g – прискорення вільного падіння, м/с².

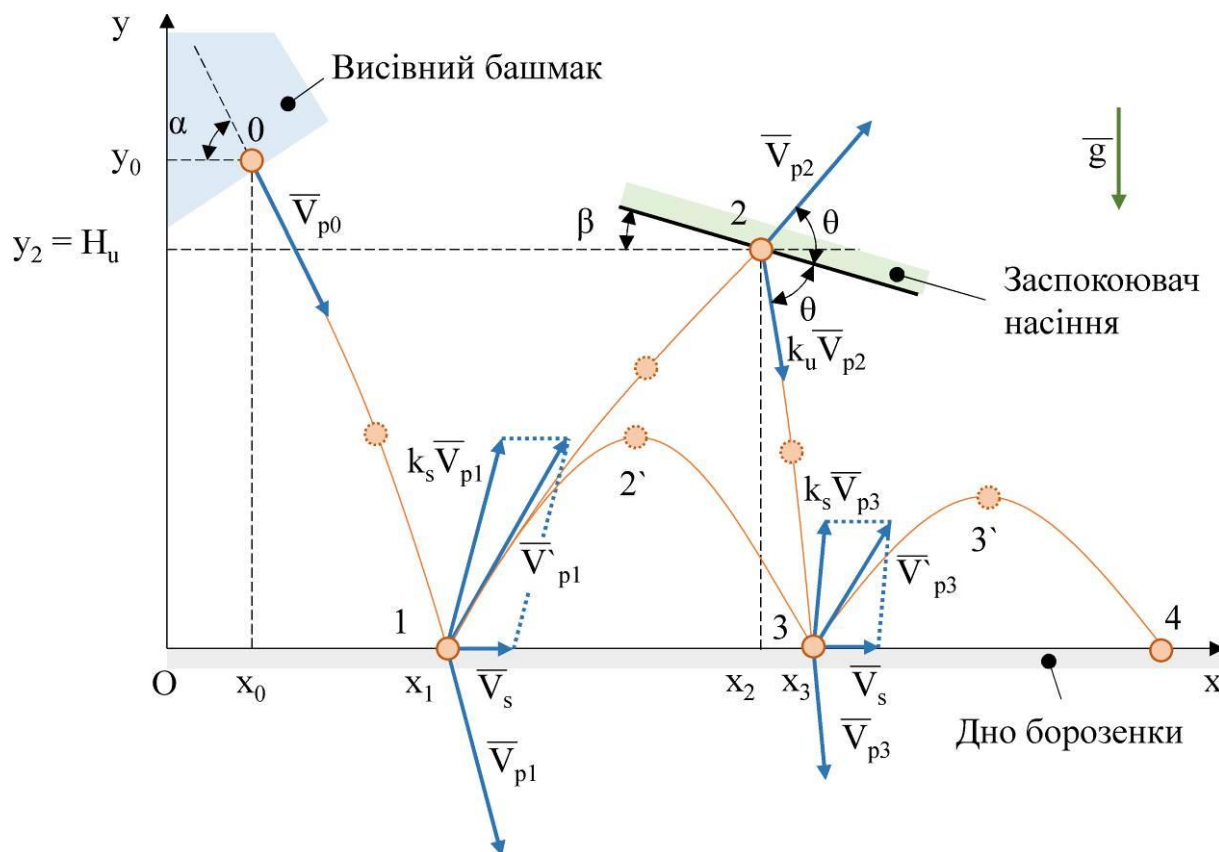


Рисунок 2.18 – Розрахункова схема руху насіння після вильоту з висівного башмака висівної секції пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series

В точці 2 відбувається відбиття насіння від дна борозенки і зміна швидкості з урахуванням відносної швидкості переміщення поверхні і коефіцієнта відновлення:

$$\begin{cases} V'_{plx}(t_1) = k_s V_{plx}(t_1) + V_s, \\ V'_{ply}(t_1) = -k_s V_{ply}(t_1). \end{cases} \quad (2.13)$$

де V_{plx} , V_{ply} – значення проєкцій швидкостей руху насіння в точці 1 після відбиття, м/с; V_{plx} , V_{ply} – значення проєкцій швидкостей руху насіння в точці 1 до відбиття, м/с; t_1 – момент знаходження насіння в точці 1, с; V_s – горизонтальна

відносна швидкість руху поверхні, м/с; k_s – коефіцієнт відновлення швидкості насіння при ударі об поверхню ґрунту.

Момент знаходження насіння в точці 1 можна визначити з умови $y_1(t_1) = 0$, $t_1 > 0$:

$$t_1 = \frac{-V_{p0} + \sqrt{(V_{p0} \sin \alpha)^2 + 2gy_0}}{g}. \quad (2.14)$$

Для ділянки 12:

$$\begin{cases} x_2(t_{12}) = x_1(t_1) + V'_{p1x} t_{12}, \\ y_2(t_{12}) = y_1(t_1) + V'_{p1y} t_{12} - gt_{12}^2/2, \\ V_{p2x}(t_{12}) = V'_{p1x}, \\ V_{p2y}(t_{12}) = V'_{p1y} - gt_{12}. \end{cases} \quad (2.15)$$

де x_2 , y_2 – поточні значення координат насіння на ділянці 12, м; t_{12} – поточний час на ділянці 12, с; V_{p2x} , V_{p2y} – поточні значення проєкцій швидкостей руху насіння на ділянці 12, м.

Якщо швидкість руху насіння достатньо висока, то в точці 2 відбувається відбиття насіння від поверхні заспокоювача та зміна швидкості з урахуванням коефіцієнта відновлення. Вирішуючи геометричну задачу з рис. 2.18 маємо:

$$\begin{cases} V'_{p2x}(t_2) = k_u \sqrt{V_{p2x}^2(t_2) + V_{p2y}^2(t_2)} \cos \left(2\beta + \arccos \frac{V_{p2x}(t_2)}{\sqrt{V_{p2x}^2(t_2) + V_{p2y}^2(t_2)}} \right), \\ V'_{p2y}(t_2) = -k_u \sqrt{V_{p2x}^2(t_2) + V_{p2y}^2(t_2)} \sin \left(2\beta + \arccos \frac{V_{p2x}(t_2)}{\sqrt{V_{p2x}^2(t_2) + V_{p2y}^2(t_2)}} \right). \end{cases} \quad (2.16)$$

де V'_{p2x} , V'_{p2y} – значення проєкцій швидкостей руху насіння в точці 2 після відбиття, м/с; V_{p2x} , V_{p2y} – значення проєкцій швидкостей руху насіння в точці 2 до відбиття, м/с; t_2 – момент знаходження насіння в точці 2, с; k_u – коефіцієнт відновлення швидкості насіння при ударі об поверхню заспокоювача.

Момент знаходження насіння в точці 2 можна визначити з умови $y_2(t_2) = H_u$, $t_2 > 0$:

$$t_2 = \frac{V'_{ply} + \sqrt{(V'_{ply})^2 + 2g(y_1(t_1) - H_u)}}{g}. \quad (2.17)$$

Для ділянки 23:

$$\begin{cases} x_3(t_{23}) = x_2(t_2) + V'_{p2x} t_{23}, \\ y_3(t_{23}) = y_2(t_2) + V'_{p2y} t_{23} - gt_{23}^2/2, \\ V_{p3x}(t_{23}) = V'_{p2x}, \\ V_{p3y}(t_{23}) = V'_{p2y} - gt_{23}. \end{cases} \quad (2.18)$$

де x_3, y_3 – поточні значення координат насіння на ділянці 23, м; t_{23} – поточний час на ділянці 23, с; V_{p3x}, V_{p3y} – поточні значення проєкцій швидкостей руху насіння на ділянці 23, м.

В точці 3 відбувається відбиття насіння від дна борозенки і зміна швидкості з урахуванням відносної швидкості переміщення поверхні і коефіцієнта відновлення:

$$\begin{cases} V'_{p3x}(t_3) = k_s V_{p3x}(t_3) + V_s, \\ V'_{p3y}(t_3) = -k_s V_{p3y}(t_3). \end{cases} \quad (2.19)$$

де V'_{p3x}, V'_{p3y} – значення проєкцій швидкостей руху насіння в точці 3 після відбиття, м/с; V_{p3x}, V_{p3y} – значення проєкцій швидкостей руху насіння в точці 3 до відбиття, м/с; t_3 – момент знаходження насіння в точці 3, с.

Момент знаходження насіння в точці 3 можна визначити з умови $y_3(t_3) = 0$, $t_3 > 0$:

$$t_3 = \frac{V'_{p2y} + \sqrt{(V'_{p2y})^2 + 2gy_2(t_2)}}{g}. \quad (2.20)$$

Якщо швидкість руху насіння достатньо низька, то вона не досягає заспокоювача, а летить по параболічній траєкторії до дна борозенки в точку 3. Тоді момент знаходження насіння в точці 3 можна визначити з умови $y_2(t_3) = 0$, $t_3 > 0$:

$$t_3 = \frac{V'_{ply} + \sqrt{(V'_{ply})^2 + 2gy_1}}{g}. \quad (2.21)$$

Для ділянки 34:

$$\begin{cases} x_4(t_{34}) = x_3(t_3) + V'_{p3x} t_{34}, \\ y_4(t_{34}) = y_3(t_3) + V'_{p3y} t_{34} - gt_{34}^2/2, \\ V_{p4x}(t_{34}) = V'_{p3x}, \\ V_{p4y}(t_{34}) = V'_{p3y} - gt_{34}. \end{cases} \quad (2.22)$$

де x_4, y_4 – поточні значення координат насіння на ділянці 34, м; t_{34} – поточний час на ділянці 34, с; V_{p4x}, V_{p4y} – поточні значення проєкцій швидкостей руху насіння на ділянці 34, м.

Насінина летить по параболічній траєкторії до дна борозенки в точку 4. Тоді момент знаходження насіння в точці 4 можна визначити з умови $y_4(t_4) = 0, t_4 > 0$:

$$t_4 = \frac{V'_{p3y} + \sqrt{(V'_{p3y})^2 + 2gy_3(t_3)}}{g}. \quad (2.23)$$

Сумісне рішення рівнянь (2.12)–(2.23) в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток В) дає змогу отримати траєкторії руху насінини від висівного башмака до дна борозенки (рис. 2.19).

Для цього були прийняті наступні параметри: $g = 9,81$ м/с², $k_s = 0,3$, $k_u = 0,6$, $x_0 = 0-0,02$ м, $y_0 = 0,15-0,17$ м, $V_s = 1$ м/с. Інші параметри варіювалися в зазначених межах: $V_{p0} = 4-20$ м/с, $\alpha = 5-60$ °, $H_u = 0,02-0,20$ м, $\beta = 0-18$ °.

Аналіз рис. 2.19 показує, що при певних значеннях змінних параметрів, параболічна траєкторія 34 (рис. 2.18) має вершину нижче, ніж висота розміщення заспокоювача H_u . Ці значення параметрів і є раціональними, так як забезпечується умова не вильоту насіння з дна борозенки, тобто:

$$y_{3'} < H_u \quad (2.24)$$

Ще однією умовою є забезпечення точності висіву, яку можна досягти якщо: різниця відстані між точками 1–4 і добутком швидкості переміщення сівалки на час, за який насіння потрапляє з точки 1 до точки 4, повинна бути найменшою. Тобто

$$\Delta x = x_4(t_4) - x_1(t_1) - V_s(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \rightarrow \min \quad (2.25)$$

Для визначення раціональних значень параметрів $V_{p0}, \alpha, H_u, \beta$, при яких виконуються умови (2.24) і (2.25), проведемо їх варіювання в програмному пакеті Wolfram Cloud.

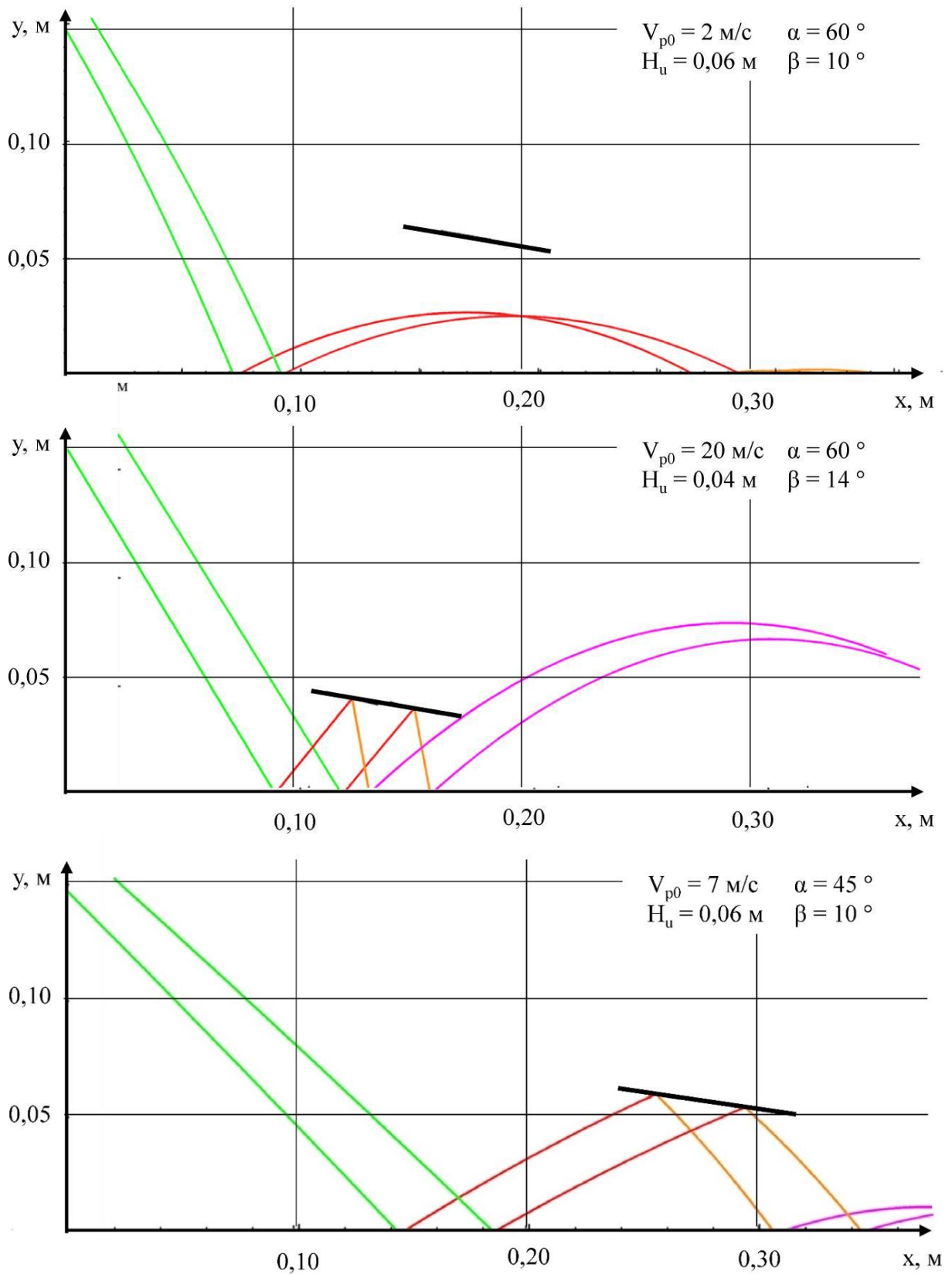


Рисунок 2.19 – Результати розрахунку траєкторії польоту насіння після вильоту з висівного башмака висівної секції пневматичної зернової сівалки John Deere 90

Series

В результаті отримано графіки залежностей y_3 і Δx від V_{p0} , α , H_u , β , які наведено на рис. 2.20.

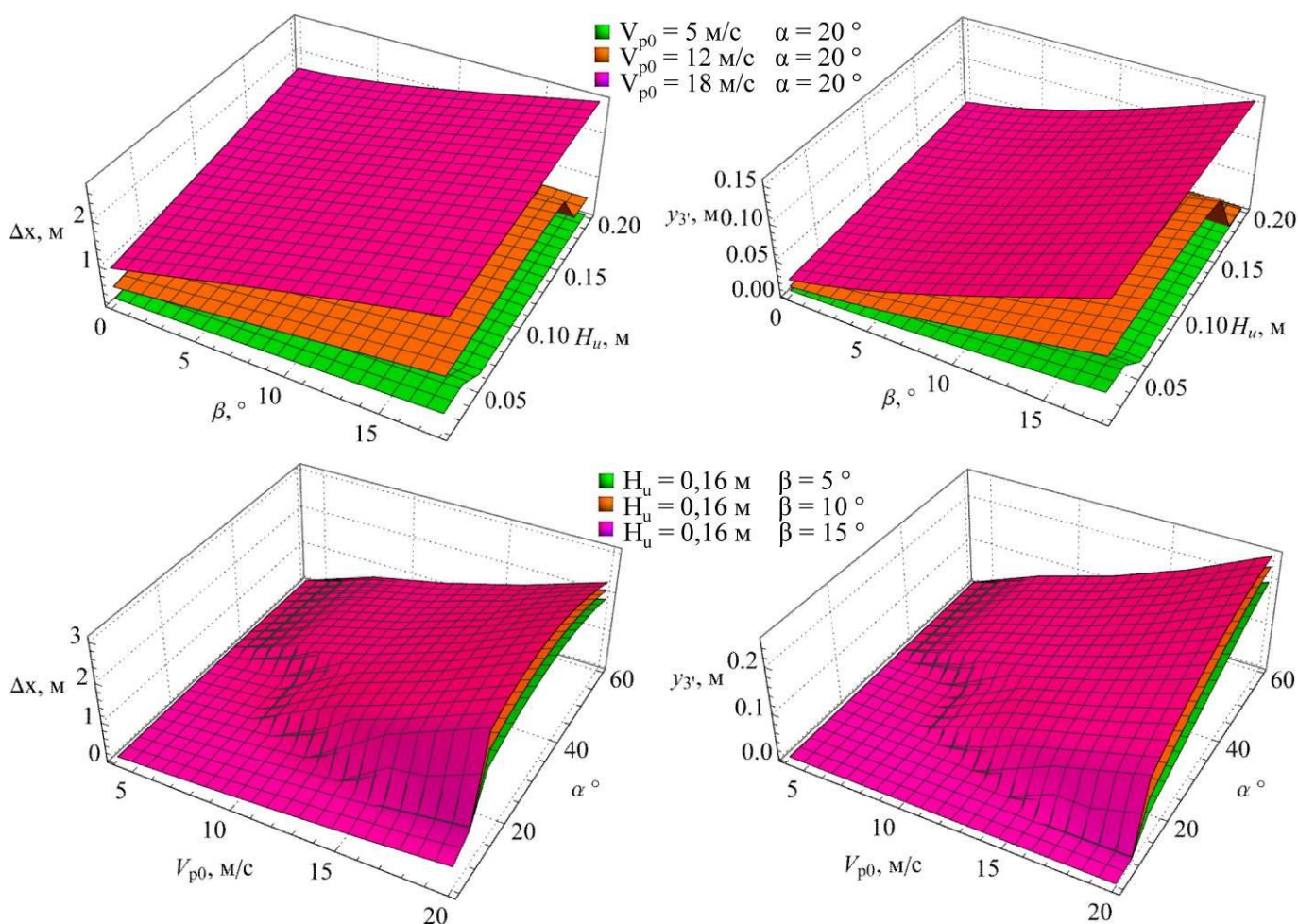


Рисунок 2.20 – Залежності висоти параболічної траєкторії y_3 і різниці відстані Δx від параметрів V_{p0} , α , H_u , β

Аналізуючи рис. 2.20 наочно видно, що із збільшенням кута нахилу β і висоти розміщення H_u заспокоювача збільшується висота параболічної траєкторії насіння після відскоку від дна борозенки y_3 та відстань Δx , що призводить до зниження точності висіву і підвищує ймовірність вильоту насіння за межі висівного ложе. Подібна ситуація спостерігається також для початкової швидкості руху насінин V_{p0} і кута їх вильоту з висівного башмака α .

Виконуючи умови (2.24) і (2.25), для отриманих залежностей рис. 2.20 в Wolfram Cloud маємо наступні раціональні параметри за умови високих швидкостей

(потрапляння насіння до заспокоювача): кути нахилу $\alpha = 47^\circ$, $\beta = 0^\circ$, висота розміщення заспокоювача повинна бути не вище $H_u < 0,134$ м. Так як заспокоювач насіння кріпиться до висівного башмака, то початковий кут його нахилу складає $\alpha = 47^\circ$, а кінцевий $\beta = 0^\circ$. Враховуючи рис. 2.19, приймаємо довжину заспокоювача – 150 мм.

Поперечний профіль заспокоювача повинен забезпечувати відбиття насінин, які потрапили на нього при невеликому відхиленні їх траєкторії ($\pm 0,01$ м). Цього можна досягти використовуючи в якості форми профіля заспокоювача параболу із фокусом $p_f = 0,134$ м:

$$y = -z^2 / (4p_f), \quad (2.25)$$

де z – поперечна координата, м.

Враховуючи вище зазначені розрахунки, форму робочої поверхні заспокоювача можна представити у тривимірному вигляді, як показано на рис. 2.21.

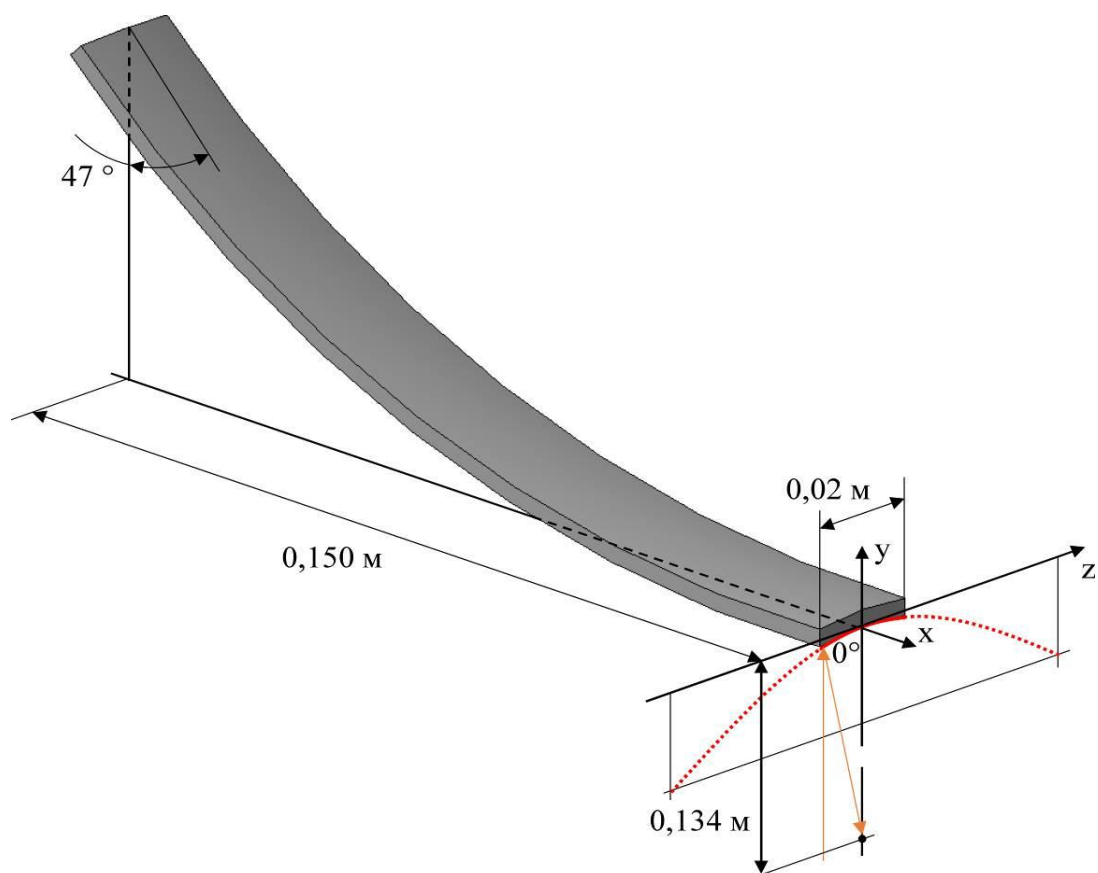


Рисунок 2.21 – Розрахована тривимірна модель робочої поверхні заспокоювача насіння

На рисунку жовтими стрілками відмічено рух насінин і відбиття їх від параболічної поверхні. Згідно геометричних властивостей параболи насінина повинна змінити свою траєкторію руху і перетнути визначений фокус. Тобто потрапити у середину дна борозенки.

Так як приведені аналітичні дослідження мали ряд припущень і спрощень для первинної оцінки форми робочої поверхні заспокоювача насіння, то в подальшому проведемо чисельне моделювання процесу функціонування всієї удосконаленої секції пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

2.6 Симуляція коливань заспокоювача насіння

Для подальших досліджень приймаємо розраховану тривимірну модель робочої поверхні заспокоювача насіння (рис. 2.21). Згідно схеми рис. 2.1 заспокоювач насіння одним кінцем жорстко закріплений до висівного башмака, а інший знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. Через нерівність поверхні ґрунту відбувається постійне коливання висівної секції, що приводить до взаємодії заспокоювача насіння із поверхнями прикочувального колеса і ґрунту. Тому на вільному кінці заспокоювача додано отвір, що дозволяє під час руху сівалки пропускати насінини, які знаходяться на поверхні ґрунту, та п'яту, що забезпечує рівномірну дію прикочувального колеса (рис. 2.22). Згідно досліджень [150–153] середнє значення амплітуда коливань сівалки в вертикальному напрямку складає $\pm 0,03$ м, а частоти – 2 Гц.

З використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведемо симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. Розрахункова схема наведена на рис. 2.22.

В якості сіткових моделей обрано генератор поверхневої і тетраедральної сіток із базовим розміром комірки – 0,01 м. В якості фізичних моделей обрано тривимірну кінцево-елементну модель аналізу напружень в суцільному твердому тілі, ізотропну лінійну модуль пружності, модель пластичності J2.

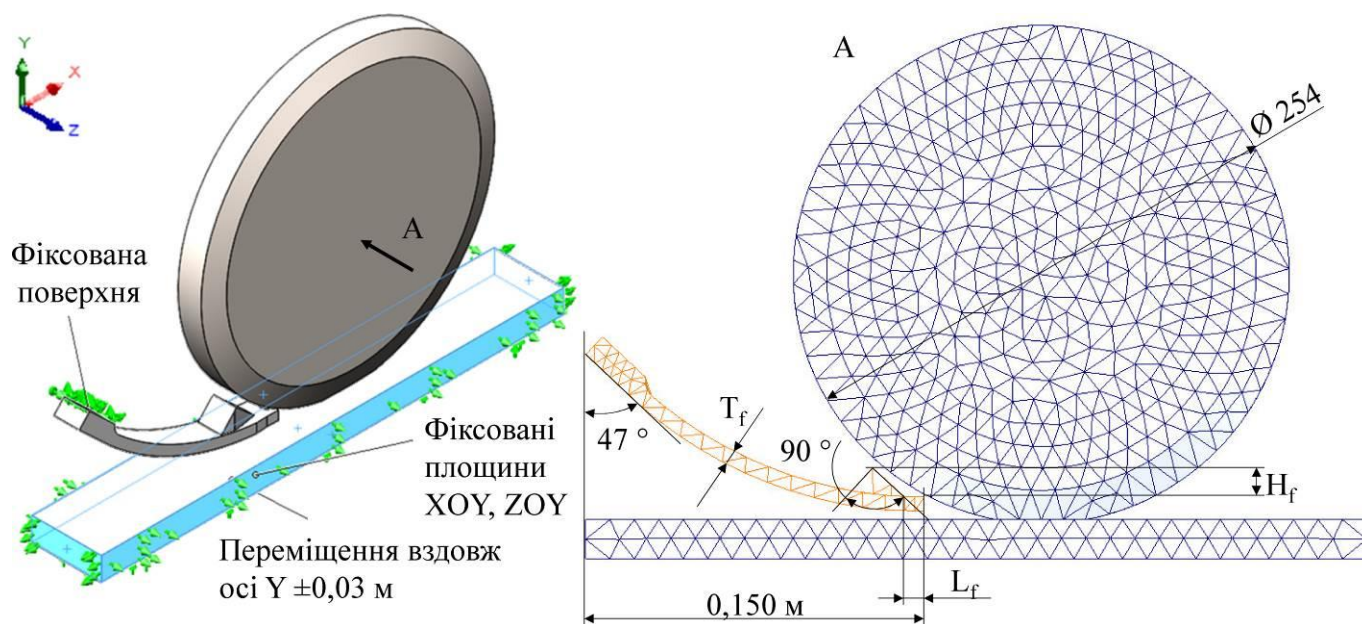


Рисунок 2.22 – Розрахункова схема симуляції коливань заспокоювача насіння

В якості спрощення було прийнято відсутність деформацій для прикочувального колеса і ґрунту. Тобто, в результаті коливань сівалки (переміщення вздовж осі Y) деформується лише заспокоювач насіння через контактну взаємодію відповідних поверхонь.

В якості факторів досліджень обрано:

- товщину заспокоювача T_f , яка змінювалась в межах від 5 мм до 8 мм із кроком 1,5 мм;
- висоту п'яти заспокоювача H_f , яка змінювалась в межах від 5 мм до 25 мм із кроком 5 мм;
- розміщення п'яти відносно вільного кінця заспокоювача L_f , яка змінювалась в межах від 5 мм до 15 мм із кроком 10 мм.

В якості варіантів матеріалу було використано ABS, поліамід 6 (Nylon) і термопластичний поліуретан (TPU) виробництва monofilament.com.ua.

Прийняті фізико-механічні властивості зазначених матеріалів наведено в табл. 2.6.

В результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруження σ_f , що виникає в кожній комірці створеної сітки (рис. 2.23).

Таблиця 2.6 – Фізико-механічні властивості матеріалів заспокоювача насіння

Показник	Nylon	ABS	TPU
Модуль пружності, МПа	2600	2900	300
Коефіцієнт Пуассона	0,387	0,389	0,410
Модуль зсуву, МПа	817	318	29
Густина, кг/м ³	1200	1050	1220
Межа міцності при згині, МПа	70	41	38
Межа плинності, МПа	62	55	65

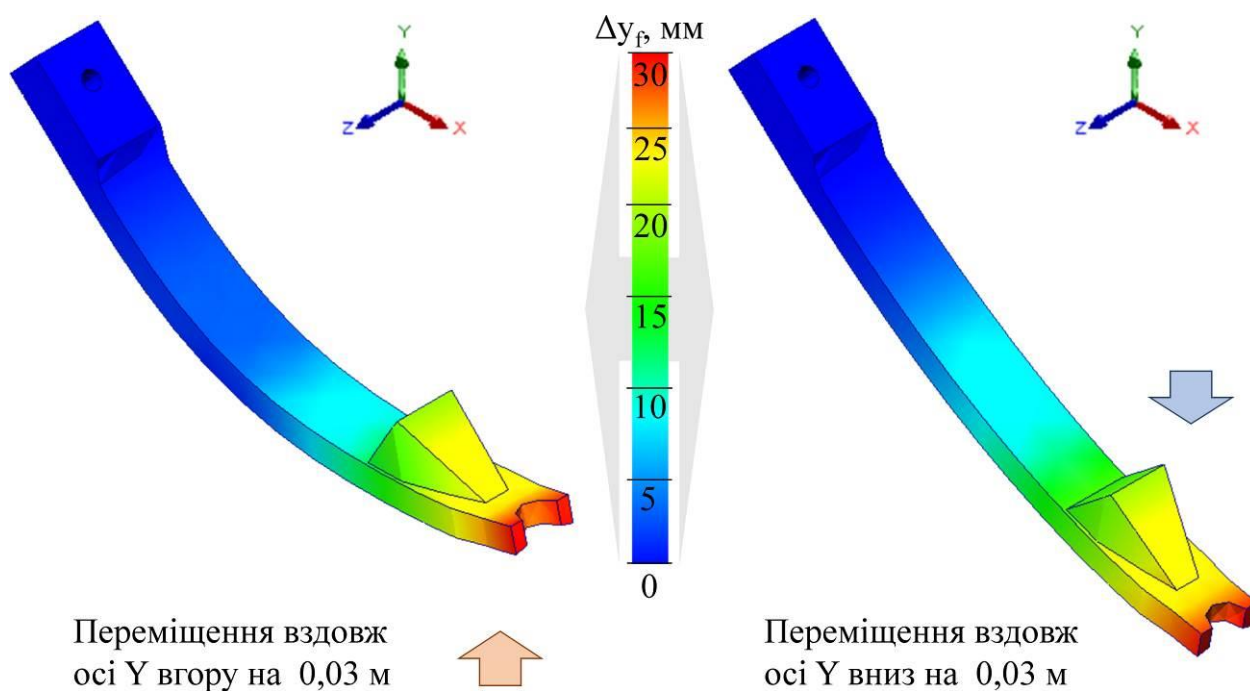
На рис 2.23 наведено один із варіантів симуляції: матеріал – ABS, $T_f = 8$ мм, $H_f = 25$ мм, $L_f = 25$ мм. З рисунку видно, що при відносному переміщенні вгору найбільше напруження спостерігається на вільному кінці сповільнювача (49,7 МПа) і в середині (48,3 МПа).

Для переміщення вниз найбільше напруження спостерігається на закріпленому кінці сповільнювача (18,4 МПа). Для інших варіантів симуляції характер розподілу зберігається, відмінність лише у значеннях напруження.

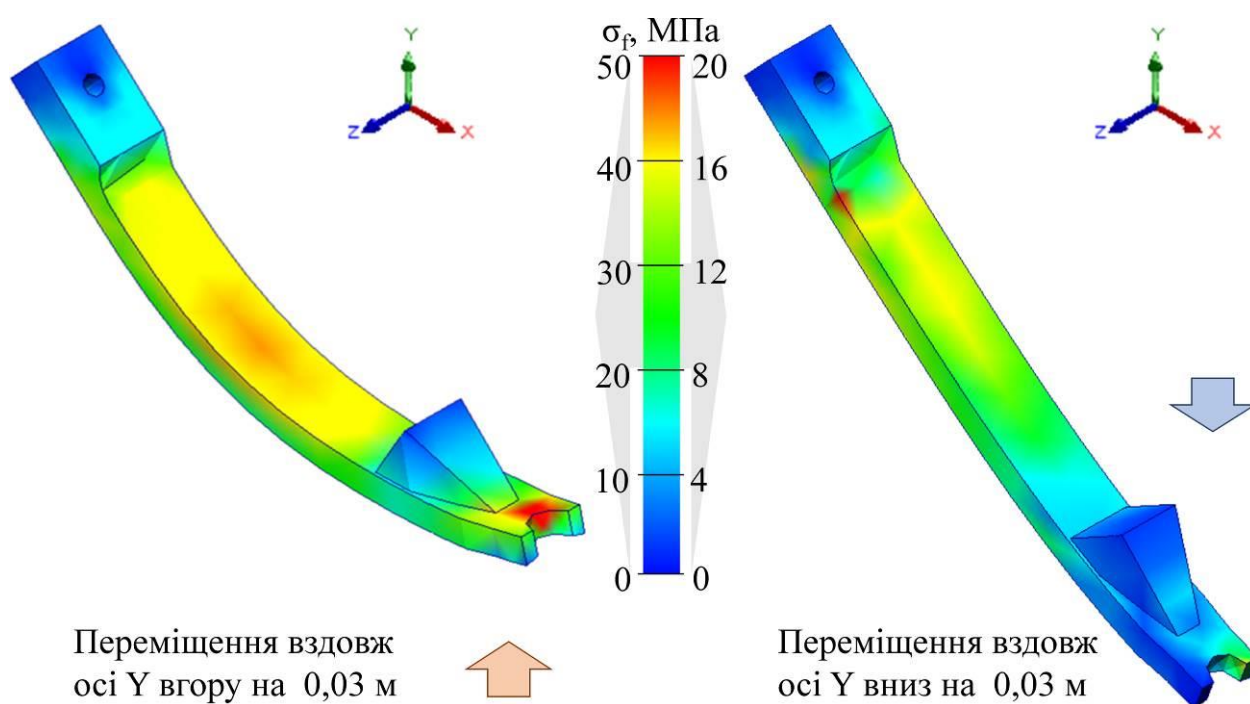
Враховуючи прийняту частоту коливань – 1 Гц, загальний ресурс сівалки John Deere 90 Series до поточного ремонту – 6000 га [154–156], швидкість руху – 2 м/с, відстань між сошниками – 0,19 м і їх кількість – 48 од., маємо загальну кількість коливань заспокоювача – $1 \text{ Гц} \times 6000 \text{ га} \times 10000 \text{ м}^2/\text{га} / 0,19 \text{ м} / 48 \text{ од.} / 2 \text{ м/с} = 3289473$ шт.

Для аналізу втоми заспокоювача при циклічних коливаннях отримано розподіл частки пошкоджень і терміну служби (рис. 2.24). Представлена епюра показує відсоток довговічності конструкції. Коефіцієнт пошкодження 100 % і вище означає, що протягом заданого періоду дії навантаження очікується руйнування деталі. Термін служби показує кількість циклів, які спричиняють руйнування заспокоювача в кожному місцеположенні.

Як видно з рис. 2.24 заспокоювач містить проблемні зони, які відмічено червоним. В цих зонах ймовірно руйнування деталі при великій кількості циклів коливань.



а



б

Рисунок 2.23 – Розподіл абсолютної деформації Δy_f (а) і напруження σ_f (б) заспокоювача для варіанту симуляції: матеріал – ABS, $T_f = 8$ мм, $H_f = 25$ мм, $L_f = 25$ мм

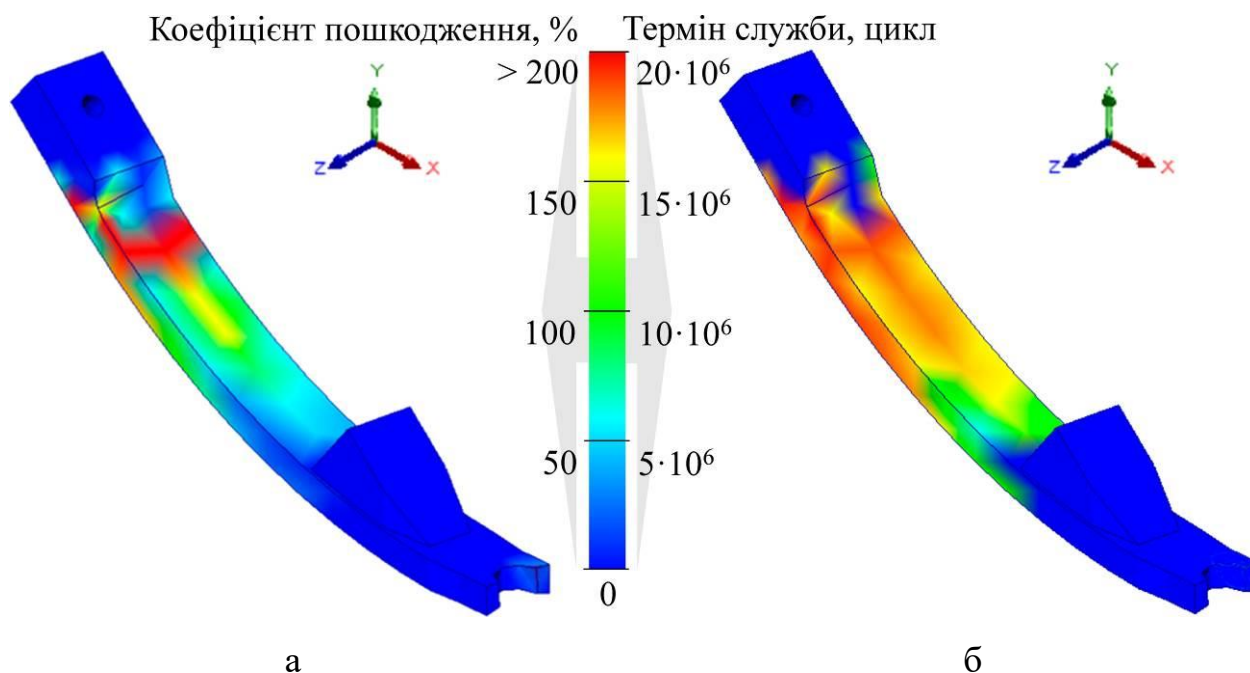


Рисунок 2.24 – Епюра коефіцієнта пошкодження (а) і терміну служби (б) заспокоювача для варіанту симуляції: матеріал – ABS, $T_f = 8$ мм, $H_f = 25$ мм, $L_f = 25$ мм

Тому, в подальшому, необхідно обґрунтувати раціональні параметри заспокоювача для забезпечення мінімізації максимального значення напруження σ_{fmax} (рис. 2.23, б) і максимізації коефіцієнта запасу міцності k_f , який розраховується, як відношення граничного напруження (граничного навантаження) до розрахункового напруження (розрахункового навантаження). Програмний пакет Simcenter STAR-CCM+ визначає зазначені показники в автоматичному режимі.

За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Г) отримано рівняння регресії другого порядку $\sigma_{fmax}(T_f, H_f, L_f)$ в закодованому вигляді

– для Nylon:

$$\begin{aligned} \sigma_{fmax} = & 11,3942 - 4,43946 x_1 + 2,43694 x_1^2 + 1,84473 x_2 - 0,509607 x_1 x_2 + \\ & + 1,66106 x_2^2 - 1,79665 x_3 + 0,902313 x_1 x_3 - 1,88964 x_2 x_3 + 2,31092 x_3^2; \end{aligned} \quad (2.26)$$

– для ABS:

$$\begin{aligned} \sigma_{fmax} = & 21,7119 - 7,81804 x_1 + 3,99509 x_1^2 + 3,34087 x_2 - 1,3159 x_1 x_2 + \\ & + 1,14349 x_2^2 - 3,29944 x_3 + 1,43308 x_1 x_3 - 3,01605 x_2 x_3 + 3,90124 x_3^2; \end{aligned} \quad (2.27)$$

– для TPU:

$$\begin{aligned} \sigma_{fmax} = & 4,70992 - 1,68826 x_1 + 0,633499 x_1^2 + 0,809823 x_2 - 0,326359 x_1 x_2 + \\ & + 0,668287 x_2^2 - 0,849115 x_3 + 0,52116 x_1 x_3 - 0,649752 x_2 x_3 + 0,533441 x_3^2. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Статистична обробка даних отриманих рівнянь (2.26)–(2.28) наведена в табл. 2.7.

В розкодованому вигляді без урахуванням незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента ($> t_{0,05}(63) = 2,00$):

– для Nylon:

$$\begin{aligned} \sigma_{fmax} = & 86,8704 - 0,0303996 H_f + 0,01661 H_f^2 - 0,980498 L_f - 0,018896 H_f L_f + \\ & + 0,0231092 L_f^2 - 17,942 T_f + 0,0601542 L_f T_f + 1,08308 T_f^2; \end{aligned} \quad (2.29)$$

– для ABS:

$$\begin{aligned} \sigma_{fmax} = & 144,427 + 0,443447 H_f + 0,0114349 H_f^2 - 1,66891 L_f - 0,0301605 H_f L_f + \\ & + 0,0390124 L_f^2 - 29,7279 T_f + 0,0955389 L_f T_f + 1,7756 T_f^2; \end{aligned} \quad (2.30)$$

– для TPU:

$$\begin{aligned} \sigma_{fmax} = & 28,6099 - 0,02204 H_f + 0,0066828 H_f^2 - 0,373317 L_f - 0,0064975 H_f L_f + \\ & + 0,00533441 L_f^2 - 5,30688 T_f + 0,034744 L_f T_f + 0,281555 T_f^2. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Таблиця 2.7 – Статистична обробка отриманих рівнянь (2.26)–(2.28)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
Nylon (2.26)				
a ₀₀	11,3942	0,508739	22,397	1,08653·10 ⁻²⁸
a ₁₀	-4,43946	0,303229	-14,6406	2,8811·10 ⁻²⁰
a ₂₀	1,84473	0,247585	7,45088	8,48823·10 ⁻¹⁰
a ₃₀	-1,79665	0,247585	-7,25672	1,74194·10 ⁻⁹
a ₁₂	-0,509607	0,371378	-1,37221	0,175779
a ₁₃	0,902313	0,371378	2,42964	0,0185353
a ₂₃	-1,88964	0,303229	-6,23174	7,72853·10 ⁻⁸
a ₁₁	2,43694	0,525207	4,63995	0,0000232475
a ₂₂	1,66106	0,42883	3,87347	0,000296886
a ₃₃	2,31092	0,42883	5,38889	1,66518·10 ⁻⁶
ABS (2.27)				
a ₀₀	21,7119	0,841521	25,8008	1,11913·10 ⁻³¹
a ₁₀	-7,81804	0,50158	-15,5868	1,92726·10 ⁻²¹
a ₂₀	3,34087	0,409538	8,15764	6,27182·10 ⁻¹¹

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
a ₃₀	-3,29944	0,409538	-8,0565	9,09159·10 ⁻¹¹
a ₁₂	-1,3159	0,614307	-2,14209	0,0367996
a ₁₃	1,43308	0,614307	2,33284	0,0234849
a ₂₃	-3,01605	0,50158	-6,0131	1,7257·10 ⁻⁷
a ₁₁	3,99509	0,868762	4,59861	0,0000267915
a ₂₂	1,14349	0,709341	1,61205	0,112892
a ₃₃	3,90124	0,709341	5,49981	1,11712·10 ⁻⁶
TPU (2.28)				
a ₀₀	4,70992	0,24971	18,8615	3,59935·10 ⁻²⁵
a ₁₀	-1,68826	0,148837	-11,343	8,55366·10 ⁻¹⁶
a ₂₀	0,809823	0,121525	6,66383	1,56697·10 ⁻⁸
a ₃₀	-0,849115	0,121525	-6,98715	4,73007·10 ⁻⁹
a ₁₂	-0,326359	0,182288	-1,79035	0,0791098
a ₁₃	0,52116	0,182288	2,859	0,00606401
a ₂₃	-0,649752	0,148837	-4,36552	0,0000590963
a ₁₁	0,633499	0,257794	2,45739	0,0173009
a ₂₂	0,668287	0,210488	3,17494	0,00249702
a ₃₃	0,533441	0,210488	2,53431	0,0142572

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

Побудувавши тривимірний графік рівняння (2.29)–(2.31) на рис. 2.25 видно, що із збільшенням товщини заспокоювача T_f , зменшенням висоти п'яти H_f і збільшенням відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f спостерігається зменшення максимального значення напруження σ_{fmax} . Також з рисунку наочно видно, що напруження σ_{fmax} є більшою для ABS, а меншою для TPU.

Перевірка отриманих рівнянь (2.29)–(2.31) за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,87$ дає змогу стверджувати про їх адекватність на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Г) отримано рівняння регресії другого порядку $k_f(T_f, H_f, L_f)$ в закодованому вигляді

– для Nylon:

$$k_f = 2,04613 + 0,526045 x_1 - 0,417 x_1^2 - 0,205367 x_2 - 0,0402536 x_1 x_2 - 0,0939857 x_2^2 + 0,13751 x_3 - 0,0207107 x_1 x_3 + 0,174229 x_2 - 0,129986 x_3^2; \quad (2.32)$$

– для ABS:

$$k_f = 1,61442 + 0,452818 x_1 - 0,237339 x_1^2 - 0,164802 x_2 - 0,00155893 x_1 x_2 - 0,166612 x_2^2 + 0,111898 x_3 - 0,0367982 x_1 x_3 + 0,0935964 x_2 x_3 - 0,131755 x_3^2; \quad (2.33)$$

– для TPU:

$$k_f = 2,82432 + 0,770971 x_1 - 0,440369 x_1^2 - 0,286019 x_2 - 0,0513643 x_1 x_2 - 0,118686 x_2^2 + 0,230233 x_3 - 0,0426179 x_1 x_3 + 0,275136 x_2 x_3 - 0,201614 x_3^2. \quad (2.34)$$

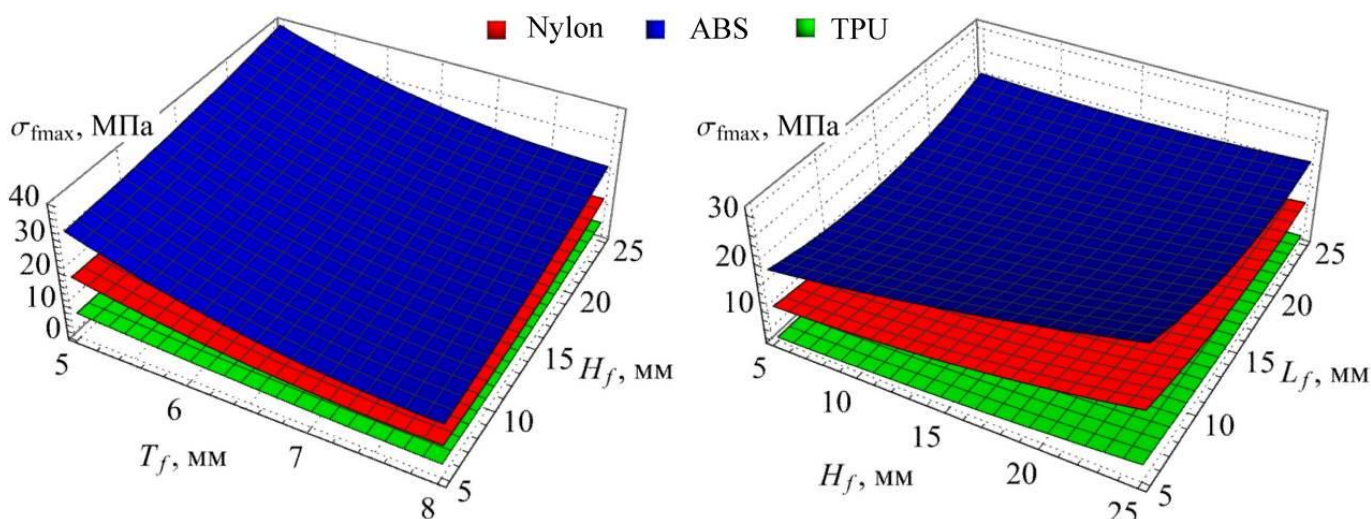


Рисунок 2.25 – Залежність максимального значення напруження σ_{fmax} від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів

Статистична обробка даних отриманих рівнянь (2.32)–(2.34) наведена в табл. 2.8.

