

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КУДРЯВЦЕВ ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.928.6:633.854.78:631.53.01 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВІДХОДІВ
НАСІННЄВОЇ СУМІШІ СОНЯШНИКА**

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

 Ігор КУДРЯВЦЕВ

Науковий керівник:

Кошулько Віталій Сергійович,
кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Кудрявцев І.М. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насінневої суміші соняшника. – 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, 2025.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу тонкого очищення насіння соняшника з відходів шляхом розробки конструкції аеродинамічного сепаратора колонного типу із раціональними технологічними і конструктивними параметрами, які дозволяють досягти задану якість продукції з мінімальними питомими енерговитратами.

Об'єкт дослідження – технологічний процес тонкого очищення насіння соняшника з відходів на аеродинамічному сепараторі колонного типу.

Предмет досліджень – насіннева суміш соняшника та умови і закономірності протікання технологічного процесу її сепарації за аеродинамічними властивостями.

Методи досліджень. Дослідження виконувались відповідно до вимог ДСТУ 3973-2000, СОУ НАН 73.1-001:2011, а дисертація оформлювалась згідно з ДСТУ 3008:2015 і наказу МОН від 12.01.2017 № 40. Теоретичні дослідження базувались на методах чисельного моделювання з урахуванням основних принципів теоретичної механіки, газодинаміки, теорій ймовірності, пружності, а також моделей лагранжевої багатофазності, дискретних елементів та багатофазної взаємодії. У процесі розрахунків застосовуватимуться методи інтегрального і диференційного числення. Для експериментальних досліджень використані математичні підходи до планування експерименту, методи наочних і натурних спостережень та експертного оцінювання. Обробка й аналіз отриманих даних здійснювались з використанням теорії ймовірностей, кореляційно-регресійного аналізу. Методичні підходи, що використовуватимуться під час досліджень, відповідають міжнародним стандартам,

зокрема вимогам ISO 17025. Під час обробки даних використовувались наступні програмні засоби: Microsoft Excel, Wolfram Cloud та Simcenter Star-CCM+.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

Вперше:

- отримані математичні моделі регресії другого порядку, які характеризують залежності ключових параметрів процесу аеродинамічної сепарації насінневої суміші соняшнику у вертикальній сепараційній камері, зокрема горизонтальної відстані польоту частинок, якості очищення та продуктивності сепарації від швидкості повітряного потоку, подачі вихідної суміші та фізико-механічних властивостей її компонентів;

- отримані траєкторії польоту і розподіли компонентів насінневої суміші соняшнику (ядро соняшника, лушпиння і дрібні частинки) в камері розрідження аеродинамічного сепаратора колонного типу залежно від її геометричних розмірів, швидкості повітряного потоку, подачі вихідної суміші та її складу.

Набуло подальшого розвитку:

- фізико-математичний апарат чисельного моделювання поведінки компонентів насінневої суміші соняшника (ядро соняшника, лушпиння і дрібні частинки) у повітряному потоці з урахуванням аеродинамічних і контактних сил на основі DEM-CFD підходу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено нову конструктивно-технологічну схему аеродинамічного сепаратора колонного типу, що забезпечує тонке очищення насіння соняшника від відходів (патенти України на корисні моделі № 155711, 155727, 156504). Запропоновані конструктивні рішення спрямовані на зменшення габаритів, матеріалоемності та енергоспоживання при збереженні високої ефективності очищення.

Результати досліджень у вигляді виготовленого аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насінневої суміші соняшника із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами впроваджені на підприємствах: ТОВ НВО «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ» (м. Дніпро); ТОВ «ПОТОКИ» (Дніпропетровська обл, м. Дніпро); ТДВ «УКРОЛЯПРОДУКТ» (Полтавська обл., м.

Зінків); ПП «ВІКТОР і К» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка); ТОВ «ГІДРОСЕНД» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка); ТОВ «АГРОПРОІНВЕСТ 08» (Дніпропетровська обл, Нікопольський район, с. Першотравневе).

Результати досліджень впроваджено в курс дисциплін: «Машини і обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія і «Експлуатація і обслуговування обладнання харчових виробництв» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 181 – Харчові технології.

Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему аеродинамічного сепаратора колонного типу для тонкого очищення відходів насінневої суміші соняшника, який містить завантажувальний бункер та віброживильник, джерело повітряного потоку, виконане з можливістю регулювання інтенсивності повітряного потоку в зоні сепарації, пневмосепараційний канал із патрубком для подачі відходів насінневої суміші, патрубком для виходу насінневого матеріалу й патрубком для виходу сміття, осадову камеру для подання сміття у шнек-пастку з віддушиною, збірник насінневого матеріалу, збірник сміття. При цьому сепараційний канал в нижній частині має повітророзподільник, а в верхній частині містить виконану як розширення перетину каналу камеру розрідження, що оснащена відбійником та патрубком для виходу повітря й пилу. Внутрішні поверхні тракту сепарації виконані із металу, переважно із нержавіючої сталі або мають покриття з низьким коефіцієнтом тертя. В основу розробки поставлена задача зменшення габаритних розмірів, матеріалоємності та енерговитрат при збереженні показників ефективності очищення відходів насінневої суміші соняшника.