В розкодованому вигляді без урахуванням незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента ($> t_{0,05}(63) = 2,00$), рис. 2.26:

– для Nylon:

$$k_f = - 8,07387 - 0,0184752 H_f - 0,000939857 H_f^2 + 0,0266124 L_f + 0,00174229 H_f L_f - 0,00129986 L_f^2 + 2,76003 T_f - 0,185333 T_f^2; \quad (2.35)$$

– для ABS:

$$k_f = - 5,18588 + 0,0194639 H_f - 0,00166612 H_f^2 + 0,0366767 L_f + \quad (2.36)$$

$$+ 0,000935964 H_f L_f - 0,00131755 L_f^2 + 1,67317 T_f - 0,105484 T_f^2;$$

– для TPU:

$$k_f = - 8,80365 - 0,0342665 H_f - 0,00118686 H_f^2 + 0,0422373 L_f + 0,00275136 H_f L_f - 0,00201614 L_f^2 + 3,05834 T_f - 0,19572 T_f^2. \quad (2.37)$$

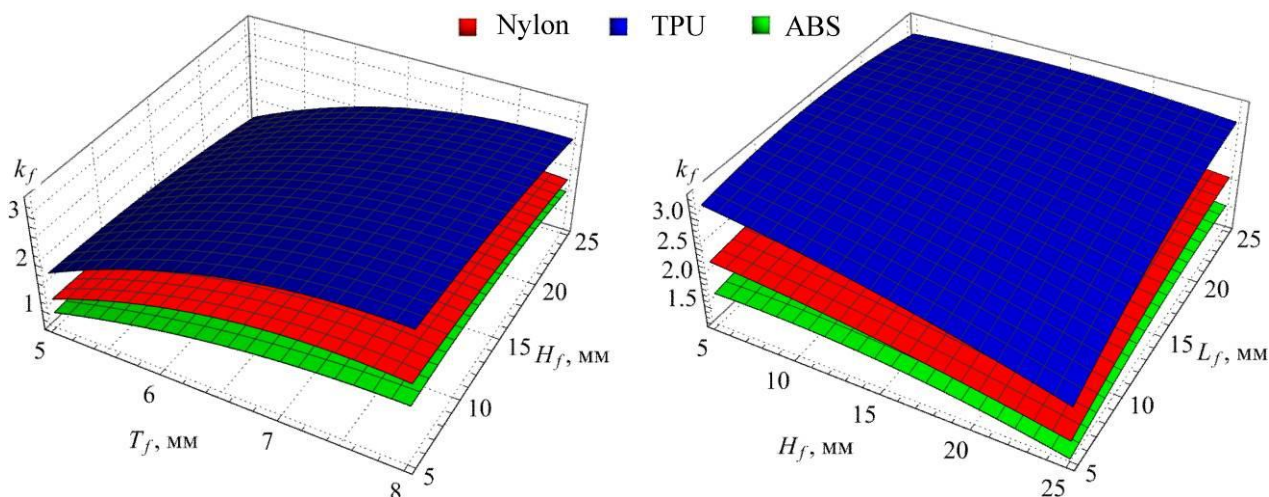


Рисунок 2.26 – Залежність коефіцієнта запасу міцності k_f від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів

Таблиця 2.8 – Статистична обробка отриманих рівнянь (2.32)–(2.34)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
Nylon (2.32)				
a_{00}	2,04613	0,0443353	46,1514	$1,78466 \cdot 10^{-44}$
a_{10}	0,526045	0,0264256	19,9067	$2,92204 \cdot 10^{-26}$
a_{20}	-0,205367	0,0215764	-9,51812	$4,5964 \cdot 10^{-13}$
a_{30}	0,13751	0,0215764	6,37315	$4,58897 \cdot 10^{-8}$
a_{12}	-0,0402536	0,0323646	-1,24375	0,219064
a_{13}	-0,0207107	0,0323646	-0,639919	0,524982
a_{23}	0,174229	0,0264256	6,59318	$2,0352 \cdot 10^{-8}$
a_{11}	-0,417	0,0457704	-9,11068	$1,96887 \cdot 10^{-12}$
a_{22}	-0,0939857	0,0373714	-2,51491	0,0149752
a_{33}	-0,129986	0,0373714	-3,47821	0,00101702
ABS (2.33)				
a_{00}	1,61442	0,0531097	30,3978	$3,23774 \cdot 10^{-35}$
a_{10}	0,452818	0,0316555	14,3046	$7,7282 \cdot 10^{-20}$
a_{20}	-0,164802	0,0258466	-6,37617	$4,538 \cdot 10^{-8}$

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значимості
a ₃₀	0,111898	0,0258466	4,3293	0,0000667322
a ₁₂	-0,00155893	0,0387699	-0,0402098	0,968077
a ₁₃	-0,0367982	0,0387699	-0,949144	0,346855
a ₂₃	0,0935964	0,0316555	2,95672	0,00463452
a ₁₁	-0,237339	0,0548289	-4,32872	0,0000668604
a ₂₂	-0,166612	0,0447676	-3,72171	0,000479943
a ₃₃	-0,131755	0,0447676	-2,94308	0,0048132
TPU (2.34)				
a ₀₀	2,82432	0,056152	50,2978	2,06391·10 ⁻⁴⁶
a ₁₀	0,770971	0,0334688	23,0355	2,80666·10 ⁻²⁹
a ₂₀	-0,286019	0,0273272	-10,4665	1,66746·10 ⁻¹⁴
a ₃₀	0,230233	0,0273272	8,42508	2,35754·10 ⁻¹¹
a ₁₂	-0,0513643	0,0409907	-1,25307	0,21568
a ₁₃	-0,0426179	0,0409907	-1,0397	0,303202
a ₂₃	0,275136	0,0334688	8,22067	4,97814·10 ⁻¹¹
a ₁₁	-0,440369	0,0579696	-7,59655	4,95292·10 ⁻¹⁰
a ₂₂	-0,118686	0,047332	-2,50751	0,0152574
a ₃₃	-0,201614	0,047332	-4,25958	0,0000842237

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

Побудувавши тривимірний графік рівняння (2.35)–(2.37) на рис. 2.25 видно, що із збільшенням товщини заспокоювача T_f , зменшенням висоти п'яти H_f і збільшенням відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f спостерігається збільшення коефіцієнта запасу міцності k_f . Також з рисунку наочно видно, що напруження $\sigma_{f\max}$ є більшою для ABS, а меншою для TPU.

Перевірка отриманих рівнянь (2.35)–(2.37) за коефіцієнтом кореляції Пірсона $r = 0,89$ дає змогу стверджувати про їх адекватність на досліджуваному діапазоні варіювання факторів.

З рис. 2.24–2.25 наочно видно, що оптимуми критеріїв відрізняються. Це призводить до необхідності вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох конфліктуючих цільових критеріїв у визначених діапазонах факторів:

$$\begin{cases} \sigma_{f\max}(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min, \\ k_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.38)$$

Для вирішення системи рівнянь (2.38) спільно із (2.29)–(2.31) і (2.35)–(2.37) приведемо критерії до безрозмірного одиничного виду, отримуємо:

$$\sigma'_{f \max}(T_f, H_f, L_f) = \frac{\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f) - \min[\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f)]}{\max[\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f)] - \min[\sigma_{f \max}(T_f, H_f, L_f)]},$$

$$k'_f(T_f, H_f, L_f) = \frac{\max[k_f(T_f, H_f, L_f)] - k_f(T_f, H_f, L_f)}{\max[k_f(T_f, H_f, L_f)] - \min[k_f(T_f, H_f, L_f)]}.$$
(2.39)

Мультиплікативну функцію V' будемо визначати, як:

$$V'(T_f, H_f, L_f) = \sigma'_{f \max}(T_f, H_f, L_f) \times k'_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min. \quad (2.40)$$

Вирішуючи задачу (2.40) спільно із (2.29)–(2.31) і (2.35)–(2.37) в Wolfram Cloud розраховані раціональні значення геометричних параметрів заспокоювача для різних матеріалів: Nylon – $T_f = 6,3$ мм $H_f = 12,6$ мм, $L_f = 14,7$ мм; ABS – $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,7$ мм, $L_f = 14,8$ мм; TPU – $T_f = 6,7$ мм $H_f = 11,9$ мм, $L_f = 14,3$ мм. Так як розраховані значення геометричних параметрів практично однакові для різних матеріалів, то розрахуємо їх середні значення: $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм. Згідно рис. 2.25 коефіцієнт запасу міцності k_f є більшим для TPU.

2.7 Чисельне моделювання процесу висіву насіння удосконаленою висівною секцією пневматичної сівалки

Створена тривимірна модель удосконаленої висівної секції пневматичної зернової сівалки наведено на рис. 2.27. Основні розміри відповідають базовій конструкції згідно рис. 2.2. В основі роботи використані обґрунтовані елементи у відповідності до розділів 2.4–2.6 і 4.2. А саме, сповільнювач насіння із можливістю змінювати площу випускних отворів (за показником ε) згідно рівняння (4.20) залежно від швидкості переміщення сівалки V_s і заданої норми висіву N_t , та заспокоювач насіння із обґрунтованими геометричними параметрами і матеріалом (розділи 2.5–2.6, 4.1).

Чисельне моделювання проводилося в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+. Опис сіткових і фізичних моделей відповідає розділу 2.3, а фізико-математичний апарат моделювання розділу 2.2.

В якості факторів досліджень обрано:

- насінневий матеріал різних культур із визначеними фізико-механічними властивостями і агротехнічними вимогами щодо процесу сівби: ріпак і горох (табл. 2.9);
- швидкість сівалки V_s (1 м/с, 2 м/с, 3 м/с, 4 м/с).

Таблиця 2.9 – Фізико-механічні властивості насінневого матеріалу і агротехнічні вимоги процесу його сівби

Показник	Ріпак [157–162]	Горох [137–141]
Ефективний діаметр насінини, м	0,001–0,003	0,005–0,010
Густина, кг/м ³	1070–1090	1120–1240
Модуль пружності Юнга, МПа	22–38	64–76
Коефіцієнт Пуассона	0,22–0,28	0,30–0,34
Коефіцієнт тертя спокою між насінинами	0,27–0,36	0,44–0,60
Дотичні коефіцієнти відновлення між насінинами	0,22–0,26	0,28–0,32
Коефіцієнт тертя спокою між насінинами і стінками	0,35–0,38	0,38–0,44
Дотичний коефіцієнти відновлення між насінинами і стінками	0,36–0,42	0,46–0,54
Норма висіву, млн. шт./га	0,8	1,2
Відстань між рядками, м	0,19	0,19
Швидкість інжекції (дозування) насіння, шт./с	$15,2 \times V_s$	$22,8 \times V_s$

V_s – швидкість руху сівалки, м/с.

За критерії оцінки якості посіву обрано рівномірність розподілу насіння (коефіцієнт варіації) вздовж лінії посіву δ_x і по глибині δ_z .

В результаті чисельного моделювання отримано розподіл швидкості потоку повітря і тиску (рис. 2.28). Аналізуючи розподіл швидкості потоку повітря в пневматичній системі видно її падіння на виході з висівного башмака. Це підтверджує проведені дослідження в розділі 2.4.

Приклад візуалізації процесу переміщення насіння представлений на рис. 2.29. Наочне моделювання показало траєкторію переміщення і швидкість насіння по пневматичній системі висівної секції. З рис. 2.29 видно, що насіння при вильоті з висівного башмака потрапляє до дна борозенки і відскакує від нього. Заспокоювач при цьому створює перешкоду насінині і направляє його після удару о нього до дна

борозенки. Тим самим наглядно підтверджена ефективність використання заспокоювача насіння, параметри якого обґрунтовано в розділі 2.5.

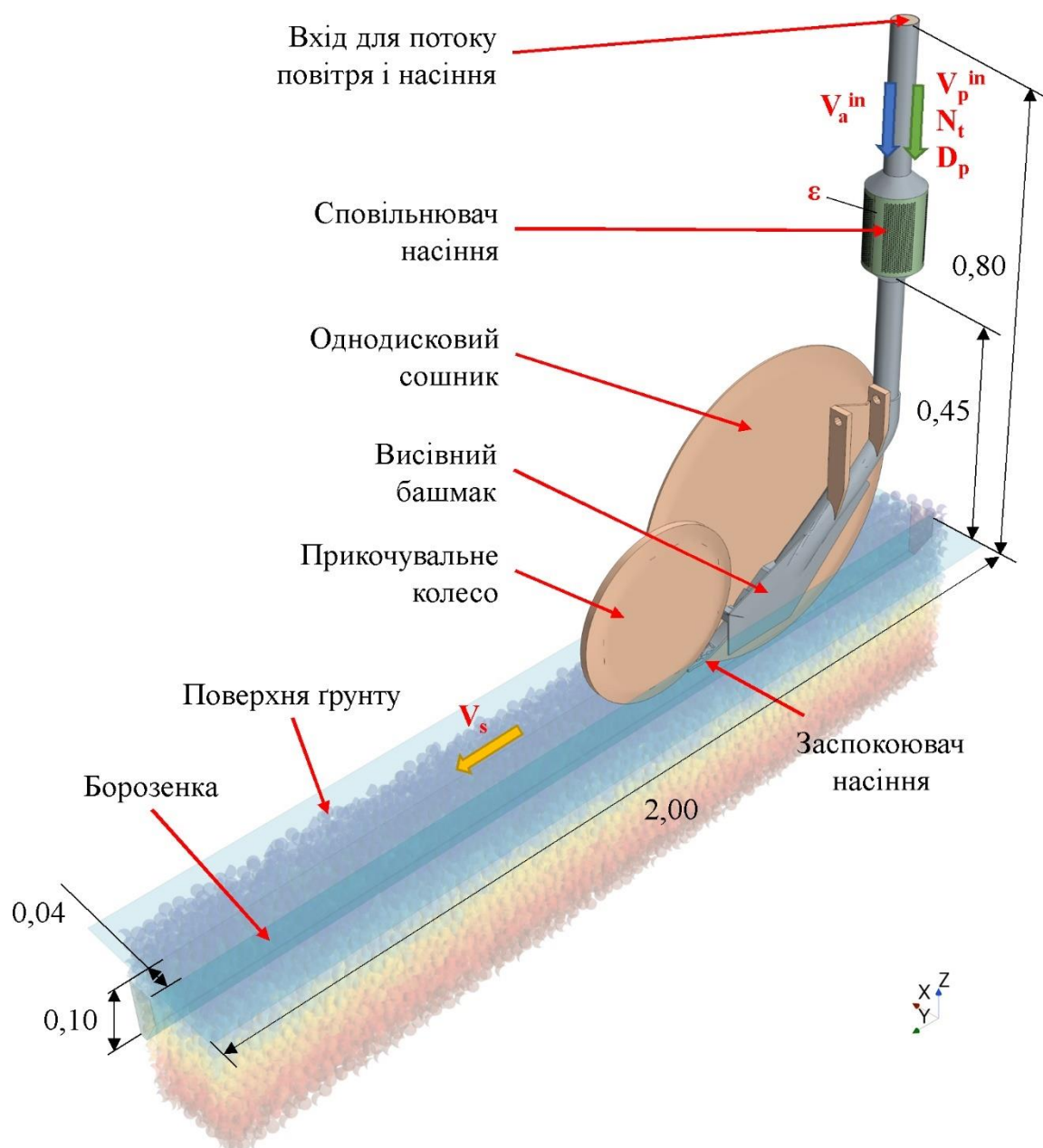


Рисунок 2.27 – Схема чисельного моделювання процесу роботи удосконаленої висівної секції пневматичної сіялки

В результаті моделювання отримано таблицю даних для точності висіву (табл. 2.10). Аналізуючи табл. 2.10 і порівнюючи дані із проведеним експериментом (розділ 4.3) видно вони достатньо близько корелюють (коефіцієнт кореляції складає 0,96).

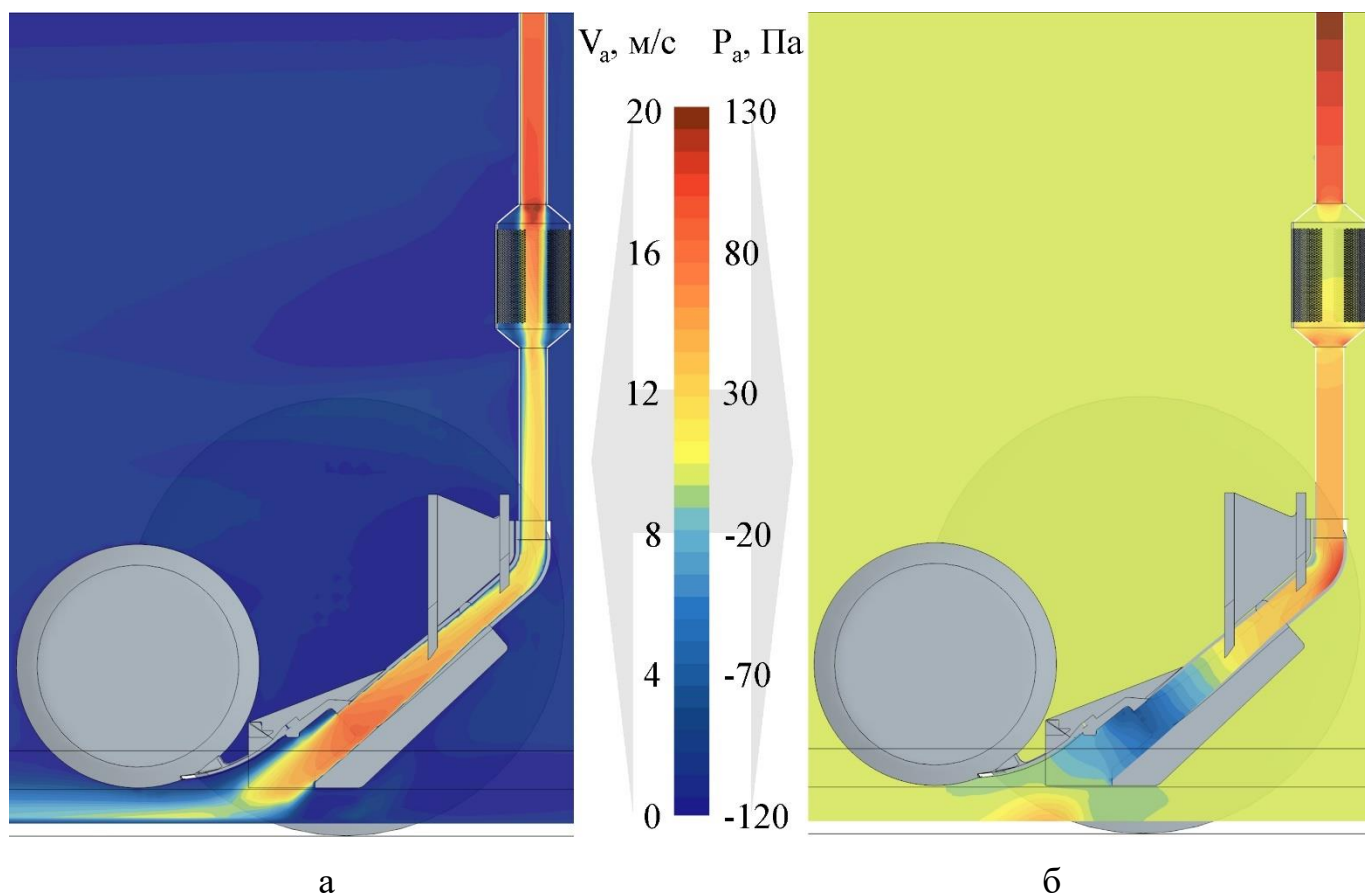


Рисунок 2.28 – Розподіли швидкості потоку повітря (а) і тиску (б)

Таблиця 2.10 – Результати моделювання

Культура (А)	Швидкість руху сівалки V_s , м/с (D)	Коефіцієнт варіації вздовж лінії посіву δ_y , %		Коефіцієнт варіації по глибині δ_z , %
		Експеримент (розділ 4.3)	Моделювання	Моделювання
Горох (норма висіву – 1,2 млн. шт./га)	1	94,7	95,2	21,3
	2	94,3	94,6	22,6
	3	92,2	92,8	24,2
	4	89,4	89,9	25,1
Ріпак (норма висіву – 0,8 млн. шт./га)	1	95,5	96,1	19,2
	2	92,5	93,3	21,5
	3	89,3	90,2	25,4
	4	86,3	88,1	26,2

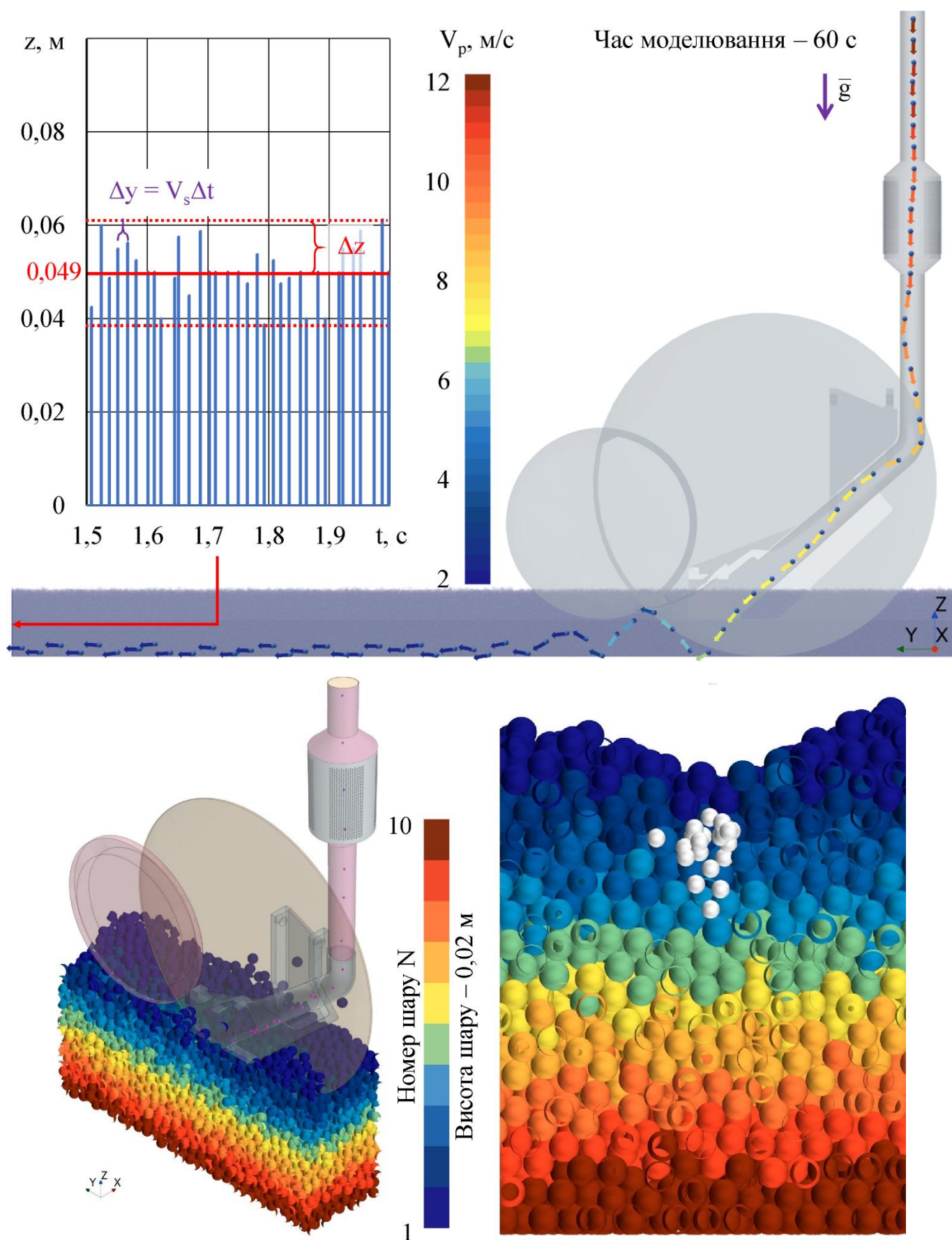


Рисунок 2.29 – Приклад візуалізації переміщення насіння в процесі чисельного моделювання удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки

Порівнюючи отриманні дані із результатами моделювання процесу висіву насіння базовою висівною секцією пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series (табл. 2.2) видно, що використання розробленого сповільнювача і удосконаленого заспокоювача насіння підвищує точність висіву вздовж лінії посіву – коефіцієнт варіації δ_x збільшується з 67,2 % до $91,7 \pm 4,6$ %. В свою чергу, розкид насіння по глибині коефіцієнта варіації δ_x зменшується з 32,2 % до $23,2 \pm 3,5$ %, що також свідчить про підвищення точності висіву.

2.8 Висновки з розділу

1. Удосконалена висівна секція пневматичної зернової сівалки (рис. 2.1), що включає раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння, яка відрізняється тим, що додатково містить верхній датчик висіву, який встановлений на насіннепроводі; нижній датчик висіву, який встановлений на висівному башмаку; сповільнювач насіння, який встановлений між насінневою трубкою і насіннепроводом і складається з перфорованого циліндра із отворами, верхнього розтрубу, нижнього розтрубу, циліндричної шторки із жорстко закріпленим зубчастим сектором, сервопривода із зубчастим колесом; блок керування, який за допомогою електричних проводів приєднаний до верхнього датчика висіву, нижнього датчика висіву і сервопривода.

2. В результаті чисельного моделювання базової конструкції висівної секції пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series встановлено достатньо високу нерівномірність посіву: відстань між насінинами вздовж рядка знаходиться в межах від 0,0017 м до 0,1192 м, коефіцієнт варіації – 0,672. При цьому нормованим значенням є відстань $0,044 \pm 0,015$ м. Менше значення відстані між насінинами ($< 0,029$ м) пояснює виникнення «двійників», а більше ($> 0,059$ м) – виникнення «пропусків». Вздовж глибини посіву розподіл насіння є досить високий, що виходить за нормовані значення. Так, отримане середнє значення глибини посіву

дорівнює $0,041 \pm 0,03$ м, а нормоване – $0,05 \pm 0,01$. 52,5 % насінин не потрапляють у посівний шар (0,04–0,08 м) орного горизонту.

3. В результаті спостережень за роботою базової конструкції висівної секції пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series в ході чисельного моделювання встановлено чинники погіршення точності висіву (висока швидкість повітряного потоку і відповідно насіння, недосконала форма насіннєвого каналу висівного башмака, недосконала форма заспокоювача насіння). Підвищення ефективності процесу сівби насіння культурних рослин можна досягти шляхом удосконалення конструкцій елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки (сповільнювач насіння, насіннєвий канал висівного башмака, заспокоювач насіння) із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують точний висів, та конструкційними матеріалами, що забезпечують підвищений ресурс їх експлуатації.

4. В результаті чисельного моделювання сповільнювача насіння пневматичної зернової сівалки John Deere в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ отримано візуалізацію процесу руху насіння і повітряного потоку в робочій області сповільнювача. За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримані рівняння регресії другого порядку в розкодованому вигляді без урахування значущих коефіцієнтів за t -критерієм Стюдента залежностей швидкості повітряного потоку V_a^{out} , швидкості насіння V_p^{out} на виході сповільнювача насіння і коефіцієнта зміни норми висіву η від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} і відношення площі випускних отворів до площі входу ϵ . Згідно агротехнічних вимог відхилення норми висіву повинно не перевищувати 1 %. Розраховане рівняння (2.11) показує залежність відношення площі випускних отворів до площі входу ϵ від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} при забезпечені умови $\eta \leq 1,01$. При зазначеному діапазоні швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} необхідно корегувати ϵ , яка знаходиться в межах від 1,60 до 2,26.

5. В результаті аналітичних досліджень розглянуто кінематику руху насінини після вильоту її з висівного башмака, відбиття від дна борозенки і заспокоювача

насіння. Отримані залежності максимальної висоти параболічної траєкторії руху насіння u_3 , різниці відстані між точками відбиття від поверхні ґрунту і відстані, яку проходить при цьому сівалка Δx від початкової швидкості руху насіння V_{p0} , кута її вильоту α , висоти розміщення заспокоювача H_u і кута його нахилу β . Виконуючи умови $u_3 < H_u$ і $\Delta x \rightarrow \min$ для отриманих залежностей в Wolfram Cloud отримано наступні раціональні параметри: $\alpha = 47^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $H_u < 0,134$ м. Для забезпечення постійного потрапляння насіння до середини дна борозенки після відбиття їх від сповільнювача при невеликому відхиленні траєкторії ($\pm 0,01$ м), форма профілю його робочої поверхні повинна бути параболічною із фокусом в точці $r_f = 0,134$ м.

6.3 використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведено симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. В результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруження σ_f , що виникає в кожній комірці створеної сітки заспокоювача. Отримані залежності максимального значення напруження σ_{fmax} і коефіцієнта запасу міцності k_f від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів (ABS, поліамід 6, двокомпонентний поліуретан). Вирішуючи багатокритеріальну задачу оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох критеріїв $\sigma_{fmax}(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min$, $k_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \max$ отримано значення геометричних параметрів заспокоювача насіння: $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм.

7. В результаті чисельного моделювання вдосконаленої конструкції висівної секції пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series встановлено, що застосування сповільнювача і заспокоювача насіння суттєво підвищує точність висіву вздовж лінії посіву (δ_y збільшується з 67,2 % до $91,7 \pm 4,6$ %) та зменшує розкид насіння по глибині (δ_z зменшується з 32,2 % до $23,2 \pm 3,5$ %), що підтверджується кореляцією результатів моделювання з експериментальними даними (розділ 4.3).

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [118, 119, 163–169].

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ

3.1 Мета і програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень передбачено перевірку отриманих залежностей при чисельному моделюванні і оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву.

Зміст програми експериментальних досліджень:

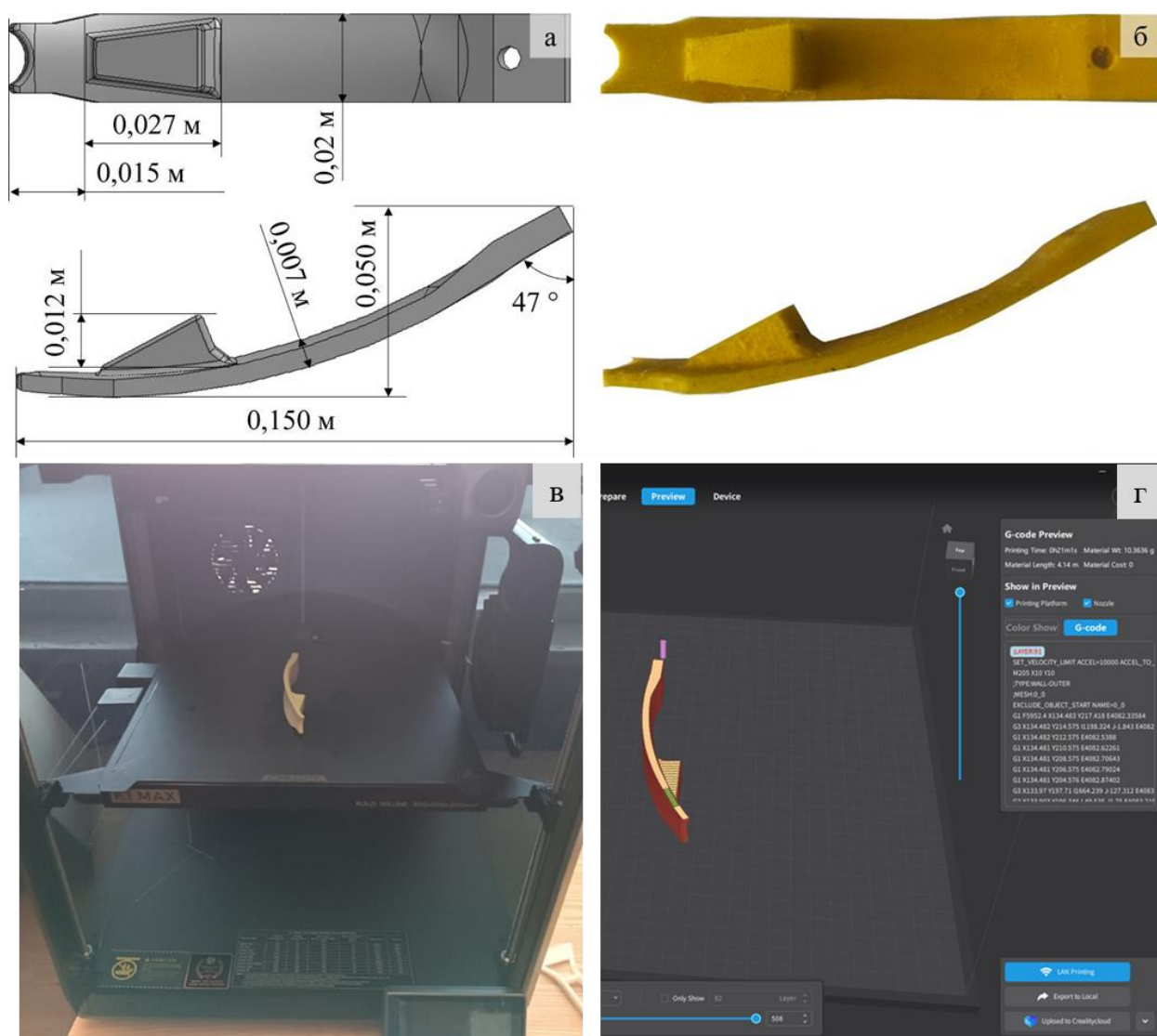
- розробка методики і створення лабораторного обладнання для дослідження процесу деформації заспокоювача насіння;
- проведення лабораторних досліджень процесу деформації заспокоювача насіння і порівняння результатів із реалізованими симуляціями (розділ 2.6);
- розробка методики і створення експериментального зразку сповільнювача насіння системи подачі пневматичної зернової сівалки точного висіву;
- проведення експериментальних досліджень сповільнювача і заспокоювача насіння у складі пневматичної системи подачі насіння, порівняння із результатами чисельного моделювання (розділи 2.4) та оптимізація їх конструктивно-технологічних параметрів;
- розробка методики порівняльних виробничих випробувань удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series із базовою;
- проведення порівняльних виробничих випробувань і визначення основних експлуатаційних показників удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series.

Обробка результатів досліджень передбачає статистичний (регресійний і дисперсійний) аналіз даних в програмному пакеті Wolfram Cloud.

3.2 Методика лабораторних досліджень процесу деформації заспокоювача насіння

3.2.1 Виготовлення дослідних зразків заспокоювача насіння

Згідно розрахованих конструктивних параметрів заспокоювача (розділ 2.5–2.6, рис. 3.1, а) виготовлені експериментальні зразки з різних конструктивних матеріалів (рис. 3.1, б).



а – 3D-модель заспокоювача; б – експериментальний зразок заспокоювача; в – 3D-принтер Creality K1 Max; г – програмне забезпечення Creality Print для створення G-коду

Рисунок 3.1 – Проектування і виготовлення експериментальних зразків заспокоювача насіння

Дослідні зразки заспокоювачів насіння виготовляли з використанням адитивної технології FDM друку за допомогою 3D-принтера Creality K1 Max (рис. 3.1, в). Для створення G-коду застосовували програмне забезпечення Creality Print (рис. 3.1, г).

В якості матеріалів були обрані наступні (рис. 3.2): Nylon, Nylon-CCF (Carbon Fiber), TPU 40D, Elasthan D100, Elasthan D70, ABS виробництва monofilament.com.ua. Режими друку приведено в табл. 3.1. а характеристики матеріалів в табл. 3.2.



Рисунок 3.2 – Експериментальні зразки заспокоювача насіння

Таблиця 3.1 – Матеріали та режими 3D-друку заспокоювачів насіння

Матеріал	Nylon	Nylon-CCF	TPU 40A	Elastan D100	Elastan D70	ABS
Температура екструдера, °C	250	250	230	240	250	230
Температура платформи, °C	80	110	60	100	100	100
Швидкість друку, мм/с	60	60	30	80	80	80
Обдув моделі	ні	ні	так	так	так	ні

Інші налаштування режимів 3D-друку для всіх матеріалів були однакові, а саме: діаметр сопла екструдера – 0,4 мм; висота шару – 0,2 мм; товщина стінки – 1,2

мм; товщина верх/низ – 1,2 мм; щільність заповнення – 100 %; діаметр нитки філаменту – 1,75 мм.

Таблиця 3.2 – Характеристики матеріалів

Матеріал	Nylon	Nylon-CCF	TPU 40A	Elastan D100	Elastan D70	ABS
Густина, г/см ³	1,20	1,12	1,22	1,18	1,15	1,05
Температура експлуатації, °С	-30 +120	-30 +120	-40 +140	-40 +100	-40 +120	-20 +80
Міцність на розтяг, МПа	90	70	150	88	117	60
Відносне видовження при розриві, %	75	50	400	436	370	30
Модуль пружності при розтязі, МПа	2600	5800	300	120	260	2900
Модуль пружності при згині, МПа	2500	5800	250	80	200	2800
Міцність при згині, МПа	90	70	125	96	108	55

3.2.2 Дослідження деформації кручення

Заспокоювач насіння у верхній площині зазнає механічного впливу прикочуючого колеса, а у нижній нерівностей поверхні борозни. При цьому, в зоні контакту заспокоювача з прикочуючим колесом, крім нормальної сили виникає ще й тангенційна, яка обумовлена трикутним перерізом робочої частини колеса та його положенням відносно заспокоювача. Коли колесо тисне на заспокоювач по центру відбувається його згин (рис. 3.3, а), коли колесо зсувається від центру заспокоювача, він скручується по повздожній осі (рис. 3.3, б).

Таким чином, крім згину, заспокоювач піддається ще й крученню на кут β_z , який рівний:

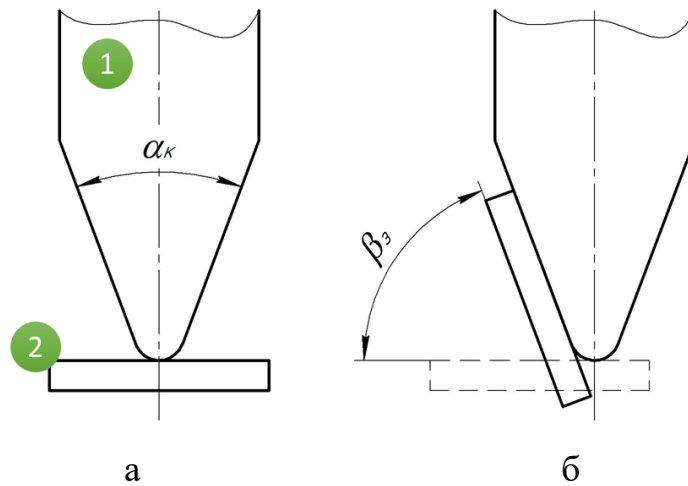
$$\beta_z = 90 - \frac{\alpha_k}{2}, \quad (3.1)$$

де α_k – кут при вершині перерізу робочої частини колеса, град. Для досліджуваної моделі посівної секції $\alpha_k = 40^\circ$.

Тому, під час вибору матеріалу заспокоювача насіння, треба враховувати його здатність до опору кручення.

Для дослідження зусилля кручення заспокоювачів насіння, виконаних з різних

матеріалів, було розроблено та реалізовано конструкцію стенду, схема якого представлена на рис. 3.4.



а – нормальне; б – зі зсувом колеса відносно центру заспокоювача

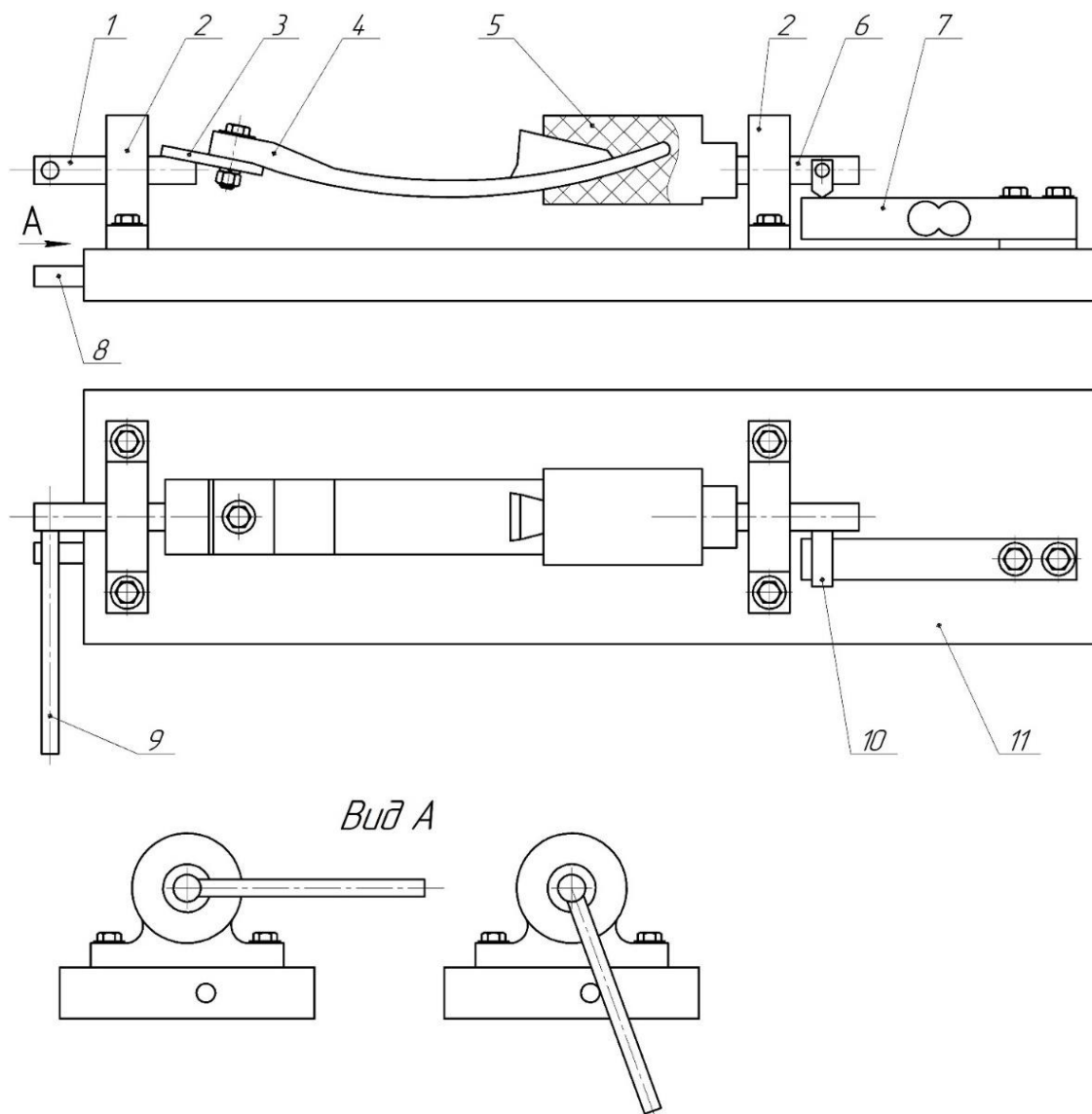
Рисунок 3.3 – Положення заспокоювача (2) відносно колеса (1)

На станині стенду розміщено дві підшипникові опори, в першій з яких встановлено вісь прикладання зусилля, яка з одного боку з'єднана з планкою кріплення заспокоювача насіння, а з іншого – з важелем прикладання зусилля. В другій опорі встановлено вісь зусилля тензометричного датчика, яка з'єднана з затискачем заспокоювача насіння та з важелем тензометричного датчика.

Вихідні контакти тензометричного датчика з'єднані проводами із входом вагового сенсору HX711, з якого дані передаються на плату Arduino Uno ATmega328P-PU (на схемі не показано). Далі дані завантажуються у табличному вигляді до програмного забезпечення Arduino IDE. Перед проведенням досліджень проводили тарування тензометричного датчика шляхом поступового навантаження та розвантаження з фіксацією отриманих показань в програмному забезпеченні Arduino IDE.

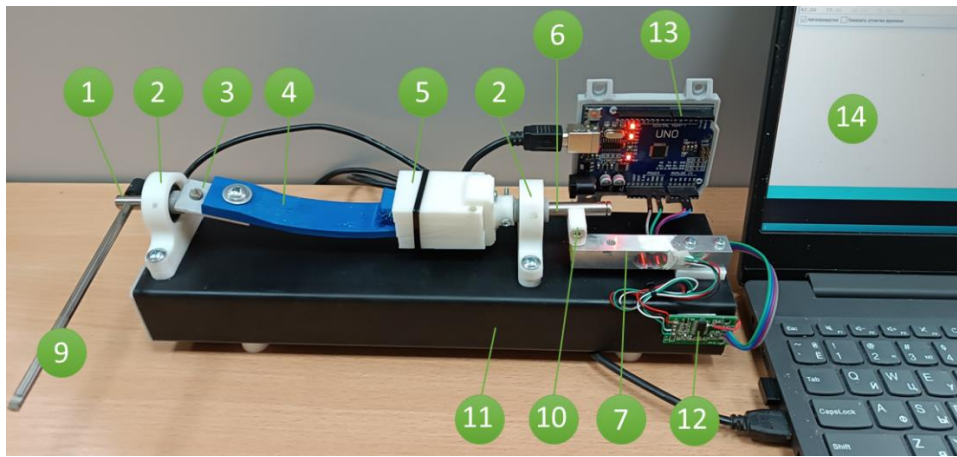
Дослідження зусилля кручення до заданого кута проводили наступним чином: в затискач встановлювали кінцеву частину заспокоювача насіння, потім, болтовим з'єднанням, приєднували затискач до планки кріплення. Потім повертали вісь

прикладання зусилля за допомогою відповідного важеля до його контакту з обмежувачем кута кручення. Значення зусилля кручення фіксували з показань в програмному забезпеченні Arduino IDE.



1 – вісь прикладання зусилля; 2 – підшипникова опора; 3 – планка кріплення заспокоювача насіння; 4 - заспокоювач насіння; 5 – затискач; 6 – вісь зусилля тензометричного датчика; 7 – тензометричний датчик; 8 – обмежувач кута кручення; 9 – важіль прикладання зусилля; 10 – важіль тензометричного датчика; 11 – станина

Рисунок 3.4 – Схема стенду для досліджень зусилля кручення експериментального заспокоювача насіння



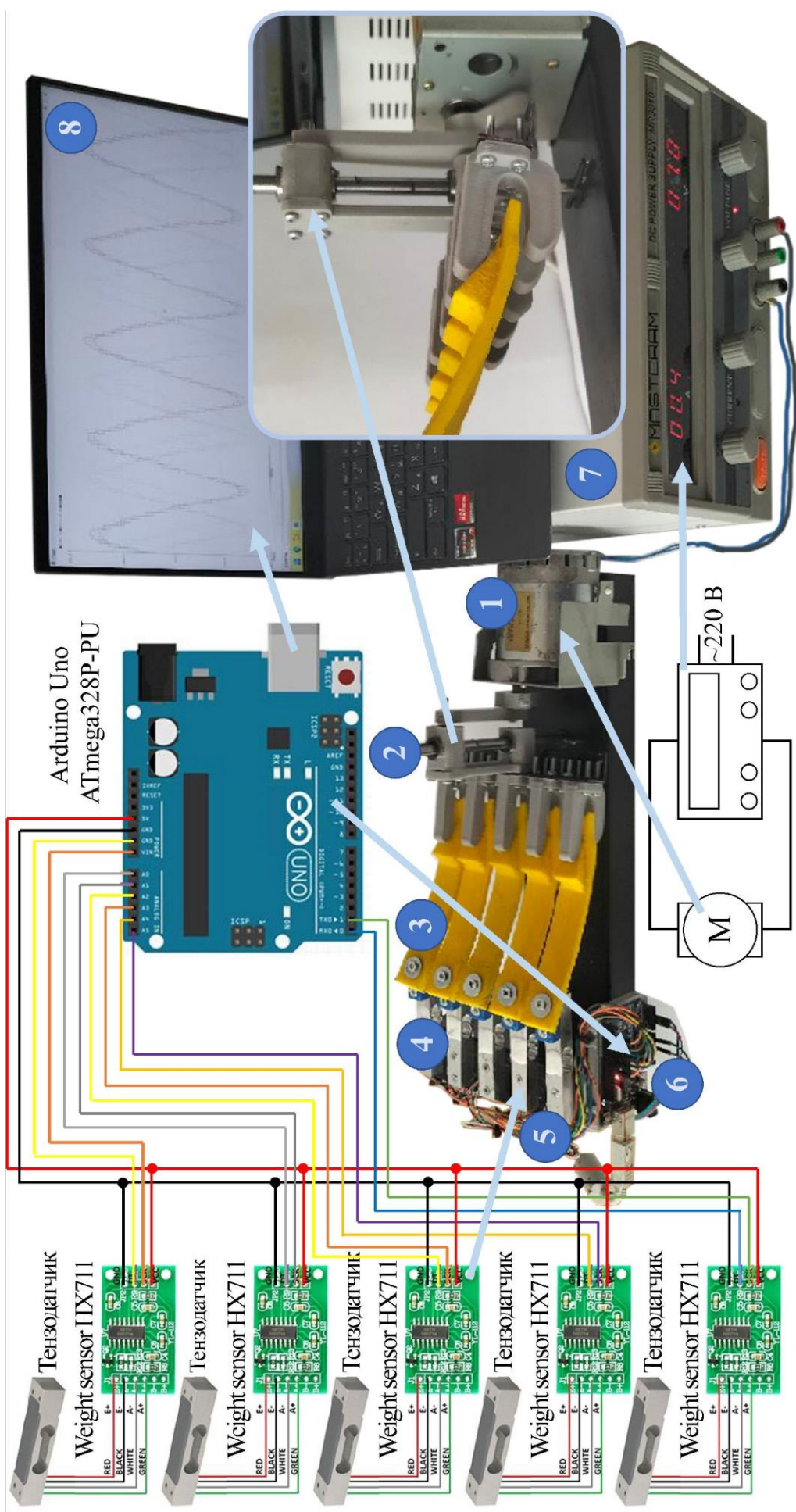
1 – вісь прикладання зусилля; 2 – підшипникова опора; 3 – планка кріплення заспокоювача насіння; 4 - заспокоювач насіння; 5 – затискач; 6 – вісь зусилля тензометричного датчика; 7 – тензометричний датчик; 8 – обмежувач кута кручення; 9 – важіль прикладання зусилля; 10 – важіль тензометричного датчика; 11 – станина; 12 – ваговий сенсор HX711; 13 – плата Arduino Uno ATmega328P-PU; 14 – персональний комп’ютер

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд стану для досліджень зусилля кручення експериментального заспокоювача насіння

3.3.3 Дослідження деформації згину

Для дослідження деформації при згині створено лабораторну установку (рис. 3.6), яка складалась з двигуна постійного струму 1, до валу якого приєднано кривошипно-кулісний виконавчий механізм 2. Зразки заспокоювача насіння 3 закріплені одним кінцем до тензодатчиків 4, а іншим вільно розміщені в утримувачі кривошипно-кулісного виконавчого механізму 2.

Одночасно досліджуються п’ять зразків заспокоювача насіння. Тензодатчики 4 за допомогою електричних проводів приєднані до аналого-цифрових перетворювачів HX711 5, які приєднані до плати керування Arduino Uno ATmega328P-PU 6. Двигун постійного струму 1 приєднано до лабораторного блоку живлення Masteram HPS3030D 7, а плати керування 6 з’єднуються з персональним комп’ютером 8 і з програмним забезпеченням Arduino IDE.



1 – двигун постійного струму; 2 – кривошипно-кулісний виконавчий механізм; 3 – зразки заспокоювача насіння; 4 – тензодатчик;

5 – аналого-цифровий перетворювач HX711; 6 – плата керування Arduino Uno ATmega328P-PU;

7 – лабораторний блок живлення Masteram HPS3030D; 8 – персональний комп'ютер із програмним забезпеченням Arduino IDE

Рисунок 3.6 – Лабораторна установка для дослідження деформації при згині

При запуску двигуна постійного струму 1 кривошипно-кулісний виконавчий механізм 2 приводиться в дію і починаються коливання зразків заспокоювача насіння із амплітудою $\pm 0,015$ м і частотою 2 Гц. При цьому тензодатчики 4 із аналого-цифровими перетворювачами HX711 5 і платою керування Arduino Uno ATmega328P-PU 6 знімають динаміку зміни сили. Приклад залежності сили від часу наведено на рис. 3.7.

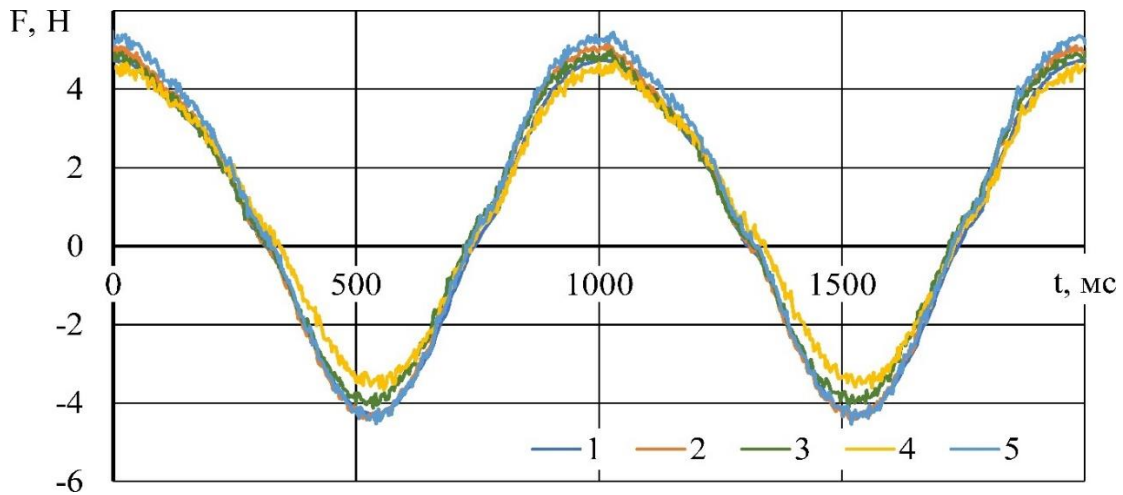


Рисунок 3.7 – Приклади залежностей динаміки сил при деформації заспокоювачів насіння (матеріал – Elastan D100) при згині

Наступним етапом було випробування на втомну міцність, якої підлягають натурні зразки заспокоювача (рис. 3.2). Границя витривалості в умовах циклічного навантаження є критерієм робоздатності деталі. Вона визначається як максимальна напруга, яку здатний витримати матеріал при будь-якій кількості циклів навантаження. Для визначення границі витривалості даного матеріалу необхідно побудувати криву втоми. Вона будується за даними результатів випробувань серії зразків [170].

Дослідження передбачали випробування зразків заспокоювачів насіння, які виготовлені із зазначених матеріалів і періодична фіксація динаміки зміни сили протягом 3289473 коливань (згідно з розділом 2.6). Тобто загальний час випробувань становив ≈ 38 діб безперервної роботи. Кожні $10^{0,25i}$ с (де $i = 0, 1, \dots, 28$) фіксувалася динаміка зміни сили і визначалося максимальне значення сил в верхній

F_{\max}^u і нижній F_{\max}^d точках для кожного зразка сповільнювача насіння. Тобто цикл випробувань був асиметричним відносно сили.

3.3 Методика експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної системи подачі насіння секції

Для проведення досліджень удосконаленої пневмосистеми висівної секції було розроблено та реалізовано лабораторну установку, загальний вигляд якої приведено на рис. 3.8. Змінними факторами експериментальних досліджень були (табл. 3.3): швидкість потоку повітря на вході в сповільнювач V_a^{in} , м/с; швидкість переміщення сівалки, V_s , м/с; швидкість інжекції (дозування) насіння Q_p , шт./с; відношення площі випускних отворів до площі входу ε (2.1).

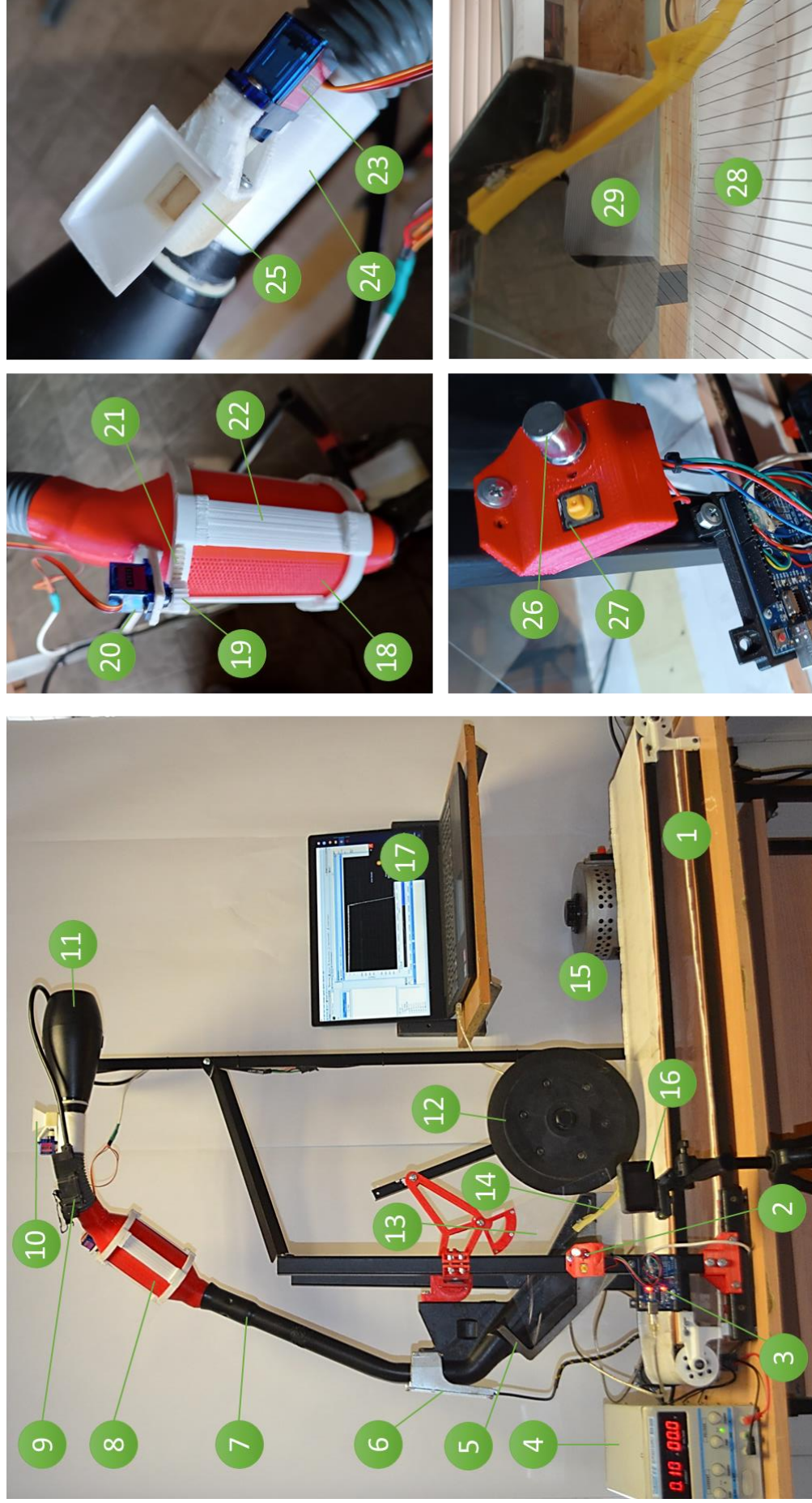
Таблиця 3.3 – Рівні варіювання факторів

Рівень	Швидкість потоку повітря на вході V_a^{in} , м/с	Швидкість переміщення сівалки V_s , м/с	Швидкість інжекції (дозування) насіння Q_p , шт./с	Відношення площі випускних отворів до площі входу ε
	x_1	x_3	x_4	x_2
-1	10	1	10	0,69
0	15	1,5	25	1,73
1	20	2	40	2,77
Δ	5	0,5	15	1,04

Критерії оптимізації: швидкість потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} , м/с; швидкість потоку насіння на виході з башмака V_p^{out} , м/с; норма висіву N , млн. шт./га; точність висіву (по довжині) (коефіцієнт варіації) δ , %. Задана норма висіву N_t розраховується враховуючи відстань між рядками ($b_r = 0,19$ м), швидкість переміщення сівалки V_s і швидкість інжекції (дозування) насіння Q_p :

$$N_t = \frac{10000 Q_p}{V_s b_r 1000000} = \frac{Q_p}{100 V_s b_r}. \quad (3.2)$$

Дослідження проведено за оптимальним планом Хартлі-Коно для чотирьох факторів $Na-Ko_4$ із загальною кількістю дослідів – 18, повторність – триразова.



1 – стрічковий транспортер «рухоме поле»; 2 – блок керування подачею насіння та сповільнювачем; 3 – Arduino Uno ATmega328P-PU; 4 – блок живлення Zhaopin RXN-305D; 5 – висівний башмак; 6 – нижній датчик висіву; 7 – повітропровід; 8 – розроблений сповільнювач; 9 – верхній датчик висіву; 10 – живильник дозованої подачі насіння; 11 – вентилятор; 12 – прикочуюче колесо; 13 – сошник; 14 – заспокоювач насіння; 15 – лабораторний автотрансформатор; 16 – камера Aspring Repeat 4 Ultra HD 4K; 17 – ПЕОМ; 18 – отвори; 19 – зубчате колесо; 20, 23 – сервопривід; 21 – сервопривід; 22 – зубчатий сектор; 25 – ежектор; 24 – циліндрична шторка; 26 – бункер живильника; 27 – регулятор положення шторки сповільнювача; 28 – розмітка «рухомого поля»; 29 – розмітка «рухомого поля»; 29 – міліметрова сітка

Рисунок 3.8 – Лабораторна установка для дослідження пневмосистеми висівної секції

Лабораторна установка складається з стрічкового транспортера «рухоме поле» 1, над яким на станині розміщено елементи пневмосистеми висівної секції: висівний башмак 5 із заспокоювачем насіння 14, нижній датчик висіву 6, пневмопровід 7, сповільнювач насіння 8, верхній датчик висіву 9, живильник дозованої подачі насіння 10. До висівного башмака 5 притиснутий прозорий сектор з оргскла 13, який імітує дисковий сошник, а заспокоювач насіння 14 притискається в робоче положення прикочуючим колесом 12.

Сповільнювач насіння 8 виконано з можливістю зміни загальної площі перерізу отворів 18 для відводу повітря шляхом зміни положення циліндричної шторки 22 за допомогою сервоприводу 20 через зубчате колесо 19 та зубчатий сектор 21. Необхідне положення шторки 22 встановлюють дистанційно, за допомогою регулятора 26.

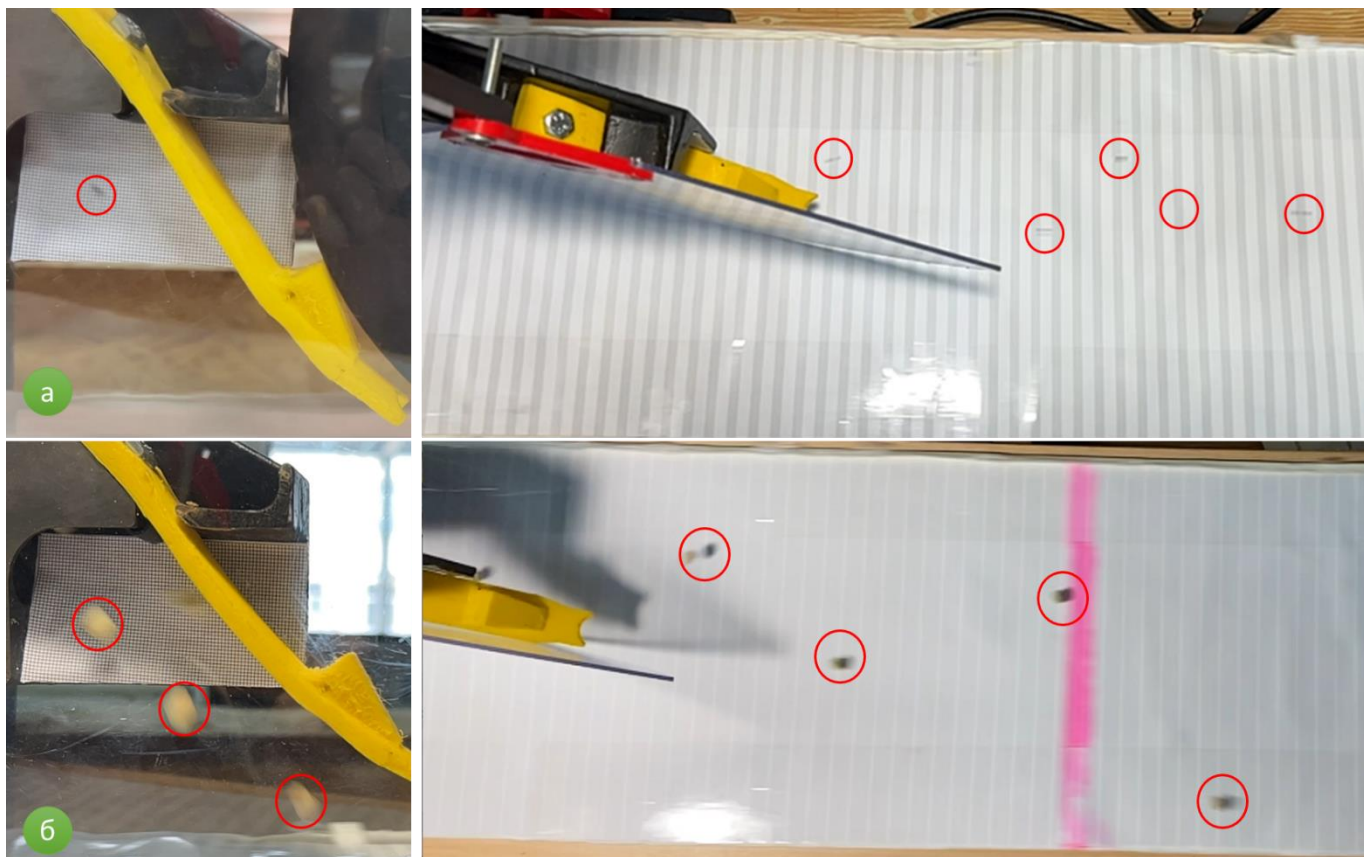
Для подачі насіння в пневмосистему висівної секції передбачено живильник дозованої подачі насіння 10, який складається з бункера 25, оснащеного секторним шиберам, що приводиться в дію сервоприводом 23. З бункера 25 через керований шибера насіння потрапляє до ежектора 24, де підхоплюється повітряним потоком, який створює вентилятор 11. Відкриття шибера також дистанційне за допомогою кнопки 27.

Запуск стрічкового транспортера «рухоме поле» 1 забезпечує електродвигун постійного струму з живленням від лабораторного блоку живлення Zhaoxin RXN-305D 4, швидкість руху транспортера регульована, від 0 до 2 м/с. Необхідну швидкість транспортера контролювали за допомогою тахометра безконтактного Venetech GM8905 (рис. 3.10, а).

Для визначення точності висіву на стрічковому транспортері 1 зроблено розмітку 28, виліт насіння фіксували за допомогою камери Aspiring Repeat 4 Ultra HD 4K 16 на фоні міліметрової стрічки 29, наклеєної на висівний башмак 5 та на фоні розмітки 29. Це дає змогу визначити швидкість вильоту насіння та розкладання його на транспортері (рис. 3.9).

Швидкість потоку повітря на вході в ежектор 24 регулювали шляхом зміни напруги живлення електродвигуна вентилятора 11 за допомогою лабораторного автотрансформатора 15. Вимірювали швидкість руху повітря за допомогою багатофункціонального пристрою Solomat MPM 500E (рис. 3.10, б). Для контролю проходження насіння по насіннепроводу використовували відповідні датчики

верхній 9, AA27652, інфрачервоний та нижній 6, PP 700285, ультразвуковий. Інформація з датчиків поступала на плату Arduino Uno ATmega328P-PU 3, з подальшою передачею на персональний комп'ютер 17.



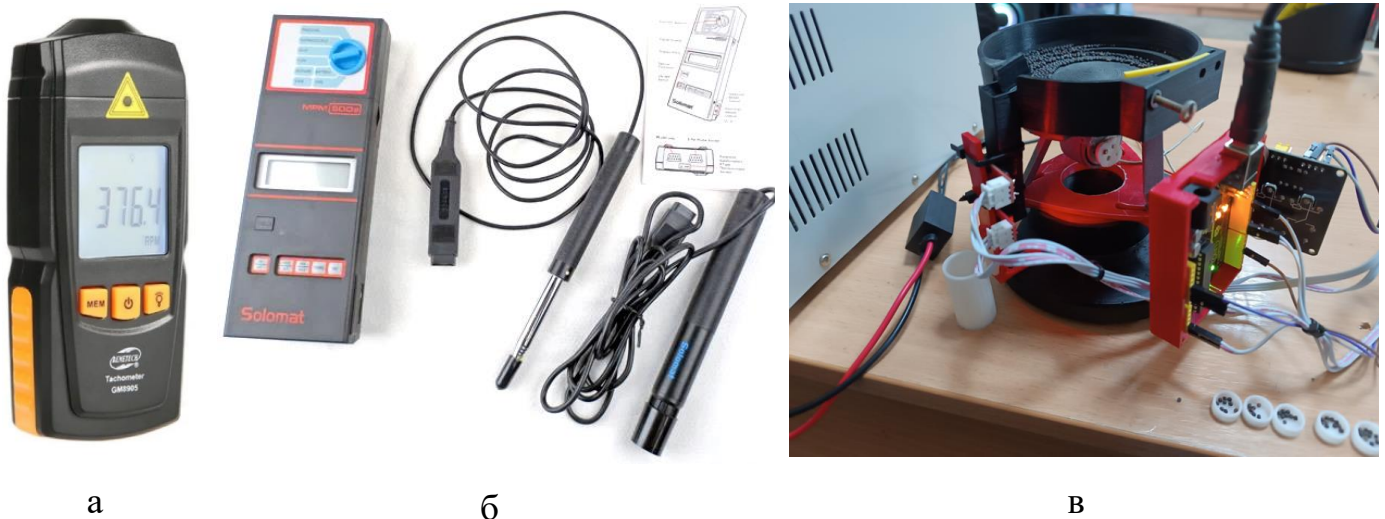
а – ріпак; б – горох

Рисунок 3.9 – Приклад отриманих на дослідному стенді результатів

В якості посівного матеріалу було використано ріпак, сорту Veritas та горох, сорту СОМЕРВУД F1 Syngenta. Для спрощення процесу підрахунку кількості насінин відповідно до номеру досліду, було розроблено та реалізовано вібраційний лічильник насіння (рис. 3.10, в).

Дослідження сповільнювача насіння проводили в наступному порядку. Спочатку, для кожної з культур, проводили контрольні вимірювання за відсутності сповільнювача. При цьому змінювали лише швидкість інжекції (дозування) насіння Q_p . Значення швидкості потоку повітря на вході V_a^{in} та швидкість переміщення

сівалки V_s фіксували на верхньому рівні. Далі, відповідно до номеру досліду, встановлювали відповідні значення змінних факторів та проводили фіксацію значень критеріїв оптимізації.



а – тахометр безконтактний Benetech GM8905; б – багатофункціональний пристрій Solomat MPM 500E; в – лічильник насіння

Рисунок 3.10 – Додаткове обладнання для проведення досліджень

3.4 Методика порівняльних виробничих випробувань удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву

Для проведення виробничих випробувань створено експериментальний зразок секції пневматичної зернової сівалки точного висіву на базі John Deere 90 Series (рис. 3.11). Експериментальний зразок окрім базових елементів містить удосконалений заспокоювач насіння і розроблений сповільнювач насіння із автоматизованою системою керування. Електрична схема автоматизованої системи керування сповільнювача насіння наведено на рис. 3.12. Автоматизована система керування основана на платі керування Arduino Uno ATmega328P-PU, програмний код якої в середовищі Arduino IDE наведено в додатку Е. До Arduino Uno по шині I²C передаються з блока керування сівалки значення норми висіву N_t (тис. шт./га).



Рисунок 3.11 – Експериментальний зразок секції пневматичної зернової сівалки
точного висіву на базі John Deere 90 Series

Також до Arduino Uno підключено індуктивний датчик наближення LJ30A3-15-Z-EX, з використанням якого визначається швидкість руху сівалки (м/с) за формулою

$$V_s = 2\pi Rn, \quad (3.3)$$

де R – радіус колеса, $R = 0,3$ м; n – частота обертання колеса, яка визначається з використанням датчиком наближення, об/с.

Кут повороту сервопривода SG90 ($^\circ$) визначається за формулою:

$$\alpha = 90\varepsilon(N_t, V_s) / \max[\varepsilon(N_t, V_s)], \quad (3.4)$$

де $\varepsilon(N_t, V_s)$ – залежність кількості отворів на сповільнювачі насіння (відношення ε) від швидкості переміщення сівалки V_s і заданої норми висіву N_t – (4.20); \max – максимальне значення функції в заданих діапазонах.

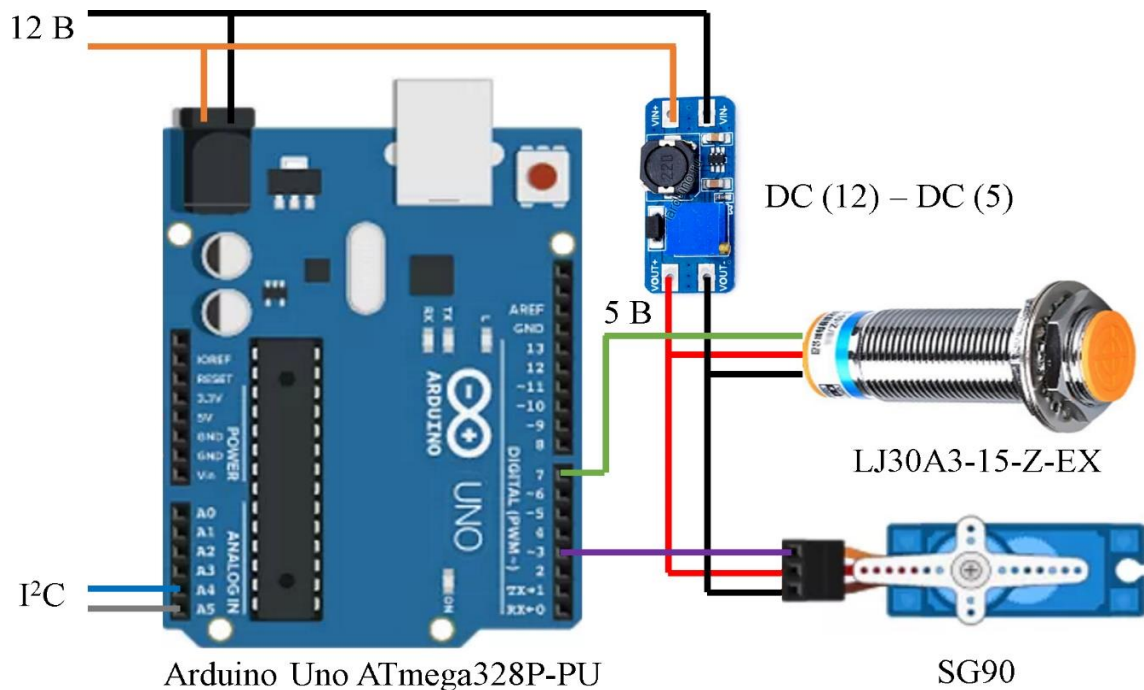


Рисунок 3.12 – Електрична схема автоматизованої системи керування сповільнювача насіння

Польові експериментальні дослідження проводилися на зерно-паропросапній сівозміні на території Акціонерного фермерського господарства «Ольвія» (с. Новоукраїнське, Криворізький р-н, Дніпропетровська обл.). Ґрунт дослідних ділянок – чорнозем звичайний важкосуглинковий малогумусний. Вміст гумусу в орному горизонті Ґрунту становив від 3,4 % до 3,9 %, а рН водної витяжки коливався від 6,4 до

6,9. Загальні запаси поживних речовин склалися з таких компонентів: азоту – від 0,22 % до 0,25 %, фосфору – від 0,12 % до 0,17 %, калію – від 1,9 % до 2,4 %.

В якості культур для проведення польових досліджень обрано – горох і ріпак.

Для проведення дослідів було використано мінеральні добрива (нітрофоску), які були внесені під час передпосівної культивуації відповідно до розроблених схем.

Посівні якості насіння, такі як маса 1000 насінин, енергія проростання та лабораторна схожість, було визначено відповідно до методик [171, 172].

У польових дослідях горох був висіяний після попередника – пшениці озимої. Час посіву – 22.04.2024 р. (середня температура навколишнього середовища – 12 °С). Для висіву були використано сорт ярого гороху Соломон. Застосована технологія вирощування гороху в цих дослідях є загальноприйнятою для даної зони. Міжряддя складало – 0,19 м, глибина посіву – 0,05–0,07 м. Норма висіву – 1,2 млн. шт./га. Маса 1000 насінин складала 174 ± 2 г. Загальна зараженість хворобами – $1,2 \pm 0,5$ %. Схожість – $98,0 \pm 1,2$ %, енергія проростання – $96,0 \pm 1,2$ %.

Ріпак був висіяний після попередника – пшениці озимої. Час посіву – 31.08.2023 р. Для висіву було використано насіння гібриду озимого ріпаку Veritas. Застосована технологія вирощування гороху в цих дослідях є загальноприйнятою для даної зони. Міжряддя дорівнювало – 0,19 м, глибина посіву – 0,05–0,07 м. Норма висіву – 0,8 млн. шт./га. Маса 1000 насінин становила $3,56 \pm 0,33$ г. Загальна зараженість хворобами – $1,4 \pm 0,5$ %. Схожість – $94,0 \pm 1,2$ %, енергія проростання – $91,0 \pm 1,2$ %.

Сіяли горох сівалкою John Deere 90 Series із базовою і удосконаленою конструкцією пневматичної системи подачі насіння секції.

В якості факторів дослідження обрано: А – культура; В – наявність сповільнювача насіння; С – наявність заспокоювача насіння; D – швидкість руху сівалки, м/с. Рівні факторів дослідів наведено в табл. 3.4.

За критерії оцінки якості посіву обрано: густоту N' (млн. шт./га) і рівномірність (точність посіву δ , %) стояння рослин вздовж лінії посіву після сходів; урожайність Р (т/га).

На рис. 3.13 відображені сходи гороху (а) і ріпаку (б) на дослідному полі. Облік густоти стояння рослин проводився згідно з методикою Доспехова Б. О. [173]. Густота і рівномірність розміщення рослин розраховувалась на п'яти метровому контрольному

рядку в п'ятиразовій повторності. Врожайність визначалася суцільним подільничним методом з подальшим перерахуванням на стандартну вологість та 100 % чистоту.

Таблиця 3.4 – Рівні варіювання факторів

Культура (А)	Наявність сповільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки V_s , м/с (D)
Горох (норма висіву – 1,2 млн. шт./га)	Без сповільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1
Ріпак (норма висіву – 0,8 млн. шт./га)	Зі сповільнювачем насіння	Удосконалений заспокоювач насіння	2
			3
			4



а



б

Рисунок 3.13 – Сходи гороху (а) і ріпаку (б) на дослідному полі АФГ «Ольвія»

Під час висіву на сівалці на рівні висівного башмака було закріплено екшн-камеру Aspiring Repeat 4 Ultra HD 4K Dual Screen. З її допомогою фіксувався момент вилітання насіння у посівне ложе. Це необхідно для наочного порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних

Експериментальні дослідження в лабораторних умовах проводилися використовуючи математичний метод планування експерименту для багатьох факторів, який дозволяв визначити математичні моделі критеріїв технологічних процесів за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud у вигляді регресійних рівнянь другого порядку [173, 174]

$$y = a_0 + \sum_{k=1}^k a_k x_k + \sum_{k=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{k=1}^k a_{ii} x_i^2, \quad (3.3)$$

де a_0 , a_i , a_{ii} , a_{ij} – регресійні коефіцієнти; x_i , x_j – незалежні закодовані фактори. Регресійні рівняння другого порядку визначалися у закодованому виді. Фактори кодувалися за формулою [175, 176]

$$x_i = \frac{X_i - X_{oi}}{\Delta X_i}, \quad (3.4)$$

де x_i – незалежні закодовані фактори (величина безрозмірна, для верхнього, центрального і нижнього рівнів позначаються +1, -1, 0 відповідно); X_i – натуральний фактор; X_{oi} – натуральний фактор на центральному рівні; ΔX_i – натуральний інтервал варіації фактору.

Критерій Кохрена використовувався для перевірки відтвореності дослідів і дорівнював відношенню максимального значення дисперсії до суми всіх дисперсій. Значення дисперсії, яке обчислювалось, порівнюють з табличним показником. Для умови $\sigma_p \leq \sigma_{\text{табл}}$ дисперсія вважається однорідною. Для умови $\sigma_p > \sigma_{\text{табл}}$ дисперсія є неоднорідною і тому необхідно підвищити точність вимірювання або встановити менші інтервали варіювання факторами та підвищити кількість повторень у дослідях [177, 178].

При встановленні похибки результатів досліджень обліковується, що відхилення від середнього значення повинно не перевищувати трьох середньоквадратичних відхилень. Якщо відхилення перевищувало три середньоквадратичні відхилення, то значення виключається з розгляду [179].

За критерієм Стюдента обчислювалися довірливі межі для випадкової похибки результатів досліджень [180].

Для перевірки поставленої гіпотези щодо визначення адекватності математичної моделі другого порядку проводився відповідний статистичний аналіз рівняння регресії з використанням критерію Фішера [181].

За допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud будувалася поверхня відгуку критерію технологічного процесу за розрахованою математичною моделлю. Раціональні параметри визначалися як координати оптимуму побудованої поверхні відгуку. Методом канонічного перетворення рівняння регресії проводився пошук оптимуму критерія [182–184].

Пошук раціональних параметрів процесу проводився в результаті вирішення компромісної задачі після визначення математичних моделей всіх критеріїв. По-перше, визначалися найбільш вагомі фактори по кожному рівнянню та їх оптимальні параметри. По-друге, із отриманого списку визначалися спільні фактори і проводився аналіз діапазонів їх раціональних параметрів [185].

Експериментальні дослідження в польових умовах проводилися використовуючи дисперсійний аналіз за допомогою програмних продуктів Microsoft Excel. Вірогідність відмінностей у ступені варіативності ознак оцінювалася за допомогою критерію Фішера (F-критерію), який визначає відношення дисперсій незалежних вибірок з певною кількістю ступенів свободи. Якщо фактичне значення F-критерію перевищує теоретичне F_{05} , то між порівнюваними дисперсіями існують суттєві відмінності; інакше, відмінності не є значущими, і нульова гіпотеза про рівність дисперсій не відхиляється. Це вказує на можливий вплив або відсутність впливу експериментального фактору на критерій. F-тест лише підтверджує наявність значних відмінностей між середніми значеннями, але не визначає, між якими саме значеннями вони є.

Значущість різниці між середніми значеннями – найменша істотна різниця (HP_{05}) оцінювалася наступним чином: якщо в експерименті є один варіант, то між середніми значеннями можна визначити кількість різниць за формулою $1(1 - 1)/2$, серед яких можуть бути як суттєві, так і незначущі відмінності. Критерій HP_{05} вказує на граничну похибку різниці між двома середніми вибірками

$$HP_{05} = t_{05} \times S_d, \quad (3.5)$$

де t_{05} – критерій значущості різниці, а S_d – стандартна похибка різниці.

Якщо фактична різниця перевищує HP_{05} , то вона є суттєвою; інакше, різниця незначна. Вплив фактору визначався як відношення дисперсії фактору до загальної дисперсії всіх факторів і виражався у відсотках [186, 187].

3.6 Висновки з розділу

1. Розроблено методику лабораторних досліджень процесу деформації заспокоювача насіння. Дослідні зразки заспокоювачів насіння виготовляли з використанням адитивної технології FDM друку за допомогою 3D-принтера Creality K1 Max. В якості матеріалів було обрано наступні: Nylon, Nylon-CCF (Carbon Fiber), TPU 40D, Elasthan D100, Elasthan D70, ABS. Дослідження кручення та згину заспокоювачів насіння проведено на спеціально розроблених лабораторних стендах, що дозволило визначити критичні значення сил та кутів деформації для кожного зразка, а також оцінити їх втомну міцність у процесі тривалих випробувань. Отримані результати матимуть важливе значення для вибору оптимального матеріалу для виготовлення заспокоювачів насіння, що забезпечить їхню надійну роботу в реальних умовах експлуатації.

2. Розроблена методика експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної системи подачі насіння секції з метою визначення раціональних параметрів її функціонування та впливу на ефективність висіву. Для реалізації експериментів було створено лабораторну установку, яка імітує роботу пневмосистеми висівної секції в умовах, максимально наближених до реальних. Змінними факторами експерименту виступали швидкість повітряного потоку на

вході в сповільнювач V_a^{in} , швидкість переміщення сівалки V_s , швидкість інжекції насіння Q_p та відношення площі випускних отворів до площі входу ε . Для кожного з цих факторів було встановлено відповідні рівні варіювання, що дозволило здійснити дослідження за оптимальним планом Хартлі-Коно для чотирьох факторів.

3. Виробничі випробування удосконаленої пневмосистеми висівної секції проведені на базі сівалки John Deere 90 Series. Удосконалена конструкція включала базові елементи, а також удосконалений заспокоювач насіння та сповільнювач із автоматизованою системою керування, що базується на Arduino Uno. Польові експериментальні дослідження проводилися на території АФГ «Ольвія» (с. Новоукраїнське, Криворізький р-н, Дніпропетровська обл.). В якості культур для проведення польових досліджень обрано – горох сорту Соломон і озимий ріпак гібриду Veritas. В якості факторів дослідження обрано: А – культура; В – наявність сповільнювача насіння; С – наявність заспокоювача насіння; D – швидкість руху сівалки V_s , м/с. За критерії оцінки якості посіву обрано: густоту N (млн. шт./га) і рівномірність (точність посіву δ , %) стояння рослин вздовж лінії посіву після сходів; урожайність P (т/га).

4. Для обробки експериментальних даних використовувалася комплексна методика статистичного аналізу, яка включала застосування математичних методів планування експерименту, дисперсійного аналізу, а також інших статистичних критеріїв. Зокрема, використання програмного забезпечення Wolfram Cloud дозволило побудувати регресійні моделі другого порядку, що описують залежність критеріїв від різних факторів. У польових умовах обробка даних здійснювалася за допомогою дисперсійного аналізу у програмному середовищі Microsoft Excel, що забезпечило надійність і адекватність висновків щодо впливу експериментальних факторів на результати.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ВИСІВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЮ СИСТЕМОЮ ПОДАЧІ НАСІННЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ ТОЧНОГО ВИСІВУ

4.1 Результати лабораторних досліджень процесу деформації заспокоювача насіння

4.1.1 Дослідження деформації кручення

В результаті дослідження деформації кручення заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці отримано значення зусилля, яке необхідно прикласти для його кручення на кут 70° (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Значення зусилля кручення заспокоювачів насіння

Матеріал	Nylon	Nylon-CCF	TPU 40A	Elastan D100	Elastan D70	ABS
Значення сили, Н	112,8 $\pm 3,2$	52,2 $\pm 2,8$	59,8 $\pm 3,0$	34,3 $\pm 1,9$	32,3 $\pm 1,6$	руйнування

За результатами проведених досліджень можна стверджувати наступне: найбільше значення зусилля кручення 112,8 Н має Nylon, найменші, на рівні 32–33 Н – Elastan D100 та Elastan D70. Nylon-CCF та TPU 40A мають приблизно рівні значення зусилля кручення – $52,2 \pm 2,8$ та $59,8 \pm 3,0$ Н. При цьому зразки з ABS руйнувалися при крученні на кут біля $44 \pm 1^\circ$.

4.1.2 Дослідження деформації згину

В результаті дослідження деформації при згині заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці встановлено динаміку зусилля, яке необхідно прикласти для згину різних зразків (рис 4.1) на величину $\pm 0,015$ м.

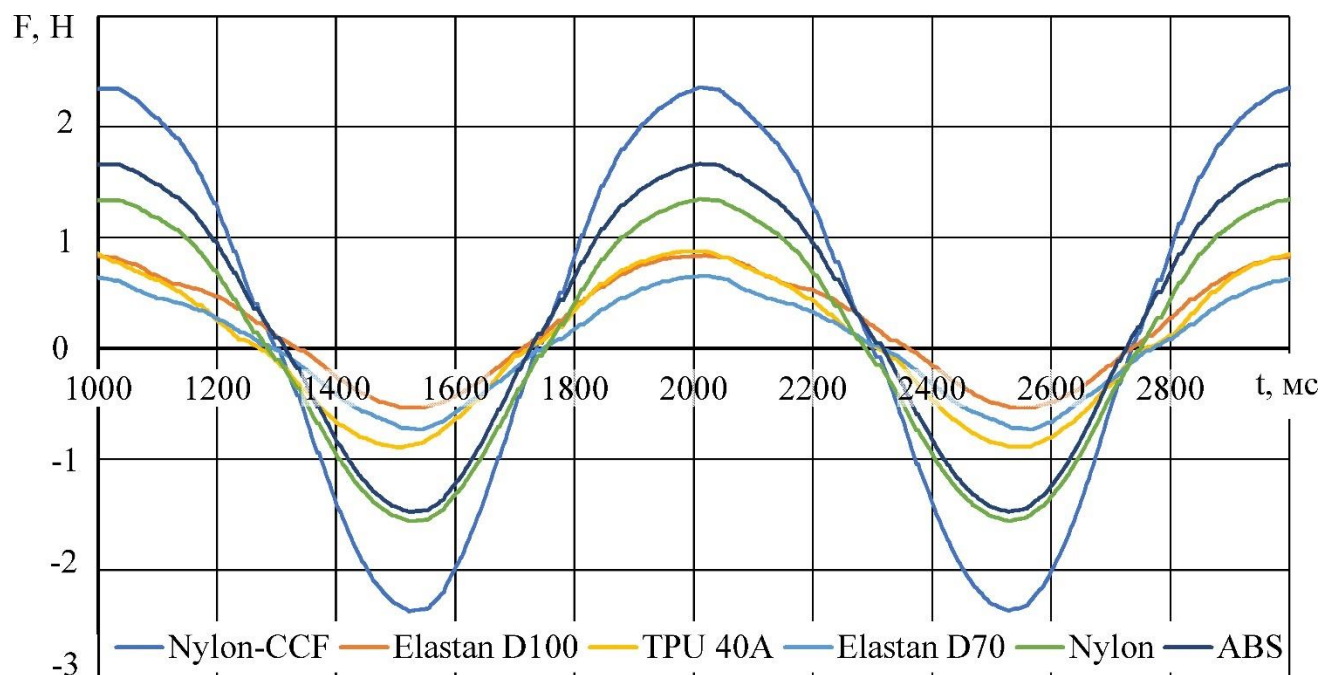


Рисунок 4.1 – Динаміка зусилля, яке необхідно прикласти для згину різних зразків заспокоювача на величину $\pm 0,015$ м

Зведені дані визначених зусиль в початковий час випробувань наведено в табл. 4.2. Найбільші значення сил має заспокоювач з Nylon-CCF, а найменше значення – Elasthan D70.

Таблиця 4.2 – Мінімальне і максимальне значення зусиль в початковий час випробувань заспокоювачів насіння

Матеріал	Nylon	Nylon-CCF	TPU 40A	Elastan D100	Elastan D70	ABS
Мінімальне значення сили, Н	-1,341 $\pm 0,021$	-2,343 $\pm 0,028$	-0,867 $\pm 0,015$	-0,812 $\pm 0,010$	-0,637 $\pm 0,012$	-1,611 $\pm 0,023$
Максимальне значення сили, Н	1,356 $\pm 0,021$	2,368 $\pm 0,018$	0,881 $\pm 0,015$	0,838 $\pm 0,010$	0,655 $\pm 0,012$	1,675 $\pm 0,023$

За результатами тривалих випробувань побудована крива втоми заспокоювачів для різних матеріалів для сил в верхній F_{\max}^u і нижній F_{\max}^d точках коливання (рис. 4.2). На рисунку номінальна амплітуда сили F_{\max}^u і F_{\max}^d зазначається лінійно, а кількість коливань N .

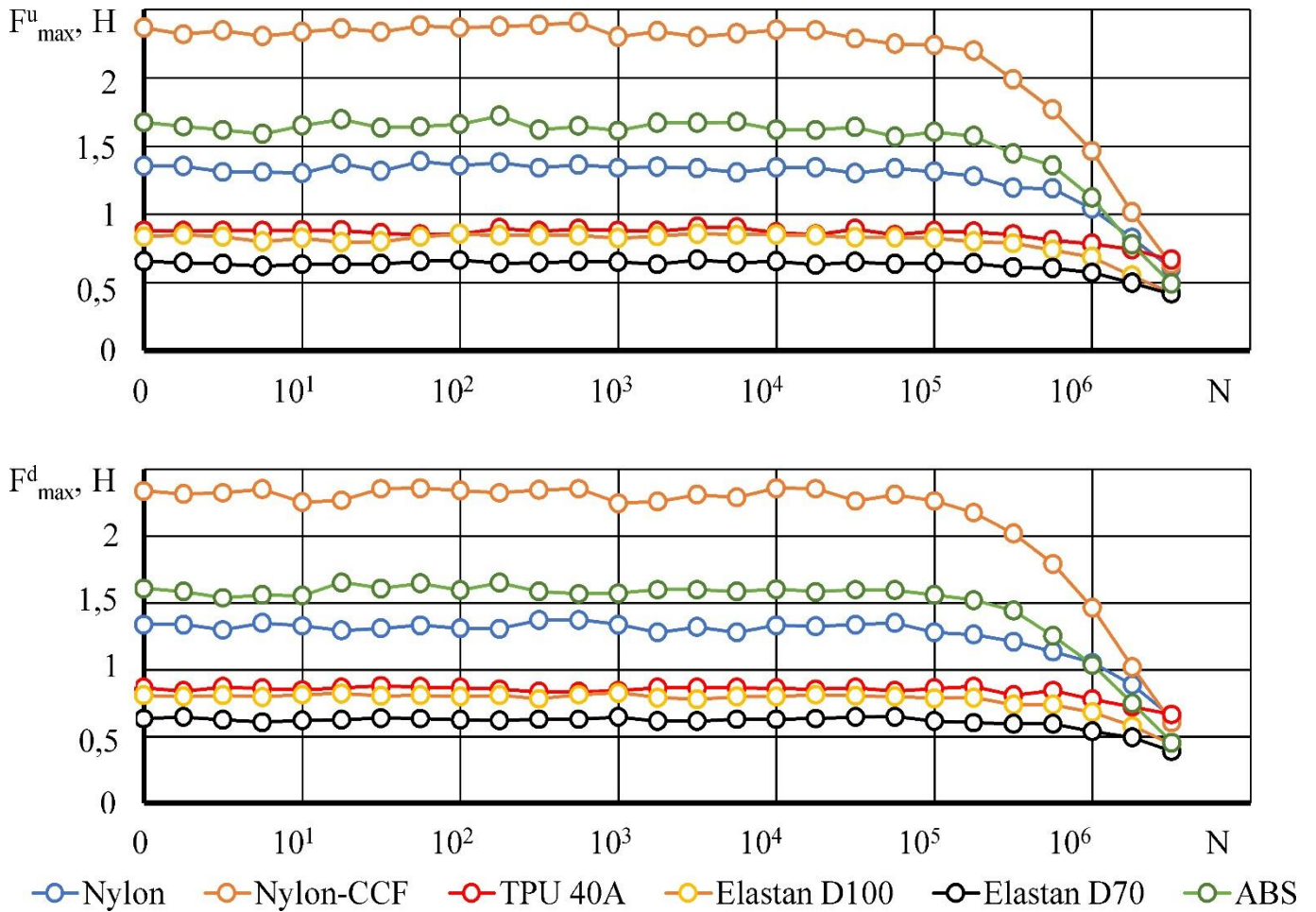


Рисунок 4.2 – Криві втоми заспокоювачів різних матеріалів для сил в верхній F_{\max}^u і нижній F_{\max}^d точках коливання

Для встановлення найбільш раціонального матеріалу для заспокоювача скористаємося умовою, що сила коливань при тривалих випробуваннях не повинна зменшуватися на 25 %:

$$F_{\max}^u(N) \geq 0,75F_{\max}^u(0), \quad F_{\max}^d(N) \geq 0,75F_{\max}^d(0). \quad (4.1)$$

Використовуючи функцію «пошук рішення» в програмному пакеті Excel отримано значення найбільшої кількості коливань для кожного матеріалу, які зведено в табл. 4.3.

Аналіз табл. 4.3 показує, що найбільшу кількість коливань витримує заспокоювач виготовлений з TPU 40A – 3701 тис. шт., а найменшу – з ABS – 818 тис. шт.

Таблиця 4.3 – Найбільша кількість коливань (тис. шт.) при яких виконується умова (4.1)

Матеріал	Nylon	Nylon-CCF	TPU 40A	Elastan D100	Elastan D70	ABS
Найбільша кількість коливань для F_{\max}^d	1468	726	3638	1775	2341	814
Найбільша кількість коливань для F_{\max}^u	1269	721	3763	1559	2282	822
Середнє значення	1369	724	3701	1667	2312	818

Тому для подальших досліджень раціонально використовувати матеріал TPU 40A. При перерахунку отримуємо, що заспокоювач з TPU 40A здатний витримувати 1028 год або 6750 га експлуатації (згідно розділу 2.6). Це значення перевищує ресурс сівалки John Deere 90 Series до технічного обслуговування в 6000 га [154–156] на 12,5 %.

4.2 Результати експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної системи подачі насіння

Результати експериментальних досліджень наведені в додатку Д. Одним з етапів експериментальних досліджень є відеофіксація вильоту насінин ріпаку і гороху з висівного башмака секції сівалки і взаємодія їх із горизонтальною поверхнею «рухомого поля» і заспокоювачем насіння. Під час спостереження (кількість спостережень для кожного досліду варіювалося від 10 до 16) було виявлено три випадки руху насіння: I – удар насіння об «рухоме поле» і подальше переміщення його без взаємодії із заспокоювачем насіння; II – удар насіння об «рухоме поле» із подальшим відскоком і взаємодія із заспокоювачем насіння; III – удар насіння об заспокоювач із подальшим відскоком його до «рухомого поля». Випадок I – є звичайним (не потребує змін) і спостерігався у 72,1 % з усіх спостережень. Більш цікавими, з точки зору зміни траєкторії руху насінин і підвищеної ймовірності вильоту їх з борозенки, є випадки II і III. Тому розглянемо їх більш детально (рис. 4.3).

Випадки II і III спостерігалися відповідно у 12,8 % і 15,1 % з усіх спостережень. У випадку II заспокоювач насіння повністю виконував свою функцію, змінюючи траєкторію руху насінини і зменшуючи її швидкість на 12–21 %. Це призводило до зменшення висоти відскоку від «рухомого поля». У III випадку заспокоювач насіння також не дозволяв насінинам продовжувати рух вгору після

відскоку від «рухомого поля», направляючи їх донизу.

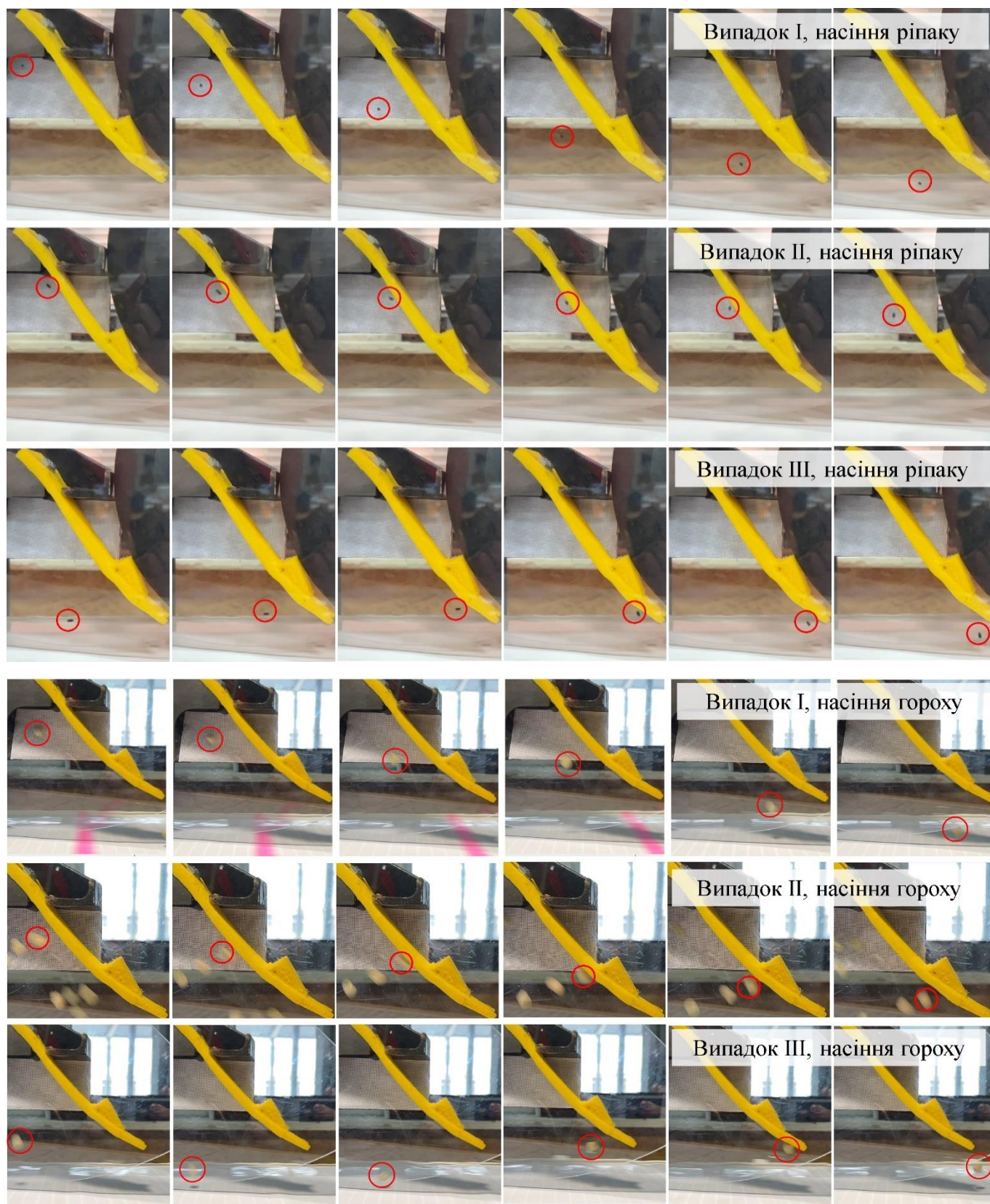


Рисунок 4.3 – Відеофіксація вильоту насінин ріпаку і гороху з висівного башмака секції сівалки і взаємодія їх із заспокоювачем

Траєкторія руху насінини отримана шляхом накладання фотозображень одне на одне. Тим самим спостерігалася траєкторія руху, яка визначена у аналітичних дослідженнях (розділ 2.5). Приклад співставлення траєкторії руху насіння при спостереженнях (випадок III) і аналітичних дослідженнях наведено на рис. 4.4.