Розроблений уточнений фізико-математичний апарат взаємодії компонентів відходів насінневої суміші соняшнику між собою і стінками аеродинамічного сепаратора колонного типу та їх руху під дією повітряного потоку. Фізико-математичний апарат базується на представленні компонентів відходів насінневої суміші соняшнику (ядро соняшнику, лущиння і дрібні частинки) у вигляді моделі скупчення сферичних субчастинок DEM різної кількості і діаметра. Складено

систему диференціальних рівнянь руху компонентів відходів насінневої суміші з урахуванням сили опору повітряного потоку, підйомної сили Сафмана, підйомної сили Магнуса, виштовхувальної сили Архімеда, контактної сили Герца. Уточнений фізико-математичний апарат чисельного моделювання DEM-CFD використано в подальшому чисельному моделюванні з застосуванням програмного пакету Simcenter Star-CCM+.

В результаті першого етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі отримані траєкторії руху її компонентів. Розраховані рівняння регресії другого порядку залежності горизонтальної відстані польоту компонентів (лушпиння соняшника і дрібних частинок) y_{opt} від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і швидкості повітряного потоку V_a . З урахуванням умови мінімізації y_{opt} і V_a для компонентів, ефективний діаметр яких знаходить в межах 0,009–0,013 м, отримана швидкість формалізованого стрічкового конвеєра складає $V_{p-opt} = 0,073$ м/с і відстань польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y_{opt} = 0,2195$ м. Прийнято поперечний переріз пневмосепаруючого каналу – квадрат зі стороною 220 мм. В результаті другого етапу чисельного моделювання процесу взаємодії потоків відходів насінневої суміші і повітря в пневмосепаруючому каналі отримано їх візуалізацію для різних комбінацій факторів. Розраховано рівняння регресії другого порядку залежності вмісту ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності процесу сепарації q і об'ємних витрат повітря (продуктивність генератора повітряного потоку) Q_a від висоти шару відходів насінневої суміші соняшнику, що подається, h_p і швидкості повітряного потоку V_a . Враховуючи умову максимізації η_{k-k} і q при мінімальному значенні Q_a отримані раціональні значення факторів досліджень: $h_p = 0,036$ м, $V_a = 3,42$ м/с. При цьому $\eta_{k-k} = 0,94$, $q = 122,9$ кг/год, $Q_a = 588$ м³/год.

В результаті третього етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження отримані траєкторії руху і розподіли її компонентів. Розраховані рівняння регресії другого порядку залежності відстань між піками розподілів лушпиння соняшнику і дрібних

частинок Δy в камері розрідження від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R . Враховуючи умову максимізації Δy отримане раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y_{int} = 0,43$ м. В результаті четвертого етапу чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу розраховані рівняння регресії коефіцієнта розподілу δ розробленого аеродинамічного сепаратора від вмісту компонентів в насіннєвій суміші ψ_h, ψ_d, ψ_k і подачі суміші q та швидкості повітряного потоку V_a . Найменше значення коефіцієнта розподілу δ спостерігається для наступного вмісту компонентів: $\psi_d = 0,331$, $\psi_h = 0,335$, $\psi_k = 0,334$. Для забезпечення високої якості сепарації ($\delta \rightarrow \max$) при достатньо високій продуктивності ($q \rightarrow \max$) і зменшених енерговитратах ($V_a \rightarrow \min$) встановлені раціональні значення факторів досліджень: $q = 133$ кг/год, $V_a = 2,46$ м/с. При цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

Результати експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора колонного типу показали, що модель, яка описує залежність вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , є значущою та адекватною. Зазначена модель включає нелінійні залежності від всіх факторів досліджень: продуктивність віброживильника q , швидкість повітряного потоку V_a і вміст ядер у вихідній суміші ψ_k . Додатково були отримані рівняння, які описують залежності коефіцієнта розподілу δ і споживної потужності P від факторів досліджень. Для досягнення ефективності роботи аеродинамічного сепаратора колонного типу необхідно дотриматися умови максимізації вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності віброживильника q та мінімізації його споживної потужності P . Рішенням заявленої компромісної задачі є два рівняння, які вказують на зв'язок продуктивності віброживильника q і швидкості повітряного потоку V_a від вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k . Отримані залежності використані для налаштування операційних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу і досягнення максимальної ефективності його роботи.

Впровадження розробленого аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насіннєвої суміші соняшника СС-002 у порівнянні з аеродинамічним сепаратором ІСМ-2,5 є економічно доцільним, оскільки він забезпечує значний річний економічний ефект (767 201 грн), має короткий термін окупності (0,37 року) та знижує сукупні витрати в порівнянні з базовою машиною, незважаючи на вищі витрати на електроенергію.

Ключові слова: насіннєвий матеріал, зернова маса, насіння соняшнику, суміш, компоненти, ядро, лушпиння, механізація, технологія, процес, очищення, розділення, сепарація, калібрування, фракціонування, поділ, аеродинамічний сепаратор, сепаруюча машина, модель, моделювання, симуляція, рівняння, оптимізація, ефективність, інтенсифікація, керування, адаптивність, параметри, режими, властивості, рух, траєкторія, поле швидкостей, концентрація, продуктивність, віброживильник, вібратор, технічний засіб, робочий орган, пневматичний канал, повітряний канал, киплячий шар, псевдорозріджений шар, вібрація, повітряний потік, коливання, метод дискретних елементів.

ANNOTATION

Kudriavtsev I.M. Justification of the design and technological parameters of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste. – Qualification scientific work in manuscript form.

Dissertation for the attainment of the educational and scientific degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty 133 Industrial Engineering (13 «Mechanical Engineering») – Dnipro State Agrarian and Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2025.