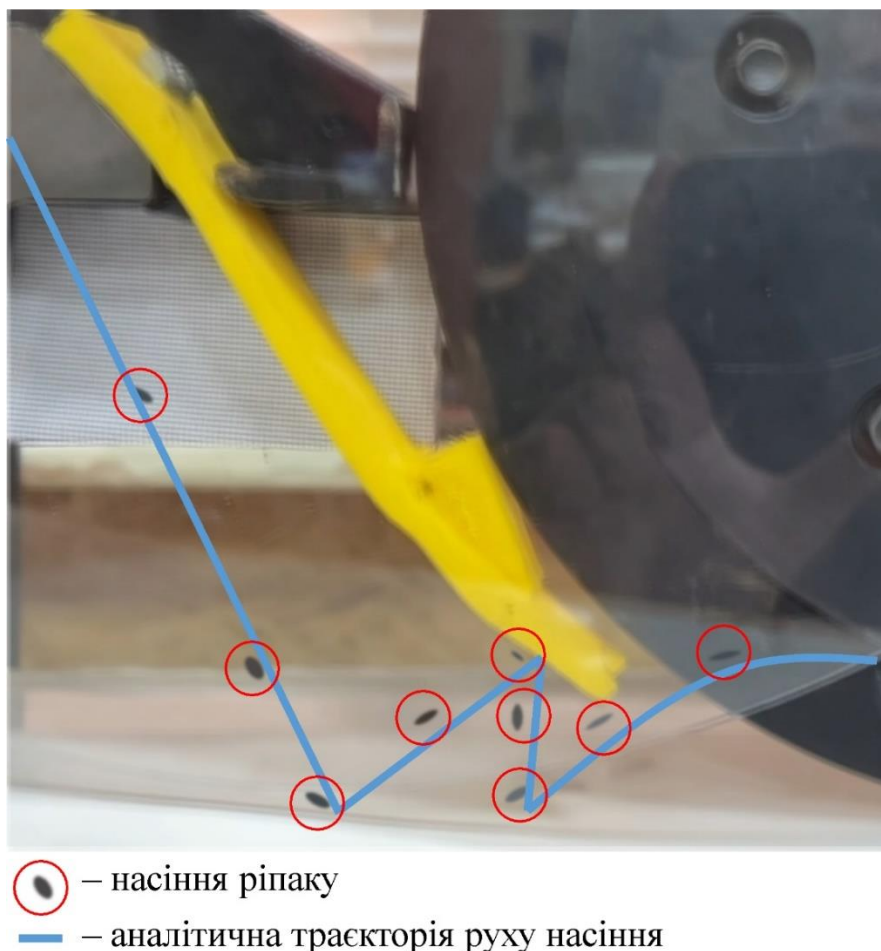


Рисунок 4.4 – Співставлення траєкторії руху насіння при спостереженнях (випадок III) і аналітичних дослідженнях (розділ 2.5)

Наочний аналіз фотозображень і відео дійсно свідчить про доцільність використання заспокоювача насіння розробленої конструкції. Однак для врахування реальних умов процесу сівби необхідно провести порівняльні виробничі випробування удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із її базовою конструкцією.

Наступним етапом є визначення рівнянь регресії між критеріями і факторами

дослідження. Отриманий масив даних у вигляді таблиці наведено в додатку Д.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку для швидкості потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} (м/с) у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} V_a^{out} = & 4,41357 + 2,61977 x_1 + 0,991006 x_1^2 - 3,72313 x_2 - 1,26555 x_1 x_2 + \\ & - 1,90913 x_2^2 + 0,394115 x_3 + 0,484615 x_1 x_3 - 0,124997 x_2 x_3 - \\ & - 0,404622 x_3^2 - 0,241632 x_4 - 0,105108 x_1 x_4 - 0,226317 x_2 x_4 - \\ & - 0,423166 x_3 x_4 - 0,440177 x_4^2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Результати статистичної обробки рівняння (4.2) наведено в табл. 4.4: визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії і обґрунтовано адекватність рівняння за критерієм Фішера.

Таблиця 4.4 – Результати статистичної обробки рівняння (4.2)

Коефіцієнт рівняння регресії	Стандартна помилка	t-критерій Стьюдента	Рівень значимості
a_{00}	0,403091	10,9493	0,00163088
a_{10}	0,341333	7,67511	0,00459508
a_{20}	0,191408	-19,4513	0,000296831
a_{30}	0,243019	1,62175	0,203308
a_{40}	0,190743	-1,26679	0,294641
a_{12}	0,204243	-6,19632	0,00846789
a_{13}	0,320392	1,51257	0,227588
a_{14}	0,212179	-0,495373	0,654351
a_{23}	0,207025	-0,603777	0,588591
a_{24}	0,219597	-1,03061	0,37854
a_{34}	0,244777	-1,72878	0,182293
a_{11}	0,498969	2,08611	0,141217
a_{22}	0,320567	5,95549	0,00946902
a_{33}	0,386457	-1,047	0,372019
a_{44}	0,523964	-0,84009	0,462533
Табличне значення		2,028	
Різновид дисперсії	Сума квадратів відхилень	Оцінка дисперсії	
Модель	775,431	51,6954	
Помилка	0,518793	0,172931	
Критерій Фішера	$F_{розр.}$	298,9	
	$F_{табл.}$	2,003	

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

У розкодованому вигляді залежність швидкості потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} (м/с) від факторів досліджень має вигляд (рис. 4.5, а):

$$V_a^{\text{out}} = 10,6338 - 0,244213 V_a^{\text{in}} + 0,0396402 (V_a^{\text{in}})^2 - 6,03654 \varepsilon - 0,243376 V_a^{\text{in}} \varepsilon + 1,7651 \varepsilon^2. \quad (4.3)$$

На рис. 4.5 (а) наведено залежність (2.5), яку отримано в результаті чисельного моделювання. Коефіцієнт кореляції залежностей (2.5) і (4.3) дорівнює 0,943.

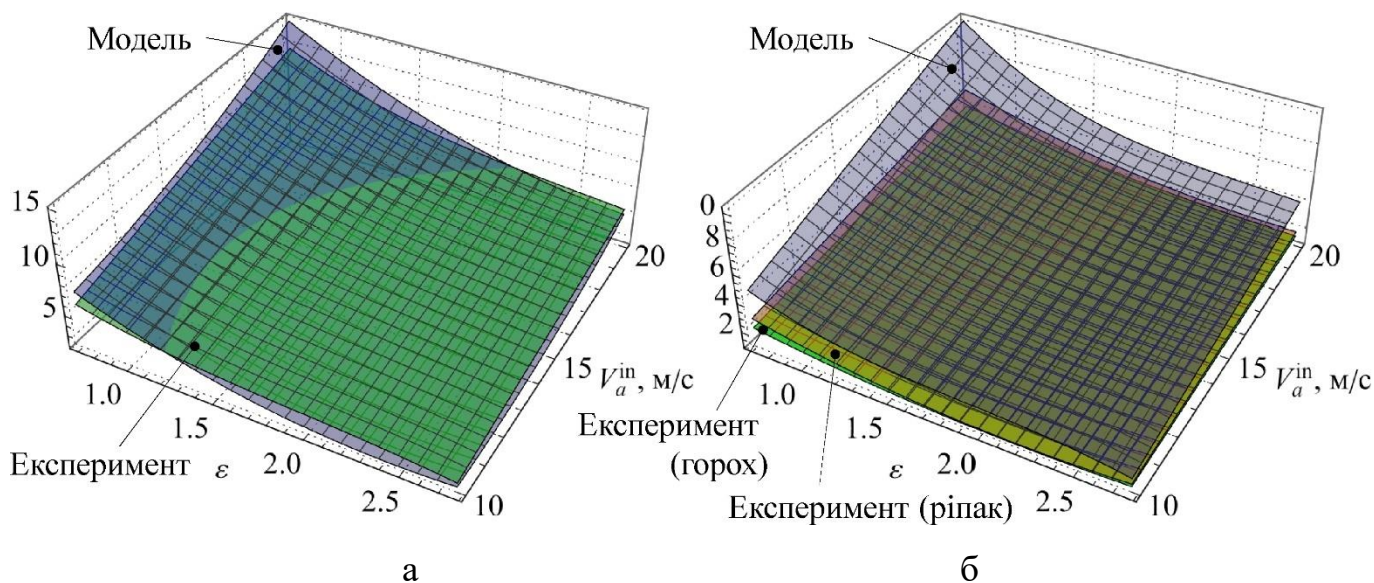


Рисунок 4.5 – Експериментальна і модельна залежності швидкості потоку повітря V_a^{out} (а) і швидкості потоку насіння ріпаку та гороху на виході з башмака V_p^{out} (б) від факторів дослідження

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку для швидкості насіння ріпаку і гороху на виході з башмака V_{pr}^{out} (м/с) і V_{pg}^{out} (м/с) у закодованому вигляді:

$$V_{pr}^{\text{out}} = 1,95292 + 0,706487 x_1 + 0,0833509 x_1^2 - 1,18412 x_2 - 0,469857 x_1 x_2 + 0,878295 x_2^2 + 0,0242434 x_3 + 0,0841222 x_1 x_3 + 0,0695539 x_2 x_3 - 0,0420764 x_3^2 - 0,129994 x_4 + 0,126775 x_1 x_4 + 0,0999313 x_2 x_4 - 0,164271 x_3 x_4 - 0,177574 x_4^2; \quad (4.4)$$

$$V_{pg}^{\text{out}} = 1,66492 + 0,529561 x_1 + 0,100447 x_1^2 - 0,825554 x_2 - \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
& - 0,360287 x_1 x_2 + 0,568114 x_2^2 + 0,0994859 x_3 + 0,156025 x_1 x_3 + \\
& + 0,0708588 x_2 x_3 + 0,0842542 x_3^2 - 0,0602851 x_4 + 0,115499 x_1 x_4 + \\
& + 0,114812 x_2 x_4 - 0,041649 x_3 x_4 - 0,4832 x_4^2.
\end{aligned}$$

Результати статистичної обробки рівняння (4.4) і (4.5) наведено в табл. 4.5: визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії і обґрунтовано адекватність рівняння за критерієм Фішера.

Таблиця 4.5 – Результати статистичної обробки рівнянь (4.4) і (4.5)

Коефіцієнт рівняння регресії	Стандартна помилка		t-критерій Стьюдента		Рівень значимості	
	(4.4)	(4.5)	(4.4)	(4.5)	(4.4)	(4.5)
a ₀₀	0,334123	0,280341	5,84491	5,93891	0,00998082	0,00954353
a ₁₀	0,282932	0,23739	2,49702	2,23077	0,0879372	0,111917
a ₂₀	0,158658	0,13312	-7,46331	-6,20158	0,00498078	0,00844763
a ₃₀	0,201438	0,169014	0,120352	0,588625	0,911812	0,597494
a ₄₀	0,158107	0,132657	-0,822191	-0,454443	0,471226	0,680376
a ₁₂	0,169297	0,142046	-2,77534	-2,53641	0,0692593	0,0849459
a ₁₃	0,265573	0,222825	0,316757	0,700214	0,77219	0,534211
a ₁₄	0,175876	0,147566	0,720819	0,782698	0,523113	0,490904
a ₂₃	0,171603	0,143981	0,405318	0,49214	0,712416	0,656383
a ₂₄	0,182024	0,152724	0,549	0,751759	0,621226	0,506798
a ₃₄	0,202896	0,170237	-0,809628	-0,244653	0,477411	0,822505
a ₁₁	0,413596	0,347021	0,201527	0,289454	0,853177	0,791085
a ₂₂	0,265718	0,222947	3,30536	2,5482	0,0455501	0,0840746
a ₃₃	0,320335	0,268772	-0,131351	0,313478	0,903811	0,774449
a ₄₄	0,434315	0,364405	-0,408861	-1,326	0,710078	0,27676
Табличне значення				1,975		
Різновид дисперсії	Сума квадратів відхилень		Оцінка дисперсії			
	(4.4)	(4.5)	(4.4)	(4.5)		
Модель	134,754	66,5691	8,98357		4,43794	
Помилка	0,356451	0,250934	0,118817		0,0836448	
Критерій Фішера	F _{розр.}		75,6		53,1	
	F _{табл.}		1,781			

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

У розкодованому вигляді залежність швидкості насіння ріпаку і гороху на виході з башмака V_{pr}^{out} (м/с) і V_{pg}^{out} (м/с) від факторів досліджень має вигляд (рис. 4.5, б):

$$V_{pr}^{out} = 1,88875 + 0,297615 V_a^{in} - 2,59285 \varepsilon - 0,090357 V_a^{in} \varepsilon + 0,812033 \varepsilon^2; \quad (4.6)$$

$$V_{pg}^{out} = 1,22357 + 0,225777 V_a^{in} - 1,57189 \varepsilon - 0,069286 V_a^{in} \varepsilon + 0,525253 \varepsilon^2. \quad (4.7)$$

На рис. 4.5 (б) наведено залежність (2.6), яку отримано в результаті чисельного моделювання. Коефіцієнт кореляції залежностей (2.6) і (4.6), (2.6) і (4.7) дорівнює 0,931 і 0,921 відповідно.

Аналіз рис. 4.5 показує, що збільшення швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} призводить до збільшення швидкості потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} і швидкості потоку насіння ріпаку та гороху на виході з башмака V_{pr}^{out} . Дані швидкості можна зменшити за рахунок збільшення кількості отворів на сповільнювачі насіння, тобто збільшенням відношення ε . Також з рис. 4.5 видно, що швидкість насіння гороху нижча за швидкість насіння ріпаку. Це головним чином пояснюється різними геометричними розмірами і масою насіння.

Розрахунок норми N і точності δ висіву здійснювалось базуючись на визначенні відстані між насінинами на «рухомому полі» лабораторного обладнання (рис. 4.6).

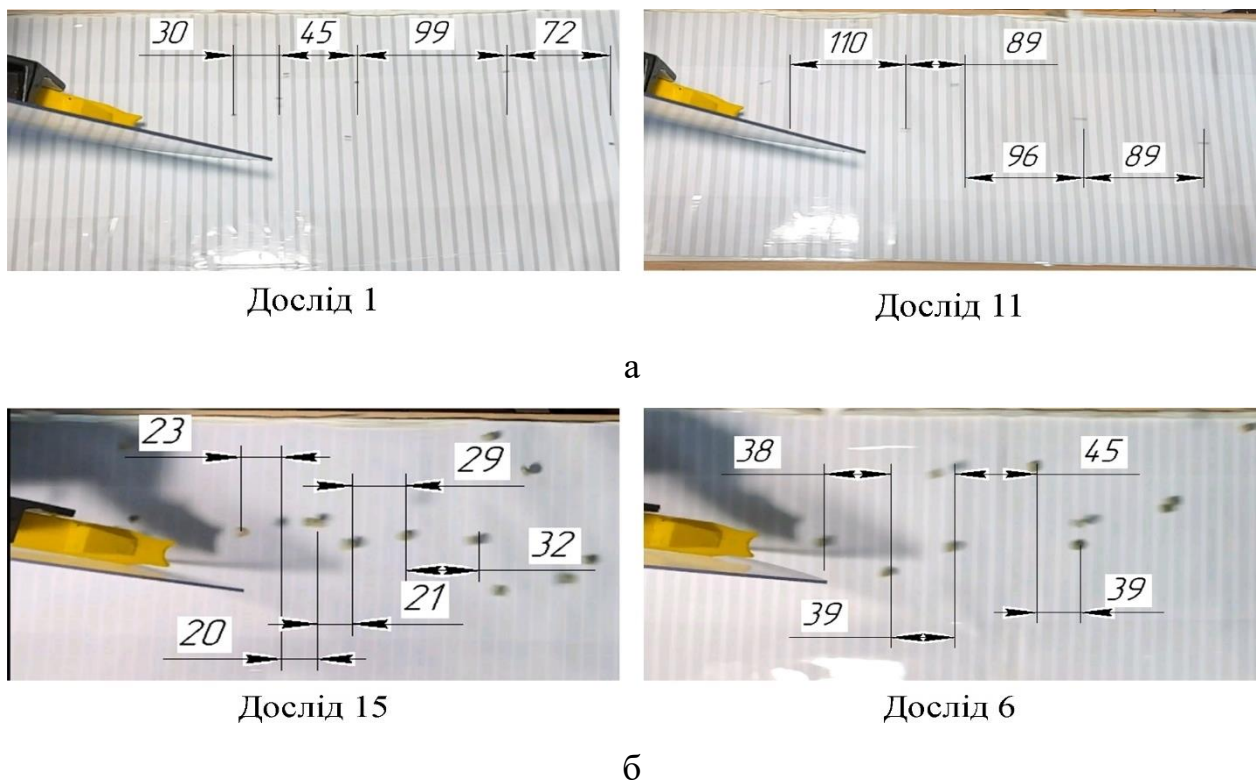


Рисунок 4.6 – Приклади визначення відстані між насінинами ріпаку (а) і гороху (б) на «рухомому полі» лабораторного обладнання

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку для норми висіву ріпаку N_r (млн. шт./га) і гороху N_g (млн. шт./га) у закодованому вигляді:

$$N_r = 0,911983 + 0,00321719 x_1 - 0,0170888 x_1^2 + 0,0238111 x_2 - 0,00613051 x_1 x_2 - 0,0127628 x_2^2 - 0,556171 x_3 - 0,0123677 x_1 x_3 + 0,00265044 x_2 x_3 - 0,000901238 x_3^2 + 0,425225 x_4 + 0,0158935 x_1 x_4 + 0,00412294 x_2 x_4 - 0,223863 x_3 x_4 + 0,0178902 x_4^2; \quad (4.8)$$

$$N_g = 0,918223 - 0,0142235 x_1 - 0,0449524 x_1^2 + 0,0470655 x_2 + 0,00881992 x_1 x_2 - 0,0169574 x_2^2 - 0,565176 x_3 - 0,0498923 x_1 x_3 + 0,00299976 x_2 x_3 - 0,00826719 x_3^2 + 0,416397 x_4 + 0,00746776 x_1 x_4 + 0,00609485 x_2 x_4 - 0,193332 x_3 x_4 + 0,0101927 x_4^2. \quad (4.9)$$

Результати статистичної обробки рівняння (4.8) і (4.9) наведено в табл. 4.6: визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії і обґрунтовано адекватність рівняння за критерієм Фішера.

У розкодованому вигляді залежність норми висіву ріпаку N_r (млн. шт./га) і гороху N_g (млн. шт./га) від факторів досліджень має вигляд (рис. 4.7):

$$N_r = 0,712862 + 0,073121 Q_p - 0,36613 V_s - 0,0298485 Q_p V_s + 0,0228953 \varepsilon; \quad (4.10)$$

$$N_g = 0,874804 + 0,0664262 Q_p - 0,485912 V_s - 0,0257776 Q_p V_s + 0,0452553 \varepsilon. \quad (4.11)$$

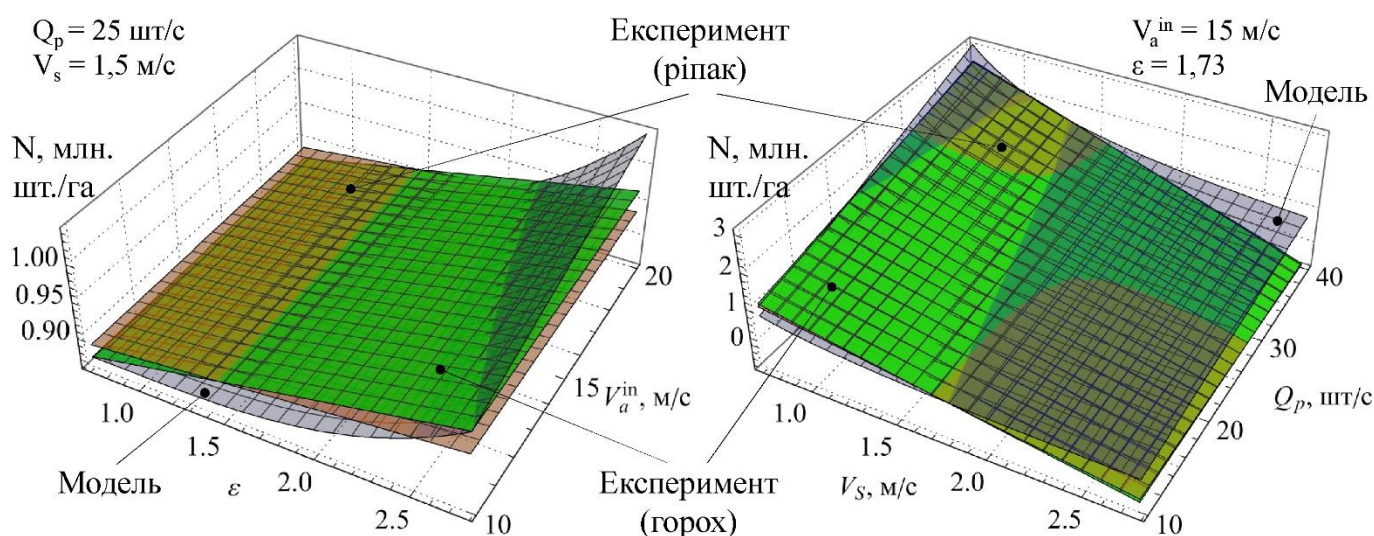


Рисунок 4.7 – Залежності норми висіву ріпаку і гороху N від факторів дослідження

Таблиця 4.6 – Результати статистичної обробки рівнянь (4.8) і (4.9)

Коефіцієнт рівняння регресії	Стандартна помилка		t-критерій Стьюдента		Рівень значимості	
	(4.8)	(4.9)	(4.8)	(4.9)	(4.8)	(4.9)
a ₀₀	0,0165859	0,0242548	54,9854	37,8573	1,32·10 ⁻⁰⁵	4,054·10 ⁻⁰⁵
a ₁₀	0,0140448	0,0205387	0,229067	-0,69252	0,833545	0,538402
a ₂₀	0,0078758	0,0115174	3,02331	4,08646	0,0566103	0,0264799
a ₃₀	0,0099994	0,0146229	-55,6202	-38,65	1,28·10 ⁻⁰⁵	3,810·10 ⁻⁰⁵
a ₄₀	0,0078484	0,0114774	54,1794	36,2798	1,38·10 ⁻⁰⁵	4,605·10 ⁻⁰⁵
a ₁₂	0,0084039	0,0122897	-0,72948	0,717667	0,518504	0,524799
a ₁₃	0,0131831	0,0192786	-0,93814	-2,58796	0,417377	0,0812176
a ₁₄	0,0087305	0,0127673	1,82046	0,584914	0,166245	0,599689
a ₂₃	0,0085184	0,0124571	0,311143	0,240807	0,776059	0,825223
a ₂₄	0,0090357	0,0132136	0,456294	0,461257	0,679186	0,676
a ₃₄	0,0100718	0,0147288	-22,2267	-13,1262	0,0001993	0,00095512
a ₁₁	0,020531	0,030024	-0,83234	-1,49722	0,466279	0,231253
a ₂₂	0,0131903	0,0192892	-0,96758	-0,87911	0,404623	0,444063
a ₃₃	0,0159015	0,0232539	-0,05667	-0,35551	0,958367	0,74573
a ₄₄	0,0215595	0,031528	0,82981	0,323291	0,467509	0,767699
Табличне значення				1,975		
Різновид дисперсії	Сума квадратів відхилень		Оцінка дисперсії			
	(4.8)	(4.9)	(4.8)	(4.9)		
Модель	31,0047		29,268		2,06698	
Помилка	0,00878349		0,0187838		0,00292783	
Критерій Фішера	F _{розр.}		706,0		311,6	
	F _{табл.}		1,781			

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

На рис. 4.7 наведено перераховану залежність (2.9), яку отримано в результаті чисельного моделювання:

$$\eta = (10000 Q_p / V_s / 0,19 / 1000000) (0,979566 + 0,0000999788 V_a^{in} + 0,0743557 \varepsilon - 0,00341242 V_a^{in} \varepsilon - 0,0687799 \varepsilon^2 + 0,00238643 V_a^{in} \varepsilon^2 + 0,0165856 \varepsilon^3). \quad (4.12)$$

Коефіцієнт кореляції залежностей (4.12) і (4.8), (4.12) і (4.9) дорівнює 0,904 і 0,895 відповідно.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку для точності висіву (коефіцієнт варіації по довжині) ріпаку δ_r (%) і гороху δ_g (%) у закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta_r = & 88,6758 - 4,27514 x_1 - 1,91715 x_1^2 + 7,702 x_2 + 3,05067 x_1 x_2 - \\ & - 4,69117 x_2^2 - 1,59164 x_3 - 0,754046 x_1 x_3 + 0,21299 x_2 x_3 - \\ & - 0,0534927 x_3^2 - 0,95354 x_4 + 0,304189 x_1 x_4 + 0,272521 x_2 x_4 + \\ & + 0,543202 x_3 x_4 + 0,34192 x_4^2; \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \delta_g = & 89,9227 - 2,76069 x_1 + 0,125465 x_1^2 + 6,19642 x_2 + 1,64583 x_1 x_2 - \\ & - 4,19422 x_2^2 - 1,9482 x_3 - 0,1486 x_1 x_3 + 0,596523 x_2 x_3 - \\ & - 1,45853 x_3^2 - 0,97156 x_4 + 0,0197399 x_1 x_4 - 0,976043 x_2 x_4 + \\ & + 1,13349 x_3 x_4 + 1,66413 x_4^2. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Результати статистичної обробки рівняння (4.13) і (4.14) наведено в табл. 4.7: визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії і обґрунтовано адекватність рівняння за критерієм Фішера.

У розкодованому вигляді залежність точності висіву (коефіцієнт варіації по довжині) ріпаку δ_r (%) і гороху δ_g (%) від факторів досліджень має вигляд (рис. 4.8):

$$\begin{aligned} \delta_r = & 80,0421 - 0,0635693 Q_p + 0,430617 V_a^{in} - 0,076686 (V_a^{in})^2 - 3,18328 V_s + \\ & + 13,6126 \varepsilon + 0,586668 V_a^{in} \varepsilon - 4,33725 \varepsilon^2; \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \delta_g = & 93,0978 - 0,0647707 Q_p - 1,25025 V_a^{in} + 0,00501862 (V_a^{in})^2 - 3,8964 V_s + \\ & + 14,6277 \varepsilon + 0,316507 V_a^{in} \varepsilon - 3,8778 \varepsilon^2. \end{aligned} \quad (4.16)$$

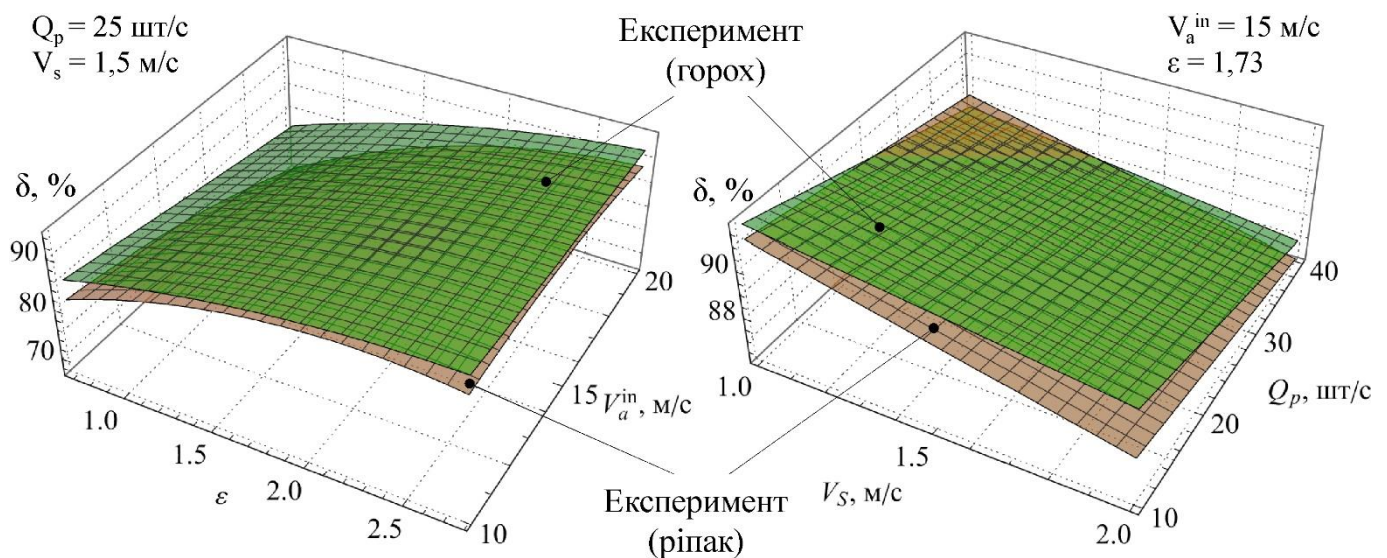


Рисунок 4.8 – Залежності точності висіву (по довжині) ріпаку і гороху (коефіцієнт варіації) δ від факторів дослідження

Таблиця 4.7 – Результати статистичної обробки рівнянь (4.15) і (4.16)

Коефіцієнт рівняння регресії	Стандартна помилка		t-критерій Стьюдента		Рівень значимості	
	(4.15)	(4.16)	(4.15)	(4.16)	(4.15)	(4.16)
a ₀₀	0,51851	1,6153	171,02	55,6694	4.408·10 ⁻⁰⁵	1,27·10 ⁻⁰⁵
a ₁₀	0,439069	1,36782	-9,73684	-2,01832	0,00230127	0,136878
a ₂₀	0,246215	0,767025	31,2817	8,07852	7,178·10 ⁻⁰⁵	0,003962
a ₃₀	0,312603	0,973842	-5,09156	-2,00053	0,0146444	0,139255
a ₄₀	0,245359	0,764358	-3,88631	-2,27108	0,0301957	0,293307
a ₁₂	0,262724	0,818457	11,6117	2,0109	0,00137186	0,137863
a ₁₃	0,412131	1,2839	-1,82963	-0,115742	0,164731	0,91517
a ₁₄	0,272934	0,850261	1,11452	0,0232162	0,346305	0,982936
a ₂₃	0,266303	0,829605	0,79980	0,719044	0,482297	0,524062
a ₂₄	0,282475	0,879984	0,96476	-1,10916	0,405831	0,348281
a ₃₄	0,314866	0,980891	1,72519	1,15557	0,182956	0,331534
a ₁₁	0,64184	1,9995	-2,98696	1,0627483	0,058272	0,953914
a ₂₂	0,412356	1,2846	-11,3765	-3,265	0,00145712	0,0469537
a ₃₃	0,497113	1,54864	-0,10760	-0,941812	0,921101	0,415769
a ₄₄	0,673993	2,09967	0,50730	0,792567	0,646883	0,485923
Табличне значення				1,975		
Різновид дисперсії	Сума квадратів відхилень		Оцінка дисперсії			
	(4.15)	(4.16)	(4.15)	(4.16)		
Модель	129787	138124	8652,47		9208,29	
Помилка	85,8424	83,3092	28,6141		9208,29	
Критерій Фішера	F _{розр.}		302,4		331,6	
	F _{табл.}		1,890			

Сірим кольором відмічені значущі коефіцієнти регресії

Рисунки 4.7 і 4.8 демонструють залежності норми N і точності δ висіву ріпаку і гороху від факторів досліджень. Збільшення швидкості потоку повітря V_a^{in} практично не впливає на норму висіву N . А збільшення кількості отворів на сповільнювачі насіння (відношення ϵ) призводить до невеликого збільшення норми N (до 8 %), яку необхідно корегувати шляхом зміни швидкості інжекції (дозування) насіння Q_p . На точність висіву (по довжині) δ чинить значний вплив кількість отворів на сповільнювачі насіння (відношення ϵ) і швидкість потоку повітря на вході V_a^{in} . Що пояснюється тим, що при цьому змінюється швидкість насіння V_p^{out} (рис. 3), яка в свою чергу сильно впливає на точність висіву δ . Швидкість переміщення сівалки V_s і швидкість інжекції (дозування) насіння Q_p логічно чинить вплив на

норму висіву N . Однак, в свою чергу, збільшення цих швидкостей призводить до зменшення точності висіву до 4 %. Тому найкраща точність висіву досягається при невеликих швидкостях переміщення сівалки.

Для того щоб визначити рівняння за яким повинна змінюватися кількість отворів на сповільнювачі насіння (відношення ε) скористаємося наступною умовою:

$$\begin{cases} N(V_a^{\text{in}}, V_s, Q_p, \varepsilon) \rightarrow N_t = \frac{Q_p}{100V_s b_r}, \\ \delta(V_a^{\text{in}}, V_s, Q_p, \varepsilon) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (4.17)$$

Вирішуючи систему рівнянь (4.17) спільно з (4.10)–(4.11), (4.15)–(4.16) в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо залежність взаємозв'язку кількості отворів на сповільнювачі насіння (відношення ε), швидкості переміщення сівалки V_s і заданої норми висіву N_t при умові забезпечення максимальної точності висіву δ (рис. 4.9):

$$\varepsilon_r = -0,87928 + 2,63625 N_t + 0,965211 V_s - 3,66254 N_t V_s + 1,49507 N_t V_s^2, \quad (4.18)$$

$$\varepsilon_g = -1,39305 + 2,73553 N_t + 1,32923 V_s - 3,45251 N_t V_s + 1,33979 N_t V_s^2. \quad (4.19)$$

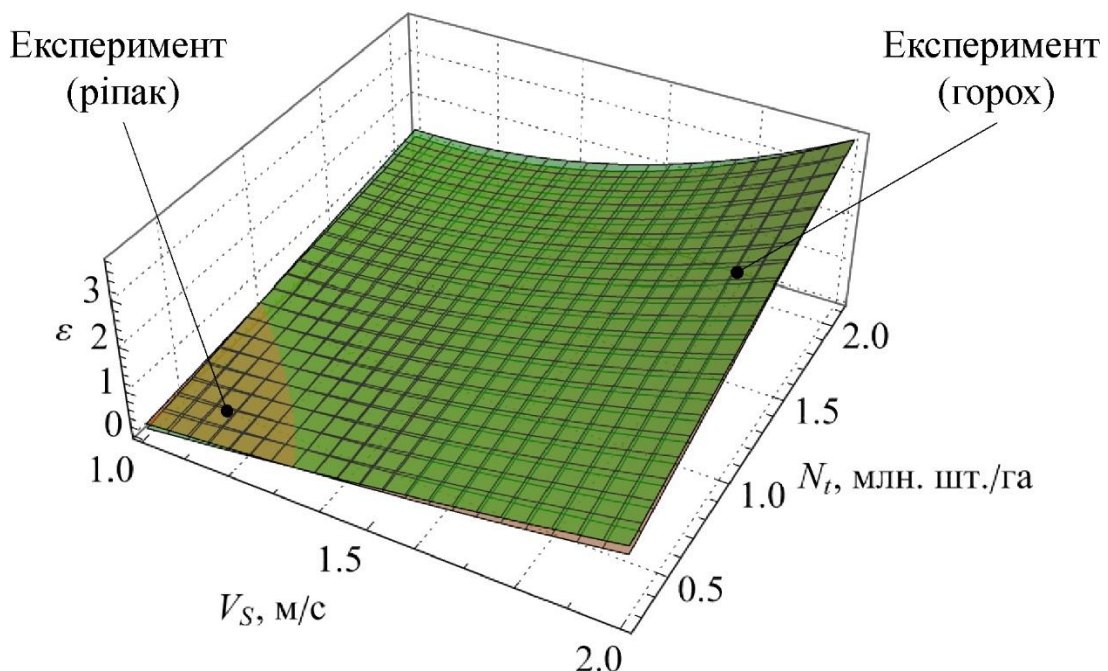


Рисунок 4.9 – Залежність кількості отворів на сповільнювачі насіння (відношення ε) від швидкості переміщення сівалки V_s і заданої норми висіву N_t

Точність висіву знаходилась в діапазоні від 89,6 % до 94,3 %, а швидкість насіння на виході з висівного башмака варіювалась в межах від 1,1 м/с до 2,4 м/с.

Аналізуючи рис. 4.9 видно, що залежності для ріпаку і гороху практично співпадають, що підтверджується високим коефіцієнтом кореляції 0,98. Тому взявши усереднення двох рівнянь остаточно маємо:

$$\varepsilon = -1,13617 + 2,68589 N_t + 1,14722 V_s - 3,55752 N_t V_s + 1,41743 N_t V_s^2. \quad (4.20)$$

З рис. 4.9 наочно видно, що зі збільшенням швидкості переміщення сівалки V_s і заданої норми висіву N_t необхідно збільшувати кількість відкритих отворів на сповільнювачі насіння (відношення ε). Така дія призводить до зменшення швидкості насіння на виході з башмака висівної секції і як наслідок зменшує ймовірність вильоту насіння з борозенки.

Рівняння (4.20) буде використано для автоматизованої системи керування заслінки на сповільнювачі насіння, яке дозволить корегувати норму висіву під час переміщення сівалки.

4.3 Результати порівняльних виробничих випробувань удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву

В результаті польових експериментальних досліджень висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series з використанням екшн-камери проведено відео-фіксацію моменту вилітання насіння з борозенки для різних конструкцій заспокоювача насіння. Найбільш виражені знімки наведені на рис. 4.10. Наочне спостереження за відео дозволяє висунути гіпотезу, щодо більшої ефективності розробленої конструкції сповільнювача. Однак для підтвердження цього статистично проведемо обробку отриманих експериментальних даних, які наведено в додатку Ж методом дисперсійного аналізу із визначенням ступеня впливу кожного фактору.

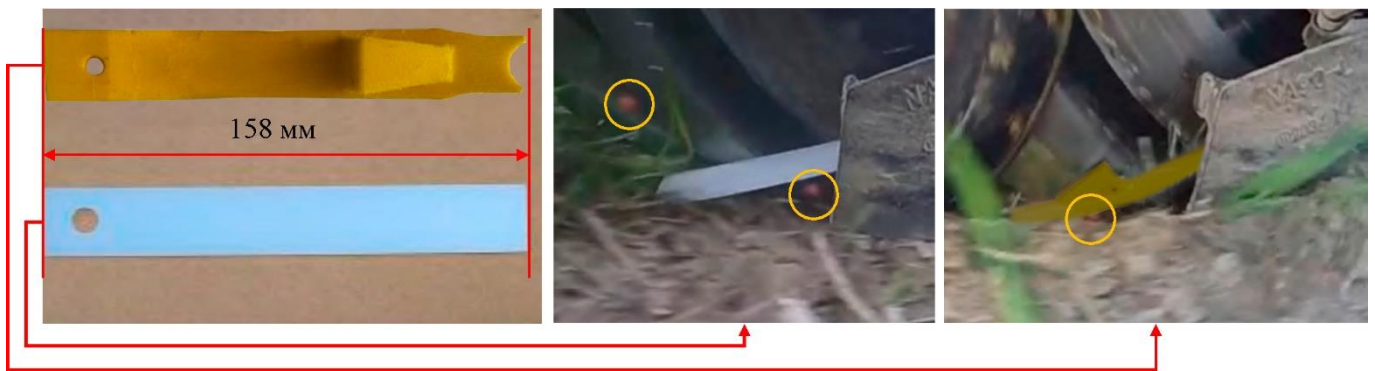


Рисунок 4.10 – Результати випробування заспокоювачів насіння базової (білого кольору) і розробленої (жовтого кольору) конструкцій

Після отримання сходів гороху і ріпаку (рис. 3.11) визначено відстані між рослинами і розраховані точність висіву (коефіцієнт варіації по довжині лінії посіву) δ (%) та густина стояння рослин N' (млн. шт./га). Урожайність (т/га) визначено по факту збирання і обмолоту насіння з кожної ділянки. Усереднені дані для кожного дослідження (по п'яти ділянкам) наведено в табл. 4.8.

Аналізуючи табл. 4.8 видно, що на точність висіву практично не впливає фактор А (культура). Для кожної культури (горох, ріпак) спостерігається максимальне значення точності висіву $\delta = 94,7\text{--}95,5$ % для варіанту зі сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння при швидкості руху 1 м/с. Мінімальне значення точності висіву $\delta = 70,6\text{--}71,3$ % визначено для варіанту без сповільнювача і базовим заспокоювачем насіння при швидкості руху 4 м/с. Результати статистичної обробки даних наведено в табл. 4.9. За критерієм Фішера визначено ті фактори, які чинять вплив на точність висіву (в табл. 4.9 відмічено сірим кольором). Найбільш впливовими є головні фактори: В (наявність сповільнювача насіння) – 42,09 %; С (наявність заспокоювача насіння) – 29,52 %; D (швидкість руху сівалки) – 20,43 %. Інші фактори і їх взаємодії мають вплив менше 1,5 %. Помилка результатів досліджень становить 5,09 %, що свідчить про високу достовірність отриманих результатів. Середнє значення найменшої істотної різниці (HP_{05}) для головних факторів дорівнює 0,909 %. Статистичний аналіз вказує на те, що

наявність сповільнювача і удосконаленого заспокоювача насіння найбільше впливають на точність висіву δ .

Таблиця 4.8 – Усереднені дані польових експериментальних досліджень висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series

Культура (А)	Наявність сповільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки, м/с (D)	Точність висіву δ , %	Густота стояння рослин N', млн. шт./га	Урожайність Р, т/га
Горох (норма висіву – 1,2 млн. шт./га)	Без сповільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	79.8	1.12	3.01
			2	77.5	1.11	2.97
			3	74	1.09	2.96
			4	71.3	1.04	2.96
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	89	1.15	3.03
			2	86	1.13	3.02
			3	82.9	1.12	3.01
			4	79.9	1.11	3.02
	Зі сповільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	85.9	1.16	3.06
			2	85	1.15	3.05
			3	83.6	1.13	3.03
			4	80.4	1.12	3.05
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	94.7	1.23	3.07
			2	94.3	1.17	3.08
			3	92.2	1.16	3.06
			4	89.4	1.14	3.08
Ріпак (норма висіву – 0,8 млн. шт./га)	Без сповільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	80.4	0.77	2.03
			2	77.1	0.76	2.04
			3	74.6	0.75	2.02
			4	70.6	0.73	2.02
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	86	0.80	2.03
			2	83	0.79	2.05
			3	79.9	0.78	2.05
			4	76.9	0.77	2.06
	Зі сповільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	89.3	0.79	2.09
			2	86.9	0.79	2.07
			3	83.3	0.78	2.07
			4	80.6	0.77	2.05
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	95.5	0.83	2.10
			2	92.5	0.81	2.11
			3	89.3	0.81	2.12
			4	86.3	0.80	2.12

Таблиця 4.9 – Результати статистичної обробки даних точності висіву

Фактор	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC
F	10,09	1058,11	742,15	171,15	5,48	31,74	3,02	0,04
F ₀₅	3,92	3,92	3,92	2,68	3,92	3,92	2,68	3,92
HP ₀₅	0,9094	0,9094	0,9094	1,2861	1,2861	1,2861	1,8188	1,2861
%	0,40	42,09	29,52	20,43	0,22	1,26	0,36	0,00
Фактор	BD	CD	ABC	ABD	BCD	ACD	ABCD	Помилка
F	2,58	0,04	0,00	2,26	0,02	0,02	0,30	
F ₀₅	2,68	2,68	3,92	2,68	2,68	2,68	2,68	
HP ₀₅	1,8188	1,8188	1,8188	2,5721	2,5721	2,5721	3,6375	
%	0,31	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,04	

Сірим кольором відмічені значущі фактори і їх взаємодії. Напівжирним шрифтом виділено найбільш впливові фактори і їх взаємодії.

Порівнюючи отримані експериментальні дані із результатними чисельного моделювання (розділи 2.3 і 2.7) присутня достатня висока відповідність даних (коефіцієнт кореляції Пірсона – 93,2 %), що підтверджує чисельну модель, яка розроблена в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Так як посів проводився для двох культур різних біологічних сімейств із різною нормою висіву, то при статистичній обробці даних густоти стояння рослин і врожайності фактор А виключено. Тобто обробку даних будемо проводити для трьох факторів (B, C, D) для двох експериментів із ріпаком і горохом.

Аналізуючи табл. 4.8 видно, що на густоту стояння рослин і урожайність впливають всі фактори (B, C, D). Максимальне значення густоти стояння рослин ($N_g = 1,23$ млн. шт./га, $N_r = 0,83$ млн. шт./га) і урожайності ($P_g = 3,08$ т/га, $P_r = 2,12$ т/га) спостерігається для варіанту зі сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння при швидкості руху 2 м/с і 3 м/с. Мінімальне значення густоти стояння рослин ($N_g = 1,04$ млн. шт./га, $N_r = 0,73$ млн. шт./га) і урожайності ($P_g = 2,96$ т/га, $P_r = 2,02$ т/га) спостерігається для варіанту без сповільнювача і базовим заспокоювачем насіння при швидкості руху 4 м/с. Такий вплив пояснюється вильотом насіння з борозенки без застосування додаткових засобів його припинення. Результати статистичної обробки даних наведені в табл. 4.10–4.11. За критерієм Фішера визначено ті фактори, які чинять вплив на точність висіву (в табл.

4.10–4.11 відмічені сірим кольором). Найбільш впливовими на урожайність при експерименті з горохом є головні фактори: В (наявність сповільнювача насіння) – 46,94 %; С (наявність заспокоювача насіння) – 15,65 %. Для експерименту з ріпаком найбільший вплив на урожайність чинять фактори: В (наявність сповільнювача насіння) – 44,71 %; С (наявність заспокоювача насіння) – 17,35 %. Інші фактори і їх взаємодії мають вплив менше 4,73 %. Помилка результатів досліджень становить 26,34 % (для гороху) і 28,26 % (для ріпаку), що має достатньо високе значення і свідчить про достатню достовірність отриманих результатів.

Таблиця 4.10 – Результати статистичної обробки даних густоти стояння рослин

Горох	Фактор	B	C	D	BC	BD	CD	BCD	Помилка
	F	67,55	37,61	19,28	0,02	1,30	1,33	2,69	
F ₀₅	3,99	3,99	2,75	3,99	2,75	2,75	2,75		
HP ₀₅	0,003	0,003	0,005	0,005	0,006	0,006	0,009		
%	27,80	15,48	23,81	0,01	1,60	1,65	3,32	26,34	
Ріпак	Фактор	B	C	D	BC	BD	CD	BCD	Помилка
	F	54,88	76,86	8,65	0,12	0,71	0,28	0,58	
F ₀₅	3,99	3,99	2,75	3,99	2,75	2,75	2,75		
HP ₀₅	0,001	0,0001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003		
%	24,23	33,93	11,46	0,05	0,94	0,37	0,77	28,26	

Сірим кольором відмічено значущі фактори і їх взаємодії. Напівжирним шрифтом виділено найбільш впливові фактори і їх взаємодії.

Таблиця 4.11 – Результати статистичної обробки даних урожайності

Горох	Фактор	B	C	D	BC	BD	CD	BCD	Помилка
	F	108,10	36,03	3,63	3,30	1,16	1,48	0,02	
F ₀₅	3,99	3,99	2,75	3,99	2,75	2,75	2,75		
HP ₀₅	0,003	0,003	0,005	0,005	0,006	0,006	0,009		
%	46,94	15,65	4,73	1,43	1,51	1,93	0,03	27,79	
Ріпак	Фактор	B	C	D	BC	BD	CD	BCD	Помилка
	F	106,30	41,25	0,19	6,04	0,92	4,78	0,82	
F ₀₅	3,99	3,99	2,75	3,99	2,75	2,75	2,75		
HP ₀₅	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,004	0,006		
%	44,71	17,35	0,24	2,54	1,16	6,04	1,04	26,92	

Сірим кольором відмічено значущі фактори і їх взаємодії. Напівжирним шрифтом виділено найбільш впливові фактори і їх взаємодії.

Середнє значення найменшої істотної різниці (HP_{05}) головних факторів для урожайності дорівнює 0,002–0,003 т/га. Статистичний аналіз вказує на те, що наявність сповільнювача і удосконаленого заспокоювача насіння найбільш впливають на урожайність.

Цікавим з табл. 4.12 є відмінність ступеня впливу факторів на урожайність для різних культур. Так для процесу висіву гороху найбільший вплив має наявність сповільнювача насіння, а для висіву ріпаку – наявність удосконаленого заспокоювача насіння. Це можна пояснити результатами експериментальних досліджень в лабораторних умовах (розділ 4.2). Швидкість руху насіння ріпаку після дії сповільнювача є ще досить високою (2,8–5,2 м/с) порівнянно зі швидкістю руху насіння гороху (на 38–54 % вища). Тому для подальшої зупинки насіння ріпаку під час його вильоту з борозенки більш важливим є встановлення заспокоювача насіння удосконаленої конструкції. В свою чергу швидкість руху насіння гороху зменшується до значення 1,1–3,5 м/с, що є достатнім, щоб зменшити ймовірність відскоку і вильоту його з борозенки.

4.4 Висновки з розділу

1. В результаті дослідження деформації кручення заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці отримано значення зусилля, яке необхідно прикласти для його кручення на кут 70° : найбільше значення зусилля кручення 112,8 Н має Nylon, найменші, на рівні 32–33 Н – Elastan D100 та Elastan D70. Nylon-CCF та TPU 40A мають приблизно рівні значення зусилля кручення – $52,2 \pm 2,8$ та $59,8 \pm 3,0$ Н. При цьому зразки з ABS руйнувалися при крученні на кут біля $44 \pm 1^\circ$.

2. В результаті дослідження деформації при згині заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці встановлено динаміку сили зусилля, яке необхідно прикласти для згину різних зразків на величину $\pm 0,015$ м. Найбільші значення сил має заспокоювач з Nylon-CCF ($2,368 \pm 0,018$), а найменше значення – Elastan D70 ($0,655 \pm 0,012$). За результатами тривалих випробувань побудована крива втоми заспокоювачів різних матеріалів для сил в верхній F^u_{max} і нижній F^d_{max} точках

коливання (рис. 4.2). Для встановлення найбільш раціонального матеріалу для заспокоювача скористаємося умовою, що сила коливань при тривалих випробуваннях не повинна зменшуватися на 25 %. Найбільшу кількість коливань витримує заспокоювач виготовлений з TPU 40A – 3701 тис. шт., а найменшу – з ABS – 818 тис. шт. Тому для подальших досліджень раціонально використовувати матеріал TPU 40A. При перерахунку отримуємо, що заспокоювач з TPU 40A здатний витримувати 1028 год або 6750 га експлуатації. Це значення перевищує ресурс сівалки John Deere 90 Series до технічного обслуговування в 6000 га на 12,5 %.

3. В результаті експериментальних досліджень удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву на базі John Deere серії 90 в лабораторних умовах встановлено закономірності зміни швидкості потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} (4.3), швидкості потоку насіння ріпаку і гороху V_p^{out} (4.6)–(4.7), норми N (4.10)–(4.11) і точності висіву (коефіцієнт варіації) δ (4.15)–(4.16) від відношення площі випускних отворів до площі виходу сповільнювача насіння ε , швидкостей потоку повітря на вході V_a^{in} , переміщення сівалки V_s і інжекції (дозування) насіння Q_p . Результати показали, що збільшення швидкості повітряного потоку на вході веде до збільшення швидкості потоку на виході, що, в свою чергу, впливає на точність і норму висіву. Швидкість переміщення сівалки і швидкість інжекції насіння суттєво впливають на норму висіву, але водночас можуть знижувати точність.

4. Встановлено залежність взаємозв'язку (4.20) між кількістю отворів на сповільнювачі насіння ε , швидкістю переміщення сівалки V_s та нормою висіву N_t , що дозволяє досягти максимальної точності висіву (89,6 % до 94,3 %) і швидкості насіння на виході з висівного башмака в межах від 1,1 м/с до 2,4 м/с. Отримано рівняння використані для автоматизованої системи керування заслінкою на сповільнювачі насіння.

5. На основі проведених польових експериментальних досліджень висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series виявлено значний вплив заспокоювача і удосконаленої конструкції сповільнювача на

точність висіву δ , густоту стояння рослин N та урожайність P . Статистичний аналіз результатів експериментів, зокрема дисперсійний аналіз, показав, що найбільший вплив на точність висіву мають такі фактори, як наявність сповільнювача насіння (42,09 %), удосконаленого заспокоювача насіння (29,52 %) та швидкість руху сівалки (20,43 %). Висока точність висіву ($\delta = 94,7-95,5$ %) була досягнута при використанні удосконаленої конструкції заспокоювача насіння та сповільнювача на швидкості 1 м/с, тоді як відсутність сповільнювача та базовий заспокоювач призводили до суттєвого зниження точності висіву ($\delta = 70,6-71,3$ %) при швидкості 4 м/с. Аналіз впливу факторів на густоту стояння рослин і урожайність також вказав на перевагу використання удосконаленої конструкції. Аналіз отриманих даних продемонстрував різний ступінь впливу конструкцій сповільнювача і заспокоювача насіння на урожайність для різних культур (ріпак і горох). Для гороху найважливішим фактором виявився сповільнювач (вплив – 46,94 %), тоді як для ріпаку – удосконалений заспокоювач насіння (вплив – 44,71 %). Отже, результати досліджень підтверджують ефективність удосконаленої конструкції сповільнювача і заспокоювача насіння, що може значно підвищити точність висіву на 24,9 % та урожайність гороху і ріпаку на 4,1 % і 4,9 % відповідно.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [166, 188, 189].

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Впровадження результатів досліджень

Удосконалена пневматична сівалка John Deere 1890 проходила виробничу перевірку у Приватному підприємстві «Архангельське» (ЄДРПОУ 41072511) під час сівби озимого ріпаку сорту «Атлант» 08.09.2024 р (додаток И). Місце проведення дослідів – с. Іванівка, Бериславський р-н., Херсонська обл. Ґрунт ділянок для дослідів – чорнозем звичайний важкосуглинистий (вміст гумусу в орному горизонті – 3,5 %. рН – 6,5-7,0). Система нульового обробітку ґрунту (No-Till). Погодні умови були сприятливі для сівби озимого ріпаку. Швидкість руху сівалки – 1,9–2,1 м/с (7–7,5 км/год). Норма висіву – 800 тис. шт./га. 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. Результати вимірювань показують, що точність висіву удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 (з встановленим сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння) вища (92,1–95,2 %), ніж базового (82,1–87,3 %). Також про якість висіву свідчить отримана густота розміщення рослин: удосконалена сівалка – 786–805 тис. шт./га, а для базового – 753–802 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 800 тис. шт./га. Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що удосконалений висівний апарат є більш ефективним, ніж базовий.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Агротек-Інвест» (ЄДРПОУ 36573198, Дніпропетровська обл., смт. Підгородне, комплекс будівель і споруд № 55-і) отримало дослідний зразок і конструкторську документацію на сповільнювач насіння системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series, який розроблено згідно науково-дослідної роботи «Розробка наукових засад ризик-орієнтованого керування складними людино-технічними сільськогосподарськими системами» (№ ДР 0120U104862). Підприємство ТОВ «Агротек-Інвест» зацікавлене у виготовленні дослідної партії сповільнювача системи подачі насіння пневматичної

зернової сівалки John Deere 90 Series у кількості 50 штук для виробничих випробувань і серійного виробництва (додаток К).

Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «Союз-Композит» (ЄДРПОУ 39605117, Дніпропетровська область, смт. Слобожанське, вул. Нижньодніпровська, 1) отримало дослідний зразок та конструкторську документацію на заспокоювач насіння для системи подачі пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series. В ТОВ «НВП «Союз-Композит» було виготовлено прес форму для лиття полімерів під тиском та виготовлено дослідну партію заспокоювачів насіння у кількості 200 одиниць та, після вдалих виробничих випробувань, переведено на серійне виробництво (додаток Л).

Науково-практичні результати впроваджені в курс дисциплін (додаток М):

– «CAD/CAM-системи в експериментальних дослідженнях» для студентів третього (освітньо-наукового) рівня за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування наступне: практична робота «Механічне випробування зразків матеріалів при згині і крученні». Мета роботи – визначити закономірності деформації від зусилля при згині і крученні зразків різних матеріалів. Матеріальне забезпечення – стенди для досліджень зусилля кручення і згину, які розроблені і створені Безверхнім П. Є. у відповідності до дисертаційної роботи.

– «Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва» для студентів освітнього рівня магістр за спеціальністю 208 – Агроінженерія наступне: завдання до виконання розрахунково-графічної роботи «Моделювання процесу висіву насіння висівною секцією пневматичної сівалки». Мета – визначити рівномірність висіву насіння при різних конструктивно-технологічних параметрах висівної секції пневматичної сівалки.

5.2 Техніко-економічна ефективність

Техніко-економічну оцінку ефективності застосування удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 проведемо на основі загальноприйнятих методик [190–193] і результатів виробничих випробувань

(розділи 3.4, 4.3).

Згідно таблиці 3.4 і 4.8 базовий і удосконалений варіанти сівалки відрізняються за факторами В (наявність сповільнювача насіння) і С (наявність заспокоювача насіння), тому подальші розрахунки будемо проводити в рамках цих удосконалень.

Балансова вартість базового заспокоювача насіння складає 120 грн., а удосконаленого – 225 грн. Така ціна зумовлена масою заспокоювача і вартістю матеріалу.

Розрахунок балансової вартості сповільнювача насіння наведено в табл. 5.1.

Кількість заспокоювачів і сповільнювачів для сівалки John Deere 1890 становить 48 од.

Таблиця 5.1 – Розрахунок балансової вартості сповільнювача насіння

Найменування	Одиниці вимірювання	Кількість	Ціна за од., грн *	Вартість, грн
3D-друк запчастин	г	155	15	2325
Сервопривід SG90	шт.	1	190	190
Плата керування Arduino Uno	шт.	1	326	326
Датчик наближення LJ30A3	шт.	1	562	562
Перетворювач напруги DC-DC	шт.	1	95	95
Провода сигнальні і живлення	м	5	18	90
Витрати на збірку	шт.	1	2870,4	2870,4
Відрахування	–	0,33	6458,4	2131,27
Всього				8589,67

* станом на 24.09.2024 р.

Вихідні дані для економічного розрахунку наведені в таблиці 5.2.

Розрахунок економічної ефективності проводився за отриманими даними польових дослідів згідно таблиці 4.8. Тобто, враховувались отримані значення урожайності для кожної культури. В процесі розрахунку визначались наступні техніко-економічні показники: балансова вартість додаткового обладнання (грн); затрати на заміну заспокоювачів насіння (грн/га); затрати на амортизацію (грн/га); затрати на ремонт і технічне обслуговування (грн/га); затрати на паливо-мастильні матеріали (грн/га); затрати праці (грн/га); загальні витрати (грн/га); вартість продукції (грн/га); вартість продукції відносно базового варіанту (грн/га); загальні витрати відносно базового варіанту (грн/га); економічний ефект (грн/га); точка

беззбитковості (га). Точка беззбитковості в нашому випадку – площа посіяного поля, при якій досягається окупність додаткового обладнання. Всі розрахунки наведені в таблиці додатка Н.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для економічного розрахунку

Найменування	Одиниці вимірювання	Значення
Загальний ресурс сівалки John Deere 90 Series до технічного обслуговування (розділ 2.6)	га	6000
Коефіцієнт нарахувань на амортизацію сповільнювача насіння	–	0,25
Коефіцієнт нарахувань на ремонт і технічне обслуговування сповільнювача насіння	–	0,25
Ціна на дизельне паливо	грн/л*	52
Коефіцієнт врахування вартості мастильних матеріалів	–	1,3
Погодинна ставка оплати праці	грн/год*	180
Коефіцієнт чистої продукції для реалізації	–	0,8
Ціна на ріпак	грн/т*	20500
Ціна на горох	грн/т*	11900

* станом на 24.09.2024 р.

Зведені дані представлено в таблиці 5.3.

Балансова вартість додаткового обладнання (сповільнювача насіння і удосконаленого заспокоювача насіння) – 418064 грн, що складає 5,2 % від загальної вартості сівалки John Deere 1890 (вживана, в хорошому стані – 8000000 грн станом на 24.09.2024 р.).

Таблиця 5.3 містить зведені дані економічного розрахунку для двох сільськогосподарських культур: гороху (з нормою висіву 1,2 млн шт./га) та ріпаку (з нормою висіву 0,8 млн шт./га).

Для варіанту посіву гороху:

– За відсутності сповільнювача насіння економічний ефект зменшується зі збільшенням швидкості сівалки, досягаючи нульових значень при швидкості 4 м/с. Використання удосконаленого заспокоювача насіння при швидкості 1 м/с забезпечує найвищий економічний ефект (766,40 грн/га) з точкою беззбитковості в 7 га.

– За наявності сповільнювача насіння економічний ефект суттєво

підвищується, особливо при використанні удосконаленого заспокоювача насіння. Наприклад, при швидкості 2 м/с економічний ефект становить 1188,14 грн/га, а точка беззбитковості — 351 га.

Таблиця 5.3 – Зведені дані економічного розрахунку зі сповільнювачем

Культура (А)				Горох (норма висіву – 1,2 млн. шт./га)		Ріпак (норма висіву – 0,8 млн. шт./га)	
Наявність сповільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки, м/с (D)	Балансова вартість додаткового обладнання, грн	Економічний ефект, грн/га	Точка беззбитковості, га	Економічний ефект, грн/га	Точка беззбитковості, га
Без сповільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	5760	576,84	0	264,84	0
		2	5760	189,65	0	422,45	0
		3	5760	76,55	0	76,55	0
		4	5760	0,00	-	0,00	-
	Удосконалений заспокоювач насіння	1	10800	766,40	7	264,00	19
		2	10800	664,81	8	585,61	9
		3	10800	551,71	9	567,71	9
		4	10800	570,36	9	655,16	8
Зі сповільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	418064	1004,96	410	1200,96	343
		2	418064	903,38	456	866,58	476
		3	418064	695,07	593	848,67	486
		4	418064	808,92	510	444,12	928
	Удосконалений заспокоювач насіння	1	423104	1099,32	380	1364,12	306
		2	423104	1188,14	351	1521,74	274
		3	423104	979,83	426	1667,83	250
		4	423104	1093,68	382	1591,28	262

Сірим кольором відмічено найбільші показники економічної ефективності

Для варіанту посіву ріпаку:

– За відсутності сповільнювача насіння економічний ефект також залежить від

швидкості сівалки. При використанні базового заспокоювача насіння та швидкості 4 м/с економічний ефект є нульовим, тоді як удосконалений заспокоювач покращує показники.

– За наявності сповільнювача насіння спостерігається суттєве підвищення економічного ефекту при використанні удосконаленого заспокоювача насіння. Найвищий економічний ефект для ріпаку спостерігається при швидкості 3 м/с (1667,83 грн/га), при цьому точка беззбитковості становить 250 га.

5.3 Висновки з розділу

1. Удосконалену пневматичну сівалку John Deere 1890 впроваджено у ПП «Архангельське». Результати вимірювань показують, що точність висіву удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 (із встановленим сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння) вища (92,1–95,2 %), ніж базового (82,1–87,3 %). Результати науково-технічної роботи у вигляді технічної і конструкторської документації на дослідний зразок сповільнювача насіння системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки John Deere 90 Series прийняті на ТОВ «Агротек-Інвест». Конструкція заспокоювача насіння прийнята і впроваджена на ТОВ «НВП» СОЮЗ-КОМПОЗИТ». Розроблені стенди для досліджень зусилля кручення і згину, методики моделювання процесу висіву насіння висівною секцією пневматичної зернової сівалки впроваджені в освітні компоненти ОПП «Агроінженерія» і ОНП «Галузеве машинобудування» для студентів другого (магістерського) і третього (освітньо-наукового) освітніх рівнів вищої освіти ДДАЕУ.

2. Техніко-економічна оцінка показала, що застосування удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 суттєво підвищує економічний ефект, особливо за наявності сповільнювача насіння і удосконаленого заспокоювача насіння. Найбільший економічний ефект спостерігається при середній швидкості посіву, зокрема для гороху при швидкості 2 м/с він досягає 1188,14 грн/га, а для ріпаку при швидкості 3 м/с — 1667,83 грн/га. Точка беззбитковості при якій окупаються додаткові капіталовкладення на удосконалення сівалки для цих культур становить відповідно 351 га і 250 га.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності процесу сівби насіння культурних рослин шляхом удосконалення конструкцій елементів системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. Технологія No-till, серед інших систем ґрунтозахисного та ресурсозберігаючого землеробства (Conservation Agriculture), є найбільш перспективною з точки зору мінімізації пошкодження ґрунту. Вона зменшує механічне втручання та ерозію, а також знижує потребу у великому парку техніки. Ключовим аспектом цієї технології є якість сівби, тому велика увага приділяється посівним машинам. Основним недоліком пневматичних посівних машин є нерівномірний розподіл насіння між сошниками. Це призводить до нераціонального використання насіння, зниження врожайності та збільшення бур'янів, що вимагає удосконалення систем висіву. Конфігурація елементів пневматичної системи сівалки, таких як насіннепровід та розподільник, значно впливає на точність висіву. Елементи, як сповільнювач насіння (seed brake), башмак (seed boot) і заспокоювач (seed bounce flap), забезпечують не лише точність розподілу насіння, але й правильне укладання його в борозну, що є важливим для рівномірного проростання та захисту від зовнішніх факторів.

2. Обґрунтована конструктивно-технологічна схема удосконаленої висівної секції пневматичної зернової сівалки (рис. 2.1), що включає раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння, яка відрізняється тим, що додатково містить верхній датчик висіву, який встановлений на насіннепроводі; нижній датчик висіву, який встановлений на висівному башмаку; сповільнювач насіння, який встановлений між насінневою трубкою і насіннепроводом і складається з перфорованого циліндра із отворами, верхнього розтрубу, нижнього розтрубу, циліндричної шторки із жорстко

закріпленим зубчастим сектором, сервопривода із зубчастим колесом; блок керування, який за допомогою електричних проводів приєднаний до верхнього датчика висіву, нижнього датчика висіву і сервопривода.

3. В результаті чисельного моделювання сповільнювача насіння пневматичної зернової сівалки в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ отримано візуалізацію процесу руху насіння і повітряного потоку в робочій області сповільнювача. За результатами чисельного моделювання і обробки отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку в розкодованому вигляді без урахування значущих коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента залежностей швидкості повітряного потоку V_a^{out} (2.5), швидкості насіння V_p^{out} (2.6) на виході сповільнювача насіння і коефіцієнта зміни норми висіву η (2.9) від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} і відношення площі випускних отворів до площі входу ϵ . Згідно агротехнічних вимог відхилення норми висіву повинно не перевищувати 1 %. Розраховане рівняння (2.11) показує залежність відношення площі випускних отворів до площі входу ϵ від швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} при забезпечені умови $\eta \leq 1,01$. При зазначеному діапазоні швидкості повітряного потоку на вході V_a^{in} необхідно корегувати ϵ , яка знаходиться в межах від 1,60 до 2,26.

4. В результаті аналітичних досліджень розглянуто кінематику руху насінини після вильоту її з висівного башмака, відбиття від дна борозенки і заспокоювача насіння. Отримано залежності максимальної висоти параболічної траєкторії руху насіння u_z , різниці відстані між точками відбиття від поверхні ґрунту і відстані, яку проходить при цьому сівалка Δx від початкової швидкості руху насінини V_{p0} , кута їх вильоту α , висоти розміщення заспокоювача H_u і кута його нахилу β (рис. 2.20). Виконуючи умови $u_z < H_u$ і $\Delta x \rightarrow \min$ для отриманих залежностей в Wolfram Cloud отримані наступні раціональні параметри: $\alpha = 47^\circ$, $\beta = 0^\circ$, $H_u < 0,134$ м. Для забезпечення постійного потрапляння насінин до середини дна борозенки після відбиття їх від сповільнювача при невеликому відхиленні траєкторії ($\pm 0,01$ м), форма профілю його робочої поверхні повинна бути параболічною із фокусом в точці $r_f = 0,134$ м.

5. З використанням програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведено симуляцію процесу коливання заспокоювача насіння, який знаходиться між прикочувальним колесом і ґрунтом. В результаті симуляції було визначено розподіл абсолютної деформації сповільнювача Δu_f і напруження σ_f , що виникає в кожній комірці створеної сітки заспокоювача. Отримані залежності максимального значення напруження $\sigma_{f_{\max}}$ (2.29)–(2.31) і коефіцієнта запасу міцності k_f (2.35)–(2.37) від товщини заспокоювача T_f , висоти п'яти H_f і відстані її розміщення відносно вільного кінця заспокоювача L_f для різних матеріалів (ABS, поліамід 6, двокомпонентний поліуретан). Вирішуючи багатокритеріальну задачу оптимізації, яка зводиться до одночасного пошуку оптимальних значень двох критеріїв $\sigma_{f_{\max}}(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \min$, $k_f(T_f, H_f, L_f) \rightarrow \max$ (2.38) отримано значення геометричних параметрів заспокоювача насіння: $T_f = 6,5$ мм $H_f = 12,4$ мм, $L_f = 14,6$ мм.

6. В результаті дослідження деформації кручення заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці отримано значення зусилля, яке необхідно прикласти для його кручення на кут 70° : найбільше значення зусилля кручення $112,8$ Н має Nylon, найменші, на рівні $32\text{--}33$ Н – Elastan D100 та Elastan D70. Nylon-CCF та TPU 40A мають приблизно рівні значення зусилля кручення – $52,2 \pm 2,8$ та $59,8 \pm 3,0$ Н. При цьому зразки з ABS руйнувалися при кручення на кут біля $44 \pm 1^\circ$. В результаті дослідження деформації при згині заспокоювача насіння на створеній лабораторній установці встановлено динаміку сили зусилля, яке необхідно прикласти для згину різних зразків на величину $\pm 0,015$ м. Найбільші значення сил має заспокоювач з Nylon-CCF ($2,368 \pm 0,018$), а найменше значення – Elastan D70 ($0,655 \pm 0,012$). За результатами тривалих випробувань побудована крива втоми заспокоювачів різних матеріалів для сил в верхній F_{\max}^u і нижній F_{\max}^d точках коливання (рис. 4.2). Для встановлення найбільш раціонального матеріалу для заспокоювача скористаємося умовою, що сила коливань при тривалих випробувань не повинна зменшуватися на 25 %. Найбільшу кількість коливань витримує заспокоювач виготовлений з TPU 40A – 3701 тис. шт., а найменшу – з ABS – 818 тис. шт. Тому для подальших досліджень раціонально використовувати матеріал TPU 40A. При перерахунку отримуємо, що

заспокоювач з TPU 40A здатний витримувати 1028 год або 6750 га експлуатації. Це значення перевищує ресурс сівалки John Deere 90 Series до поточного ремонту в 6000 га на 12,5 %.

7. В результаті експериментальних досліджень удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву на базі John Deere серії 90 в лабораторних умовах встановлено закономірності зміни швидкості потоку повітря на виході з башмака V_a^{out} (4.3), швидкості потоку насіння ріпаку і гороху V_p^{out} (4.6)–(4.7), норми N (4.10)–(4.11) і точності висіву (коефіцієнт варіації) δ (4.15)–(4.16) від відношення площі випускних отворів до площі входу сповільнювача насіння ε , швидкостей потоку повітря на вході V_a^{in} , переміщення сівалки V_s і інжекції (дозування) насіння Q_p . Результати показали, що збільшення швидкості повітряного потоку на вході веде до збільшення швидкості потоку на виході, що, в свою чергу, впливає на точність і норму висіву. Швидкість переміщення сівалки і швидкість інжекції насіння суттєво впливають на норму висіву, але водночас можуть знижувати точність. Встановлено залежність взаємозв'язку (4.20) між відношенням площі випускних отворів до площі входу на сповільнювачі насіння ε , швидкістю переміщення сівалки V_s та нормою висіву N_t , що дозволяє досягти максимальної точності висіву (89,6 % до 94,3 %) і швидкості насіння на виході з висівного башмака в межах від 1,1 м/с до 2,4 м/с. Отримані рівняння використано для автоматизованої системи керування заслінкою на сповільнювачі насіння.

8. На основі проведених польових експериментальних досліджень висівної секції пневматичної зернової сівалки точного висіву John Deere 90 Series виявлено значний вплив заспокоювача і удосконаленої конструкції сповільнювача на точність висіву δ , густоту стояння рослин N' та урожайність P . Статистичний аналіз результатів експериментів, зокрема дисперсійний аналіз, показав, що найбільший вплив на точність висіву мають такі фактори, як наявність сповільнювача насіння (42,09 %), удосконаленого заспокоювача насіння (29,52 %) та швидкість руху сівалки (20,43 %). Висока точність висіву ($\delta = 94,7$ – $95,5$ %) була досягнута при використанні удосконаленої конструкції заспокоювача насіння та сповільнювача на швидкості 1 м/с, тоді як відсутність сповільнювача та базовий заспокоювач

призводили до суттєвого зниження точності висіву ($\delta = 70,6\text{--}71,3\%$) при швидкості 4 м/с. Аналіз впливу факторів на густоту стояння рослин і урожайність також вказав на перевагу використання удосконаленої конструкції. Аналіз отриманих даних продемонстрував різний ступінь впливу конструкцій сповільнювача і заспокоювача насіння на урожайність для різних культур (ріпак і горох). Для гороху найважливішим фактором виявився сповільнювач (вплив – 46,94 %), тоді як для ріпаку – удосконалений заспокоювач насіння (вплив – 44,71 %). Отже, результати досліджень підтверджують ефективність удосконаленої конструкції сповільнювача і заспокоювача насіння, що може значно підвищити точність висіву на 24,9 % та урожайність гороху і ріпаку на 4,1 % і 4,9 % відповідно.

9. Техніко-економічна оцінка показала, що застосування удосконаленої пневматичної зернової сівалки John Deere 1890 суттєво підвищує економічний ефект, особливо за наявності сповільнювача насіння і удосконаленого заспокоювача насіння. Найбільший економічний ефект спостерігається при середній швидкості посіву, зокрема для гороху при швидкості 2 м/с він досягає 1188,14 грн/га, а для ріпаку при швидкості 3 м/с — 1667,83 грн/га. Точка беззбитковості при якій окупаються додаткові капіталовкладення на удосконалення сівалки для цих культур становить відповідно 351 га і 250 га.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Conservation Agriculture. (2024). www.fao.org. FAO organizational. URL: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>
2. Stanojevic A.B. (2021). Conservation agriculture and its principles. *Ann Environ Sci Toxicol* 5(1): 018–022. DOI: 10.17352/aest.000031
3. Verhulst N., Govaerts B., Verachtert E., Castellanos-Navarrete A., Mezzalama M., Wall P., Deckers J., Sayre K.D. (2010). Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality* (Lal R., Stewart B.A.). CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 137–208. DOI: 10.1201/EBK1439800577-7
4. Blanco-Canqui H., Lal R. (2007). Impacts of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1166–1173. DOI: 10.2136/sssaj2006.0411
5. Govaerts B., Mezzalama M., Sayre K.D., Crossa J., Nicol J.M., Deckers J. (2006). Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/wheat root rot and nematode populations in subtropical highlands. *Appl. Soil Ecol.* 32: 305–315. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.07.010
6. Plumer B. (2013). No-till farming is on the rise. That’s actually a big deal. *The Washington Post*. URL: <https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2013/11/09/no-till-farming-is-on-the-rise-thats-actually-a-big-deal/>
7. Spears S. (2018). What is No-Till Farming? *Regeneration International*. URL: <https://regenerationinternational.org/2018/06/24/no-till-farming/>
8. Verheye W.H. (2010). *Soil Engineering and Technology. Soils, Plant Growth and Crop Production Volume I*. EOLSS Publishers. 161 p. ISBN 978-1-84826-367-3
9. Flatt C. (2023). No-till farming, cover crops reduce greenhouse gasses but cost growers at the start, study finds. *KNKX Public Radio*. URL: <https://www.knkx.org/agriculture/2023-01-03/no-till-farming-cover-crops-reduce-greenhouse-gasses-but-cost-growers-at-the-start-study-finds>.
10. Косолап М.П., Кротінов О.П. (2011). Система землеробства No-till: Навч. посібник. К.: «Логос», 352 с. ISBN 978-966-171-374-0.

11. Свидинюк І.М., Шморгун О.В. (2009). Особливості освоєння технології «No-till». Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства УААН». Спецвипуск, 87–95.
12. Цицюра Я.Г. (2017). No-till технології. Конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання освітнього-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» напряму підготовки 6.090101 «Агрономія». Він. нац. аграр. ун-т. Вінниця: ВНАУ, 78 с.
13. Jiang S., Wang Q., Zhong G., Tong Z., Wang X., Xu J. (2021). Brief Review of Minimum or No-Till Seeders in China. *AgriEngineering*, 3: 605–621. DOI: 10.3390/agriengineering3030039.
14. Amer N.N.K., Ayad A.K., Arkan M.A.S. (2021). No-tillage Seeders for Crops and Their Development: A review paper. *J. of Kirkuk Univ. for Agri. Sci.*, 12 (2): 75–92. URL: <https://search.emarefa.net/detail/BIM-1280467>
15. Jin H., Zhiqiang Z., Hongwen L., Qingjie W. (2014). Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: A review. *Int J Agric & Biol Eng Open*, 7 (4): 1–12.
16. Altikat S., Çelik A. (2012). Effects of Different No-Till Seeders and Tractor Forward Speeds on the Soil Physical Properties and Seed Emergence of Summer Vetch and Winter Wheat. *Journal of Agricultural Sciences*, 18: 21–30. DOI: 10.1501/Tarimbil_0000001189
17. Godwin R.J. (2020). Potential of «No-till» Systems for Arable Farming. Soil and Water Management Centre. Harper Adams University. Newport, Shropshire, TF108NB. 42 p.
18. Brown E. (2013). Conservation Tillage Field Day at ARDEC. Colorado State University Extension. URL: <http://www.ext.colostate.edu/pubs/water/news-cons-tillage.html>
19. Кривошипко Т. (2021). STRiP-TiLL – technology of the future. Здоровя земля України. URL: <https://healthysoil.in.ua/strip-till-technology-for-future>
20. Çelik A., Altikat S., Thomas R.W. (2013). Strip tillage width effects on sunflower seed emergence and yield. *Soil Tillage Res.*, 131: 20–27. DOI: 10.1016/j.still.2013.03.004
21. Benincasa P., Zorzi A., Panella F., Tosti G., Trevini M. (2017). Strip tillage and sowing: Is precision planting indispensable in silage maize? *Int. J. Plant Prod.*, 11: 577–588. DOI: 10.22069/ijpp.2017.3719

22. Циліорик О.І. (2019). Система мульчувального обробітку ґрунту в Північному Степу: монографія. Дніпро: Новий Світ. 298 с.
23. Танчик С.П. (2009). No-till і не тільки Сучасні системи землеробства. К.: Юніверст Медіа. 160 с.
24. Cannel R. G. (1985). Reduced tillage in northwest Europe – a review. *Soil tillage Res.* 2 (5): 129–177. DOI: 10.1016/0167-1987(85)90028-5
25. Suskevic M. (1982). Results of minimum tillage. *Czechoslovakia. Sci. Agr. Bohemoslovaca.* 14 (4): 261–264.
26. Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. (2019). Global spread of conservation agriculture. *Int. J. Environ. Stud.* 76: 29–51. DOI: 10.1080/00207233.2018.1494927
27. Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. (2021). Successful Experiences and Learnings from Conservation Agriculture Worldwide. Keynote Address, Sub-Theme 1. In *Proceedings of the 8th World Congress on Conservation Agriculture*, Bern, Switzerland, 21–23 June 2021. URL: <https://8wcca.org/wp-content/uploads/2021/06/20-jun-prog-english.pdf>
28. Gramshaw G. M., McKeon G. M., Clem R. L. (1993). Tropical Pasture Establishment. A systems perspective of establishment illustrated by oversowing in the subtropics. *Tropical Grasslands*, 27: 261–275.
29. Fenner M. (1992). Environmental influences on seed size and composition. *Hort. Rev.* 13: 183–213. DOI: 10.1002/9780470650509.ch5
30. Shepilova T., Mostipan M., Petrenko D., Vasytkovska K. (2020). The influence of sowing time and micro-fertilizers on soybean productivity in the northern steppe of Ukraine. *Bulgarian Journal of Agricultural Science.* 26 (4): 787–792.
31. Bewley J.D., Black M. (1982). Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination. Vol. 2. SpringerVerlag: Berlin. 375 p. DOI: 10.1007/978-3-642-68643-6
32. Wood I. M. (1987). Crop establishment models and their role in agricultural research, extension and production. *Crop Establishment Problems in Queensland: Recognition, Research and Resolutions* (Wood I.M., Hazard W.H., From F.R.). Occas. Publ. No. 34, Australian Institute of Agricultural Science, Brisbane, Qld., 12–22.
33. Collis-George N. (1987). Effects of soil physical factors on imbibition, germination, root elongation and shoot development. *Crop Establishment Problems in*

Queensland: Recognition, Research and Resolutions (Wood I.M., Hazard W.H., From F.R.). Occas. Publ. No. 34, Australian Institute of Agricultural Science, Brisbane, Qld.: 23–41.

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

35. Зозуля О.Л., Мамалига В.С. (1993). Селекція і насінництво польових культур. Київ: Урожай. 416 с.

36. Опалко А.І., Заплічко Ф.О. (2000). Селекція плодових і овочевих культур. Київ: Вища школа. 440 с.

37. Wilkins D. E., Klepper B., Rickman R.W. (1989). Measuring wheat seedling response to tillage and seeding systems. Trans. ASAE., 32(3):795:800. DOI: 10.13031/2013.31071

38. McLeod J.G., Dyck F.B., Campbell C.A., Vera C.L. (1992). Evaluation of four zero-tillage drills equipped with different row openers for seeding winter wheat in the semi-arid prairies. Soil & Tillage Research, 25: 1–16. DOI: 10.1016/0167-1987(92)90058-J

39. Hadas A., Russo D. (1974). Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity and seed-soil water contact. 2. Analysis of experimental data. Agron. J. 66: 647–652. DOI: 10.2134/agronj1974.00021962006600050012x

40. Hayes W. A. (1985). Conservation tillage systems and equipment requirements. In: Systems Approach to Conservation Tillage (D'Itri F.M.) Lewis Pub., 21–40. DOI: 10.1201/9781351070850-3

41. Unger P.W., Stewart B.A. (1976). Land preparation and seedling establishment practices in multiple cropping systems. Multiple Cropping (Stelly M.). ASA Special Publ., 27: 225–234. DOI: 10.2134/asaspecpub27.c13

42. Radford B.J., Nielsen R.G.H. (1985). Comparison of a press wheel, seed soaking and water injection as aids to sorghum and sunflower establishment in Queensland. Aust. J. Exp. Agric., 25: 656–664. DOI: 10.1071/EA9850656

43. Murray D.H.A., Dodman R. L., Marley J.M. (1987). Biotic factors in field crop establishment in Queensland with particular reference to insects, diseases and weeds. Crop Establishment Problems in Queensland: Recognition, Research and Resolutions (Wood M., Hazard W.H., From F.R.). Occas. Publ., 34: 23–41.

44. Blacket D.S. (1987). Improving crop emergence with management and agronomy. *Crop Establishment Problems in Queensland: Recognition, Research and Resolutions* (Wood I.M., Hazard W.H., From F.R.). Occas. Publ., 34: 192–207.

45. Benjamin L.R. (1990). Variation in time of seedling emergence within populations: A feature that determines individual growth and development. *Adv. in Agron.* 44: 1–25. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60816-0

46. Asher C.J. (1987). Crop nutrition during the establishment phase: role of seed reserves. *Crop Establishment Problems in Queensland: Recognition, Research and Resolutions* (Wood I.M., Hazard W.H., From F.R.). Occas. Publ., 34: 88–106.

47. Wollin A.S., McPhee J.E., Robotham B.G., Walsh P.A. (1987). A review of engineering aspects of crop establishment. *Crop Establishment Problems in Queensland: Recognition, Research and Resolutions* (Wood I.M., Hazard W.H., From F.R.). Occas. Publ., 34, 42–61.

48. Trukhanska O. (2021). Improvement of quality indicators of the process of sowing of row crops. *Vibrations in engineering and technology*, 2 (101): 124–134. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-14

49. Murray J.R., Tullberg J.N., Basnet B.B. (2006). *Planters and their components: types, attributes, functional requirements, classification and description*. ACIAR Monograph, 121. 178 p. ISBN 1863204628

50. Яропуд В. М., Говоруха В. Б., Дацюк Д. А. (2023). Експериментальні дослідження дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 3 (122): 43–52. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-5

51. Яропуд В. М., Говоруха В. Б., Дацюк Д. А. (2023). Випробування математичної моделі роботи дозатора висівного апарата селекційної сівалки дрібнонасіньєвих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*, 3 (110): 52–50. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-6

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

53. Бойко В. Б. (2021). Дозування насіння в гідросівалці. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 21 (2): 51–60. DOI: 10.31388/2078-0877-2021-21-2-51-60

54. Бойко В. Б., Улексін В. О., Золотовська О. В., Лепеть Є. І., Бойко Б. В. (2023). Проект мехатронної системи експериментальної гідро-пневматичної сівалки. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету, 23 (2): 99–112. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-99-112
55. Aliiev E., Tesliuk H., Puhach A., Kobets O., Zolotovska O., Boiko V. (2023). Improving the work process efficiency of a tillage module for pre-sowing tillage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (124)), 60–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.284597
56. Яропуд В. М., Дацюк Д., Теслюк Г. В. (2023) Використання методу дискретних елементів у моделюванні руху та укладання насіння дрібнонасінневих культур. Вібрації в техніці та технологіях, 1 (108): 73–82. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8
57. Vasytkovska K., Vasytkovskyi O., Leshchenko S, Sviren M., Moroz V. (2020). Identification of parameters of pneumatic and mechanical seeding device under the influence of vacuum. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 26 (5): 1091–1094.
58. Vasytkovska K., Vasytkovskyi O., Kovalov M., Andriienko O., Mostipan M., Kulyk H. (2023). Analysis of sowing quality of sugar beet seeds before and after sowing by pneumatic and mechanical seed meter. HSOA Journal of Agronomy & Agricultural Science. 6 (54): 1–5. DOI: 10.24966/AAS-8292/100054
59. Ференц Р.В., Васильковська К.В., Кірчук Р.В. (2024). Огляд конструкцій пневматичних висівних апаратів сівалок. Сільськогосподарські машини, 50: 104–112. DOI: 10.36910/acm.vi50.1387
60. Trukhanska O., Hadaichuk M. Ensuring reliability and resource conservation coulters discs of grain seeders. Vibrations in engineering and technology. 2023. № 3 (110). P. 61-69.. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-7
61. Trukhanska O. (2023). Investigation the impact of the constructive parameters of the working body the tillage machine on the energy intensity and quality of soil tillage. Vibrations in engineering and technology, 1 (108): 104–109. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-12
62. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. (2015). Сільськогосподарські машини. Київ : Каравела. 552 с.

63. Сисолін П.В., Свірень М.О. (2004). Висівні апарати сівалок (еволюція конструкцій, розрахунки параметрів): навч. посіб. Кіровоград : ТОВ Центрально-Українське видавництво. 160 с.
64. Сисолін П.В. (1999). Обґрунтування конструктивних параметрів апарату точного висіву зернових культур: автореф. дис... канд. техн. наук : 05.05.11. Кіровоград. 19 с.
65. Bilgili M.E., Vurarak Y., Aybek A. (2023). Determination of Performance of No-Till Seeder and Stubble Cutting Prototype. *Agriculture*, 13: 289. DOI: 10.3390/agriculture13020289
66. De Vries J.W., Zapata M.C., Hoogmoed W.B. (2029). Design and Evaluation of a No-Tillage Seeder for Small Scale Vegetable Production Using a Two-Wheeled Tractor in Coahuila, Mexico. *ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19, Izmir-Turkey*, 1: 1–8.
67. Сівалка зернотукова СЗД-360. (2024). demetra-site.com.ua. DEMETRA. URL: <https://demetra-site.com.ua/products/sejalka-zernotukovaja-szd-360-szd-360>
68. ASTRA 3.6. (2024). elvorti.com. ELVORTI. URL: <https://elvorti.com/catalog/sejalka/astra-3-6.html?lang=ua>
69. Деркач О. Д., Макаренко Д. О., Муранов Є. С., Лободенко А. В. (2021). Підвищення довговічності рухомих з'єднань посівних машин впровадженням прогресивних конструкційних матеріалів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 11 (2): 10. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-4-2
70. Aminzadeh R. (2014). Modified Design of a Precision Planter For a Robotic Assistant Farmer. A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research In Partial Fulfillment of the Requirements For the Degree of Master of Science In the Department of Mechanical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon. 196 p.
71. Sharipov G.M. (2019). Modelling and optimisation of no-till seeder dynamics for precise seeding depth. Dissertation Submitted in fulfilment of the regulations to acquire the degree «Doktor der Agrarwissenschaften» to the Faculty of Agricultural Sciences. 103 p.
72. Li Y., Bai Y., Zhang X., Xie F. (2023). Structural Design and Simulation Analysis of a Dual-Row Pneumatic Vegetable Precision Planter. *Processes*, 11: 1803. DOI: 10.3390/pr11061803

73. Xing H., Wang Z.M., Luo X.W., Zang Y., He S.Y., Xu.P., Liu S. (2021). Design and experimental analysis of rice pneumatic seeder with adjustable seeding rate. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, 14 (4): 113–122. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211404.5658
74. Sultan U., Khan A.A., Husnain S.N., Zohaib M., Hashim N. (2023) Multi crop high efficiency seed drill with solar hybrid seed metering: A step toward precision and sustainability. *Front. Sustain. Food Syst.* 6:1081122. DOI: 10.3389/fsufs.2022.1081122.
75. Zhu Q., Zhang H., Zhu Z., Gao Y., Chen L. (2022). Structural Design and Simulation of Pneumatic Conveying Line for a Paddy Side-Deep Fertilisation System. *Agriculture*, 12: 867. DOI: 10.3390/agriculture12060867
76. Liu L. J., Yang H., Ma S. C. (2016). Experimental study on performance of pneumatic seeding system. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.* 9 (6): 84–90.
77. Kadu A.V., Rathod V., Matre V. (2019). A Review on Seed Sowing Method and Alternative Method for Small Farmers. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 7 (2): 194–196.
78. Li H., Liu H., Zhou J., Wei G., Shi S., Zhang X., Zhang R., Zhu H., He T. (2021). Development and First Results of a No-Till Pneumatic Seeder for Maize Precise Sowing in Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agriculture*, 11: 1023. DOI: 10.3390/agriculture11101023.
79. Smith J.A., Kocher M.F. (2008). Evaluate planter meter and seed tube systems for seed spacing performance of confection sunflower seed to improve plant spacing in the field. *National Sunflower Workshop. National Sunflower Association*, 1–13. URL: https://www.sunflowernsa.com/uploads/research/330/Smith_PlanterMeter_08.pdf
80. Lavrukhin P.V., Ivanov P.A., Zhigailov A.V., Senkevich S.E. (2021). Analysis of the process of pneumatic conveying of seeds through the seed drill tube. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 659: 012059. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012059
81. Kocher M.F., Coleman J.M., Smith J.A., Kachman S.D. (2011). Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition. *Appl. Eng. Agric.*, 27 (2): 177–183. DOI: 10.13031/2013.36484
82. Kalitanyi A., Mardini L. (2020). BREE 495 – Engineering Design 3. Mechanization of seeder for smallholder farmers in Rwanda. McGill University. Montreal, Canada. 70 p.

83. Bourges G., Medina M. (2013). Air-seeds flow analysis in a distributor head of an "air drill" seeder. *Acta Hort.* 1008, 259–264. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1008.34
84. Yatskul A., Lemiere J.P., Cointault F. (2017). Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder. *Biosyst. Eng.*, 161: 120–134. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.015
85. Li Z.D., He S., Zhong, J.Y., Han J.F., Chen Y.X., Song Y. (2021). Parameter optimization and experiment of the disturbance air-suction hole metering device for rapeseed. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach.*, 37: 1–11.
86. Aduov M.A., Nukusheva S.A., Kaspakov E.Z., Isenov K.G., Volodya K., Tulegenov T.K. (2022). Development of pneumatic seeder for sowing grain crops. *International scientific journal «Mechanization in agriculture»*, 1: 25–26.
87. Wang C., Li H., Wang J., He J., Wang Q., Lu C. (2020). CFD Simulation and Optimization of a Pneumatic Wheat Seeding Device. *IEEE Access*, 8: 214007-214018. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3041630
88. Bogus A.E., Stanin V., Vyshebabina A. (2021). Analysis of Designs of Distribution Systems of Grain Pneumatic Seeders. *MATEC Web of Conferences* 346, 03010. DOI: 10.1051/mateconf /202134603010.
89. Johnston M. (2007). United States Patent US 7,168,376 B2, Int. Cl. AOIC 7700 (2006.01). U.S. Cl 111A167: 111 f150. Seed boot for a seeding machine. Assignee: Deere & Company, Moline, IL (US). Appl. No.: 10/632,370. Filed: Aug. 1, 2003. Date of Patent: Jan. 30, 2007.
90. Stainless Steel Seed Brake for 1 1/2" OD Hose (with baffle for air-seeders). (2024). store.needhamag.com. Needham Ag Technologies, LLC. URL: <https://store.needhamag.com/product/stainless-steel-seed-brake-for-1-1-2-od-hose-with-baffle-for-air-seeders/>
91. AIRGUARD™ Stainless Steel Seed Brake. (2024). rede-ag.com. Seeding is Believing. URL: <https://rede-ag.com/product/airguard-stainless-steel-seed-brake/#>
92. Seed bounce flaps – JD 50 & 90-series drill boots. (2024). www.exapta.com. Exapta Solutions, Inc. URL: <https://www.exapta.com/seed-bounce-flaps-jd-50-90-series-drill-boots-2/>

93. Hagny M. P. (2017). United States Patent US 9,668,402 B2, Int. Cl. AOIC 5/06 (2006.01), U.S. Cl A0IC5/068 (2013.01). Seed bounce flap for agricultural seeder. Assignee: Hagny M. P. (US). Appl. No.: 14/591,724. Filed: Jan. 7, 2015. Date of Patent: Jul. 7, 2016.
94. Yatskul A., Lemièrè J.-P. (2018). Establishing the conveying parameters required for the airseeders *Biosystems Engineering*, 166: 1–12. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.11.0015.
95. Yatskul A., Lemièrè J.-P., Cointault F. (2017). Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seeds distribution accuracy of the air-seeder *Biosystems Engineering*, 161, 120–134. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.015
96. Yatskul A., Lemièrè J.-P., Cointault F. (2018). Comparative energy study of the air-stream loading systems of air-seeders *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 11: 30–37. DOI:10.1016/j.eaef.2017.09.003
97. McKay M.E. (1979). Performance characteristics of pneumatic drills: transverse distribution (Parkville: University of Melbourne, Dept. of Civil Engineering). URL: <https://trove.nla.gov.au/work/21209973?q&versionId=25298581>
98. Wei L., Wang Q., Niu K., Bai S., Wei L., Qiu C., Han N. (2024). Design and Test of Seed–Fertilizer Replenishment Device for Wheat Seeder. *Agriculture*, 14: 374. DOI: 10.3390/agriculture14030374
99. Kravtsov V.A., Konovalov V.V., Zaitsev Yu.V., Petrov M.A., Petrova S.S. (2020). Simulation of the Pneumatic System of a Seed Drill with a Vertical Flow Direction. *KnE Life Sciences*, 5 (1), 239–244. DOI: 10.18502/cls.v5i1.6060
100. Kravtsov A., Konovalov V., Zaitsev V., Petrov A., Petrova S. (2020). Results of seeder pneumatic system distributor and aero product stream flow in the pipeline numerical studies. 6th International Conference on Agriproducts processing and Farming IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 422: 012111. DOI: 10.1088/1755-1315/422/1/012111
101. Guzman L., Chen Y., Landry H. (2023). Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in Horizontal-Vertical Tube Transition. *Processes*, 11: 909. DOI: 10.3390/pr11030909
102. Chang J., Zhang X. (2011). Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 27: 136 DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.021

103. Li K., Li S., Ni X., Lu B., Zhao B. (2023). Analysis and Experimental of Seeding Process of Pneumatic Split Seeder for Cotton. *Agriculture*, 13: 1050. DOI: 10.3390/agriculture13051050
104. Lei X., Liao Y., Zhang W., Li S., Wang D., Liao Q. (2017). Simulation and experiment of gassolid flow in seed conveying tube for rapeseed and wheat *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 48(3): 57–68. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.007
105. Li Z., Zhang H., Xie R., Gu X., Du J., Chen Y. (2022). Evaluation on the Performance of Airflow Distribution Device of Pneumatic Seeder for Rapeseed through CFD Simulations. *Agriculture*, 12: 1781. DOI: 10.3390/agriculture12111781
106. Wang B., Na Y., Pan Y., Ge Z., Liu J., Luo X. (2022). CFD Simulation and Experiments of Pneumatic Centralized Cylinder Metering Device Cavity and Airflow Distributor. *Agronomy*, 12: 1775. DOI: 10.3390/agronomy12081775
107. Gierz Ł., Markowski P., Choszcz D.J., Wojcieszak D. (2023). Effect of using deflector in the distributor head of a pneumatic seed drill on the oat seed sowing unevenness. *Sci. Rep. Sep. 19*, 13(1): 15471. DOI: 10.1038/s41598-023-42476-5
108. Kumar V., Durairaj C. (2000). Influence of Head Geometry on the Distributive Performance of Air-assisted Seed Drills *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75: 81–95. DOI: 10.1006/jaer.1999.0490
109. Lysych M.N., Chernyshev V.V., Nagaytsev V.M. (2021). Design and simulation of seed metering device for aerosowing of forest pelleted seeds. *Journal of Physics: Conference Series*, 032: 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012062
110. Dai Y., Luo X., Wang Z., Zeng S., Zang Y., Yang W., Zhang M., Wang B., Xing H. (2016). Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32 (24): 36–42. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.005
111. Lu B., Ni X., Li S., Li K., Qi Q. (2022). Simulation and Experimental Study of a Split High-Speed Precision Seeding System. *Agriculture*, 12, 1037. DOI: 10.3390/agriculture12071037
112. Mudarisov S., Khasanov E., Rakhimov Z., Gabitov I., Badretdinov I., Farchutdinov I., Gallyamov F., Davletshin M., Aipov R., Jarullin R. (2007). Specifying two-

phase flow in modeling pneumatic systems performance of farm machines. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments* 40 (4): 706. DOI: 10.7508/jmerd.2017.04.018

113. Lei X., Liao Y., Zhang Q., Wang L., Liao Q. (2018). Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150: 98–109. DOI: 10.1016/j.compag.2018.04.009

114. Dai Y., Luo X., Wang Z., Zeng S., Zang Y., Yang W., Zhang M., Wang B., Xing H. (2016). Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32 (24): 36–42. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.005

115. Karayel D., Šarauskis E., Akta,s A. (2022). Design and Experiment of a Helicoidal Seed Tube to Improve Seed Distribution Uniformity of Seed Drills. *Processes*, 10, 1271. DOI: 10.3390/pr10071271

116. Jun G., Yue Y., Memon M.S., Chuang T., Linyu W., Pei T. (2022). Design and simulation for seeding performance of high-speed inclined corn metering device based on discrete element method (DEM). *Sci Rep* 12, 19415. DOI: 10.1038/s41598-022-23993-1

117. Rubio Scola I., Rossi S., Bourges G. (2022). Air drill Seeder Distributor Head Evaluation: A Comparison between Laboratory Tests and Computational Fluid Dynamics Simulations. *Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme II: Data* (Bochtis D.D., Moshou D.E., Vasileiadis G., Balafoutis A., Pardalos P.M.). Springer Optimization and Its Applications, 183: 189–205. DOI: 10.1007/978-3-030-84148-5_8

118. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є. (2023). Дослідження чинників погіршення точності висіву пневматичними сівалками. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2 (121): 51–61. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-6.

119. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Безверхній П. Є. (2024). Патент на корисну модель України 157302, МПК А01С 7/20 (2006.01). Висівна секція пневматичної зернової сівалки. Заявник: Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Безверхній П. Є., № u202401647. Заявл. 02.04.2024. Опубл. 25.09.2024, бюл. № 39.

120. Алієв Е., Безверхній П. (2022). Аналіз проблем пневматичних сівалок та шляхи їх вирішення. *Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез*

Міжнародної наукової інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина (15 березня 2022 р.). ІОК НААН, 61–62.

121. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є. (2022). 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 (20 травня 2022 року, м. Херсон). Херсон: ІЗЗ НААН, 158–159.

122. Алієв Е. Б. (2020). Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 530 с.

123. Gumerov N. A., Duraiswami R. (1998). Modeling of particle motion in viscous swirl flow between two porous cylinders. Proceedings of FEDSM'98 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting June 21-25. Washington, DC, 1–8.

124. Dinesh J. (2009). Modelling and Simulation of a Single Particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Bangalore, 1–9.

125. Kanehl P. (2010). Particle model of the Magnus effect. Bachelor Thesis. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. 35 p.

126. Chen N. H. (1979). An Explicit Equation for Friction factor in Pipe. Ind. Eng. Chem. Fundam, 18 (3): 296–297.

127. Zhang S., Kuwabara S., Suzuki T., Kawano Y., Morita K., Fukuda K. (2009). Simulation of solid–fluid mixture flow using moving particle methods. Journal of Computational Physics, 228: 2552–2565.

128. Johnson K. L. (1987). Contact Mechanics. Cambridge University Press. 434 p.

129. Alberto D. R., Paolo D. M. F. (2004). Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. Chemical Engineering Science, 59 (1): 525–541.

130. Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H. (2006). Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation. Granular Matter, 8 (1): 41–54.

131. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.

132. Needham Ag Technologies. (2022). Product Guide. 88 p. https://store.needhamag.com/wp-content/uploads/Needham_Ag_2022_Product_Guide.pdf.

133. Research Report Summary 688. (1993). Spread Pattern of Air Seeder Seed Boots Part II. Tested at Lethbridge. 4 p. [https://pami.ca/pdfs/reports_research_updates/\(9f\)%20Miscellaneous/688.PDF](https://pami.ca/pdfs/reports_research_updates/(9f)%20Miscellaneous/688.PDF).

134. Шевченко І.А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища // К.: Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с. ISBN 978-966-2622-22-5.

135. Гуцол О. П., Ковбаса В. П. (2016). Обґрунтування параметрів і режимів руху ґрунтообробних машин з дисковими робочими органами: монографія. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ; Ніжин: Лисенко М. М. 145 с. ISBN 978-617-640-306-7.

136. Ковбаса В. П. (2016). Механіка взаємодії робочих органів із ґрунтом: монографія. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ; Ніжин: Лисенко М. М. 297 с. ISBN 978-617-640-307-4.

137. Paksoy M., Aydin C. (2006). Determination of Some Physical and Mechanical Properties of Pea (*Pisum sativum* L.) Seeds. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 9 (1): 26–29. DOI: 10.3923/pjbs.2006.26.29

138. Yalçın İ., Özarıslan C., Akbař T. (2007). Physical properties of pea (*Pisum sativum*) seed. *Journal of Food Engineering*, 79 (2): 731–735. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.02.039

139. Mahawar M. K., Samuel D. V. K., Sinha J. P., Jalgaonkar K. (2018). Moisture-dependent physical and physiological properties of accelerated aged pea (*Pisum sativum* L.) seeds. *Current Science*, 114 (4): 909–915. DOI: 10.18520/cs/v114/i04/909-915

140. Гирка А.Д., Ткаліч І.Д., Сидоренко Ю.Я., Бочевар О.В., Ільєнко О.В. (2018). Актуальні аспекти технології вирощування гороху в умовах Північного Степу України. *Вісник аграрної науки*, 2 (779): 31–35.