The aim of the work is to improve the efficiency of the technological process of fine cleaning sunflower seeds from waste by developing the design of a column-type aerodynamic separator with rational technological and structural parameters, which allow achieving the required product quality with minimal specific energy consumption.

The object of the study is the technological process of fine cleaning sunflower seeds from waste using a column-type aerodynamic separator.

The subject of the study is the sunflower seed mixture and the conditions and regularities of the technological process of its separation based on aerodynamic properties.

Research methods. The study was conducted in accordance with the requirements of DSTU 3973-2000, COY NAH 73.1-001:2011, and the dissertation was formatted according to DSTU 3008:2015 and the Ministry of Education and Science order No. 40 dated 12.01.2017. Theoretical research was based on methods of numerical modeling, considering the fundamental principles of theoretical mechanics, gas dynamics, probability theory, elasticity, as well as models of Lagrangian multiphase systems, discrete elements, and multiphase interactions. During calculations, integral and differential calculus methods were applied. Experimental research utilized mathematical approaches for experimental design, methods of visual and field observations, and expert evaluation. Data processing and analysis were carried out using probability theory and correlation-regression analysis. The methodological approaches used in the research comply with international standards, including the requirements of ISO 17025. During data processing, the following software tools were used: Microsoft Excel, Wolfram Cloud, and Simcenter Star-CCM+.

The scientific novelty of the obtained results lies in the following.

For the first time:

- regression models of the second order were obtained, describing the dependencies of key parameters of the aerodynamic separation process of the sunflower seed mixture in the vertical separation chamber, in particular the horizontal flight distance of particles, cleaning quality, and separation productivity from the air flow velocity, the feed rate of the initial mixture, and the physicochemical properties of its components;
- trajectories of flight and distribution of components of the sunflower seed mixture (sunflower kernel, husk, and small particles) in the rarefaction chamber of the column-type aerodynamic separator were obtained, depending on its geometric dimensions, air flow velocity, feed rate of the initial mixture, and its composition.

Further developed:

- the physical and mathematical framework for numerically modeling the behavior of components of the sunflower seed mixture (sunflower kernel, husk, and small particles) in an air flow, taking into account aerodynamic and contact forces based on the DEM-CFD approach.

Practical significance of the obtained results. A new structural and technological scheme of a column-type aerodynamic separator has been developed, which ensures fine cleaning of sunflower seeds from waste (Ukrainian patents for utility models No. 155711, 155727, 156504). The proposed design solutions aim to reduce dimensions, material consumption, and energy consumption while maintaining high cleaning efficiency.

The research results, in the form of a manufactured aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste with justified structural and technological parameters, have been implemented at the following enterprises: LLC NVO "SORTIVALNI MACHINY" (Dnipro); LLC "POTOKI" (Dnipro region, city of Dnipro); JSC "UKROLYAPRODUKT" (Poltava region, city of Zinkiv); LLC "VIKTOR i K" (Kirovohrad region, city of Svitlovodsk, village Vlasivka); LLC "HYDROSEND" (Kirovohrad region, city of Svitlovodsk, village Vlasivka); LLC "AGROPROINVEST 08" (Dnipro region, Nikopol district, village Pershotravneve).

The research results have been incorporated into the curriculum of the following courses: "Machines and Equipment and their Use in the Processing of Agricultural Products" for bachelor's degree students in the specialty 208 – Agroengineering, and "Operation and

Maintenance of Food Production Equipment" for bachelor's degree students in the specialty 181 – Food Technologies.

A structurally and technologically justified scheme of a column-type aerodynamic separator for fine cleaning of sunflower seed mixture waste has been developed. It includes a loading hopper and vibration feeder, an air flow source with adjustable intensity in the separation zone, a pneumatic separation channel with a branch pipe for feeding seed mixture waste, a branch pipe for discharging seed material, and a branch pipe for discharging waste, a settling chamber for delivering waste to a screw trap with a vent, a seed material collector, and a waste collector. The separator channel at the bottom has an air distributor, and at the top, it features a chamber for rarefaction with an extension of the channel section, equipped with a deflector and a branch pipe for the discharge of air and dust. The internal surfaces of the separation duct are made of metal, primarily stainless steel, or have a low friction coefficient coating. The development was based on the task of reducing the dimensions, material consumption, and energy consumption while maintaining the efficiency of sunflower seed mixture waste cleaning.

An improved physical and mathematical framework for the interaction of the components of the sunflower seed mixture waste with each other and the walls of the column-type aerodynamic separator, as well as their movement under the influence of the air flow, has been developed. The physical and mathematical framework is based on representing the components of the sunflower seed mixture waste (sunflower kernel, husk, and small particles) as a model of clusters of spherical sub-particles in the DEM with varying quantities and diameters. A system of differential equations of motion for the components of the seed mixture waste, considering the air flow resistance force, the Safman lift force, the Magnus lift force, Archimedes' buoyant force, and the Hertz contact force, has been developed. The refined DEM-CFD numerical modeling framework has been used in further numerical simulations using the Simcenter Star-CCM+ software package.

As a result of the first stage of numerical modeling of the separation process of the components of sunflower seed mixture waste in the pneumatic separation channel, the trajectories of their movement were obtained. The second-order regression equations for the horizontal flight distance of the components (sunflower husk and small particles), y_{opt} , were calculated as a function of the effective diameter D_p , the component feed speed V_p , and the air flow velocity V_a .