141. Popov S.I., Hlubokyi O.M., Avramenko S.V. (2022). Sowing rate effect the performance and seed quality of pea cultivars in the eastern Forest-steppe of Ukraine. *Селекція і насінництво*, 121: 94–104. DOI: 10.30835/2413-7510.2022.261001
142. Сало В., Лещенко С., Лузан П., Сало Л. (2022). *Машини для сівби, садіння та догляду за посівами. Начальний посібник. ЦНТУ. Кропивницький. 220 с*
143. Алієв Е. Б. (2019). *Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.*
144. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1): 95–104.
145. Shevchenko I., Aliiev E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12 (4): 135–142.
146. Shevchenko I., Aliiev E., Viselga G., Kaminski J. R. (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators, 27(4): 311–320. DOI: 10.5755/j02.mech.276
147. Богомолів О. О. (2020). *Обґрунтування раціональних параметрів енергозберігаючого обладнання для сепарації насіння ріпаку: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків. 210 с.*
148. Палехін В. П. (2013). *Курс фізики: підручник. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна. 516 с. ISBN 978-966-623-936-8.*
149. Чолпан П. П. (2004). *Фізика: підручник. К.: Вища школа. 567 с. ISBN 966-642-249-2.*
150. Wang Y, Zhang W, Luo X, Zang Y, Ma L, Zhang W, Liu J, Zeng S. (2024). Effect of Vibration Conditions on the Seed Suction Performance of an Air-Suction Precision Seeder for Small Seeds. *Agriculture*, 14(4):559. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040559>
151. Yu D, Peng F, Zeng Z, Zhang M, Yang W, Zang Y, He J, Huang Y, Wu Y, Zhong W, et al. Vibrational Dynamics of Rice Precision Hole Seeders and Their Impact on Seed Dispensation Efficacy. *Agriculture*. 2024; 14 (2): 324. DOI: 10.3390/agriculture14020324

152. Wei T., Bowei S., Ren D. (2021). Study of needle seeding machine vibration system. *Journal of Physics: Conference Series*. Bristol. 1865 (3). DOI: 10.1088/1742-6596/1865/3/032044
153. Kuş E. (2021). Field-scale evaluation of parameters affecting planter vibration in single seed planting. *Measurement*. 184: 109959. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109959.
154. Науменко М. Макаренко Д., Гурідова В., Крутоус Д. (2021). Математична модель взаємодії сошника посівного комплексу з ґрунтом за ускладнених умов його експлуатації. *Математичне моделювання*, 1 (44): 55–61.
155. Деркач О. Д., Макаренко Д. О., Муранов Є. С., Лободенко А. В. (2021). Підвищення довговічності рухомих з'єднань посівних машин впровадженням прогресивних конструкційних матеріалів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 11 (2): 10.
156. Макаренко Д. О., Деркач О. Д., Д Говоруха В. Б., Веселовська Н. Р. (2023). Модернізація рухомих з'єднань секції посівного комплексу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 123 (4): 12–20.
157. Unal H., Sincik M., Izli N. (2009). Comparison of some engineering properties of rapeseed cultivars. *Industrial Crops and Products*. *Industrial Crops and Products* 30, 131–136. DOI: 10.1016/j.indcrop.2009.02.011
158. Wiącek J., Molenda M. (2011). Moisture-dependent physical properties of rapeseed – experimental and DEM modeling. *Int. Agrophys.*, 25: 59–65.
159. Izli N., Unal H., Sincik M. (2009). Physical and mechanical properties of rapeseed at different moisture content. *Int. Agrophysics*, 23, 137–145.
160. Stasiak M., Molenda M., Horabik J. (2006). Modulus of elasticity of rapeseeds by edometric and acoustic methods, *EJPAU*, 9 (4): 06. <http://www.ejpau.media.pl/volume9/issue4/art-06.html>.
161. Cao X., Li Z., Li H., Wang X., Ma X. (2021). Measurement and Calibration of the Discrete Element Parameters of Rapeseed. *Processes*, 9: 605. DOI: 10.3390/pr9040605
162. Поляков О.І. (2022). Особливості росту, розвитку та формування врожайності ріпаку озимого залежно від норми висіву за різних строків сівби. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 33: 99–110. DOI: 10.36710/ІОС-2022-33-10

163. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є. (2022). Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 52: 86–98. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52.86-98.

164. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є., Алієва О.Ю. (2024). Результати аналітичних досліджень заспокоювача насіння удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 1 (124): 73–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-8.

165. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Безверхній П. Є., Шаповал О. М. (2024). Обґрунтування конструктивних параметрів заспокоювача насіння висівної секції пневматичної сівалки. Вібрації в техніці та технологіях, 2 (113): 43–54. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2.

166. Алієв Е., Безверхній П. (2022). Дослідження сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Шляхи інноваційного розвитку агровиробництва в Україні»: збірник наукових праць. Аграрна наука Західного Полісся. Рівне, 88–89.

167. Безверхній П. (2022). Симуляція сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (21 березня 2023 р.).ІОК НААН, 122–123.

168. Безверхній П. (2023). Результати чисельного моделювання процесу роботи пневматичної сівалки точного висіву. Інноваційні екологобезпечні технології рослинництва в умовах воєнного стану: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції (31 серпня 2023 року), 24–26.

169. Безверхній П. Є. (2023). Методика чисельного моделювання процесу висіву насіння пневматичною сівалкою точного висіву. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 4–6.

170. Армашов Ю. В., Охмат П. К. (2002). Випробування сільськогосподарської техніки на надійність: Начальний посібник. ДДАЕУ. Дніпропетровськ. 219 с.

171. ДСТУ 4138-2002 (2003). Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Київ : Держстандарт України. 173 с.

172. ДСТУ 2240-93 (1993). Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ : Держстандарт України. 74 с.

173. Кисельов О. В., Комарова І. Б., Мілько Д. О., Бакарджиєв Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): навч. посіб.; за заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС. 1181 с.

174. Шейко В.М., Кушнарєнко Н.М. (2004). Організація та методика науково-дослідницької діяльності : підручник. Київ : Знання. 307 с.

175. Вашків П. Г., Пастер П. І., Сторожук В. П., Ткач Є. І. (2001). Теорія статистики: навч. посіб. Київ: Либідь. 320 с.

176. Горбатенко І.Ю. (2001). Основи наукових досліджень. Київ : Вища школа. 92 с.

177. Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов, А. В. (2017). Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця: ПП «ТДЕ-дельвейс». 804 с. ISBN 978-617-7237-23-4.

178. Фетісов В.С. (2011). Математичні та статистичні пакети. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М. 324 с.

179. Царенко О. М., Злобін Ю. А., Скляр В. Г., Панченко С. М. (2000). Комп'ютерні методи в сільському господарстві та біології: навч. посіб. Суми: Університетська книга. 203 с.

180. Сердюк А. М., Антомонов М. Ю., Бардов В. Г., Прилуцький О. С. (2010). Подання результатів математичної та статистичної обробки даних медичних та біологічних досліджень у дисертаційних роботах. Бюл. Вищої атестац. комісії України. 6. С. 31–33.

181. Ушкаренко Е. О., Нікішенко В. Л., Голобородько С. П., Коковіхін С. В. (2008). Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві: навч. посіб. Херсон: Айлант. 272 с.

182. Єщенко В. О., Копитко П. Г., Костогриз П. В., Опришко В. П. (2014). Основи наукових досліджень в агрономії: підручник; за ред. В. О. Єщенка. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К». 332 с.

183. Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Алексєєва І.В. (2017). Математичні методи моделювання та оптимізації. Частина 1. Математичне програмування та дослідження операцій : підручник. Київ : НАУ. 212 с.

184. Распопова В.Б. (2016). Розробка моделей та методів аналізу складних систем засобами комп'ютерної математики. Київ : НУЦП НАНУ. 122 с.

185. Кисельов О. В., Антонов Є. Є., Бакарджиев Р. О. (2011). Використання пакету програм Statist для аналізу результатів багатофакторного активного експерименту. Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві: зб. наук. праць. Запоріжжя: ІМТ НААН. 1(7): 243–253.

186. Ермантраут, Є. Р., Присяжнюк, О. І., Шевченко, І. Л. (2007). Статистичний аналіз агрономічних дослідних даних в пакеті Statistika 6.0. Методичні вказівки. К. 56 с.

187. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджиев Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник. За заг. ред. Д. О. Мілька; Інститут механізації тваринництва НААН. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС. 1181 с.

188. Aliiev E, Bezverkhniy P., Dudin V., Aliieva O. (2024). Results of experimental studies on the improved seed delivery system of a pneumatic precision seeder. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2 (125): 7–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-1.

189. Алієв Е. Б., Безверхній П. Є. (2024). Експериментальні дослідження процесу висіву насіння базовою висівною секцією пневматичної сівалки John Deere 90 Series. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Наукові основи адаптивного землеробства» (16-17 травня 2024 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 353–355.

190. ДСТУ 4397 (2005). Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Держспоживстандарт України.

191. ГСТУ 3-37-4-94 (1995). Трактори та машини сільськогосподарські. Методи економічної оцінки. Мінагрополітики України.

192. Данильченко М. Г., Гладич Б. Б., Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г. (2001). Експертноаналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки. Тернопіль: Економічна думка. 60 с.

193. Завгородній О.І., Левкін Д.А., Котко Я.М., Левкін А.В. (2021). Економіко-математичне моделювання прогнозування ймовірних ризиків технологічних процесів. Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 32(71), 4. 66–70. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.4/10

ДОДАТКИ

Додаток А



УКРАЇНА

(19) UA (11) 157302 (13) U
(51) МПК
A01C 7/20 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 01647	(72) Винахідник(и): Алієв Ельчин Бахтияр огли (UA), Дудін Володимир Юрійович (UA), Безверхній Петро Євгенович (UA)
(22) Дата подання заявки: 02.04.2024	(73) Володілець (володільці): Алієв Ельчин Бахтияр огли, вул. Космічна, буд. 7, кімн. 512, м. Дніпро, 49100 (UA), Дудін Володимир Юрійович, вул. Мандриківська, буд. 260, гуртож. 7, кімн. 10, м. Дніпро, 49100 (UA), Безверхній Петро Євгенович, вул. Миру, буд. 52, с. Мала Костромка, Криворізький р-н, Дніпропетровська обл., 53817 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 26.09.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 25.09.2024, Бюл.№ 39	

(54) ВИСІВНА СЕКЦІЯ ПНЕВМАТИЧНОЇ ЗЕРНОВОЇ СІВАЛКИ

(57) Реферат:

Висівна секція пневматичної зернової сівалки містить раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння. Крім цього, додатково містить верхній датчик висіву, який встановлений на насіннепроводі; нижній датчик висіву, який встановлений на висівному башмаку; сповільнювач насіння, який встановлений між насінневою трубкою і насіннепроводом; блок керування. Сповільнювач насіння складається з перфорованого циліндра із отворами, верхнього розтруба, нижнього розтруба, циліндричної шторки із жорстко закріпленим зубчастим сектором, сервопривода із зубчастим колесом. Блок керування за допомогою електричних проводів приєднаний до верхнього датчика висіву, нижнього датчика висіву і сервопривода.

UA 157302 U

UA 157302 U

підшипниковому вузлі 4 під дією сил тертя, розрізає ґрунт. Висівний башмак 7 відгортає по боках ґрунт, утворюючи борозенку трапецієподібної форми.

5 Під дією потоку повітря насіння через насіннепровід 11 переміщується до верхнього розтруба 17 сповільнювача насіння 10. Верхній датчик висіву 12 фіксує час проходження насіння і передає інформацію за допомогою електричних проводів 23 до блока керування 24. В початковий момент в сповільнювачі насіння 10 циліндрична шторка 21 встановлена таким чином, що всі отвори 16 на перфорованому циліндрі 15 є відкритими. Частина повітря виходить крізь отвори 16, зменшуючи швидкість потоку повітря на виході з нижнього розтруба 18. Швидкість насіння, яке при цьому рухається під дією повітряного потоку, зменшується.

10 Сповільнене насіння надходить до насінневої трубки 9 і каналу для насіння 8 висівного башмака 7. Нижній датчик висіву 14 фіксує час проходження насіння і передає інформацію за допомогою електричних проводів 23 до блока керування 24.

15 Далі насіння вилітає з каналу для насіння 8 висівного башмака 7 і потрапляє у утворену борозенку. У разі відсакування від дна борозни насіння летить у бік заспокоювача насіння 13, який притиснутий прикочувальним колесом 5, відбивається від нього і потрапляє на дно борозенки. Тим самим зменшується ймовірність вильоту насіння за межі борозенки. Далі загортаюче колесо 6 засипає борозенку із насінням ґрунтом.

20 За отриманими даними часу проходження насіння у верхньому датчику висіву 12 і нижньому датчику висіву 14 блок керування 24 розраховує норму і точність висіву до і після сповільнювача насіння 10. У разі відхилення норми висіву до і після сповільнювача насіння 10 блок керування 24 за допомогою електричних проводів 23 передає сигнал до сервопривода 19, який за рахунок механічної передачі між зубчастим колесом 20 і зубчастим сектором 22 повертає циліндричну шторку 21, поступово закриваючи отвори 16 перфорованого циліндра 15. Це приводить до збільшення швидкості насіння і запобігає його турбулентному і хаотичному руху. При досягненні однакової норми висіву до і після сповільнювача насіння 10 блок керування 24 за допомогою електричних проводів 23 передає сигнал до сервопривода 19, який за рахунок механічної передачі між зубчастим колесом 20 і зубчастим сектором 22 повертає циліндричну шторку 21, поступово відкриваючи отвори 16 перфорованого циліндра 15. Це, в свою чергу, приводить до зменшення швидкості насіння і запобігає його відскоку від дна борозенки.

30 Використання висівної секції пневматичної зернової сівалки дозволяє оперативно регулювати швидкість руху насіння, що забезпечить зменшення ймовірності його травмування та вильоту з борозенки і, як наслідок, запобігає зменшенню врожаю.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

35 Висівна секція пневматичної зернової сівалки, що містить раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння, яка **відрізняється** тим, що додатково містить верхній датчик висіву, який встановлений на насіннепроводі; нижній датчик висіву, який встановлений на висівному башмаку; сповільнювач насіння, який встановлений між насінневою трубкою і насіннепроводом і складається з перфорованого циліндра із отворами, верхнього розтруба, нижнього розтруба, циліндричної шторки із жорстко закріпленим зубчастим сектором, сервопривода із зубчастим колесом; блок керування, який за допомогою електричних проводів приєднаний до верхнього датчика висіву, нижнього датчика висіву і сервопривода.

40

45

Корисна модель належить до галузі аграрного машинобудування, а саме стосується конструкції сівалок, та може бути використана для модернізації існуючих конструкцій пневматичних зернових сівалок з метою підвищення ефективності їхньої роботи.

Відома висівна секція сівалки [Johnston M. United States Patent US 7,168,376 B2, Int. Cl. A01C 7700 (2006.01). U.S. Cl. 111A167: 111 f150. Seed boot for a seeding machine. Assignee: Deere & Company, Moline, IL (US). Appl. No.: 10/632,370. Filed: Aug. 1, 2003. Date of Patent: Jan. 30, 2007], яка містить раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння. Недоліком такої висівної секції є висока швидкість повітряного потоку у насінневому каналі висівного башмака. Через це підвищується ризик того, що насіння буде травмуватися при ударі і може вилетіти з борозенки, тим самим не потрапити у посівне ложе.

Відомий сповільнювач насіння пневматичної зернової сівалки виробництва Needham Ag Technologies, LLC [Needham Ag Technologies. (2022). Product Guide. 88 p. (Needham Ag 1 1/4" Seed Brakes With Baffle, P. 41)] являє собою зігнуту перфоровану трубку. Зігнута форма сповільнювача насіння зумовлена ергономічним розташуванням його під елементами рами пневматичної зернової сівалки. Однак дана форма призводить до нерівномірного проходження потоку повітря крізь сповільнювач, виникнення турбулентності, що спричиняє хаотичний рух насіння і відповідно до цього зменшення точності висіву. Ще одним недоліком є відсутність можливості змінювати швидкість потоку повітря безпосередньо під час висіву, що унеможливорює контроль та оперативне коригування точності висіву.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення точності висіву висівною секцією пневматичної зернової сівалки.

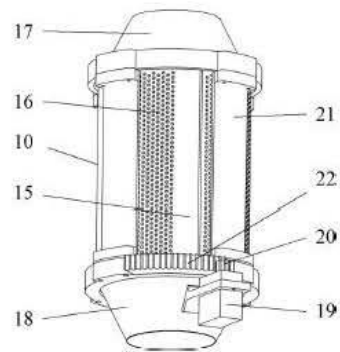
Поставлена задача вирішується тим, що висівна секція пневматичної зернової сівалки, яка містить раму із хомутом, однодисковий сошник, підшипниковий вузол, прикочувальне колесо, загортаюче колесо, висівний башмак із каналом для насіння, насінневу трубку, насіннепровід, заспокоювач насіння, згідно з корисною моделлю, додатково містить верхній датчик висіву, який встановлений на насіннепроводі; нижній датчик висіву, який встановлений на висівному башмаку, сповільнювач насіння, який встановлений між насінневою трубкою і насіннепроводом і складається з перфорованого циліндра із отворами, верхнього розтруба, нижнього розтруба, циліндричної шторки із жорстко закріпленим зубчастим сектором, сервопривода із зубчастим колесом; блок керування, який за допомогою електричних проводів приєднаний до верхнього датчика висіву, нижнього датчика висіву і сервопривода.

Корисна модель пояснюється кресленнями. На фіг. 1 представлено загальний вигляд висівної секції пневматичної зернової сівалки, на фіг. 2 - види збоку і ззаду в перспективі основних компонентів висівної секції пневматичної зернової сівалки, на фіг. 3 - загальний вигляд сповільнювача насіння.

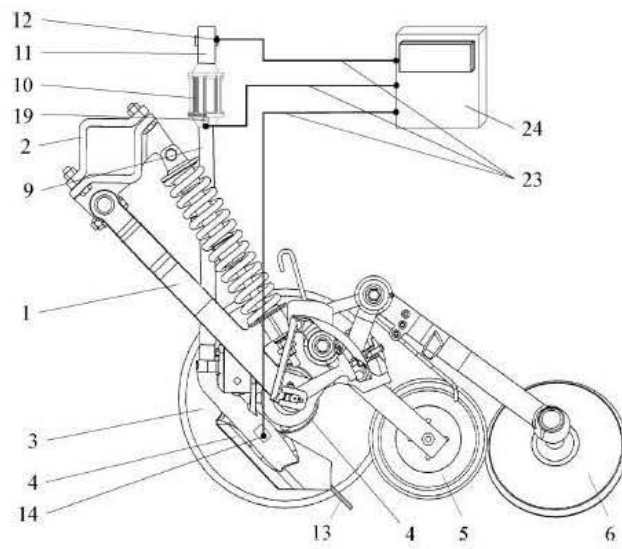
Висівна секція пневматичної зернової сівалки (фіг. 1) складається з рами 1, яка з'єднана з рамою сівалки (на фіг. 1 не показано) за допомогою хомута 2. Однодисковий сошник 3 встановлений на рамі 1 з можливістю обертання, яку забезпечує підшипниковий вузол 4. Прикочувальне колесо 5 встановлено за однодисковим сошником 3 з можливістю обертання на рамі 1. За прикочувальним колесом 5 встановлено загортаюче колесо 6, яке закріплене на рамі 1 з можливістю обертання. На рамі 1 закріплений висівний башмак 7, який одним боком щільно прилягає до однодискового сошника 3. Через всю довжину висівного башмака 7 виконано канал для насіння 8 (фіг. 2). До верхньої частини каналу для насіння 8 висівного башмака 7 приєднано насінневу трубку 9. До верхньої частини насінневої трубки 9 приєднано сповільнювач насіння 10, до верхньої частини якого приєднано насіннепровід 11 з верхнім датчиком висіву 12. На виході з каналу для насіння 8 висівного башмака 7 встановлено заспокоювач насіння 13. В середній частині каналу для насіння 8 висівного башмака 7 встановлено нижній датчик висіву 14. Сповільнювач насіння 10 (фіг. 3) складається з перфорованого циліндра 15 із отворами 16, до якого зверху і знизу жорстко закріплені верхній розтруб 17 і нижній розтруб 18. На нижньому розтрубі 18 жорстко зафіксовано сервопривід 19. На валу сервопривода 19 встановлено зубчасте колесо 20. На перфорованому циліндрі 15 встановлено циліндричну шторку 21 з можливістю обертання навколо власної осі. На циліндричній шторці 21 жорстко закріплено зубчастий сектор 22. Зубчастий сектор 22 і зубчасте колесо 20 сервопривода 19 утворюють механічну передачу. Сервопривід 19, верхній датчик висіву 12 і нижній датчик висіву 14 за допомогою електричних проводів 23 з'єднані із блоком керування 24.

Висівна секція пневматичної зернової сівалки працює наступним чином. Рама 1 висівної секції пневматичної зернової сівалки закріплюється на рамі сівалки (на фіг. 1 не показано) з використанням хомута 2. Під час руху сівалки однодисковий сошник 3, обертаючись у

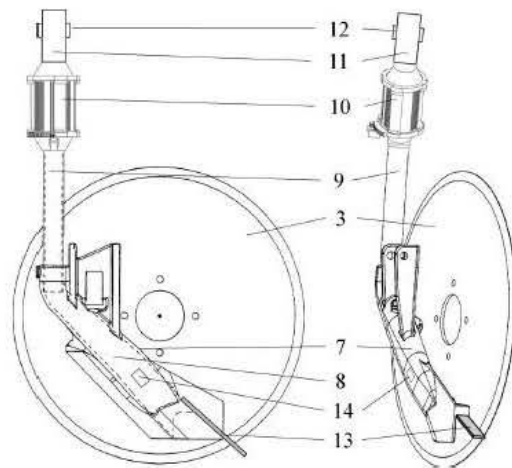
UA 157302 U



Фиг. 3



Фиг. 1



Фиг. 2

Додаток Б

Результати чисельного моделювання процесу функціонування сповільнювача системи подачі насіння

№	V_a^{in} , м/с	N, шт	ε	x_1	x_2	η	V_a^{out} , м/с	V_p^{out} , м/с
1	20	2520	2,80	0,50	1,00	1,19	5,35	3,95
2	20	2160	2,40	0,50	0,71	1,1	5,97	4,19
3	20	1800	2,00	0,50	0,43	1,08	6,75	4,69
4	20	1440	1,60	0,50	0,14	1,04	7,79	5,56
5	20	1080	1,20	0,50	-0,14	1,02	9,2	6,94
6	20	720	0,80	0,50	-0,43	1	11,23	9,09
7	20	360	0,40	0,50	-0,71	0,99	14,44	12,64
8	20	0	0,00	0,50	-1,00	0,99	19,22	19,11
9	5	2520	2,80	-1,00	1,00	1,03	1,35	0,99
10	5	2160	2,40	-1,00	0,71	1	1,5	1,04
11	5	1800	2,00	-1,00	0,43	0,99	1,7	1,17
12	5	1440	1,60	-1,00	0,14	0,99	1,95	1,38
13	5	1080	1,20	-1,00	-0,14	0,98	2,31	1,73
14	5	720	0,80	-1,00	-0,43	0,98	2,82	2,27
15	5	360	0,40	-1,00	-0,71	0,98	3,62	3,16
16	5	0	0,00	-1,00	-1,00	0,99	4,82	4,78
17	25	2520	2,80	1,00	1,00	1,28	6,73	4,93
18	25	2160	2,40	1,00	0,71	1,12	7,49	5,23
19	25	1800	2,00	1,00	0,43	1,07	8,46	5,86
20	25	1440	1,60	1,00	0,14	1,01	9,74	6,95
21	25	1080	1,20	1,00	-0,14	1,01	11,51	8,66
22	25	720	0,80	1,00	-0,43	0,98	14,05	11,36
23	25	360	0,40	1,00	-0,71	0,99	18,05	15,79
24	25	0	0,00	1,00	-1,00	1,02	24,24	23,89
25	15	2520	2,80	0,00	1,00	1,15	4,03	2,96
26	15	2160	2,40	0,00	0,71	1,05	4,49	3,13
27	15	1800	2,00	0,00	0,43	1	5,08	3,52
28	15	1440	1,60	0,00	0,14	1	5,85	4,17
29	15	1080	1,20	0,00	-0,14	0,99	6,91	5,2
30	15	720	0,80	0,00	-0,43	0,98	8,43	6,81
31	15	360	0,40	0,00	-0,71	0,98	10,83	9,47
32	15	0	0,00	0,00	-1,00	0,97	14,44	14,34
33	10	2520	2,80	-0,50	1,00	1,12	2,69	1,98
34	10	2160	2,40	-0,50	0,71	1,05	2,99	2,09
35	10	1800	2,00	-0,50	0,43	1	3,38	2,34
36	10	1440	1,60	-0,50	0,14	1	3,9	2,78
37	10	1080	1,20	-0,50	-0,14	0,99	4,6	3,46

№	V_a^{in} , м/с	N, шт	ϵ	x_1	x_2	η	V_a^{out} , м/с	V_p^{out} , м/с
38	10	720	0,80	-0,50	-0,43	0,99	5,62	4,55
39	10	360	0,40	-0,50	-0,71	0,98	7,21	6,31
40	10	0	0,00	-0,50	-1,00	0,98	9,79	9,56

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії швидкості повітряного потоку на виході V_a^{out}

```

M = {{0.5, 1, 5.35}, {0.5, 0.71, 5.97}, {0.5, 0.43, 6.75}, {0.5, 0.14,
7.79}, {0.5, -0.14, 9.2}, {0.5, -0.43, 11.23}, {0.5, -0.71,
14.44}, {0.5, -1, 19.22}, {-1, 1, 1.35}, {-1, 0.71, 1.5}, {-1,
0.43, 1.7}, {-1, 0.14, 1.95}, {-1, -0.14, 2.31}, {-1, -0.43,
2.82}, {-1, -0.71, 3.62}, {-1, -1, 4.82}, {1, 1, 6.73}, {1, 0.71,
7.49}, {1, 0.43, 8.46}, {1, 0.14, 9.74}, {1, -0.14,
11.51}, {1, -0.43, 14.05}, {1, -0.71, 18.05}, {1, -1, 24.24}, {0,
1, 4.03}, {0, 0.71, 4.49}, {0, 0.43, 5.08}, {0, 0.14,
5.85}, {0, -0.14, 6.91}, {0, -0.43, 8.43}, {0, -0.71,
10.83}, {0, -1, 14.44}, {-0.5, 1, 2.69}, {-0.5, 0.71,
2.99}, {-0.5, 0.43, 3.38}, {-0.5, 0.14, 3.9}, {-0.5, -0.14,
4.6}, {-0.5, -0.43, 5.62}, {-0.5, -0.71, 7.21}, {-0.5, -1, 9.79}}];
nlm3 = Nonlinear_Model_Fit[M,
g00 + g10 *x1 + g20 * x2 + g12* x1*x2 + g11* x1^2 + g22 *x2^2
+ g211* x2*x1^2 + g122 *x1*x2^2
+ g111* x1^3 + g222 *x2^3, {g00, g10, g20, g12, g11, g22, g211,
g122, g111, g222 }, {x1, x2}];
Normal[nlm3]
nlm3["ParameterTable"]
QQ3[x1_, x2_] :=
6.234366507549904` + 4.11160788310961` x1 - 3.641476769087104` x2 -
3.2280170900152143` x1 x2 + 2.9760152663502795` x2^2 +
1.9803163218784672` x1 x2^2 - 1.5902883549543916` x2^3
x10 = 15;
dx1 = 10;
x20 = 1.4;
dx2 = 1.4;
Q3[V_, \[CurlyEpsilon]_] :=
QQ3[(V - x10)/dx1, (\[CurlyEpsilon] - x20)/dx2];
Expand[Q3[V, \[CurlyEpsilon]]]
Expand[Q3[B5, D5]]
Opt = Find_Minimum[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]],
x10 - dx1 <= V <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= \[CurlyEpsilon] <= x20 + dx2}, {V,
x10 - dx1}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2}]

```

```

Vopt = V /. Last[Opt];
\[CurlyEpsilon]opt = \[CurlyEpsilon] /. Last[Opt];
Plot3D[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]]}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2,
  x20 + dx2}, {V, x10 - dx1, x10 + dx1}, PlotStyle -> {Green},
  AxesLabel -> {"!\(\)*
Style_Box[\["\[CurlyEpsilon]", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \n
FontSize->14, \nFont_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\),
  "\!\(\)*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box[\["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"], \n
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["", "\nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)", "\!\(\)*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box[\["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "out", "a"], \n
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["", "\nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)",
  Label_Style -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
  Mesh -> 20, Plot_Theme -> "Detailed", Plot_Legends -> Automatic,
  Plot_Range -> All]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії

швидкості насіння на виході V_p^{out}

```

M = {{0.5, 1, 3.95}, {0.5, 0.71, 4.19}, {0.5, 0.43, 4.69}, {0.5, 0.14,
  5.56}, {0.5, -0.14, 6.94}, {0.5, -0.43, 9.09}, {0.5, -0.71,
  12.64}, {0.5, -1, 19.11}, {-1, 1, 0.99}, {-1, 0.71, 1.04}, {-1,
  0.43, 1.17}, {-1, 0.14, 1.38}, {-1, -0.14, 1.73}, {-1, -0.43,
  2.27}, {-1, -0.71, 3.16}, {-1, -1, 4.78}, {1, 1, 4.93}, {1, 0.71,
  5.23}, {1, 0.43, 5.86}, {1, 0.14, 6.95}, {1, -0.14,
  8.66}, {1, -0.43, 11.36}, {1, -0.71, 15.79}, {1, -1, 23.89}, {0,
  1, 2.96}, {0, 0.71, 3.13}, {0, 0.43, 3.52}, {0, 0.14,
  4.17}, {0, -0.14, 5.2}, {0, -0.43, 6.81}, {0, -0.71,
  9.47}, {0, -1, 14.34}, {-0.5, 1, 1.98}, {-0.5, 0.71, 2.09}, {-0.5,
  0.43, 2.34}, {-0.5, 0.14, 2.78}, {-0.5, -0.14,
  3.46}, {-0.5, -0.43, 4.55}, {-0.5, -0.71, 6.31}, {-0.5, -1, 9.56}};
nlm3 = Nonlinear_Model_Fit[M,
  g00 + g10 *x1 + g20 * x2 + g12* x1*x2 + g11* x1^2 + g22 *x2^2
  + g211* x2*x1^2 + g122 *x1*x2^2
  + g111* x1^3 + g222 *x2^3, {g00, g10, g20, g12, g11, g22, g211,
  g122, g111, g222 }, {x1, x2}];
Normal[nlm3]
nlm3["ParameterTable"]
QQ3[x1_, x2_] :=
  4.4593716283762115` + 2.9798753396375335` x1 -
  3.3475946733090653` x2 - 3.4011822544773485` x1 x2 +
  4.07924569868949` x2^2 + 2.712551391850936` x1 x2^2 -
  2.3264538628008093` x2^3;
x10 = 15;
dx1 = 10;
x20 = 1.4;
dx2 = 1.4;
Q3[V_, \[CurlyEpsilon]_] :=
  QQ3[(V -x10)/dx1, (\[CurlyEpsilon] -x20)/dx2];
Expand[Q3[V, \[CurlyEpsilon]]]
Expand[Q3[B5, D5]]
Opt = Find_Minimum[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]],
  x10 - dx1 <= V <= x10 + dx1,
  x20 - dx2 <= \[CurlyEpsilon] <= x20 + dx2}, {V,
  x10 - dx1}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2}]
Vopt = V /. Last[Opt];
\[CurlyEpsilon]opt = \[CurlyEpsilon] /. Last[Opt];
Plot3D[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]]}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2,
  x20 + dx2}, {V, x10 - dx1, x10 + dx1}, PlotStyle -> {Orange},

```

```

AxesLabel -> {"!(\*
Style_Box["[CurlyEpsilon]",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\n
FontSize->14,\nFont_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),
"!(\*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"],\n
FontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["",",",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box[" ",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["m",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["^",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["c",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]), "!(\*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]], "out", "p"],\n
FontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["",",",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box[" ",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["m",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["^",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),!(\*
Style_Box["c",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]]),}],
Label_Style -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, Plot_Theme -> "Detailed", Plot_Legends -> Automatic,
Plot_Range -> All]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії
коефіцієнту зміни норми висіву η

```

M = {{0.5, 1, 1.19}, {0.5, 0.71, 1.1}, {0.5, 0.43, 1.08}, {0.5, 0.14,
1.04}, {0.5, -0.14, 1.02}, {0.5, -0.43, 1}, {0.5, -0.71,

```

```

0.99}, {0.5, -1, 0.99}, {-1, 1, 1.03}, {-1, 0.71, 1}, {-1, 0.43,
0.99}, {-1, 0.14, 0.99}, {-1, -0.14, 0.98}, {-1, -0.43,
0.98}, {-1, -0.71, 0.98}, {-1, -1, 0.99}, {1, 1, 1.28}, {1, 0.71,
1.12}, {1, 0.43, 1.07}, {1, 0.14, 1.01}, {1, -0.14,
1.01}, {1, -0.43, 0.98}, {1, -0.71, 0.99}, {1, -1, 1.02}, {0, 1,
1.15}, {0, 0.71, 1.05}, {0, 0.43, 1}, {0, 0.14, 1}, {0, -0.14,
0.99}, {0, -0.43, 0.98}, {0, -0.71, 0.98}, {0, -1, 0.97}, {-0.5,
1, 1.12}, {-0.5, 0.71, 1.05}, {-0.5, 0.43, 1}, {-0.5, 0.14,
1}, {-0.5, -0.14, 0.99}, {-0.5, -0.43, 0.99}, {-0.5, -0.71,
0.98}, {-0.5, -1, 0.98}}];
nlm3 = Nonlinear_Model_Fit[M,
g00 + g10 *x1 + g20 * x2 + g12* x1*x2 + g11* x1^2 + g22 *x2^2
+ g211* x2*x1^2 + g122 *x1*x2^2
+ g111* x1^3 + g222 *x2^3, {g00, g10, g20, g12, g11, g22, g211,
g122, g111, g222 }, {x1, x2}];
Normal[nlm3]
nlm3["ParameterTable"]
QQ3[x1_, x2_] :=
0.9943658168005904` + 0.03967453140827221` x2 +
0.04577431815521463` x1 x2 + 0.07188484553631597` x2^2 +
0.046774106360605` x1 x2^2 + 0.04551077832059101` x2^3
x10 = 15;
dx1 = 10;
x20 = 1.4;
dx2 = 1.4;
Q3[V_, \[CurlyEpsilon]_] :=
QQ3[(V -x10)/dx1, (\[CurlyEpsilon] -x20)/dx2];
Expand[Q3[V, \[CurlyEpsilon]]]
Expand[Q3[B5, D5]]
Opt = Find_Maximum[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]],
Q3[V, \[CurlyEpsilon]] <= 1.01, x10 - dx1 <= V <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= \[CurlyEpsilon] <= x20 + dx2}, {V,
x10 - dx1}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2}]
Vopt = V /. Last[Opt];
\[CurlyEpsilon]opt = \[CurlyEpsilon] /. Last[Opt];
Plot3D[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]], 1.01}, {V, x10 - dx1,
x10 + dx1}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2, x20 + dx2},
PlotStyle -> {Cyan, Directive[Opacity[0.3], Blue]},
AxesLabel -> {"!\[CurlyEpsilon]
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"], \n
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \nFont_Weight->"Normal\
", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\[CurlyEpsilon]
Style_Box["", "", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n

```

```

Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box[" ",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["m",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["^",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["c",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])", "\!(\(*
Style_Box["\[CurlyEpsilon]",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\n
FontSize->14,\nFont_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])",
"\!(\(*
Style_Box["\[Eta]",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\
\nFont_Weight->"Normal",\nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
Style_Box[" ",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.])"}],
Label_Style -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, Plot_Theme -> "Detailed", Plot_Legends -> Automatic,
Plot_Range -> All]
Show[
Plot3D[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]], {V, x10 - dx1,
x10 + dx1}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2, x20 + dx2},
PlotStyle -> {Cyan, Directive[Opacity[0.3]]},
AxesLabel -> {"\!(\(*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Plain",\nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"],\n
FontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\nFont_Weight->"Normal\
",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["",",,\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box[" ",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["m",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["^",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])\!(\(*
Style_Box["c",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n
Font_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])", "\!(\(*
Style_Box["\[CurlyEpsilon]",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\n
FontSize->14,\nFont_Weight->"Normal",\nFont_Color->Gray_Level[0])",
"\!(\(*
Style_Box["\[Eta]",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\
\nFont_Weight->"Normal",\nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
Style_Box[" ",\nFontFamily->"Times_New_Roman",\nFontSize->14,\n

```

```

Font_Weight->\"Normal\", \nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.]\"),
Label_Style ->
Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times",
Plot_Legends -> "Expressions"], Mesh -> 20,
Plot_Theme -> "Detailed", Plot_Range -> All],
Plot3D[{Q3[V, \[CurlyEpsilon]]}, {V, x10 - dx1,
x10 + dx1}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2, x20 + dx2},
PlotStyle -> {Cyan},
RegionFunction -> Function[{x, y, z}, Q3[x, y] <= 1.01]]
]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для вирішення компромісної задачі

```

NN[V_, \[CurlyEpsilon]_] :=
0.9795656702999577` + 0.00009997882053903659` V +
0.07435572653314737` \[CurlyEpsilon] -
0.0034124210404282407` V \[CurlyEpsilon] -
0.06877992294202272` \[CurlyEpsilon]^2 +
0.002386433997990051` V \[CurlyEpsilon]^2 +
0.01658556061246028` \[CurlyEpsilon]^3;
Vp[V_, \[CurlyEpsilon]_] :=
0.572252384226847` + 0.9093608985965819` V -
3.747157215586886` \[CurlyEpsilon] -
0.6304489312985158` V \[CurlyEpsilon] +
3.5662143874058736` \[CurlyEpsilon]^2 +
0.13839547917606818` V \[CurlyEpsilon]^2 -
0.8478330403793037` \[CurlyEpsilon]^3;
Va[V_, \[CurlyEpsilon]_] :=
0.46223495543674176` + 0.9319941295003291` V -
2.5581412614232963` \[CurlyEpsilon] -
0.5134749809837249` V \[CurlyEpsilon] +
2.436941759385588` \[CurlyEpsilon]^2 +
0.10103654703461568` V \[CurlyEpsilon]^2 -
0.57955114976472` \[CurlyEpsilon]^3;
NN[B5, D5]
Vp[B5, D5]
x10 = 15;
dx1 = 10;
x20 = 1.4;
dx2 = 1.4;
Show[
Plot3D[{Vp[V, \[CurlyEpsilon]]}, {\[CurlyEpsilon], x20 - dx2,
x20 + dx2}, {V, x10 - dx1, x10 + dx1}, PlotStyle -> Opacity[0.3],

```

```

AxesLabel -> {"\!(\(*
Style_Box["\[CurlyEpsilon]", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \n\
FontSize->14, \nFont_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]])",
"\!(\(*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"], \n\
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \nFont_Weight->"Normal\
", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]])", "\!(\(*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "out", "p"], \n\
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]])\!(\(*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.]])"}],
Label_Style ->
Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times",
Plot_Legends -> "Expressions"], Mesh -> 20,
Plot_Theme -> "Detailed", Plot_Range -> All],
Plot3D[{Vp[V, [CurlyEpsilon]], {[CurlyEpsilon], x20 - dx2,
x20 + dx2}, {V, x10 - dx1, x10 + dx1},
RegionFunction -> Function[{x, y, z}, NN[y, x] <= 1.01]]
]
M1 = Array[opt, {21, 2}, {x10 - dx1, 1}];

```

```

For[i = x10 - dx1, i <= x10 + dx1, i++,
  Opt = Find_Minimum[{ Vp[i, \[CurlyEpsilon]],
    NN[i, \[CurlyEpsilon]] < 1.01,
    x20 - dx2 <= \[CurlyEpsilon] <= x20 + dx2}, {\[CurlyEpsilon],
    x20 - 0 dx2}];
  opte[i, 1] = i;
  opte[i, 2] = \[CurlyEpsilon] /. Last[Opt];
]
opte[5, 2] = 2.26;
opte[6, 2] = 2.15;
nlm3 = Nonlinear_Model_Fit[M1,
  a0 + a1 *V + a2 * V^2 + a3 * V^3, {a0, a1, a2, a3 }, {V}];
opte[5, 2]
opte[25, 2]
EE[V_] := Normal[nlm3];
EE[V]
Show[Plot[EE[V], {V, x10 - dx1, x10 + dx1},
  AxesLabel -> {"\!\(\)*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"], \n\
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \nFont_Weight->"Normal\
", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["", "\nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\)*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]", "\!\(\)*
Style_Box["\[Eta]", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
\nFont_Weight->"Normal", \nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\)*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\)",
  Label_Style ->
  Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times",
  Plot_Legends -> "Expressions"], GridLines -> {Automatic},
  Plot_Range -> All], ListPlot[M1, Plot_Range -> All]]
M2 = Array[optV, {21, 2}, {x10 - dx1, 1}];
For[i = x10 - dx1, i <= x10 + dx1, i++,
  optV[i, 1] = i;
  optV[i, 2] = Vp[i, opte[i, 2]];

```

```

]
optV[5, 2]
optV[25, 2]
nlm4 = Nonlinear_Model_Fit[M2,
  a0 + a1 *V + a2 * V^2 + a3 * V^3, {a0, a1, a2, a3 }, {V}];
VV[V_] := Normal[nlm4];
VV[V]
Show[Plot[{VV[V]}, {V, x10 - dx1, x10 + dx1 },
  AxesLabel -> {"V"},
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "in", "a"], \n\
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \nFont_Weight->"Normal\
", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["", "\", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\), "\!\(\(*
Style_Box[SubsuperscriptBox[
Style_Box["V", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]], "out", "p"], \n\
FontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["", "\", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["m", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["^", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box["c", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Plain", \nFont_Color->Gray_Level[0]]\)\!\(\(*
Style_Box[" ", \nFontFamily->"Times_New_Roman", \nFontSize->14, \n\
Font_Weight->"Normal", \nFont_Color->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\),
Label_Style ->
  Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times",
  Plot_Legends -> "Expressions"], GridLines -> {Automatic},
Plot_Range -> All], ListPlot[M2, Plot_Range -> All]]

```

```
M3 = Array[optVa, {21, 2}, {x10 - dx1, 1}];
For[i = x10 - dx1, i <= x10 + dx1, i++,
  optVa[i, 1] = i;
  optVa[i, 2] = Va[i, opte[i, 2]];
]
optVa[5, 2]
optVa[25, 2]
nlm5 = Nonlinear_Model_Fit[M2,
  a0 + a1 *V + a2 * V^2 + a3 * V^3, {a0, a1, a2, a3 }, {V}];
VVa[V_] := Normal[nlm5];
VVa[V]
```

Додаток В

Розрахунок траєкторії руху насінини від висівного башмака до дна борозенки
в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

g=9.81;
Ks=0.4;
Ku=0.6;
x0=0;
y0=0.15;
Vs=2;
i=0;
α=20Pi/180;
β=2Pi/180;
Vp0=6;
H2=0.16;
For[H2=0.02,H2<=0.20,H2=H2+0.02,
For[β=0Pi/180,β<=18Pi/180,β=β+2Pi/180,
(*For[Vp0=4,Vp0<=20,Vp0=Vp0+4,
For[α=5Pi/180,α<=60Pi/180,α=α+5Pi/180,*)
i=i+1;
x1[t01_]:=x0+Vp0 Cos[α]t01;
y1[t01_]:=y0-Vp0 Sin[α]t01-g t01^2/2;
sol1=Solve[y1[t01]==0&&t01>=0,t01];
t01sol1=t01/.First[sol1];
Vp1x[t01_]:=Vp0 Cos[α];
Vp1y[t01_]:=-Vp0 Sin[α]-g t01;
Vp1[t01_]:=Sqrt[Vp1x[t01]^2+Vp1y[t01]^2]^0.5;
Vp1xl=Ks Vp1x[t01sol1]+Vs;
Vp1yl=-Ks Vp1y[t01sol1];
Vp1l=Sqrt[Vp1xl^2+Vp1yl^2]^0.5;
x2[t12_]:=x1[t01sol1]+Vp1xl t12;
y2[t12_]:=y1[t01sol1]+Vp1yl t12-g t12^2/2;
max1=Find_Maximum[y2[t12],{t12,0}];
t12max1=t12/.Last[max1];
If[y2[t12max1]<H2,
{sol2=Solve[y2[t12]==0&&t12>=0,t12],
t12sol2=t12/.Last[sol2],
t12max1=t12max1,
yu[xu_]:=-xu Tan[β]+(H2+x2[t12max1] Tan[β]),
Vp2x[t12_]:=Vp1xl,
Vp2y[t12_]:=Vp1yl -g t12,
Vp2[t12_]:=Sqrt[Vp2x[t12]^2+Vp2y[t12]^2]^0.5,
Vp2xl=Ks Vp2x[t12sol2]+Vs;

```

```

Vp2yl=-Ks Vp2y[t12sol2];
x3[t23_]:=x2[t12sol2]+Vp2xl t23,
y3[t23_]:=y2[t12sol2]+Vp2yl t23-g t23^2/2,
sol3=Solve[y3[t23]==0&&t23>=0,t23],
t23sol3=t23/.Last[sol3]
},
{sol2=Solve[y2[t12]==H2&&t12>=0,t12],
t12sol2=t12/.First[sol2],
t12max1=t12sol2,
yu[xu_]:=-xu Tan[β]+(y2[t12max1]+x2[t12max1] Tan[β]),
Vp2x[t12_]:=Vp1xl ,
Vp2y[t12_]:=Vp1yl -g t12,
Vp2[t12_]:= (Vp2x[t12]^2+Vp2y[t12]^2)^0.5,
θ=β+ArcCos[Vp2x[t12sol2]/Vp2[t12sol2]],
Vp2xl=Ku Vp2[t12sol2] Cos[θ+β],
Vp2yl=-Ku Vp2[t12sol2] Sin[θ+β],
x3[t23_]:=x2[t12sol2]+Vp2xl t23,
y3[t23_]:=y2[t12sol2]+Vp2yl t23-g t23^2/2,
sol3=Solve[y3[t23]==0&&t23>=0,t23],
t23sol3=t23/.First[sol3]
}];
xs[t12_]:=x1[t01sol1]+Vp1xl t12;
ys[t12_]:=0;
Vp3x[t23_]:=Vp2xl ;
Vp3y[t23_]:=Vp2yl -g t23;
Vp3[t23_]:= (Vp3x[t23]^2+Vp3y[t23]^2)^0.5;
Vp3xl=Ks Vp3x[t23sol3]+Vs;
Vp3yl=-Ks Vp3y[t23sol3];
x4[t34_]:=x3[t23sol3]+Vp3xl t34;
y4[t34_]:=y3[t23sol3]+Vp3yl t34-g t34^2/2;
sol4=Solve[y4[t34]==0&&t34>=0,t34];
t34sol4=t34/.Last[sol4];
max2=Find_Maximum[y4[t34],{t34,0}];
t34max2=t34/.Last[max2];
M1x[i,1] = N[β 180/Pi];
M1x[i,2] =H2;
M1x[i,3] = xs[t12sol2+t23sol3+t34sol4]-x4[t34max2];
M1y[i,1] = N[β 180/Pi];
M1y[i,2] =H2;
M1y[i,3] = y4[t34max2];
]
]
i=0;
α=20Pi/180;
β=2Pi/180;

```

```

Vp0=12;
H2=0.16;
For[H2=0.02,H2<=0.20,H2=H2+0.02,
For[β=0Pi/180,β<=18Pi/180,β=β+2Pi/180,
(*For[Vp0=4,Vp0<=20,Vp0=Vp0+4,
For[α=5Pi/180,α<=60Pi/180,α=α+5Pi/180,*)
i=i+1;
x1[t01_]:=x0+Vp0 Cos[α]t01;
y1[t01_]:=y0-Vp0 Sin[α]t01-g t01^2/2;
sol1=Solve[y1[t01]==0&&t01>=0,t01];
t01sol1=t01/.First[sol1];
Vp1x[t01_]:=Vp0 Cos[α];
Vp1y[t01_]:=-Vp0 Sin[α]-g t01;
Vp1[t01_]:=Sqrt[Vp1x[t01]^2+Vp1y[t01]^2];
Vp1xl=Ks Vp1x[t01sol1]+Vs;
Vp1yl=-Ks Vp1y[t01sol1];
Vp1l=Sqrt[Vp1xl^2+Vp1yl^2];
x2[t12_]:=x1[t01sol1]+Vp1xl t12;
y2[t12_]:=y1[t01sol1]+Vp1yl t12-g t12^2/2;
max1=Find_Maximum[y2[t12],{t12,0}];
t12max1=t12/.Last[max1];
If[y2[t12max1]<H2,
{sol2=Solve[y2[t12]==0&&t12>=0,t12],
t12sol2=t12/.Last[sol2],
t12max1=t12max1,
yu[xu_]:=-xu Tan[β]+(H2+x2[t12max1] Tan[β]),
Vp2x[t12_]:=Vp1xl,
Vp2y[t12_]:=Vp1yl -g t12,
Vp2[t12_]:=Sqrt[Vp2x[t12]^2+Vp2y[t12]^2];
Vp2xl=Ks Vp2x[t12sol2]+Vs;
Vp2yl=-Ks Vp2y[t12sol2];

x3[t23_]:=x2[t12sol2]+Vp2xl t23,
y3[t23_]:=y2[t12sol2]+Vp2yl t23-g t23^2/2,
sol3=Solve[y3[t23]==0&&t23>=0,t23],
t23sol3=t23/.Last[sol3]
},
{sol2=Solve[y2[t12]==H2&&t12>=0,t12],
t12sol2=t12/.First[sol2],
t12max1=t12sol2,
yu[xu_]:=-xu Tan[β]+(y2[t12max1]+x2[t12max1] Tan[β]),
Vp2x[t12_]:=Vp1xl,
Vp2y[t12_]:=Vp1yl -g t12,
Vp2[t12_]:=Sqrt[Vp2x[t12]^2+Vp2y[t12]^2];
θ=β+ArcCos[Vp2x[t12sol2]/Vp2[t12sol2]],