Considering the condition for minimizing y_{opt} and V_a for components with effective diameters in the range of 0.009–0.013 m, the formalized conveyor belt speed was obtained as $V_{p\text{-opt}} = 0.073$ m/s, and the flight distance of the components (sunflower husk and small particles) was $y_{\text{opt}} = 0.2195$ m. The cross-sectional area of the pneumatic separation channel was adopted as a square with a side length of 220 mm.

As a result of the second stage of numerical modeling of the interaction of the sunflower seed mixture waste and air flows in the pneumatic separation channel, their visualization for different factor combinations was obtained. The second-order regression equations for the content of sunflower kernels in the kernel intake area, η_{k-k} , separation process productivity, q , and air flow volume (air flow generator capacity), Q_a , as a function of the height of the sunflower seed mixture waste layer being fed, h_p , and air flow velocity V_a , were calculated. Considering the condition for maximizing η_{k-k} and q with a minimal value of Q_a , rational values for the research factors were obtained: $h_p = 0.036$ m, $V_a = 3.42$ m/s. At these conditions, $\eta_{k-k} = 0.94$, $q = 122.9$ kg/h, $Q_a = 588$ m³/h.

As a result of the third stage of numerical modeling of the separation process of sunflower seed mixture waste components in the rarefaction chamber, the trajectories of their movement and distributions were obtained. The second-order regression equations for the distance between the peaks of the sunflower husk and small particle distributions, $\Delta y'$, in the rarefaction chamber were calculated as a function of the effective diameter D_p , the component feed speed V_p , and the radius of curvature of the upper edge of the rarefaction chamber, R . Considering the condition for maximizing $\Delta y'$, a rational value for the intersection point of the component distributions (sunflower husk and small particles) was obtained as $y'_{\text{int}} = 0.43$ m.

As a result of the fourth stage of numerical modeling of the separation process of sunflower seed mixture waste in the column-type aerodynamic separator, the regression equations for the distribution coefficient δ of the developed aerodynamic separator were calculated as a function of the content of components in the seed mixture ψ_h , ψ_d , ψ_k , the mixture feed rate q , and air flow velocity V_a . The minimum value of the distribution coefficient δ was observed for the following component content: $\psi_d = 0.331$, $\psi_h = 0.335$, $\psi_k = 0.334$. To ensure high separation quality ($\delta \rightarrow \max$) with sufficiently high productivity ($q \rightarrow \max$) and reduced

energy consumption ($V_a \rightarrow \min$), rational values for the research factors were established: $q = 133 \text{ kg/h}$, $V_a = 2.46 \text{ m/s}$. At these conditions, the distribution coefficient $\delta = 0.92$.

The results of the experimental studies of the column-type aerodynamic separator showed that the model describing the dependence of the content of sunflower kernels in the kernel intake area, η_{k-k} , is significant and adequate. This model includes nonlinear dependencies on all the factors of the research: the productivity of the vibration feeder q , the air flow velocity V_a , and the content of kernels in the initial mixture, ψ_k . Additionally, equations were obtained that describe the dependencies of the distribution coefficient δ and the power consumption P on the research factors. To achieve the effectiveness of the column-type aerodynamic separator, the condition for maximizing the content of sunflower kernels in the kernel intake area η_{k-k} , the productivity of the vibration feeder q , and minimizing its power consumption P must be met. The solution to the stated compromise problem is given by two equations that indicate the relationship between the productivity of the vibration feeder q and the air flow velocity V_a with the content of sunflower kernels in the mixture, ψ_k . These obtained dependencies were used for setting the operational parameters of the column-type aerodynamic separator and achieving its maximum efficiency.

The implementation of the developed aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste, model CC-002, compared to the aerodynamic separator ISM-2.5, is economically feasible, as it provides a significant annual economic benefit (767,201 UAH), has a short payback period (0.37 years), and reduces overall costs compared to the baseline machine, despite higher electricity costs.

Keywords: seed material, grain mass, sunflower seeds, mixture, components, kernel, husk, mechanization, technology, process, cleaning, separation, segregation, calibration, fractionation, division, aerodynamic separator, separating machine, model, modeling, simulation, equation, optimization, efficiency, intensification, control, adaptability, parameters, modes, properties, motion, trajectory, velocity field, concentration, productivity, vibration feeder, vibrator, technical means, working body, pneumatic channel, air channel, fluidized bed, pseudo-fluidized bed, vibration, air flow, oscillation, discrete element method.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, У ЯКИХ ВИКЛАДЕНО ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Статті у наукових фахових виданнях України зі спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»:

1. **Кудрявцев, І.М.** (2024). Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження аеродинамічного сепаратора. Вібрації в техніці та технологіях, 2 (113): 132–142. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-15

2. **Kudriavtsev, I.** (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (125): 47–55. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-5

3. Koshulko, V., & **Kudriavtsev, I.** (2024). Justification of the design of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 10 (41), II: 113-122. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.113-122 *(Здобувачу належать результати чисельного моделювання процесу сепарації відходів соняшнику)*

4. **Kudriavtsev, I.**, Koshulko, V., Sova, N., & Leusenko, O. (2025). Results of experimental studies of a column-type aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, № 1 (128): 45–54. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-5 *(Здобувачу належать результати експериментальних досліджень процесу сепарації відходів соняшнику)*

Патенти України:

5. **Кудрявцев, І.М.**, & Бардадим, О.В. (2024). Патент України на корисну модель №155711. Сортувальний агрегат колонного типу для тонкого очищення насіннєвих матеріалів. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202300562. Заявл. 15.02.2023. Опубл. 03.04.2024, бюл. № 14/2024 *(Здобувачу належать обґрунтування форми і геометричних розмірів сортувальний агрегат).*

6. Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Бардадим, О.В., Ярошкін, В.П., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2024). Патент України на корисну модель №155727. Технологічна лінія пресування соняшникової олії повного циклу на базі адаптивних сортувальних машин із програмованими параметрами. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202303069. Заявл. 23.06.2023. Опубл. 03.04.2024, бюл. № 14/2024 *(Здобувачу належать ідея оснащати технологічну лінію адаптивними сортувальними машинами з програмованими параметрами)*.

7. Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Бардадим, О.В., Ярошкін, В.П., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2024). Патент України на корисну модель №156504. Спосіб сепарації сипучої суміші у текучому двостадійному середовищі. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202305759. Заявл. 29.11.2023. Опубл. 03.07.2024, бюл. № 27/2024 *(Здобувачу належать ідея додатково включити другу стадію, при якій здійснюють сепарацію у текучому двостадійному середовищі з послідовним використанням віброінерційного та пневматичного способів генерації псевдорозріджених середовищ)*

Авторське право на твір:

8. **Кудрявцев, І.М.** (2023). Авторське право на службовий твір №121609. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів СС-012. Настанови з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 06.12.2023. Опубл. 29.12.2023, бюл. № 78.

9. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Мельник, М.М., Ярошкін, & В.П. (2024). Авторське право на службовий твір №7286. Брошура «Машини сортувальні для сипучих матеріалів. Програма та методики випробувань». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 23.10.2024. Опубл. 29.11.2024, бюл. №84. *(Здобувачу належать опис методики випробування сортувальних машин)*

10. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Мельник, М.М., & Ярошкін, В.П. (2024). Авторське право на службовий твір № 7242. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів лабораторна СС-002-05. Настанова з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 12.09.2024. Опубл. 29.11.2024, бюл. №84. *(Здобувачу належать опис методики випробування сортувальних машин)*

Статті у наукових фахових виданнях України інших спеціальностей:

11. Чурсінов, Ю.О., Луценко, М.В., & **Кудрявцев, І.М.** (2022). Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. Наука технології інновації, 2 (22): 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08 *(Здобувачу належать розрахунок техніко-економічної ефективності доцільності сортування відходів)*.

12. Чурсінов, Ю.О., **Кудрявцев, І.М.**, & Луценко, М.В. (2022). Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2 (12): 93–99. DOI: 10.20998/2413-4295.2022.02.14. *(Здобувачу належать розробка конструктивно-технологічної схеми мобільної установки для сортування зернових відходів)*.

Статті у інших виданнях України:

13. **Кудрявцев, І.М.**, & Мельник, С.М. (2022). Проблеми визначення технологічної ефективності сортувального обладнання. Веб-сайт «Elevatorist» <https://elevatorist.com/blog/read/822-problemi-viznachennya-tehnologichnoyi-efektivnosti-sortuvalnogo-obladnannya> *(Здобувачу належать опис сепаратора колонного типу для очищення засмічених насіннєвих матеріалів)*.

Тези і матеріали конференцій:

14. **Кудрявцев, І.М.,** Чурсінов, Ю.О., & Луценко, М.В. (2022). Innovative sorting equipment for the food industry. Матеріали I міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» присвячена 100-річчю Дніпровського державного аграрно-економічного університету (20 травня 2022 р.). Дніпро, “Середняк Т.К.”: 116–118. *(Здобувачу належить аналіз сортувального обладнання для харчової промисловості).*

15. **Кудрявцев, І.М.,** & Чурсінов, Ю.О. (2022). Перспективи сортування відходів пшениці. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та практичні питання аграрної науки» (18 травня 2022 р.). Дніпро, ДДАЕУ. Ч. 1: 293–295. *(Здобувачу належить аналіз сортувального обладнання для сортування насіння).*

16. **Кудрявцев, І.М.,** Луценко, М.В., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2023). Аспекти сталого розвитку підприємства в умовах «циркулярної економіки». Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи» (20-21 березня 2023 р.). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»: 736–738. *(Здобувачу належить аналіз процесу очищення відходів в умовах сталого розвитку підприємства).*

17. Чурсінов, Ю.О., **Кудрявцев, І.М.,** Луценко, М.В., & Мельник, М.М. (2023). Innovations of the sorting process in the technology of oil extraction production. Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (20-21 березня 2023 р.). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»: 467–468. *(Здобувачу належить аналіз процесу сортування в технології олійно-екстракційного виробництва).*

18. **Кудрявцев, І.М.,** Бардадим, О.В., & Мельник, С.М. (2023). Концепція «NO HUSKS» (без лушпиння) та перспективи її впровадження у шеретувально віяльних відділеннях олійно екстракційних підприємств. Тези доповідей II Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молодь – науці і виробництву: Актуальні питання харчової промисловості» (10 травня

2023 р.). Херсон: ХДАЕУ: 78–79. *(Здобувачу належить опис перспектив впровадження нової технології у олійно-екстракційні підприємства).*

19. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., **Кудрявцев, І.М.**, & Мельник, М.М. (2024). Аспекти функціонування олійножирового підприємства в умовах кризи та інженерія пост кризового періоду. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Особливості функціонування економіки в умовах кризи». (31 січня 2024 р). Черкаси, Східноєвропейський центр наукових досліджень: 188–192. *(Здобувачу належать опис перспектив впровадження аеродинамічного сепаратора колонного типу)*