```

```

Vp2x1=Ku Vp2[t12sol2] Cos[θ+β],
Vp2y1=-Ku Vp2[t12sol2] Sin[θ+β],
x3[t23_]:=x2[t12sol2]+Vp2x1 t23,
y3[t23_]:=y2[t12sol2]+Vp2y1 t23-g t23^2/2,
sol3=Solve[y3[t23]==0&&t23>=0,t23],
t23sol3=t23/.First[sol3]
}];
xs[t12_]:=x1[t01sol1]+Vp1x1 t12;
ys[t12_]:=0;
Vp3x[t23_]:=Vp2x1 ;
Vp3y[t23_]:=Vp2y1 -g t23;
Vp3[t23_]:=((Vp3x[t23]^2+Vp3y[t23]^2)^0.5);
Vp3x1=Ks Vp3x[t23sol3]+Vs;
Vp3y1=-Ks Vp3y[t23sol3];
x4[t34_]:=x3[t23sol3]+Vp3x1 t34;
y4[t34_]:=y3[t23sol3]+Vp3y1 t34-g t34^2/2;
sol4=Solve[y4[t34]==0&&t34>=0,t34];
t34sol4=t34/.Last[sol4];
max2=Find_Maximum[y4[t34],{t34,0}];
t34max2=t34/.Last[max2];
M2x[i,1] = N[β 180/Pi];
M2x[i,2] =H2;
M2x[i,3] = xs[t12sol2+t23sol3+t34sol4]-x4[t34max2];
M2y[i,1] = N[β 180/Pi];
M2y[i,2] =H2;
M2y[i,3] = y4[t34max2];
]
]
i=0;
α=20Pi/180;
β=2Pi/180;
Vp0=18;
H2=0.16;
For[H2=0.02,H2<=0.20,H2=H2+0.02,
For[β=0Pi/180,β<=18Pi/180,β=β+2Pi/180,
(*For[Vp0=4,Vp0<=20,Vp0=Vp0+4,
For[α=5Pi/180,α<=60Pi/180,α=α+5Pi/180,*)
i=i+1;
x1[t01_]:=x0+Vp0 Cos[α]t01;
y1[t01_]:=y0-Vp0 Sin[α]t01-g t01^2/2;
sol1=Solve[y1[t01]==0&&t01>=0,t01];
t01sol1=t01/.First[sol1];
Vp1x[t01_]:=Vp0 Cos[α];
Vp1y[t01_]:=-Vp0 Sin[α]-g t01;
Vp1[t01_]:=((Vp1x[t01]^2+Vp1y[t01]^2)^0.5;

```

```

Vp1xl=Ks Vp1x[t01sol1]+Vs;
Vp1yl=-Ks Vp1y[t01sol1];
Vp1l=(Vp1xl^2+Vp1yl^2)^0.5;
x2[t12_]:=x1[t01sol1]+Vp1xl t12;
y2[t12_]:=y1[t01sol1]+Vp1yl t12-g t12^2/2;
max1=Find_Maximum[y2[t12],{t12,0}];
t12max1=t12/.Last[max1];
If[y2[t12max1]<H2,
{sol2=Solve[y2[t12]==0&&t12>=0,t12],
t12sol2=t12/.Last[sol2],
t12max1=t12max1,
yu[xu_]:=-xu Tan[β]+(H2+x2[t12max1] Tan[β]),
Vp2x[t12_]:=Vp1xl ,
Vp2y[t12_]:=Vp1yl -g t12,
Vp2[t12_]:= (Vp2x[t12]^2+Vp2y[t12]^2)^0.5,
Vp2xl=Ks Vp2x[t12sol2]+Vs;
Vp2yl=-Ks Vp2y[t12sol2];
x3[t23_]:=x2[t12sol2]+Vp2xl t23,
y3[t23_]:=y2[t12sol2]+Vp2yl t23-g t23^2/2,
sol3=Solve[y3[t23]==0&&t23>=0,t23],
t23sol3=t23/.Last[sol3]
},
{sol2=Solve[y2[t12]==H2&&t12>=0,t12],
t12sol2=t12/.First[sol2],
t12max1=t12sol2,
yu[xu_]:=-xu Tan[β]+(y2[t12max1]+x2[t12max1] Tan[β]),
Vp2x[t12_]:=Vp1xl ,
Vp2y[t12_]:=Vp1yl -g t12,
Vp2[t12_]:= (Vp2x[t12]^2+Vp2y[t12]^2)^0.5,
θ=β+ArcCos[Vp2x[t12sol2]/Vp2[t12sol2]],
Vp2xl=Ku Vp2[t12sol2] Cos[θ+β],
Vp2yl=-Ku Vp2[t12sol2] Sin[θ+β],
x3[t23_]:=x2[t12sol2]+Vp2xl t23,
y3[t23_]:=y2[t12sol2]+Vp2yl t23-g t23^2/2,
sol3=Solve[y3[t23]==0&&t23>=0,t23],
t23sol3=t23/.First[sol3]
}];
xs[t12_]:=x1[t01sol1]+Vp1xl t12;
ys[t12_]:=0;
Vp3x[t23_]:=Vp2xl ;
Vp3y[t23_]:=Vp2yl -g t23;
Vp3[t23_]:= (Vp3x[t23]^2+Vp3y[t23]^2)^0.5;
Vp3xl=Ks Vp3x[t23sol3]+Vs;
Vp3yl=-Ks Vp3y[t23sol3];
x4[t34_]:=x3[t23sol3]+Vp3xl t34;

```

```

y4[t34_]:=y3[t23sol3]+Vp3yl t34-g t34^2/2;
sol4=Solve[y4[t34]==0&&t34>=0,t34];
t34sol4=t34/.Last[sol4];
max2=Find_Maximum[y4[t34],{t34,0}];
t34max2=t34/.Last[max2];
M3x[i,1] = N[β 180/Pi];
M3x[i,2] =H2;
M3x[i,3] = xs[t12sol2+t23sol3+t34sol4]-x4[t34max2];
M3y[i,1] = N[β 180/Pi];
M3y[i,2] =H2;
M3y[i,3] = y4[t34max2];
]
]
ListPlot3D[{Array[M1x,{100,3}],Array[M2x,{100,3}],Array[M3x,{100,3}]},InterpolationOrder->1,PlotStyle->{Green,Orange, Magenta}, AxesLabel->{"β, °","H_u, M", "Δx, m"},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
ListPlot3D[{Array[M1y,{100,3}],Array[M2y,{100,3}],Array[M3y,{100,3}]},InterpolationOrder->1,PlotStyle->{Green,Orange, Magenta}, AxesLabel->{"β, °","H_u, M", "y_3, m"},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
Print[H2,"\t",N[β],"\t",Vp0,"\t",N[α],"\t",
y4[t34max2]-
H2,"\t",xs[t12sol2+t23sol3+t34sol4]-x4[t34max2]];
Show[
ParametricPlot[{x1[t],y1[t]},{t,0,t01sol1},PlotStyle->{Green}],
ParametricPlot[{x2[t],y2[t]},{t,0,t12sol2},PlotStyle->{Red}],
ParametricPlot[{x3[t],y3[t]},{t,0,t23sol3},PlotStyle->{Orange}],
ParametricPlot[{x4[t],y4[t]},{t,0,t34sol4},PlotStyle->{Yellow}],
ParametricPlot[{xs[t],ys[t]},{t,0,t12sol2+t23sol3+t34sol4},PlotStyle->{Blue}],
ParametricPlot[{xu,yu[xu]},{xu,x2[t12max1]-0.05,x2[t12max1]+0.05},PlotStyle->{Black}],
Plot_Range->All]

```

Додаток Г

Результати симуляції коливань заспокоювача насіння

№	T _f , ММ	H _f , ММ	L _f , ММ	ABS		Поліамід 6		Двокомпонентний поліуретан	
				σ_{fmax} , МПа	k _f	σ_{fmax} , МПа	k _f	σ_{fmax} , МПа	k _f
1	5	5	5	19,91	1,01	33,28	1,59	7,37	0,75
2	5,5	5	5	18,39	1,37	31,32	1,97	6,83	1,03
3	6	5	5	16,04	1,79	27,88	2,49	6,15	1,22
4	6,5	5	5	13,77	2,07	23,34	2,98	5,52	1,48
5	7	5	5	11,76	2,27	19,05	3,31	4,85	1,65
6	7,5	5	5	10,43	2,38	17,89	3,39	4,00	1,81
7	8	5	5	12,63	2,19	22,18	3,08	4,47	1,72
8	5	15	5	20,79	0,94	39,31	1,13	7,87	0,67
9	5,5	15	5	18,81	1,33	36,54	1,59	6,80	1,06
10	6	15	5	15,92	1,74	32,33	2,10	5,88	1,33
11	6,5	15	5	13,85	1,94	27,91	2,49	5,15	1,60
12	7	15	5	11,55	2,13	23,56	2,77	4,74	1,68
13	7,5	15	5	11,37	2,14	19,12	3,14	4,03	1,79
14	8	15	5	12,66	1,99	22,95	2,80	4,37	1,74
15	5	25	5	31,51	0,43	54,27	0,64	12,88	0,21
16	5,5	25	5	29,89	0,60	49,42	0,95	11,73	0,43
17	6	25	5	26,72	0,85	44,38	1,18	10,36	0,54
18	6,5	25	5	21,87	1,12	39,12	1,52	9,20	0,70
19	7	25	5	19,35	1,23	35,02	1,66	7,96	0,89
20	7,5	25	5	16,18	1,36	27,78	2,00	6,20	0,99
21	8	25	5	18,14	1,27	33,82	1,70	6,85	0,94
22	5	5	15	18,04	1,16	30,84	1,76	6,98	0,93
23	5,5	5	15	16,52	1,43	28,17	2,08	6,32	1,11
24	6	5	15	14,25	1,76	24,94	2,40	5,65	1,27
25	6,5	5	15	12,75	2,09	21,67	2,78	5,04	1,46
26	7	5	15	11,25	2,19	19,64	2,98	4,68	1,65
27	7,5	5	15	10,11	2,25	18,71	3,22	4,17	1,72
28	8	5	15	10,53	2,11	20,05	3,12	4,43	1,57
29	5	15	15	16,99	1,14	33,18	1,67	7,39	0,74
30	5,5	15	15	15,41	1,45	30,22	2,05	6,91	0,99
31	6	15	15	13,03	1,78	27,34	2,38	6,25	1,21
32	6,5	15	15	11,58	2,10	23,71	2,74	5,70	1,43
33	7	15	15	10,79	2,27	20,53	3,01	4,86	1,64
34	7,5	15	15	10,13	2,14	18,52	3,26	4,00	1,81
35	8	15	15	11,50	2,00	20,71	3,18	4,27	1,76
36	5	25	15	19,39	1,05	33,02	1,51	6,78	0,86

№	T _f , ММ	H _f , ММ	L _f , ММ	ABS		Поліамід 6		Двокомпонентний поліуретан	
				σ _{fmax} , МПа	k _f	σ _{fmax} , МПа	k _f	σ _{fmax} , МПа	k _f
37	5,5	25	15	17,67	1,30	28,93	1,81	6,48	1,10
38	6	25	15	14,80	1,59	25,16	2,21	5,80	1,37
39	6,5	25	15	13,91	1,89	23,02	2,61	5,32	1,52
40	7	25	15	12,35	1,99	21,11	2,86	4,37	1,75
41	7,5	25	15	11,52	2,11	19,73	3,03	4,27	1,77
42	8	25	15	12,75	1,99	20,06	2,90	4,49	1,72
43	5	5	25	18,47	1,13	31,66	1,70	6,25	0,98
44	5,5	5	25	16,15	1,60	27,99	2,13	5,62	1,15
45	6	5	25	14,03	1,93	24,12	2,48	4,97	1,42
46	6,5	5	25	11,90	2,17	20,47	2,94	4,36	1,62
47	7	5	25	10,82	2,27	18,81	3,23	3,70	1,80
48	7,5	5	25	10,93	2,26	18,58	3,24	3,86	1,76
49	8	5	25	11,84	2,18	21,13	3,05	4,09	1,70
50	5	15	25	19,41	1,05	32,83	1,62	6,33	0,96
51	5,5	15	25	17,96	1,35	29,41	2,00	5,62	1,17
52	6	15	25	15,70	1,58	25,71	2,40	5,01	1,43
53	6,5	15	25	13,70	1,86	23,38	2,83	4,65	1,64
54	7	15	25	11,60	2,07	19,90	3,10	4,12	1,77
55	7,5	15	25	10,13	2,20	19,00	3,16	4,02	1,80
56	8	15	25	11,49	2,08	21,70	2,97	4,33	1,62
57	5	25	25	18,74	1,08	35,91	1,68	7,56	0,68
58	5,5	25	25	17,23	1,39	32,94	1,96	6,77	0,87
59	6	25	25	15,57	1,69	29,17	2,25	6,19	1,01
60	6,5	25	25	13,96	1,95	26,33	2,65	5,66	1,17
61	7	25	25	12,30	2,12	22,93	2,92	5,16	1,30
62	7,5	25	25	11,48	2,09	19,56	3,06	4,47	1,57
63	8	25	25	12,67	1,90	20,35	2,78	4,83	1,51

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії

максимального значення напруження σ_{fmax}

```
M1={{-1,-1,-1,19.9143},{-0.6666666666666667,-1,-1,18.39375},{-0.3333333333333333,-1,-1,16.03935},{0,-1,-1,13.77324},{0.3333333333333333,-1,-1,11.76219},{0.6666666666666667,-1,-1,10.42803},{1,-1,-1,12.62547},{-1,0,-1,20.78739},{-0.6666666666666667,0,-1,18.80577},{-0.3333333333333333,0,-1,15.92163},{0,0,-1,13.85172},{0.3333333333333333,0,-1,11.54637},{0.6666666666666667,0,-1,11.36979},{1,0,-1,12.66347},{-1,1,-1,31.5056},{-0.6666666666666667,1,-1,29.88695},{-0.3333333333333333,1,-1,26.71832},{0,1,-1,21.87218},{0.3333333333333333,1,-
```

```

1,19.35101},{0.6666666666666667,1,-1,16.17669},{1,1,-1,18.14438},{-1,-
1,0,18.04059},{-0.6666666666666667,-1,0,16.52446},{-0.3333333333333333,-
1,0,14.24854},{0,-1,0,12.74699},{0.3333333333333333,-
1,0,11.24699},{0.6666666666666667,-1,0,10.10872},{1,-1,0,10.53055},{-
1,0,0,16.99092},{-0.6666666666666667,0,0,15.40802},{-
0.3333333333333333,0,0,13.034},{0,0,0,11.5815},{0.3333333333333333,0,0,10.78
751},{0.6666666666666667,0,0,10.13024},{1,0,0,11.50178},{-1,1,0,19.39437},{-
0.6666666666666667,1,0,17.66843},{-
0.3333333333333333,1,0,14.80329},{0,1,0,13.91058},{0.3333333333333333,1,0,12
.35172},{0.6666666666666667,1,0,11.51694},{1,1,0,12.75238},{-1,-
1,1,18.47223},{-0.6666666666666667,-1,1,16.14629},{-0.3333333333333333,-
1,1,14.0283},{0,-1,1,11.90015},{0.3333333333333333,-
1,1,10.82043},{0.6666666666666667,-1,1,10.92834},{1,-1,1,11.84067},{-
1,0,1,19.41399},{-0.6666666666666667,0,1,17.96273},{-
0.3333333333333333,0,1,15.69662},{0,0,1,13.70457},{0.3333333333333333,0,1,11
.59604},{0.6666666666666667,0,1,10.13435},{1,0,1,11.48813},{-
1,1,1,18.7371},{-0.6666666666666667,1,1,17.22698},{-
0.3333333333333333,1,1,15.57068},{0,1,1,13.95901},{0.3333333333333333,1,1,12
.30174},{0.6666666666666667,1,1,11.4777},{1,1,1,12.67204}};
nlm1=Nonlinear_Model_Fit[M1,g00+g10 *x1+g20 * x2+g30 *x3+
  g12* x1*x2+g13 *x1*x3+g23* x2*x3+
  g11* x1^2+g22 *x2^2+g33 *x3^2,{g00,g10,g20,g30,g12,g13, g23,g11,g22,g33
},{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm1]
"Критерій Стюдента"
nlm1["ParameterTable"]
M2={{-1,-1,-1,33.27552},{-0.6666666666666667,-1,-1,31.32333},{-
0.3333333333333333,-1,-1,27.88002},{0,-1,-1,23.33799},{0.3333333333333333,-
1,-1,19.05102},{0.6666666666666667,-1,-1,17.89344},{1,-1,-1,22.175505},{-1,0,-
1,39.310475},{-0.6666666666666667,0,-1,36.53915},{-0.3333333333333333,0,-
1,32.33066},{0,0,-1,27.90635},{0.3333333333333333,0,-
1,23.555615},{0.6666666666666667,0,-1,19.11969},{1,0,-1,22.947395},{-1,1,-
1,54.2741},{-0.6666666666666667,1,-1,49.42032},{-0.3333333333333333,1,-
1,44.383195},{0,1,-1,39.11765},{0.3333333333333333,1,-
1,35.021975},{0.6666666666666667,1,-1,27.78192},{1,1,-1,33.815345},{-1,-
1,0,30.837735},{-0.6666666666666667,-1,0,28.170655},{-0.3333333333333333,-
1,0,24.943165},{0,-1,0,21.665385},{0.3333333333333333,-
1,0,19.64086},{0.6666666666666667,-1,0,18.70767},{1,-1,0,20.046735},{-
1,0,0,33.179225},{-0.6666666666666667,0,0,30.22275},{-
0.3333333333333333,0,0,27.343205},{0,0,0,23.712575},{0.3333333333333333,0,0,
20.5314},{0.6666666666666667,0,0,18.516375},{1,0,0,20.70581},{-
1,1,0,33.015555},{-0.6666666666666667,1,0,28.926955},{-
0.3333333333333333,1,0,25.157745},{0,1,0,23.02469},{0.3333333333333333,1,0,2
1.108385},{0.6666666666666667,1,0,19.72791},{1,1,0,20.06145},{-1,-

```

```
1,1,31.65687},{-0.666666666666667,-1,1,27.994695},{-0.333333333333333,-
1,1,24.12279},{0,-1,1,20.469805},{0.333333333333333,-
1,1,18.80577},{0.666666666666667,-1,1,18.58014},{1,-1,1,21.13074},{-
1,0,1,32.83407},{-0.666666666666667,0,1,29.41224},{-
0.333333333333333,0,1,25.71418},{0,0,1,23.37723},{0.333333333333333,0,1,19
.899585},{0.666666666666667,0,1,18.997065},{1,0,1,21.69972},{-
1,1,1,35.907025},{-0.666666666666667,1,1,32.94105},{-
0.333333333333333,1,1,29.17432},{0,1,1,26.332465},{0.333333333333333,1,1,2
2.92504},{0.666666666666667,1,1,19.556235},{1,1,1,20.35296}};
nlm2=Nonlinear_Model_Fit[M2,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[nlm2]
"Критерій Стюдента"
nlm2["ParameterTable"]
M3={{-1,-1,-1,7.368291},{-0.666666666666667,-1,-1,6.833646},{-
0.333333333333333,-1,-1,6.145717},{0,-1,-1,5.520087},{0.333333333333333,-
1,-1,4.852026},{0.666666666666667,-1,-1,4.000518},{1,-1,-1,4.474341},{-1,0,-
1,7.874487},{-0.666666666666667,0,-1,6.800292},{-0.333333333333333,0,-
1,5.875942},{0,0,-1,5.148288},{0.333333333333333,0,-
1,4.737249},{0.666666666666667,0,-1,4.027986},{1,0,-1,4.369374},{-1,1,-
1,12.88126},{-0.666666666666667,1,-1,11.728957},{-0.333333333333333,1,-
1,10.357147},{0,1,-1,9.20092},{0.333333333333333,1,-
1,7.960203},{0.666666666666667,1,-1,6.202863},{1,1,-1,6.851053},{-1,-
1,0,6.983429},{-0.666666666666667,-1,0,6.318621},{-0.333333333333333,-
1,0,5.652252},{0,-1,0,5.044364},{0.333333333333333,-
1,0,4.680661},{0.666666666666667,-1,0,4.167288},{1,-1,0,4.43381},{-
1,0,0,7.388024},{-0.666666666666667,0,0,6.912239},{-
0.333333333333333,0,0,6.252697},{0,0,0,5.699723},{0.333333333333333,0,0,4.
862445},{0.666666666666667,0,0,3.999537},{1,0,0,4.271387},{-
1,1,0,6.780672},{-0.666666666666667,1,0,6.48441},{-
0.333333333333333,1,0,5.800653},{0,1,0,5.321925},{0.333333333333333,1,0,4.
369374},{0.666666666666667,1,0,4.268331},{1,1,0,4.485132},{-1,-
1,1,6.24897},{-0.666666666666667,-1,1,5.616535},{-0.333333333333333,-
1,1,4.968094},{0,-1,1,4.364779},{0.333333333333333,-
1,1,3.700642},{0.666666666666667,-1,1,3.856621},{1,-1,1,4.086175},{-
1,0,1,6.328431},{-0.666666666666667,0,1,5.619478},{-
0.333333333333333,0,1,5.007024},{0,0,1,4.647978},{0.333333333333333,0,1,4.
12241},{0.666666666666667,0,1,4.016214},{1,0,1,4.327924},{-
1,1,1,7.562704},{-0.666666666666667,1,1,6.765647},{-
0.333333333333333,1,1,6.193538},{0,1,1,5.656931},{0.333333333333333,1,1,5.
158831},{0.666666666666667,1,1,4.469436},{1,1,1,4.829452}};
nlm3=Nonlinear_Model_Fit[M3,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[nlm3]
"Критерій Стюдента"
nlm3["ParameterTable"]
θ1[x1_,x2_,x3_] :=11.394233121693125` -4.439461309523807`
x1+2.4369386904761847` x1^2+1.8447264285714282` x2+1.66106166666666758`
x2^2-1.79665499999999986` x3+0.9023126785714277` x1 x3-
1.8896414285714238` x2 x3+2.310920238095229` x3^2
θ2[x1_,x2_,x3_] :=21.711896772486774` -7.818044940476187`
x1+3.995093154761896` x1^2+3.340867857142858` x2+1.1434904761904947`
x2^2-3.2994445238095214` x3+1.433083839285715` x1 x3-3.0160498214285694`
x2 x3+3.901242619047604` x3^2
θ3[x1_,x2_,x3_] :=4.709919243386244` -1.6882636309523804`
x1+0.6334986309523788` x1^2+0.8098231428571432` x2+0.6682868571428605`
x2^2-0.8491150714285708` x3+0.5211603749999999` x1 x3-
0.6497519285714274` x2 x3+0.5334407857142837` x3^2
x10=6.5;
dx1=1.5;
x20=15;
dx2=10;
x30=15;
dx3=10;
θ01 [ T_,H_,L_] := θ1 [ (T-x10)/ dx1 , (H-x20)/ dx2 , (L - x30 )/ dx3 ];
Expand[ θ01 [T , H ,L ] ]
θ02 [ T_,H_,L_] := θ2 [ (T-x10)/ dx1 , (H-x20)/ dx2 , (L - x30 )/ dx3 ];
Expand[ θ02 [T , H ,L ] ]
θ03 [ T_,H_,L_] := θ3 [ (T-x10)/ dx1 , (H-x20)/ dx2 , (L - x30 )/ dx3 ];
Expand[ θ03 [T , H ,L ] ]
Find_Maximum[{ θ01 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}]
Opt1=Find_Minimum[{ θ01 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}]
Topt1=T/.Last[Opt1];
Hopt1= H/.Last[Opt1];
Lopt1=L/.Last[Opt1];
Find_Maximum[{ θ02 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}]
Opt2=Find_Minimum[{ θ02 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}]
Topt2=T/.Last[Opt2];
Hopt2= H/.Last[Opt2];
Lopt2=L/.Last[Opt2];

```

```

Find_Maximum[{  $\theta_3$  [T , H , L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}]
Opt3=Find_Minimum[{  $\theta_3$  [T , H , L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}]
Topt3=T/.Last[Opt3];
Hopt3= H/.Last[Opt3];
Lopt3=L/.Last[Opt3];
Plot3D[{  $\theta_1$ [T , H ,Lopt1],  $\theta_2$ [ T , H , Lopt2],  $\theta_3$ [T , H ,Lopt3]},{T,x10-
dx1,x10+dx1},{ H,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Red,Blue,Green}, AxesLabel-
>{"Tf, мм","Hf, мм"," $\sigma_{fmax}$ , МПа "},Label_Style->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends-
>{"ABS","Поліамід 6","Двокомпонентний поліуретан"}]
Plot3D[{  $\theta_1$ [Topt1,H,L],  $\theta_2$ [ T opt2 , H , L],  $\theta_3$ [Topt3,H,L]},{H,x20-
dx2,x20+dx2},{L,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Red,Blue,Green}, AxesLabel-
>{"Hf, мм","Lf, мм"," $\sigma_{fmax}$ , МПа "},Label_Style->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends-
>{"ABS"," Поліамід 6","Двокомпонентний поліуретан"}]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії
коефіцієнта запасу міцності k_f

```

M1={{-1,-1,-1,1.007},{-0.6666666666666667,-1,-1,1.372},{-0.3333333333333333,-
1,-1,1.785},{0,-1,-1,2.073},{0.3333333333333333,-1,-
1,2.269},{0.6666666666666667,-1,-1,2.377},{1,-1,-1,2.19},{-1,0,-1,0.944},{-
0.6666666666666667,0,-1,1.334},{-0.3333333333333333,0,-1,1.735},{0,0,-
1,1.944},{0.3333333333333333,0,-1,2.127},{0.6666666666666667,0,-
1,2.139},{1,0,-1,1.987},{-1,1,-1,0.4311},{-0.6666666666666667,1,-1,0.6001},{-
0.3333333333333333,1,-1,0.8541},{0,1,-1,1.1231},{0.3333333333333333,1,-
1,1.2271},{0.6666666666666667,1,-1,1.355},{1,1,-1,1.2701},{-1,-1,0,1.163},{-
0.6666666666666667,-1,0,1.434},{-0.3333333333333333,-1,0,1.756},{0,-
1,0,2.085},{0.3333333333333333,-1,0,2.185},{0.6666666666666667,-
1,0,2.252},{1,-1,0,2.111},{-1,0,0,1.138},{-0.6666666666666667,0,0,1.447},{-
0.3333333333333333,0,0,1.778},{0,0,0,2.095},{0.3333333333333333,0,0,2.271},{0.
6666666666666667,0,0,2.142},{1,0,0,1.997},{-1,1,0,1.047},{-
0.6666666666666667,1,0,1.3},{-
0.3333333333333333,1,0,1.589},{0,1,0,1.887},{0.3333333333333333,1,0,1.993},{0.
6666666666666667,1,0,2.105},{1,1,0,1.986},{-1,-1,1,1.125},{-
0.6666666666666667,-1,1,1.599},{-0.3333333333333333,-1,1,1.931},{0,-
1,1,2.167},{0.3333333333333333,-1,1,2.273},{0.6666666666666667,-
1,1,2.264},{1,-1,1,2.178},{-1,0,1,1.046},{-0.6666666666666667,0,1,1.352},{-
0.3333333333333333,0,1,1.575},{0,0,1,1.86},{0.3333333333333333,0,1,2.07},{0.66
6666666666666667,0,1,2.196},{1,0,1,2.08},{-1,1,1,1.076},{-
0.6666666666666667,1,1,1.388},{-

```

```

0.3333333333333333,1,1,1.685},{0,1,1,1.952},{0.3333333333333333,1,1,2.115},{0.
6666666666666667,1,1,2.089},{1,1,1,1.898}};
nlm1=Nonlinear_Model_Fit[M1,g00+g10 *x1+g20 * x2+g30 *x3+
  g12* x1*x2+g13 *x1*x3+g23* x2*x3+
  g11* x1^2+g22 *x2^2+g33 *x3^2,{g00,g10,g20,g30,g12,g13, g23,g11,g22,g33
},{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm1]
"Критерій Стюдента"
nlm1["ParameterTable"]
M2={{-1,-1,-1,1.59},{-0.6666666666666667,-1,-1,1.973},{-0.3333333333333333,-
1,-1,2.491},{0,-1,-1,2.978},{0.3333333333333333,-1,-
1,3.312},{0.6666666666666667,-1,-1,3.387},{1,-1,-1,3.078},{-1,0,-1,1.127},{-
0.6666666666666667,0,-1,1.587},{-0.3333333333333333,0,-1,2.099},{0,0,-
1,2.486},{0.3333333333333333,0,-1,2.77},{0.6666666666666667,0,-1,3.137},{1,0,-
1,2.804},{-1,1,-1,0.6377},{-0.6666666666666667,1,-1,0.9537},{-
0.3333333333333333,1,-1,1.1757},{0,1,-1,1.5207},{0.3333333333333333,1,-
1,1.6617},{0.6666666666666667,1,-1,2.003},{1,1,-1,1.6987},{-1,-1,0,1.755},{-
0.6666666666666667,-1,0,2.084},{-0.3333333333333333,-1,0,2.396},{0,-
1,0,2.778},{0.3333333333333333,-1,0,2.981},{0.6666666666666667,-
1,0,3.218},{1,-1,0,3.115},{-1,0,0,1.668},{-0.6666666666666667,0,0,2.052},{-
0.3333333333333333,0,0,2.381},{0,0,0,2.739},{0.3333333333333333,0,0,3.01},{0.6
6666666666666667,0,0,3.256},{1,0,0,3.18},{-1,1,0,1.506},{-
0.6666666666666667,1,0,1.809},{-
0.3333333333333333,1,0,2.211},{0,1,0,2.61},{0.3333333333333333,1,0,2.86},{0.66
6666666666666667,1,0,3.026},{1,1,0,2.904},{-1,-1,1,1.697},{-0.6666666666666667,-
1,1,2.126},{-0.3333333333333333,-1,1,2.477},{0,-
1,1,2.935},{0.3333333333333333,-1,1,3.227},{0.6666666666666667,-
1,1,3.243},{1,-1,1,3.051},{-1,0,1,1.618},{-0.6666666666666667,0,1,1.997},{-
0.3333333333333333,0,1,2.403},{0,0,1,2.834},{0.3333333333333333,0,1,3.1},{0.66
6666666666666667,0,1,3.16},{1,0,1,2.97},{-1,1,1,1.679},{-
0.6666666666666667,1,1,1.963},{-
0.3333333333333333,1,1,2.25},{0,1,1,2.649},{0.3333333333333333,1,1,2.921},{0.6
6666666666666667,1,1,3.057},{1,1,1,2.783}};
nlm2=Nonlinear_Model_Fit[M2,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[nlm2]
"Критерій Стюдента"
nlm2["ParameterTable"]
M3={{-1,-1,-1,0.754},{-0.6666666666666667,-1,-1,1.026},{-0.3333333333333333,-
1,-1,1.221},{0,-1,-1,1.484},{0.3333333333333333,-1,-
1,1.646},{0.6666666666666667,-1,-1,1.81},{1,-1,-1,1.724},{-1,0,-1,0.673},{-

```

```

0.6666666666666667,0,-1,1.056},{-0.3333333333333333,0,-1,1.329},{0,0,-
1,1.599},{0.3333333333333333,0,-1,1.677},{0.6666666666666667,0,-
1,1.794},{1,0,-1,1.74},{-1,1,-1,0.2092},{-0.6666666666666667,1,-1,0.4312},{-
0.3333333333333333,1,-1,0.5402},{0,1,-1,0.7038},{0.3333333333333333,1,-
1,0.8869},{0.6666666666666667,1,-1,0.99},{1,1,-1,0.944},{-1,-1,0,0.925},{-
0.6666666666666667,-1,0,1.109},{-0.3333333333333333,-1,0,1.267},{0,-
1,0,1.464},{0.3333333333333333,-1,0,1.653},{0.6666666666666667,-
1,0,1.717},{1,-1,0,1.566},{-1,0,0,0.743},{-0.6666666666666667,0,0,0.988},{-
0.3333333333333333,0,0,1.213},{0,0,0,1.428},{0.3333333333333333,0,0,1.639},{0.
6666666666666667,0,0,1.81},{1,0,0,1.755},{-1,1,0,0.863},{-
0.6666666666666667,1,0,1.103},{-
0.3333333333333333,1,0,1.367},{0,1,0,1.515},{0.3333333333333333,1,0,1.745},{0.
6666666666666667,1,0,1.765},{1,1,0,1.72},{-1,-1,1,0.979},{-
0.6666666666666667,-1,1,1.147},{-0.3333333333333333,-1,1,1.424},{0,-
1,1,1.624},{0.3333333333333333,-1,1,1.8},{0.6666666666666667,-1,1,1.762},{1,-
1,1,1.703},{-1,0,1,0.96},{-0.6666666666666667,0,1,1.174},{-
0.3333333333333333,0,1,1.43},{0,0,1,1.639},{0.3333333333333333,0,1,1.774},{0.6
6666666666666667,0,1,1.801},{1,0,1,1.621},{-1,1,1,0.675},{-
0.6666666666666667,1,1,0.873},{-
0.3333333333333333,1,1,1.011},{0,1,1,1.169},{0.3333333333333333,1,1,1.295},{0.
6666666666666667,1,1,1.567},{1,1,1,1.51}};
nlm3=Nonlinear_Model_Fit[M3,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[nlm3]
"Критерій Стюдента"
nlm3["ParameterTable"]
  θ1[x1_,x2_,x3_] :=2.046133333333333` +0.5260452380952381` x1-
0.41699999999999994` x1^2-0.205366666666666678` x2-0.09398571428571562`
x2^2+0.13750952380952403` x3+0.17422857142857134` x2 x3-
0.12998571428571362` x3^2
  θ2[x1_,x2_,x3_] :=2.8243195767195766` +0.7709714285714284` x1-
0.44036904761904744` x1^2-0.2860190476190479` x2-0.11868571428571661`
x2^2+0.23023333333333336` x3+0.2751357142857138` x2 x3-
0.20161428571428477` x3^2
  θ3[x1_,x2_,x3_] :=1.6144158730158729` +0.4528178571428572` x1-
0.23733928571428548` x1^2-0.1648023809523809` x2-0.16661190476190613`
x2^2+0.11189761904761922` x3+0.0935964285714284` x2 x3-
0.1317547619047616` x3^2
x10=6.5;
dx1=1.5;
x20=15;
dx2=10;

```

```

x30=15;
dx3=10;
θ01 [ T_ ,H_ ,L_ ] := θ1 [ (T-x10)/ dx1 , (H-x20)/ dx2 , (L - x30 )/ dx3 ] ;
Expand[ θ01 [T , H ,L ] ]
θ02 [ T_ ,H_ ,L_ ] := θ2 [ (T-x10)/ dx1 , (H-x20)/ dx2 , (L - x30 )/ dx3 ] ;
Expand[ θ02 [T , H ,L ] ]
θ03 [ T_ ,H_ ,L_ ] := θ3 [ (T-x10)/ dx1 , (H-x20)/ dx2 , (L - x30 )/ dx3 ] ;
Expand[ θ03 [T , H ,L ] ]
Find_Minimum[ { θ01 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3} ]
Opt1=Find_Maximum[ { θ01 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3} ]
Topt1=T/.Last[Opt1];
Hopt1= H/.Last[Opt1];
Lopt1=L/.Last[Opt1];
Find_Minimum[ { θ02 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3} ]
Opt2=Find_Maximum[ { θ02 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3} ]
Topt2=T/.Last[Opt2];
Hopt2= H/.Last[Opt2];
Lopt2=L/.Last[Opt2];
Find_Minimum[ { θ03 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3} ]
Opt3=Find_Maximum[ { θ03 [T , H ,L ],x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<=
H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3} ]
Topt3=T/.Last[Opt3];
Hopt3= H/.Last[Opt3];
Lopt3=L/.Last[Opt3];
Plot3D[ { θ01[T , H ,Lopt1], θ02[T , H ,Lopt2], θ03[T , H ,Lopt3]},{T,x10-
dx1,x10+dx1},{ H,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Red,Blue,Green}, AxesLabel-
>{"Tf, мм","Hf, мм","kf "},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->{"ABS","
Поліамід 6","Двокомпонентний поліуретан"} ]
Plot3D[ { θ01[Topt1,H,L], θ02[Topt2,H,L], θ03[Topt3,H,L]},{H,x20-
dx2,x20+dx2},{L,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Red,Blue,Green}, AxesLabel-
>{"Hf, мм","Lf, мм","kf "},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->{"ABS","
Поліамід 6","Двокомпонентний поліуретан"} ]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для вирішення компромісної задачі

```
F1 [T_ , H_ ,L_ ] :=86.87038332341258` -0.030399642857146414`
```

```

H+0.016610616666666758` H^2-0.9804975178571405` L-0.018896414285714237`
H L+0.023109202380952293` L^2-17.942043763227478`
T+0.06015417857142851` L T+1.08308386243386` T^2;
F2 [T_ , H_ ,L_ ] :=144.42651029761888` +0.4434471160714228`
H+0.011434904761904948` H^2-1.668912761904758` L-0.030160498214285694`
H L+0.03901242619047604` L^2-29.727874249338573` T+0.09553892261904767`
L T+1.7755969576719537` T^2;
F3 [T_ , H_ ,L_ ] :=28.609850512896788` -0.02204095357142974`
H+0.006682868571428606` H^2-0.37331711607142803` L-
0.006497519285714274` H L+0.005334407857142837` L^2-5.3068837744708866`
T+0.03474402499999999` L T+0.2815549470899461` T^2;
k1 [T_ , H_ ,L_ ] :=-8.07386507936507` -0.018475238095237694` H-
0.0009398571428571562` H^2+0.026612380952380783`
L+0.0017422857142857136` H L-0.0012998571428571362`
L^2+2.7600301587301552` T-0.18533333333333307` T^2;
k2 [T_ , H_ ,L_ ] :=-8.803649801587301` -0.03426654761904688` H-
0.0011868571428571661` H^2+0.04223726190476172`
L+0.0027513571428571383` H L-0.002016142857142848`
L^2+3.0583354497354485` T-0.19571957671957663` T^2;
k3 [T_ , H_ ,L_ ] :=-5.185875099206348` +0.019463869047619486` H-
0.0016661190476190612` H^2+0.03667672619047614`
L+0.0009359642857142841` H L-0.001317547619047616`
L^2+1.6731722222222207` T-0.10548412698412687` T^2;
x10=6.5;
dx1=1.5;
x20=15;
dx2=10;
x30=15;
dx3=10;
"ABS"
Opt1=Find_Minimum[{{{( F1 [ T , H ,L ] -8.859354068787496` ) /
(28.67595051731258` -8.859354068787496` )
( (2.3260088660853206` - k1 [ T , H ,L ])/(2.3260088660853206` -
0.3620121151071369`))^8,x10-dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<= H<=x20+dx2,x30-
dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}}]
Topt1=T/.Last[Opt1];
Hopt1= H/.Last[Opt1];
Lopt1=L/.Last[Opt1];
F1 [Topt1 , Hopt1 ,Lopt1 ]
k1 [Topt1 , Hopt1 ,Lopt1 ]
"Поліамід 6"
Opt2=Find_Minimum[{{{( F2 [ T , H ,L ] -15.606864784543404` ) /
(49.65921399147593` -15.606864784543404` ) ( (3.3315955182447965` - k2 [ T ,
H ,L ])/(3.3315955182447965` - 0.5012911984537125`))^8,x10-
dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<= H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-

```

```

dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}}
Topt2=T/.Last[Opt2];
Hopt2= H/.Last[Opt2];
Lopt2=L/.Last[Opt2];
F2 [Topt2 , Hopt2 , Lopt2 ]
k2 [Topt2 , Hopt2 , Lopt2 ]
"Двокомпонентний поліуретан"
Opt3=Find_Minimum[{{{ F3 [ T , H ,L ] -3.4069443062391116` ) /
(11.063259569525805`-3.4069443062391116` ) ( (1.8802234741042598` - k3 [ T
, H ,L ])/(1.8802234741042598` - 0.7723934938960323`)^8,x10-
dx1<=T<=x10+dx1,x20-dx2<= H<=x20+dx2,x30-dx3<=L<=x30+dx3},{T,x10-
dx1},{ H,x20-dx2},{L,x30-dx3}}]
Topt3=T/.Last[Opt3];
Hopt3= H/.Last[Opt3];
Lopt3=L/.Last[Opt3];
F3 [Topt3 , Hopt3 ,Lopt3 ]
k3 [Topt3 , Hopt3 ,Lopt3 ]
(Topt1+Topt2+Topt3)/3
(Hopt1+Hopt2+Hopt3)/3
(Lopt1+Lopt2+Lopt3)/3

```

Додаток Д

Результати експериментальних досліджень удосконаленої пневматичної системи подачі насіння

№	x ₁	x ₃	x ₄	x ₂	V _a ^{out} , м/с				Ріпак										Горох											
									V _p ^{out} , м/с										V _p ^{out} , м/с											
					1	2	3	Сер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сер.
1	1	-1	-1	-1	12,4	13,2	12,5	12,7	3,4	6,7	5,0	5,0	3,2	4,9	4,9	5,0	6,7	5,0	5,0	3,3	3,1	4,6	3,2	3,8	3,5	3,6	3,3	3,4	3,6	3,5
2	-1	1	-1	-1	6,2	7,3	6,3	6,6	2,2	3,7	2,3	2,4	4,1	2,6	2,4	2,3	4,1	2,4	2,9	2,3	1,8	1,5	2,3	1,3	2,5	1,7	1,8	2,0	1,9	1,9
3	-1	-1	1	-1	6,1	7	7	6,7	3,7	2,1	3,0	2,0	3,1	2,5	3,0	2,1	3,0	2,0	2,6	1,8	2,3	1,9	1,9	1,4	1,7	1,8	1,5	1,3	1,7	1,7
4	-1	-1	-1	1	1	1,9	1,9	1,6	1,3	1,5	0,9	1,7	0,5	1,4	0,5	1,4	1,5	0,9	1,2	1,4	0,9	1,3	0,7	0,9	1,0	1,1	0,9	0,6	0,5	0,9
5	-1	1	-1	1	1,2	2,5	1,1	1,6	1,7	2,6	0,1	1,7	2,0	0,9	1,7	0,9	2,0	2,6	1,6	1,4	1,1	1,3	0,2	1,6	0,6	0,6	1,1	1,2	1,1	1,0
6	1	-1	1	-1	12,9	14	13,9	13,6	5,6	4,8	5,4	4,6	5,9	4,5	5,0	4,4	4,6	5,9	5,1	2,9	3,2	3,8	4,5	2,8	2,5	3,9	4,2	3,4	3,3	3,5
7	-1	-1	1	1	1,3	2,4	1,1	1,6	1,3	1,9	1,7	0,9	1,1	1,3	1,8	1,1	1,7	0,9	1,4	0,5	0,6	1,1	0,9	1,4	1,4	0,9	1,0	1,2	0,9	1,0
8	1	1	1	1	3,4	4,7	3,6	3,9	2,4	0,8	2,1	1,8	2,3	1,9	2,0	0,5	2,3	1,8	1,8	2,0	2,0	1,6	2,1	1,4	1,5	1,4	1,6	1,7	1,9	1,7
9	0	0	0	0	4	4,7	4,2	4,3	2,1	1,0	2,3	1,6	1,7	2,8	2,3	1,0	1,7	2,3	1,9	1,3	1,8	2,0	1,5	1,6	1,3	2,2	1,8	1,3	1,2	1,6
10	0	1	-1	1	2,1	3,6	3,3	3	1,6	1,3	2,2	1,7	1,5	1,5	2,2	1,5	1,3	1,1	1,6	1,0	1,1	1,4	1,0	1,6	1,4	1,1	0,8	0,8	1,1	1,1
11	-1	0	-1	-1	6,2	7,4	6,2	6,6	3,2	3,6	3,2	2,9	3,4	2,3	2,9	3,2	3,6	2,7	3,1	2,2	2,0	2,1	1,8	2,5	2,4	1,9	2,0	2,2	2,1	2,1
12	1	0	1	1	3,1	4,5	4,1	3,9	3,1	3,6	1,4	2,5	1,4	1,3	1,9	2,1	2,0	2,0	2,1	1,5	1,3	1,2	1,8	1,8	1,5	1,2	1,3	1,6	1,3	1,5
13	-1	1	-1	0	2,5	3,2	2,7	2,8	1,5	0,9	0,7	1,8	1,5	3,0	2,1	2,3	2,3	2,0	1,8	1,4	1,3	1,2	1,4	1,5	1,6	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3
14	-1	0	1	1	1,2	2,3	1,3	1,6	0,8	0,2	0,8	1,5	1,0	1,5	1,3	0,9	0,7	1,6	1,0	0,6	0,6	0,6	0,8	0,7	1,0	1,1	0,7	0,6	0,5	0,7
15	0	1	1	-1	8,5	9,9	9,2	9,2	3,6	3,4	3,2	3,8	2,8	4,2	2,9	3,5	3,6	3,0	3,4	2,3	2,6	3,2	2,7	1,8	2,0	2,9	2,1	2,6	2,3	2,5
16	1	-1	1	0	5,7	6,5	6,1	6,1	1,5	2,7	2,1	1,9	2,8	2,6	2,7	2,1	2,6	2,3	2,3	1,1	1,3	1,1	1,6	1,6	1,5	1,8	1,4	1,7	1,5	1,5
17	1	-1	0	1	3	4,4	4,3	3,9	1,6	2,0	2,4	1,6	2,0	2,0	1,8	1,2	1,6	2,1	1,8	1,7	1,5	1,1	1,6	1,6	1,2	1,4	1,8	1,6	1,7	1,5
18	0	-1	1	-1	8,7	9,5	9,4	9,2	2,6	3,3	3,3	4,5	4,8	3,5	4,5	4,1	4,3	3,9	3,9	2,6	2,4	2,7	2,5	1,9	2,8	3,3	2,3	2,7	2,7	2,6

№	x ₁	x ₃	x ₄	x ₂	Ріпак													Горох																
					Відстань між насінинам, см													N, млн. шт./га	δ, %	Відстань між насінинам, см													N, млн. шт./га	δ, %
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Сер.	1	2			3	4	5	6	7	8	9	10	Сер.						
1	1	-1	-1	-1	3,0	7,0	6,5	7,5	8,5	6,9	4,5	7,2	6,0	9,9	6,7	0,79	71,2	3,3	3,1	4,6	3,2	3,8	3,5	3,6	3,3	3,4	3,6	3,5	0,79	79,1				
2	-1	1	-1	-1	28,2	29,4	37,5	38,0	36,0	34,8	36,4	36,8	36,0	52,9	36,6	0,14	81,9	2,3	1,8	1,5	2,3	1,3	2,5	1,7	1,8	2,0	1,9	1,9	0,12	79,4				
3	-1	-1	1	-1	1,5	3,4	2,8	2,5	3,0	2,7	2,4	2,3	2,6	2,6	2,6	2,04	80,9	1,8	2,3	1,9	1,9	1,4	1,7	1,8	1,5	1,3	1,7	1,7	1,95	85,2				
4	-1	-1	-1	1	7,0	6,5	6,1	6,3	6,4	5,9	5,9	6,0	6,0	7,0	6,3	0,83	93,4	1,4	0,9	1,3	0,7	0,9	1,0	1,1	0,9	0,6	0,5	0,9	0,82	96,9				
5	-1	1	-1	1	31,1	28,5	27,0	28,0	27,5	27,3	27,8	32,0	27,2	22,6	27,9	0,19	91,0	1,4	1,1	1,3	0,2	1,6	0,6	0,6	1,1	1,2	1,1	1,0	0,17	93,6				
6	1	-1	1	-1	1,7	3,2	2,9	2,0	3,4	2,8	2,9	2,9	2,1	0,9	2,5	2,12	68,5	2,9	3,2	3,8	4,5	2,8	2,5	3,9	4,2	3,4	3,3	3,5	2,02	76,9				
7	-1	-1	1	1	2,3	2,8	2,6	2,5	2,7	2,5	2,2	2,4	2,2	2,9	2,5	2,10	90,3	0,5	0,6	1,1	0,9	1,4	1,4	0,9	1,0	1,2	0,9	1,0	2,02	92,3				
8	1	1	1	1	10,4	10,5	9,2	9,8	9,0	9,5	9,1	8,4	9,2	6,3	9,1	0,58	87,0	2,0	2,0	1,6	2,1	1,4	1,5	1,4	1,6	1,7	1,9	1,7	0,53	88,9				
9	0	0	0	0	5,0	6,5	5,8	6,0	6,2	5,9	6,1	6,3	5,9	4,3	5,8	0,91	88,6	1,3	1,8	2,0	1,5	1,6	1,3	2,2	1,8	1,3	1,2	1,6	0,92	89,5				
10	0	1	-1	1	24,2	29,0	27,5	28,0	27,8	24,8	28,2	27,9	28,0	33,6	27,9	0,19	91,0	1,0	1,1	1,4	1,0	1,6	1,4	1,1	0,8	0,8	1,1	1,1	0,17	91,7				
11	-1	0	-1	-1	9,7	12,5	11,0	11,5	11,8	8,9	11,2	11,4	9,6	15,4	11,3	0,47	83,9	2,2	2,0	2,1	1,8	2,5	2,4	1,9	2,0	2,2	2,1	2,1	0,44	87,4				
12	1	0	1	1	3,3	4,5	4,0	3,1	4,1	4,3	3,7	4,0	3,6	4,4	3,9	1,35	88,0	1,5	1,3	1,2	1,8	1,8	1,5	1,2	1,3	1,6	1,3	1,5	1,32	90,0				
13	-1	1	-1	0	29,0	29,2	30,0	32,3	31,0	31,5	31,0	30,8	32,0	39,2	31,6	0,17	90,9	1,4	1,3	1,2	1,4	1,5	1,6	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3	0,14	91,0				
14	-1	0	1	1	3,2	4,5	3,8	4,0	4,2	4,1	3,9	3,7	3,5	4,0	3,9	1,35	90,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,7	1,0	1,1	0,7	0,6	0,5	0,7	1,35	92,3				
15	0	1	1	-1	7,0	10,6	6,4	11,5	10,5	9,5	7,2	11,2	10,1	15,0	9,9	0,53	74,1	2,3	2,6	3,2	2,7	1,8	2,0	2,9	2,1	2,6	2,3	2,5	0,50	79,0				
16	1	-1	1	0	2,0	3,0	2,5	2,8	2,9	2,7	2,2	2,1	2,1	2,1	2,4	2,16	84,3	1,1	1,3	1,1	1,6	1,6	1,5	1,8	1,4	1,7	1,5	1,5	2,11	88,0				
17	1	-1	0	1	3,2	4,0	3,6	3,8	3,9	3,7	3,5	3,4	3,7	2,9	3,6	1,47	90,7	1,7	1,5	1,1	1,6	1,6	1,2	1,4	1,8	1,6	1,7	1,5	1,50	91,4				
18	0	-1	1	-1	2,0	3,4	2,7	2,3	3,2	2,4	2,6	2,8	2,5	1,3	2,5	2,09	76,4	2,6	2,4	2,7	2,5	1,9	2,8	3,3	2,3	2,7	2,7	2,6	2,02	80,8				

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії

швидкості повітряного потоку на виході V_a^{out}

```

M={{1,-1,-1,-1,12.7},{-1,-1,1,-1,6.6},{-1,-1,-1,1,6.7},{-1,1,-1,-1,1.6},{-1,1,1,-1,1.6},{1,-1,-1,1,13.6},{-1,1,-1,1,1.6},{1,1,1,1,3.9},{0,0,0,0,4.3},{0,1,1,-1,3},{-1,-1,0,-1,6.6},{1,1,0,1,3.9},{-1,0,1,-1,2.8},{-1,1,0,1,1.6},{0,-1,1,1,9.2},{1,0,-1,1,6.1},{1,1,-1,0,3.9},{0,-1,-1,1,9.2}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,g00+g10*x1+g20*x2+g30*x3+g40*x4+
  g12*x1*x2+g13*x1*x3+g14*x1*x4+g23*x2*x3+g24*x2*x4+g34*x3*x4+
  g11*x1^2+g22*x2^2+g33*x3^2+g44*x4^2,
  {g00,g10,g20,g30,g40,g12,g13,g14,g23,g24,g34,g11,g22,g33,g44},
  {x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlm]
nlm["ParameterTable"]
nlm["ANOVATable"]
nlm["FitCurvatureTable"]
  YYe[x1_,x2_,x3_,x4_] :=4.413566926750962` +2.619770792489573`
x1+0.9910060393942179` x1^2-3.7231319324745704` x2-1.2655544005999921`
x1 x2+1.9091311298535536` x2^2
x10=15;
dx1=5;
x20=1.73;
dx2=1.04;
x30=1.5;
dx3=0.5;
x40=25;
dx4=15;
Yt [Va_,ε_,Vs_,Qp_] := 0.462235 + 0.931994 Va -2. 55814 ε - 0.513475
Va ε + 2.43694 ε^2 + 0.101037 Va ε^2 - 0.579551 ε^3 ;
Ye [Va_,ε_,Vs_,Qp_] := YYe [ (Va - x10 )/ dx1 , (ε - x20 )/ dx2 , (Vs - x30 )/
dx3 , (Qp - x40 )/ dx4 ] ;
Expand[ Ye [Va,ε,Vs,Qp] ]
Expand[ YYe[I11,L11,J11,K11] ]
Expand[ Yt [O11,R11,P11,Q11] ]
Opt=Find_Minimum[{ Ye [Va,ε,Vs,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-
dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{Va,x10-
dx1},{ε,x20-dx2},{Vs,x30-dx3},{Qp,x40-dx4}]
Vaopt=Va/.Last[Opt];
εopt=ε/.Last[Opt];
Vsopt=Vs/.Last[Opt];
Qpopt=Qp/.Last[Opt];
Plot3D[{ Ye [Va,ε,Vsopt,Qpopt] , Yt [Va,ε,Vsopt,Qpopt] },{ε,x20-
dx2,x20+dx2},{Va,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle-
```

```

>{Directive[Opacity[0.4],Blue],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel-
>{"ε","Vain, м/с","Vaout, м/с"},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
Plot3D[{ Ye [Va ,ε ,Vsopt ,Qpopt ]},{ε,x20-dx2,x20+dx2},{Va,x10-
dx1,x10+dx1},PlotStyle->{Green}, AxesLabel->{"ε","Vain, м/с","Vaout, м/с
"},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
>20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії швидкостей потоку насіння ріпаку та гороху на виході з башмака V_p^{out}

```

Mr={{1,-1,-1,-1,5},{-1,-1,1,-1,2.9},{-1,-1,-1,1,2.6},{-1,1,-1,-1,1.2},{-1,1,1,-
1,1.6},{1,-1,-1,1,5.1},{-1,1,-1,1,1.4},{1,1,1,1,1.8},{0,0,0,0,1.9},{0,1,1,-1,1.6},{-
1,-1,0,-1,3.1},{1,1,0,1,2.1},{-1,0,1,-1,1.8},{-1,1,0,1,1},{0,-1,1,1,3.4},{1,0,-
1,1,2.3},{1,1,-1,0,1.8},{0,-1,-1,1,3.9}};
nlmr=Nonlinear_Model_Fit[Mr,g00+g10 *x1+g20 * x2+g30 * x3+g40 * x4+
g12* x1*x2+g13* x1*x3+g14* x1*x4+g23* x2*x3+g24* x2*x4+g34* x3*x4+
g11* x1^2+g22 *x2^2+g33 *x3^2+g44 *x4^2,
{g00,g10,g20,g30,g40,g12,g13,g14,g23,g24,g34, g11,g22,g33,g44},
{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlmr]
nlmr["ParameterTable"]
nlmr["ANOVATable"]
nlmr["FitCurvatureTable"]
Mg={{1,-1,-1,-1,3.5},{-1,-1,1,-1,1.9},{-1,-1,-1,1,1.7},{-1,1,-1,-1,0.9},{-1,1,1,-
1,1},{1,-1,-1,1,3.5},{-1,1,-1,1,1},{1,1,1,1,1.7},{0,0,0,0,1.6},{0,1,1,-1,1.1},{-1,-
1,0,-1,2.1},{1,1,0,1,1.5},{-1,0,1,-1,1.3},{-1,1,0,1,0.7},{0,-1,1,1,2.5},{1,0,-
1,1,1.5},{1,1,-1,0,1.5},{0,-1,-1,1,2.6}};
nlmg=Nonlinear_Model_Fit[Mg,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[nlmg]
nlmg["ParameterTable"]
nlmg["ANOVATable"]
nlmg["FitCurvatureTable"]
YYer[x1_,x2_,x3_,x4_] :=1.9529177247667788` +0.7064874146392803` x1-
1.1841159984737035` x2-0.4698566466230704` x1 x2+0.8782948579623949`
x2^2
YYeg[x1_,x2_,x3_,x4_] :=1.6649175668741207` +0.5295607952526934` x1-
0.8255536111366949` x2-0.360287364639939` x1 x2+0.5681140708674882` x2^2

```

```

x10=15;
dx1=5;
x20=1.73;
dx2=1.04;
x30=1.5;
dx3=0.5;
x40=25;
dx4=15;
Yt [Va _,ε _,Vs _,Qp _] :=0.572252+0.909361 Va - 3.74716 ε-0.630449 Va
ε+3.56621 ε^2+0.138395 Va ε^2 - 0.847833 ε^3;
Yer [Va _,ε _,Vs _,Qp _] := YYer [ (Va - x10 )/ dx1 , (ε - x20 )/ dx2 , (Vs - x30
)/ dx3 , (Qp - x40 )/ dx4 ]
Yeg [Va _,ε _,Vs _,Qp _] := YYeg [ (Va - x10 )/ dx1 , (ε - x20 )/ dx2 , (Vs -
x30 )/ dx3 , (Qp - x40 )/ dx4 ]
Expand[ Yer [Va ,ε ,Vs ,Qp ] ]
Expand[ Yeg [Va ,ε ,Vs ,Qp ] ]
Expand[ YYer[I11,L11,J11,K11] ]
Expand[ YYeg[I34,L34,J34,K34] ]
Expand[ Yt[O11,R11,P11,Q11] ]
Optr=Find_Minimum[{ Yer [Va ,ε ,Vs ,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-
dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{ Va,x10-
dx1},{ ε,x20-dx2},{ Vs,x30-dx3},{ Qp,x40-dx4}]
Vaoptr=Va/.Last[Optr];
εoptr=ε/.Last[Optr];
Vsoptr=Vs/.Last[Optr];
Qpoptr=Qp/.Last[Optr];

Optg=Find_Minimum[{ Yeg [Va ,ε ,Vs ,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-
dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{ Va,x10-
dx1},{ ε,x20-dx2},{ Vs,x30-dx3},{ Qp,x40-dx4}]
Vaoptg=Va/.Last[Optg];
εoptg=ε/.Last[Optg];
Vsoptg=Vs/.Last[Optg];
Qpoptg=Qp/.Last[Optg];
Plot3D[{ Yer [Va ,ε ,x30 ,x40 ] , Yeg [Va ,ε ,x30 ,x40 ] , Yt [Va ,ε ,x30 ,x40
]},{ε,x20-dx2,x20+dx2},{ Va,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.8],Green],Directive[Opacit
y[0.3],Blue]}, AxesLabel->{"ε","Vain, M/c","Vpout, M/c"},Label_Style-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme-
>"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
Plot3D[{ Yer [Va ,ε ,x30 ,x40 ] , Yeg [Va ,ε ,x30 ,x40 ]},{ε,x20-
dx2,x20+dx2},{ Va,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.8],Green]}, AxesLabel-
>{"ε","Vain, M/c","Vpout, M/c"},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily-

```

```
>"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
```

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії норми висіву ріпаку і гороху N

```
Mr={{1,-1,-1,-1,0.79},{-1,-1,1,-1,0.14},{-1,-1,-1,1,2.04},{-1,1,-1,-1,0.83},{-1,1,1,-1,0.19},{1,-1,-1,1,2.12},{-1,1,-1,1,2.1},{1,1,1,1,0.58},{0,0,0,0,0.91},{0,1,1,-1,0.19},{-1,-1,0,-1,0.47},{1,1,0,1,1.35},{-1,0,1,-1,0.17},{-1,1,0,1,1.35},{0,-1,1,1,0.53},{1,0,-1,1,2.16},{1,1,-1,0,1.47},{0,-1,-1,1,2.09}};
nlmr=Nonlinear_Model_Fit[Mr,g00+g10 *x1+g20 * x2+g30 * x3+g40 * x4+
  g12* x1*x2+g13* x1*x3+g14* x1*x4+g23* x2*x3+g24* x2*x4+g34* x3*x4+
  g11* x1^2+g22 *x2^2+g33 *x3^2+g44 *x4^2,
  {g00,g10,g20,g30,g40,g12,g13,g14,g23,g24,g34, g11,g22,g33,g44},
  {x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlmr]
nlmr["ParameterTable"]
nlmr["ANOVATable"]
nlmr["FitCurvatureTable"]
Mg={{1,-1,-1,-1,0.79},{-1,-1,1,-1,0.12},{-1,-1,-1,1,1.95},{-1,1,-1,-1,0.82},{-1,1,1,-1,0.17},{1,-1,-1,1,2.02},{-1,1,-1,1,2.02},{1,1,1,1,0.53},{0,0,0,0,0.92},{0,1,1,-1,0.17},{-1,-1,0,-1,0.44},{1,1,0,1,1.32},{-1,0,1,-1,0.14},{-1,1,0,1,1.35},{0,-1,1,1,0.5},{1,0,-1,1,2.11},{1,1,-1,0,1.5},{0,-1,-1,1,2.02}};
nlmg=Nonlinear_Model_Fit[Mg,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[nlmg]
nlmg["ParameterTable"]
nlmg["ANOVATable"]
nlmg["FitCurvatureTable"]
YYer[x1_,x2_,x3_,x4_] :=0.9119833949553291`+0.023811068275417784` x2-
0.55617100432889` x3+0.42522470099077586` x4-0.22386348534887654` x3 x4
YYeg[x1_,x2_,x3_,x4_] :=0.9182231812739297` +0.047065499138169334` x2-
0.5651762476809513` x3+0.4163974816120838` x4-0.19333206142024406` x3
x4
x10=15;
dx1=5;
x20=1.73;
dx2=1.04;
x30=1.5;
```

```

dx3=0.5;
x40=25;
dx4=15;
Yt [Va _ ,ε _ ,Vs _ ,Qp _ ] :=10000 Qp(0.979566+0.0000999788 Va+0.0743557
ε-0.00341242 Va ε-0.0687799 ε^2+0.00238643 Va ε^2+0.0165856
ε^3)/Vs/0.19/1000000;
Yer [Va _ ,ε _ ,Vs _ ,Qp _ ] := YYer [ (Va - x10 )/ dx1 , (ε - x20 )/ dx2 , (Vs - x30
)/ dx3 , (Qp - x40 )/ dx4 ]
Yeg [Va _ ,ε _ ,Vs _ ,Qp _ ] := YYeg [ (Va - x10 )/ dx1 , (ε - x20 )/ dx2 , (Vs -
x30 )/ dx3 , (Qp - x40 )/ dx4 ]
Expand[ Yer [Va ,ε ,Vs ,Qp ] ]
Expand[ Yeg [Va ,ε ,Vs ,Qp ] ]
Expand[ YYer[I11,L11,J11,K11] ]
Expand[ YYeg[I34,L34,J34,K34] ]
Expand[ Yt[O11,R11,P11,Q11] ]
Optr=Find_Minimum[{ Yer [Va ,ε ,Vs ,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-
dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{ Va,x10-
dx1},{ ε,x20-dx2},{ Vs,x30-dx3},{ Qp,x40-dx4}]
Vaoptr=Va/.Last[Optr];
εoptr=ε/.Last[Optr];
Vsoptr=Vs/.Last[Optr];
Qpoptr=Qp/.Last[Optr];
Optg=Find_Minimum[{ Yeg [Va ,ε ,Vs ,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-
dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{ Va,x10-
dx1},{ ε,x20-dx2},{ Vs,x30-dx3},{ Qp,x40-dx4}]
Vaoptg=Va/.Last[Optg];
εoptg=ε/.Last[Optg];
Vsoptg=Vs/.Last[Optg];
Qpoptg=Qp/.Last[Optg];
Plot3D[{ Yt [Va ,ε ,x30 ,x40 ] , Yer [Va ,ε ,x30 ,x40 ] , Yeg [Va ,ε ,x30 ,x40
]}, {ε,x20-dx2,x20+dx2},{ Va,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.3],Blue],Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[
0.8],Green]}, AxesLabel->{"ε","Vina m/c","N
"},Label_Style-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme-
>"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
Plot3D[{ Yt [x10 ,x20 ,Vs ,Qp ] , Yer [x10 ,x20 ,Vs ,Qp ] , Yeg [x10 ,x20 ,Vs ,Qp
]}, {Vs,x20-dx2,x20+dx2},{ Qp,x40-dx4,x40+dx4},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.3],Blue],Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[
0.8],Green]}, AxesLabel->{"Vs, m/c","Qp, m/c","N
"},Label_Style-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme-
>"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
Plot3D[{ Yer [a ,ε ,x30 ,x40 ] , Yeg [a ,ε ,x30 ,x40 ]}, {ε,x20-
dx2,x20+dx2},{ Va,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel-

```

```

>{"ε", "Vain, m/c", "N"}, Label_Style->Directive[FontSize->14, FontFamily->
>"Times"], Mesh->20, Plot_Theme->"Detailed", Plot_Legends->Automatic]
Plot3D[{ Yer [x10 ,x20 ,Vs ,Qp ] + 0.4Vs-0.6 , Yeg [x10 ,x20 ,Vs ,Qp
]], {Vs,x30-dx3,x30+dx3}, {Qp,x40-dx4,x40+dx4}, PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange], Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel-
>{"Vs, m/c", "Qp, шт/с", "N"}, Label_Style->Directive[FontSize->14, FontFamily-
>"Times"], Mesh->20, Plot_Theme->"Detailed", Plot_Legends->Automatic]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії точності висіву (по довжині) ріпаку і гороху (коефіцієнт варіації) δ

```

Mr={{1,-1,-1,-1,71.2},{-1,-1,1,-1,81.9},{-1,-1,-1,1,80.9},{-1,1,-1,-1,93.4},{-
1,1,1,-1,91},{1,-1,-1,1,68.5},{-1,1,-1,1,90.3},{1,1,1,1,87},{0,0,0,0,88.6},{0,1,1,-
1,91},{-1,-1,0,-1,83.9},{1,1,0,1,88},{-1,0,1,-1,90.9},{-1,1,0,1,90.6},{0,-
1,1,1,74.1},{1,0,-1,1,84.3},{1,1,-1,0,90.7},{0,-1,-1,1,76.4}};
nlmr=Nonlinear_Model_Fit[Mr,g00+g10 *x1+g20 * x2+g30 * x3+g40 * x4+
g12* x1*x2+g13* x1*x3+g14* x1*x4+g23* x2*x3+g24* x2*x4+g34* x3*x4+
g11* x1^2+g22 *x2^2+g33 *x3^2+g44 *x4^2,
{g00,g10,g20,g30,g40,g12,g13,g14,g23,g24,g34, g11,g22,g33,g44},
{x1,x2,x3,x4}];
Normal[nlmr]
nlmr["ParameterTable"]
nlmr["ANOVATable"]
nlmr["FitCurvatureTable"]
Mg={{1,-1,-1,-1,79.1},{-1,-1,1,-1,79.4},{-1,-1,-1,1,85.2},{-1,1,-1,-1,96.9},{-
1,1,1,-1,93.6},{1,-1,-1,1,76.9},{-1,1,-
1,1,92.3},{1,1,1,1,88.9},{0,0,0,0,89.5},{0,1,1,-1,91.7},{-1,-1,0,-
1,87.4},{1,1,0,1,90},{-1,0,1,-1,91},{-1,1,0,1,92.3},{0,-1,1,1,79},{1,0,-
1,1,88},{1,1,-1,0,91.4},{0,-1,-1,1,80.8}};
nlmg=Nonlinear_Model_Fit[Mg,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[nlmg]
nlmg["ParameterTable"]
nlmg["ANOVATable"]
nlmg["FitCurvatureTable"]
YYer[x1_,x2_,x3_,x4_] :=88.67579373955603` -4.275140458678174` x1-
1.9171504322311685` x1^2+7.70199865791239` x2+3.050672030631166` x1 x2-
4.691168208313066` x2^2-1.5916376100314367` x3-0.9535400849988799` x4
YYeg[x1_,x2_,x3_,x4_] :=89.9227233852186` -2.76069328035158`

```

```

x1+0.12546545440191226` x1^2+6.196422415494527` x2+1.6458345942816421`
x1 x2-4.194223924685179` x2^2-1.9481977210826023` x3-0.9715599136853349`
x4
x10=15;
dx1=5;
x20=1.73;
dx2=1.04;
x30=1.5;
dx3=0.5;
x40=25;
dx4=15;
Yer [Va _,ε _,Vs _,Qp _] := YYer [ (Va - x10) / dx1 , (ε - x20) / dx2 , (Vs - x30) / dx3 , (Qp - x40) / dx4 ]
Yeg [Va _,ε _,Vs _,Qp _] := YYeg [ (Va - x10) / dx1 , (ε - x20) / dx2 , (Vs - x30) / dx3 , (Qp - x40) / dx4 ]
Expand[ Yer [Va ,ε ,Vs ,Qp ] ]
Expand[ Yeg [Va ,ε ,Vs ,Qp ] ]
Expand[ YYer[I11,L11,J11,K11] ]
Expand[ YYeg[I34,L34,J34,K34] ]
Optr=Find_Maximum[{ Yer [Va ,ε ,Vs ,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{ Va,x10-dx1},{ ε,x20-dx2},{ Vs,x30-dx3},{ Qp,x40-dx4}]
Vaoptr=Va/.Last[Optr];
εoptr=ε/.Last[Optr];
Vsoptr=Vs/.Last[Optr];
Qpoptr=Qp/.Last[Optr];
Optg=Find_Maximum[{ Yeg [Va ,ε ,Vs ,Qp ],x10-dx1<=Va<=x10+dx1,x20-dx2<=ε<=x20+dx2,x30-dx3<=Vs<=x30+dx3,x40-dx4<=Qp<=x40+dx4},{ Va,x10-dx1},{ ε,x20-dx2},{ Vs,x30-dx3},{ Qp,x40-dx4}]
Vaoptg=Va/.Last[Optg];
εoptg=ε/.Last[Optg];
Vsoptg=Vs/.Last[Optg];
Qpoptg=Qp/.Last[Optg];
Plot3D[{ Yer [Va ,ε ,x20 ,x30 ] , Yeg [Va ,ε ,x20 ,x30 ]},{ε,x20-dx2,x20+dx2},{ Va,x10-dx1,x10+dx1},PlotStyle->{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel->{"ε","Vina, m/c","δ, % "},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]
Plot3D[{ Yer [x10 ,x20 ,Vs ,Qp ] , Yeg [x10 ,x20 ,Vs ,Qp ]},{Vs,x30-dx3,x30+dx3},{ Qp,x40-dx4,x40+dx4},PlotStyle->{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel->{"Vs, m/c","Qp, m/c","δ, % "},Label_Style->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends->Automatic]

```

Програмний код в Wolfram Cloud для оптимізації процесу роботи

сповільнювача насіння

```

Vpr [Va _ ,Vs _ ,Qp _ ,ε _ ] :=1.8887549899436598` +0.29761517497745477`
Va-2.592851432598518` ε-0.09035704742751362` Va ε+0.8120329677906754`
ε²;
Vpg [Va _ ,Vs _ ,Qp _ ,ε _ ] :=1.2235702222365172` +0.22577699382498018`
Va-1.571887817221764` ε-0.06928603166152679` Va ε+0.5252533939233428`
ε²;
NNr [Va _ ,Vs _ ,Qp _ ,ε _ ] :=0.7128623499471545` +0.07312101046916025`
Qp-0.3661303908281953` Vs-0.029848464713183424` Qp
Vs+0.022895257957132344` ε;
NNg [Va _ ,Vs _ ,Qp _ ,ε _ ] :=0.8748041669239195` +0.066426244391521` Qp-
0.48591229062775765` Vs-0.025777608189365808` Qp
Vs+0.04525528763285492` ε;
ddr [Va _ ,Vs _ ,Qp _ ,ε _ ] :=80.04210408807164` -0.06356933899992533`
Qp+0.43061730905870643` Va-0.07668601728924675` Va²-
3.1832752200628733` Vs+13.612633015368761` ε+0.5866676981983011` Va ε-
4.337248713307197` ε²;
ddg [Va _ ,Vs _ ,Qp _ ,ε _ ] :=93.09783426151323` -0.06477066091235566` Qp-
1.250253710604003` Va+0.00501861817607649` Va²-3.8963954421652045`
Vs+14.627672112949611` ε+0.3165066527464696` Va ε-3.877795788355379` ε²;
x10=15;
dx1=5;
x20=1.5;
dx2=0.5;
x30=25;
dx3=15;
x40=1.73;
dx4=1.04;
br=0.19;
NNr [Va ,Vs ,Qp ,ε ]
NNg [x10 ,Vs ,Qp ,ε ]
N0min = (x30-dx3)/(100 (x20+dx2) br)
N0max = (x30+dx3)/(100 (x20-dx2) br)
Solve[{ NNr [x10 ,Vs ,100 Vs br N0 ,ε ]== N0},{ε}]
Solve[{ NNg [x10 ,Vs ,100 Vs br N0 ,ε ]== N0},{ε}]
EE0r [Vs _ ,N0 _ ] := (-31.13580774158009`+43.67716676843466`
N0+15.991538139195246` Vs-60.68065280222141` N0
Vs+24.770231050129542` N0 Vs²);
EE0g [Vs _ ,N0 _ ] :=22.09686541189961` (-0.8748041669239196`+1.`
N0+0.48591229062775765` Vs-1.262098643438899` N0
Vs+0.48977455559795036` N0 Vs²);

```

```

EE0ropt=Find_Maximum[{EE0r [Vs ,N0 ],x20-
dx2<=Vs<=x20+dx2,N0min<=N0<=N0max},{Vs,x10-dx1},{N0,N0min}]
EE0rmax=First[EE0ropt]
EEr [Vs _ ,N0 _ ] := (x40+dx4)EE0r [Vs ,N0 ] /EE0rmax;

EE0gopt=Find_Maximum[{EE0g [Vs ,N0 ],x20-
dx2<=Vs<=x20+dx2,N0min<=N0<=N0max},{Vs,x10-dx1},{N0,N0min}]
EE0gmax=First[EE0gopt]
EEg [Vs _ ,N0 _ ] := (x40+dx4)EE0g [Vs ,N0 ] /EE0gmax;
Expand[EEr [Vs ,N0 ]]
Expand[EEg [Vs ,N0 ]]
Expand[(EEr [Vs ,N0 ] +EEg [Vs ,N0 ]) / 2]
QQp [Vs _ ,N0 _ ] :=19. N0 Vs;
Plot3D[{EEr [Vs ,N0 ] ,EEg [Vs ,N0 ]},{Vs,x20-
dx2,x20+dx2},{N0,N0min,N0max},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel-
>{"Vs, м/с","Nt, млн. шт./га","ε"},Label_Style->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends-
>Automatic]
Plot3D[{ Vpr [x10 ,Vs ,QQp [Vs ,N0 ] ,EEr [Vs ,N0 ] ] + 15 , Vpg [x10 ,Vs ,QQp
[Vs ,N0 ] ,EEg [Vs ,N0 ] ] + 15},{Vs,x20-
dx2,x20+dx2},{N0,N0min,N0max},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel-
>{"Vs, м/с","Nt, млн. шт./га","Vp"},Label_Style->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends-
>Automatic]
Plot3D[{ ddr [x10 ,Vs ,QQp [Vs ,N0 ] ,EEr [Vs ,N0 ] ] + 8 , ddg [x10 ,Vs ,QQp
[Vs ,N0 ] ,EEg [Vs ,N0 ] ] + 9},{Vs,x20-
dx2,x20+dx2},{N0,N0min,N0max},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.5],Orange],Directive[Opacity[0.5],Green]}, AxesLabel-
>{"Vs, м/с","Nt, млн. шт./га","δ, % "},Label_Style->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,Plot_Theme->"Detailed",Plot_Legends-
>Automatic]
Expand[ Vpr [x10 ,Vs ,QQp [Vs ,N0 ] ,EE [Vs ,N0 ] ] ];
Expand[ ddr [x10 ,Vs ,QQp [Vs ,N0 ] ,EE [Vs ,N0 ] ] ];
"ddrmax"
ddrmax=0;
jmax=0;
For[i=N0min,i<=N0max,i=i+0.01,
  ddrmax=0;
  jmax=0;
  For[j=x20-dx2,j<=x20+dx2,j=j+0.01,
    ddrmax=If[ddrmax<= ddr [x10 ,j ,QQp [j ,i ] ,EE [j ,i ] ], ddr [x10 ,j ,QQp [j ,i ] ]

```

```

,EE [j ,i ] ],ddrmax];
  jmax=If[ddrmax<= ddr [x10 ,j ,QQp [j ,i ] ,EE [j ,i ] ],j,jmax];
  ];
  Print[i," ",jmax, " ",ddrmax ] ;
  ];
"Vprimin"
  Vprimin=1000000;
  jmin=0;
  For[i=N0min,i<=N0max,i=i+0.01,
    Vprimin=100000;
    jmin=0;
    For[j=x20-dx2,j<=x20+dx2,j=j+0.01,
      Vprimin=If[ Vprimin>= Vpr [x10 ,j ,QQp [j ,i ] ,EE [j ,i ] ], Vpr [x10 ,j ,QQp [j
,i ] ,EE [j ,i ] ] , Vprimin];
      jmin=If[ Vprimin>= Vpr [x10 ,j ,QQp [j ,i ] ,EE [j ,i ] ],j,jmin];
    ];
    Print[i," ",jmin, " ", Vprimin ] ;
  ];

```

Додаток Е

Програмний код автоматизованої системи керування сповільнювача насіння в
Arduino IDE

```

#include <Wire.h>                // For I2C communication
#include <Servo.h>               // For controlling the servo
#include <math.h>                // For calculations
#define SENSOR_PIN 7            // Pin connected to the proximity sensor
#define WHEEL_RADIUS 0.3        // Wheel radius in meters
#define PI 3.14159              // Pi constant
#define TIME_WINDOW 1000        // Time window for speed calculation (ms)
Servo myServo;                  // Create servo object
volatile unsigned int pulses = 0;
unsigned long lastTime = 0;
float Nt = 0;                   // Seeding rate (thousand units/ha)
float Vs = 0;                   // Seeder speed (m/s)
float angle = 0;                // Servo angle (degrees)

// Function to count sensor pulses
void countPulses() {
  pulses++;
}

void setup() {
  // Servo setup
  myServo.attach(3);            // Attach servo to pin 3
  myServo.write(0);             // Initialize servo position to 0 degrees

  // Proximity sensor setup
  pinMode(SENSOR_PIN, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(SENSOR_PIN), countPulses, RISING);

  // I2C setup
  Wire.begin(8);                // Initialize I2C as slave with address 8
  Wire.onReceive(receiveNt);    // Function to receive Nt

  // Initialize Serial communication for debugging
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Calculate speed every second
  unsigned long currentTime = millis();

```

```

if (currentTime - lastTime >= TIME_WINDOW) {
  float frequency = pulses / (TIME_WINDOW / 1000.0); // Pulses per second (Hz)
  Vs = 2 * PI * WHEEL_RADIUS * frequency; // Speed calculation
  pulses = 0; // Reset pulse count
  lastTime = currentTime;

  // Calculate servo angle using the given formula
  angle = 90 * (-1.13617 + 2.68589 * Nt + 1.14722 * Vs - 3.55752 * Nt * Vs + 1.41743 *
Nt * Vs * Vs) / 3.2;

  // Constrain angle between 0 and 180 degrees for the servo
  angle = constrain(angle, 0, 180);

  // Set servo position
  myServo.write(angle);

  // Debugging output
  Serial.print("Nt: ");
  Serial.print(Nt);
  Serial.print(" Vs: ");
  Serial.print(Vs);
  Serial.print(" Angle: ");
  Serial.println(angle);
}
}

// Function to receive Nt via I2C
void receiveNt(int bytes) {
  if (bytes == 2) {
    Nt = Wire.read() << 8 | Wire.read(); // Read two bytes for Nt
    Nt = Nt / 1000.0; // Convert to thousand units/ha
  }
}
}

```

Додаток Ж

Результати порівняльних виробничих випробувань удосконаленої системи подачі насіння пневматичної зернової сівалки точного висіву

Культура (А)	Наявність стовільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки, м/с (D)	Точність висіву δ , %					Густота стояння рослин N, млн. шт./га					Урожайність Р, т/га							
				1	2	3	4	5	Сер.	1	2	3	4	5	Сер.	1	2	3	4	5	Сер.
Горох (норма висіву – 1,2 млн. шт./га)	Без стовільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	80,6	77,9	79,1	79,0	82,4	79,8	1,06	0,95	1,00	1,09	1,15	1,05	3,04	3,06	3,00	2,92	3,09	3,02
			2	77,7	76,0	76,1	76,8	80,9	77,5	1,03	0,97	1,02	1,08	1,00	1,02	2,98	3,03	2,97	2,84	2,94	2,95
			3	74,6	72,6	73,5	73,2	76,1	74,0	0,97	0,94	0,96	0,99	0,99	0,97	2,87	2,92	2,85	2,73	2,79	2,83
			4	71,7	70,4	71	71,0	72,4	71,3	0,94	0,87	0,90	0,96	0,98	0,93	2,78	2,75	2,73	2,67	2,75	2,74
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	89,5	86,6	87,5	88,7	92,7	89,0	1,14	1,05	1,11	1,18	1,17	1,13	3,25	3,31	3,25	3,07	3,19	3,21
			2	86,4	84,1	85,7	85,5	88,3	86,0	1,11	0,99	1,08	1,14	1,13	1,09	3,14	3,17	3,07	3,04	3,11	3,11
			3	83,5	82,0	81,7	82,0	85,3	82,9	1,06	1,00	1,04	1,07	1,08	1,05	3,02	3,10	3,02	2,94	3,02	3,02
			4	80,5	78,5	78,8	79,7	82,0	79,9	1,03	0,91	0,98	1,07	1,06	1,01	2,95	2,99	2,95	2,83	2,92	2,93
	Зі стовільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	86,3	84,0	84,8	85,5	88,9	85,9	1,17	1,11	1,13	1,21	1,23	1,17	3,34	3,35	3,33	3,22	3,33	3,31
			2	85,8	82,6	83,5	84,3	88,8	85,0	1,14	1,11	1,12	1,16	1,17	1,14	3,25	3,34	3,27	3,08	3,19	3,23
			3	83,9	81,6	82,3	82,6	87,6	83,6	1,10	1,05	1,08	1,16	1,11	1,10	3,18	3,21	3,13	3,00	3,12	3,13
			4	81,0	78,5	80,1	79,4	83,0	80,4	1,07	0,95	1,04	1,10	1,09	1,05	3,07	3,10	2,97	2,91	3,05	3,02
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	95,6	93,8	93,2	93,5	97,4	94,7	1,25	1,13	1,20	1,29	1,28	1,23	3,47	3,55	3,46	3,29	3,47	3,45
			2	95,2	93,4	93,6	93,4	95,9	94,3	1,21	1,12	1,18	1,24	1,25	1,20	3,36	3,43	3,36	3,27	3,38	3,36
			3	92,6	90,8	91,1	91,3	95,2	92,2	1,16	1,10	1,10	1,22	1,22	1,16	3,33	3,32	3,30	3,15	3,30	3,28
			4	89,9	87,0	88,7	88,6	92,8	89,4	1,11	1,09	1,07	1,16	1,17	1,12	3,27	3,24	3,21	3,07	3,16	3,19

Культура (А)	Наявність стовільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки, м/с (D)	Точність висіву δ , %					Густота стояння рослин N, млн. шт./га					Урожайність Р, т/га							
				1	2	3	4	5	Сер.	1	2	3	4	5	Сер.	1	2	3	4	5	Сер.
Ріпак (норма висіву – 0,8 млн. шт./га)	Без стовільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	80,7	78,4	78,9	79,7	84,3	80,4	0,72	0,68	0,68	0,77	0,80	0,73	2,15	2,17	2,13	2,00	2,12	2,11
			2	77,8	76,7	76,6	76,0	78,4	77,1	0,66	0,64	0,67	0,75	0,63	0,67	2,00	2,04	1,97	1,88	2,02	1,98
			3	74,8	74,1	74,2	74,0	75,9	74,6	0,65	0,64	0,64	0,67	0,65	0,65	1,96	1,94	1,92	1,86	1,95	1,93
			4	71,5	69,2	69,7	69,7	72,9	70,6	0,61	0,59	0,59	0,66	0,65	0,62	1,85	1,93	1,87	1,77	1,84	1,85
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	86,6	85,1	84,9	84,8	88,6	86,0	0,80	0,77	0,79	0,88	0,81	0,81	2,34	2,36	2,30	2,19	2,35	2,31
			2	83,2	82,5	81,5	82,8	85,0	83,0	0,77	0,74	0,78	0,86	0,80	0,79	2,27	2,30	2,33	2,18	2,24	2,26
			3	80,3	79,5	79,1	79,5	81,1	79,9	0,74	0,73	0,74	0,78	0,76	0,75	2,18	2,20	2,17	2,10	2,20	2,17
			4	77,6	75,5	75,4	76,1	79,9	76,9	0,69	0,66	0,68	0,79	0,73	0,71	2,10	2,17	2,11	1,97	2,05	2,08
	Зі стовільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	90,1	87,4	88,6	88,5	91,9	89,3	0,78	0,75	0,74	0,84	0,79	0,78	2,26	2,29	2,23	2,15	2,26	2,24
			2	87,3	86,0	86,5	85,8	88,9	86,9	0,77	0,76	0,75	0,79	0,78	0,77	2,25	2,21	2,15	2,13	2,29	2,21
			3	84,0	82,4	82,8	82,4	84,9	83,3	0,74	0,71	0,72	0,82	0,71	0,74	2,17	2,19	2,14	2,04	2,20	2,15
			4	81,1	80,2	79,1	79,4	83,2	80,6	0,69	0,66	0,70	0,78	0,72	0,71	2,10	2,15	2,12	1,96	2,09	2,08
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	96,4	94,1	94	94,3	98,7	95,5	0,86	0,83	0,85	0,96	0,90	0,88	2,48	2,58	2,47	2,32	2,48	2,47
			2	92,7	91,5	91,4	92,1	94,8	92,5	0,85	0,82	0,84	0,91	0,88	0,86	2,51	2,54	2,51	2,39	2,46	2,48
			3	89,8	86,9	88,6	88,4	92,8	89,3	0,85	0,81	0,79	0,93	0,87	0,85	2,46	2,48	2,39	2,27	2,40	2,40
			4	87,3	83,9	86	85,7	88,6	86,3	0,83	0,80	0,77	0,88	0,82	0,82	2,35	2,36	2,32	2,24	2,35	2,32

Додаток И

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ,
д-р с.-г. наук, професор

Юрій ТКАЛІЧ
« 19 » 2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТП «Архангельське»

Гор ЖУК
« 19 » 2024 р.



А К Т

про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економічного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Безверхній Петро Євгенович під керівництвом професора кафедри інжинірингу технічних систем, д-ра техн. наук, старшого дослідника Алієва Ельчина Бахтияра огли, з однієї сторони, і представник Приватного підприємства «Архангельське» (ЄДРПОУ 41072511, Херсонська обл., Бериславський р-н, с. Іванівка) агроном Скубій Володимир Петрович, з другої сторони, склали цей акт про те, що удосконалена Безверхнім П. Є. пневматична сівалка John Deere 1890 проходила виробничу перевірку під час сівби озимого ріпаку сорту «Атлант» 08.09.2024 р. Місце проведення дослідів – с. Іванівка, Бериславський р-н., Херсонська обл. Ґрунт ділянок для дослідів – чорнозем звичайний важкосуглинистий (вміст гумусу в орному горизонті – 3,5 %. рН – 6,5-7,0). Система нульового обробітку ґрунту (No-Till). Погодні умови були сприятливі для сівби озимого ріпаку. Швидкість руху сівалки – 1,9–2,1 м/с (7–7,5 км/год). Норма висіву – 800 тис. шт./га.

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.

Результати вимірювань показують, що точність висіву удосконаленої пневматичної сівалки John Deere 1890 (із встановленим сповільнювачем і удосконаленим заспокоювачем насіння) вища (92,1–95,2 %), ніж базового (82,1–87,3 %). Також про якість висіву свідчить отримана густота розміщення рослин: удосконалена сівалка – 786–805 тис. шт./га, а для базового – 753–802 тис. шт./га. Це при встановленій нормі висіву – 800 тис. шт./га. Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що удосконалений висівний апарат є більш ефективним, ніж базовий.

Від ДДАЕУ

Професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д.т.н., старший дослідник

Ельчин АЛІЄВ

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

Петро БЕЗВЕРХНІЙ

« 19 » 10 2024 р.

Від ТП «Архангельське»

агроном



Володимир СКУБІЙ

« 19 » 10 2024 р.

Додаток К

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ,
д-р с.-г. наук, професор

Юрій ТКАЛІЧ

«19» 03 2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Агротек-Інвест»

Артур СЕМІУСОВ

«19» 03 2024 р.



А К Т

про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які виконані здобувачем третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Безверхнім Петром Євгеновичем під керівництвом професора кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету, д-ра техн. наук, старшого дослідника Алієва Ельчина Бахтияра огли впроваджені та використані на виробництві Товариства з обмеженою відповідальністю «Агротек-Інвест» (ЄДРПОУ 36573198, Дніпропетровська обл., смт. Підгородне, комплекс будівель і споруд № 55-і). ТОВ «Агротек-Інвест» в особі провідного інженера Циганок Андрія Миколайовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію на сповільнювача насіння системи подачі насіння пневматичної сівалки John Deere 90 Series, який розроблено згідно науково-дослідної роботи «Розробка наукових засад ризик-орієнтованого керування складними людино-технічними сільськогосподарськими системами» (№ ДР 0120U104862) Безверхнім П. Є. і Алієвим Е. Б.

Підприємство ТОВ «Агротек-Інвест» зацікавлене у виготовленні дослідної партії сповільнювача насіння системи подачі насіння пневматичної сівалки John Deere 90 Series у кількості 50 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 ДДАЕУ

Професор кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
д.т.н., старший дослідник

Ельчин АЛІЄВ

Від ТОВ «Агротек-Інвест»

Провідний інженер

Андрій ЦИГАНОК

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»

Петро БЕЗВЕРХНІЙ

«19» 03 2024 р.

«19» 03 2024 р.

Додаток Л

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності
Дніпровського державного аграрно-економічного
університету, д. с.-г. н., проф.


Юрій ТКАЧУК
« 17 » жовтня 2024 р.


ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «НВП «Союз-Композит»



Ігор ДРОБОТ
« 17 » жовтня 2024 р.

А К Т

про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Безверхній Петро Євгенович, науковий керівник професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослідн. Алієв Ельчин Бахтияр огли, завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін Володимир Юрійович, з однієї сторони, і представник ТОВ «НВП «Союз-Композит» (ЄДРПОУ 39605117, Дніпропетровська область, смт. Слобожанське, вул. Нижньодніпровська, 1) головний інженер Дворецький Дмитро Юрійович, з другої сторони, склали цей акт про те, що ТОВ «НВП «Союз-Композит» отримало дослідний зразок та конструкторську документацію на заспокоювач насіння для системи подачі пневматичної сівалки John Deere 90 Series.

В ТОВ «НВП «Союз-Композит» було виготовлено прес форму для лиття полімерів під тиском та виготовлено дослідну партію заспокоювачів насіння у кількості 200 одиниць та, після вдалих виробничих випробувань, переведено на серійне виробництво.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ДДАЕУ

завідувач кафедри інжинірингу технічних систем
ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц.

 Володимир ДУДІН

професор кафедри інжинірингу технічних систем
ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослідн.

 Ельчин АЛІЄВ

здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої
освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

 Петро БЕЗВЕРХНІЙ

Від ТОВ «НВП «Союз-Композит»

Головний інженер
ТОВ «НВП «Союз-Композит»

 Дмитро ДВОРЕЦЬКИЙ

Додаток М

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор – проректор з навчальної роботи Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ),
канд. с.-г. наук, проф.

Дмитро ОНОПРІЄНКО

м.п.

«10» вересня 2024 р.



А К Т

**про використання результатів дисертації
на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії
Безверхнього Петра Євгеновича
«Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної
сівалки точного висіву»
у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ**

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А. М. та членів – завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін В. Ю., професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослід. Алієв Е. Б. підтверджує впровадження науково-практичних результатів за дисертаційною роботою на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії аспіранта Безверхнього Петра Євгеновича «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневматичної сівалки точного висіву» у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ і констатує

– аспірантом Безверхнім П. Є. впроваджено в курс дисципліни «CAD/CAM-системи в експериментальних дослідженнях» для студентів третього (освітньо-наукового) рівня за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування наступне: практична робота «Механічне випробування зразків матеріалів при згині і скручуванні». Мета роботи – визначити закономірності деформації від зусилля при згині і скручуванні зразків різних матеріалів. Матеріальне забезпечення – стенди для досліджень зусилля скручування і згину, які розроблені і створені Безверхнім П. Є. у відповідності до дисертаційної роботи.

– аспірантом Безверхнім П. Є. впроваджено в курс дисципліни «Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва» для студентів освітнього рівня магістр за спеціальністю 208 – Агроінженерія наступне: завдання до виконання розрахунково-графічної роботи «Моделювання процесу висіву насіння висівною секцією пневматичної сівалки». Мета – визначити рівномірність висіву насіння при різних конструктивно-технологічних параметрів висівної секцією пневматичної сівалки.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного
факультету ДДАЕУ,
д-р наук з держ. управ., проф.



Андрій ПУГАЧ

Члени комісії:

завідувач кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц.



Володимир ДУДІН

професор кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
д-р техн. наук, старш. дослід.



Ельчин АЛІЄВ

Додаток Н

Результати розрахунку техніко-економічної ефективності

Культура (А)	Наявність сповільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки, м/с (D)	Урожайність, т/га	Балансова вартість додаткового обладнання, грн	Заграти на заміну заспокоювачів насіння, грн/га	Заграти на амортизацію, грн/га	Заграти на ремонт і ТО, грн/га	Витрати палива, л/га	Заграти на ПММ, грн./га	Тривалість роботи тракториста, год/га	Заграти праці, грн/га	Загальні витрати, грн/га	Вартість продукції, грн/га	Відносна вартість продукції, грн/га	Відносні витрати, грн/га	Економічний ефект, грн/га	Точка беззбитковості, га
Горох (норма висіву – 1,2 млн. шт./га)	Без сповільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	3,01	5760	0,96	0,00	0,00	5,30	358,28	0,30	54,82	414,06	28655	476,00	-100,84	576,84	0
			2	2,97	5760	0,96	0,00	0,00	5,80	392,08	0,15	27,41	420,45	28274	95,20	-94,45	189,65	0
			3	2,96	5760	0,96	0,00	0,00	6,20	419,12	0,10	18,27	438,35	28179	0,00	-76,55	76,55	0
			4	2,96	5760	0,96	0,00	0,00	7,40	500,24	0,08	13,71	514,91	28179	0,00	0,00	0,00	-
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	3,03	10800	1,80	0,00	0,00	5,30	358,28	0,30	54,82	414,90	28845	666,40	-100,00	766,40	7
			2	3,02	10800	1,80	0,00	0,00	5,80	392,08	0,15	27,41	421,29	28750	571,20	-93,61	664,81	8
			3	3,01	10800	1,80	0,00	0,00	6,20	419,12	0,10	18,27	439,19	28655	476,00	-75,71	551,71	9
			4	3,02	10800	1,80	0,00	0,00	7,40	500,24	0,08	13,71	515,75	28750	571,20	0,84	570,36	9
	Зі сповільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	3,06	418064	0,96	17,18	17,18	5,50	371,80	0,30	54,82	461,94	29131	952,00	-52,96	1004,96	410
			2	3,05	418064	0,96	17,18	17,18	6,00	405,60	0,15	27,41	468,33	29036	856,80	-46,58	903,38	456
			3	3,03	418064	0,96	17,18	17,18	6,40	432,64	0,10	18,27	486,23	28845	666,40	-28,67	695,07	593
			4	3,05	418064	0,96	17,18	17,18	7,60	513,76	0,08	13,71	562,78	29036	856,80	47,88	808,92	510
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	3,07	423104	1,80	17,18	17,18	5,50	371,80	0,30	54,82	462,78	29226	1047,20	-52,12	1099,32	380
			2	3,08	423104	1,80	17,18	17,18	6,00	405,60	0,15	27,41	469,17	29321	1142,40	-45,74	1188,14	351
			3	3,06	423104	1,80	17,18	17,18	6,40	432,64	0,10	18,27	487,07	29131	952,00	-27,83	979,83	426
			4	3,08	423104	1,80	17,18	17,18	7,60	513,76	0,08	13,71	563,62	29321	1142,40	48,72	1093,68	382

Культура (А)	Наявність сповільнювача насіння (В)	Наявність заспокоювача насіння (С)	Швидкість руху сівалки, м/с (D)	Урожайність, т/га	Балансова вартість додаткового обладнання, грн	Заходи на заміну заспокоювачів насіння, грн/га	Заходи на амортизацію, грн/га	Заходи на ремонт і ТО, грн/га	Витрати палива, л/га	Заходи на ПММ, грн./га	Тривалість роботи тракториста, год/га	Заходи праці, грн/га	Загальні витрати, грн/га	Вартість продукції, грн/га	Відносна вартість продукції, грн/га	Відносні витрати, грн/га	Економічний ефект, грн/га	Точка беззбитковості, га
Ріпак (норма висіву – 0,8 млн. шт./га)	Без сповільнювача насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	2,03	5760	0,96	0,00	0,00	5,30	358,28	0,30	54,82	414,06	33292	164,00	-100,84	264,84	0
			2	2,04	5760	0,96	0,00	0,00	5,80	392,08	0,15	27,41	420,45	33456	328,00	-94,45	422,45	0
			3	2,02	5760	0,96	0,00	0,00	6,20	419,12	0,10	18,27	438,35	33128	0,00	-76,55	76,55	0
			4	2,02	5760	0,96	0,00	0,00	7,40	500,24	0,08	13,71	514,91	33128	0,00	0,00	0,00	-
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	2,03	10800	1,80	0,00	0,00	5,30	358,28	0,30	54,82	414,90	33292	164,00	-100,00	264,00	19
			2	2,05	10800	1,80	0,00	0,00	5,80	392,08	0,15	27,41	421,29	33620	492,00	-93,61	585,61	9
			3	2,05	10800	1,80	0,00	0,00	6,20	419,12	0,10	18,27	439,19	33620	492,00	-75,71	567,71	9
			4	2,06	10800	1,80	0,00	0,00	7,40	500,24	0,08	13,71	515,75	33784	656,00	0,84	655,16	8
	Зі сповільнювачем насіння	Базовий заспокоювач насіння	1	2,09	418064	0,96	17,18	17,18	5,50	371,80	0,30	54,82	461,94	34276	1148,00	-52,96	1200,96	343
			2	2,07	418064	0,96	17,18	17,18	6,00	405,60	0,15	27,41	468,33	33948	820,00	-46,58	866,58	476
			3	2,07	418064	0,96	17,18	17,18	6,40	432,64	0,10	18,27	486,23	33948	820,00	-28,67	848,67	486
			4	2,05	418064	0,96	17,18	17,18	7,60	513,76	0,08	13,71	562,78	33620	492,00	47,88	444,12	928
		Удосконалений заспокоювач насіння	1	2,1	423104	1,80	17,18	17,18	5,50	371,80	0,30	54,82	462,78	34440	1312,00	-52,12	1364,12	306
			2	2,11	423104	1,80	17,18	17,18	6,00	405,60	0,15	27,41	469,17	34604	1476,00	-45,74	1521,74	274
			3	2,12	423104	1,80	17,18	17,18	6,40	432,64	0,10	18,27	487,07	34768	1640,00	-27,83	1667,83	250
			4	2,12	423104	1,80	17,18	17,18	7,60	513,76	0,08	13,71	563,62	34768	1640,00	48,72	1591,28	262

Додаток О

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2022). Чисельне моделювання сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 52: 86–98. DOI: 10.32515/2414-3820.2022.52.86-98. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу роботи сповільнювача насіння пневматичної сівалки).*

2. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2023). Дослідження чинників погіршення точності висіву пневматичними сівалками. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (121): 51–61. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-6. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і польових досліджень процесу висіву).*

3. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.**, Алієва О.Ю. (2024). Результати аналітичних досліджень заспокоювача насіння удосконаленої висівної секції пневматичної сівалки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 1 (124): 73–81. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-8 *(Здобувачу належить проведення аналітичних досліджень роботи заспокоювача насіння).*

4. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Безверхній П. Є.**, Шаповал О. М. (2024). Обґрунтування конструктивних параметрів заспокоювача насіння висівної секції пневматичної сівалки. Вібрації в техніці та технологіях, 2 (113): 43–54. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і лабораторних досліджень коливань заспокоювача насіння).*

5. Aliiev E, **Bezverkhniy P.**, Dudin V., Aliieva O. (2024). Results of experimental studies on the improved seed delivery system of a pneumatic precision seeder. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2 (125): 7–15. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-1.

(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень удосконаленої системи подачі насіння пневматичної сівалки).

Патент України на корисну модель:

6. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Безверхній П. Є.** (2024). Патент на корисну модель України 157302, МПК А01С 7/20 (2006.01). Висівна секція пневматичної зернової сівалки. Заявник: Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Безверхній П. Є., № u202401647. Заявл. 02.04.2024. Опубл. 25.09.2024, бюл. № 39. *(Здобувачу належить ідея додати до складу висівної секції заспокоювач і сповільнювач насіння).*

Тези і матеріали конференцій:

7. Алієв Е., **Безверхній П.** (2022). Аналіз проблем пневматичних сівалок та шляхи їх вирішення. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина (15 березня 2022 р.). ІОК НААН, 61–62. *(Здобувачу належить проведення аналізу проблем пневматичних сівалок).*

8. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2022). 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 (20 травня 2022 року, м. Херсон). Херсон: ІЗЗ НААН, 158–159. *(Здобувачу належить аналіз шляхів підвищення ефективності пневматичних сівалок).*

9. Алієв Е., **Безверхній П.** (2022). Дослідження сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Шляхи інноваційного розвитку агровиробництва в Україні»: збірник наукових праць. Аграрна наука Західного Полісся. Рівне, 88–89. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу роботи сповільнювача насіння пневматичної сівалки).*

10. **Безверхній П.** (2022). Симуляція сповільнювача насіння пневматичної сівалки точного висіву. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (21 березня 2023 р.).ІОК НААН, 122–123.

11. **Безверхній П.** (2023). Результати чисельного моделювання процесу роботи пневматичної сівалки точного висіву. Інноваційні екологічнобезпечні технології рослинництва в умовах воєнного стану: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції (31 серпня 2023 року), 24–26.

12. **Безверхній П. Є.** (2023). Методика чисельного моделювання процесу висіву насіння пневматичною сівалкою точного висіву. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 4–6.

13. Алієв Е. Б., **Безверхній П. Є.** (2024). Експериментальні дослідження процесу висіву насіння базовою висівною секцією пневматичної сівалки John Deere 90 Series. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Наукові основи адаптивного землеробства» (16-17 травня 2024 р.). Дніпро: ДДАЕУ, 353–355. *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і аналіз результатів).*