20. **Кудрявцев, І.М.**, Кошулько, В.С., & Мельник, М.М. (2024). Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику і експериментальних результатів. Матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 р.). Запоріжжя, ТДАТУ: 27–32. *(Здобувачу належать результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику)*

21. **Кудрявцев, І.М.**, Кошулько, В.С., & Мельник, М.М. (2024). Порівняльний аналіз даних чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику та експериментальних результатів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (26–27 листопада 2024 р.). Харків, ДБУ: 417–419. *(Здобувачу належать результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику)*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	26
1.1 Технологічний процес сепарації насіння соняшнику	26
1.2 Аналіз досліджень щодо визначення фізико-механічних характеристик компонентів насінневої суміші соняшнику	29
1.3 Аналіз способів і технологій очищення насінневої суміші соняшнику.	34
1.4 Аналіз технічних засобів аеродинамічної безрешітної сепарації насінневої суміші.....	38
1.5 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми аеродинамічного сепаратора колонного типу	44
1.6 Висновки з розділу	53
1.7 Мета і задачі досліджень.....	54
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО ТИПУ	56
2.1 Постановка задачі	56
2.2 Фізико-математична модель руху компонентів відходів насінневої суміші соняшника під впливом повітряного потоку	57
2.3 Методика чисельного моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу	64
2.4 Результати чисельного моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу	71
2.5 Висновки з розділу	87
3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО ТИПУ	90
3.1 Планування експериментальних досліджень.....	90

3.2	Методики лабораторних досліджень	91
3.3	Методика експериментальних досліджень	99
3.4	Методика статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень.....	109
3.5	Висновки з розділу	110
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО ТИПУ	112
4.1	Результати лабораторних досліджень	112
4.2	Результати експериментальних досліджень допоміжних елементів сепаратора колонного типу	118
4.3	Результати експериментальних досліджень основних параметрів сепаратора	124
4.4	Висновки з розділу	133
5	РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	136
5.1	Впровадження результатів досліджень.....	136
5.2	Економічне оцінювання техніки на етапі випробовування	140
5.3	Висновки з розділу	145
	ВИСНОВКИ.....	146
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	149
	ДОДАТКИ.....	173

ВСТУП

Актуальність. Сталий розвиток, який передбачає раціональне використання природних ресурсів та мінімізацію впливу виробництва на довкілля, стає одним із ключових напрямів світової економіки. Концепція циркулярної економіки, що ґрунтується на принципах скорочення споживання ресурсів, повторного використання та переробки відходів, є основою екологічно відповідальної моделі господарювання. У межах цієї стратегії Європейська комісія прийняла «Європейський зелений курс», спрямований на досягнення вуглецевої нейтральності ЄС до 2050 року [1, 2]. Україна також рухається у напрямку сталого розвитку, що закріплено у Національній доповіді «Цілі сталого розвитку: Україна», де визначені пріоритети у сфері екологічного управління, відповідального споживання та виробництва. Важливим завданням є зменшення утворення відходів та підвищення рівня їх повторного використання через інноваційні технології [3, 4].

Україна є державою з розвиненим аграрним і промисловим секторами, де однією з основних сфер діяльності виступає вирощування олійних культур, зокрема соняшнику [5, 6]. Високі показники врожайності супроводжуються значним утворенням відходів на всіх етапах переробки зернових (насіннєвих) сумішей. Так, середня врожайність соняшнику в 2022-2024 роках становила 25 ц/га, а максимальні значення перевищували 50 ц/га, що свідчить про тенденцію до подальшого збільшення обсягів таких відходів [7, 8].

Відходи соняшнику містять значну частку придатної до використання олійної фракції (30–50 %), що робить їх цінною вторинною сировиною. Однак ефективне вилучення цієї складової можливе лише за допомогою механічного сепарування, що потребує сучасного технічного оснащення. Наявне обладнання не забезпечує належного рівня очищення відходів соняшнику з забезпеченням ресурсозбереження. Морально і фізично застарілі очисні комплекси не мають сучасних систем автоматизованого керування, що спричиняє зменшення продуктивності процесів і збільшення їх енергоспоживання [9]. Зазначені проблеми зумовлюють необхідність

пошуку і впровадження інноваційних рішень для тонкого очищення насіння соняшнику з відходів.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що стали основою дисертації, проведені в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті в рамках науково-технічної роботи «Інноваційні процеси отримання білкових та біологічно-активних добавок з рослин» (№ ДР 0122U001380, 2022–2025 рр.).

Метою досліджень є підвищення ефективності технологічного процесу тонкого очищення насіння соняшника з відходів шляхом розробки конструкції аеродинамічного сепаратора колонного типу із раціональними технологічними і конструктивними параметрами, які дозволяють досягти задану якість продукції з мінімальними питомими енерговитратами.

Задля досягнення поставленої мети була сформульована **наукова гіпотеза**, відповідно до якої підвищення якості технологічного процесу тонкого очищення насіння соняшнику від відходів та зменшення енерговитрат можуть бути досягнуті шляхом обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу та впровадження системи керування його режимами залежно від складу відходів.

Задачі дослідження:

- здійснити аналіз техніко-технологічного обґрунтування процесу сепарації насіння соняшнику аеродинамічним безрешітним способом і обґрунтувати конструкцію відповідного аеродинамічного сепаратора колонного типу;
- здійснити аналітичне дослідження процесу взаємодії компонентів насінневої суміші з повітряним потоком;
- здійснити чисельне моделювання процесу сепарації насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу та виявити закономірності впливу його конструктивних і режимних параметрів на якість і продуктивність процесу сепарації;

– розробити методику і провести експериментальні дослідження процесу сепарації насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу та виявити основні закономірності процесу її функціонування;

– здійснити випробування та оцінити економічну ефективність розробленого аеродинамічного сепаратора колонного типу, а також впровадити результати досліджень у виробничу практику.

Об'єкт дослідження: технологічний процес тонкого очищення насіння соняшнику з відходів на аеродинамічному сепараторі колонного типу.

Предмет дослідження: насіннєва суміш соняшнику та умови і закономірності протікання технологічного процесу її сепарації за аеродинамічними властивостями.

Методи дослідження. Дослідження виконувались відповідно до вимог ДСТУ 3973-2000, СОУ НАН 73.1-001:2011, а дисертація оформлювалась згідно з ДСТУ 3008:2015 і наказу МОН від 12.01.2017 № 40.

Теоретичні дослідження базувались на методах чисельного моделювання з урахуванням основних принципів теоретичної механіки, газодинаміки, теорій ймовірності, пружності, а також моделей лагранжевої багатофазності, дискретних елементів та багатофазної взаємодії. У процесі розрахунків застосовувались методи інтегрального і диференційного числення.

Для експериментальних досліджень використані математичні підходи до планування експерименту, методи наочних і натурних спостережень та експертного оцінювання. Обробка й аналіз отриманих даних здійснювалась з використанням теорії ймовірностей, кореляційно-регресійного аналізу. Методичні підходи, що використовувались під час досліджень, відповідають міжнародним стандартам, зокрема вимогам ISO 17025.

Під час обробки даних використовувались наступні програмні засоби: Simcenter Star-CCM+, Wolfram Cloud та Microsoft Excel.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

Вперше:

– отримані математичні моделі регресії другого порядку, які характеризують залежності ключових параметрів процесу аеродинамічної сепарації насіннєвої

суміші соняшнику у вертикальній сепараційній камері, зокрема горизонтальної відстані польоту частинок, якості очищення та продуктивності сепарації від швидкості повітряного потоку, подачі вихідної суміші та фізико-механічних властивостей її компонентів;

– отримані траєкторії польоту і розподіли компонентів насінневої суміші соняшнику (ядро соняшнику, лушпиння і дрібні частинки) в камері розрідження аеродинамічного сепаратора колонного типу залежно від її геометричних розмірів, швидкості повітряного потоку, подачі вихідної суміші та її складу.

Набуло подальшого розвитку:

– фізико-математичний апарат чисельного моделювання поведінки компонентів насінневої суміші соняшнику (ядро соняшнику, лушпиння і дрібні частинки) у повітряному потоці з урахуванням аеродинамічних і контактних сил на основі DEM-CFD підходу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено нову конструктивно-технологічну схему аеродинамічного сепаратора колонного типу, що забезпечує тонке очищення насіння соняшнику від відходів (патенти України на корисні моделі № 155711, 155727, 156504). Запропоновані конструктивні рішення спрямовані на зменшення габаритів, матеріалоемності та енергоспоживання при збереженні високої ефективності очищення.

Результати досліджень у вигляді виготовленого аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насінневої суміші соняшника із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами впроваджені на підприємствах: ТОВ НВО «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ» (м. Дніпро); ТОВ «ПОТОКИ» (Дніпропетровська обл, м. Дніпро); ТДВ «УКРОЛЯПРОДУКТ» (Полтавська обл., м. Зіньків); ПП «ВІКТОР і К» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка); ТОВ «ГІДРОСЕНД» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка); ТОВ «АГРОПРОІНВЕСТ 08» (Дніпропетровська обл, Нікопольський район, с. Першотравневе).

Результати досліджень впроваджено в курс дисциплін: «Машини і обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції» для студентів

спеціальності 208 «Агроінженерія» (освітній рівень – бакалавр) і «Експлуатація і обслуговування обладнання харчових виробництв» для студентів спеціальності 181 «Харчові технології» (освітній рівень – бакалавр).

Особистий внесок здобувача. Експериментальні і теоретичні результати досліджень, представлені в роботі, отримані автором особисто. Формулювання завдань, аналіз та інтерпретація отриманих результатів здійснювалися у співпраці з науковим керівником і частково за участю співавторів публікацій. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить внесок у відповідних розділах дослідження: [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] – стан проблеми та визначення напрямків досліджень; [18, 19, 20] – теоретичні дослідження; [21, 22, 23, 24] – експериментальні дослідження; [25, 26, 27, 28, 29, 30] – реалізація результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались та отримали позитивну оцінку на: I міжнародній науковій конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» (20 травня 2022 р., ДДАЕУ, Дніпро, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні питання аграрної науки» (18 травня 2022 р., ДДАЕУ, Дніпро, Україна); III Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи» (20–21 березня 2023 р., ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», Полтава, Україна); II Всеукраїнській науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молодь – науці і виробництву: Актуальні питання харчової промисловості» (10 травня 2023 р., ХДАЕУ, Херсон, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Особливості функціонування економіки в умовах кризи». (31 січня 2024 р., Східноєвропейський центр наукових досліджень, Черкаси, Україна); V Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 р., ТДАТУ, Запоріжжя, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (26–27 листопада 2024 р., ДБУ, Харків, Україна).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження представлені у 21 науковій публікації, серед яких: 4 статті у фахових наукових виданнях України за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування; 3 патенти України на корисну модель; 3 авторські свідоцтва на твір; 3 статті в наукових виданнях інших спеціальностей; 8 матеріалів та тез у збірниках конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, п'ять розділів, висновки, перелік використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 227 сторінок, з яких 55 сторінок відведені для 12 додатків. Основний текст дисертації займає 172 сторінки і містить 53 рисунки та 20 таблиць. Список використаних джерел налічує 217 найменування та розміщується на 24 сторінках.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Технологічний процес сепарації насіння соняшнику

Технологічні процеси сепарації насіння соняшнику мають відповідати вимогам щодо якості насіння як кінцевого продукту переробки, забезпечувати допустимі технологічні безповоротні втрати сировини, а також відповідати нормативам продуктивності, енергоспоживання та санітарно-гігієнічного стану обладнання і робочої зони [31–32]. Узагальнену схему очищення зернової (насіннєвої) суміші наведено на рис. 1.1.

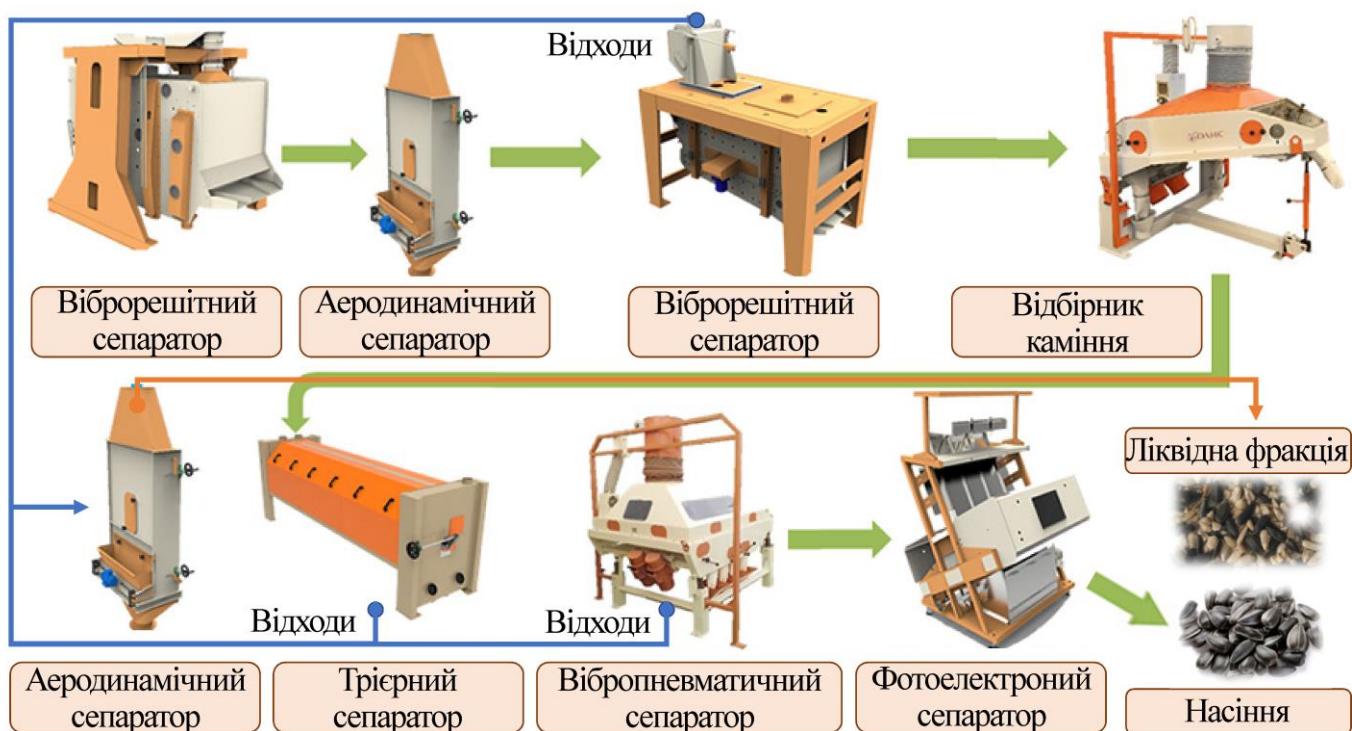


Рисунок 1.1 – Узагальнена технологічна схема процесу очищення насіння соняшнику

Очищення зернової (насіннєвої) суміші на початковому етапі післязбиральної обробки проводять з метою тимчасового її збереження перед сушінням, забезпечення сипкості та можливості виконання подальших очисних операцій. Видалення вологих домішок є основним завданням цього процесу,

оскільки підвищена вологість і засміченість свіжозібраного зерна (насіння) знижують його сипкість і збільшують ризик самозігрівання. Надлишок вологи зазвичай міститься у дрібних рослинних рештках, що входять до складу зернової суміші [33]. Сорткування зерна на етапі післязбиральної обробки здійснюється безпосередньо після комбайна, маючи на меті відокремлення домішок, що відрізняються геометричними розмірами (товщина, ширина) і аеродинамічними властивостями (швидкість витання). Висока засміченість (до 14–25 %), значна вологість (18–28 %) та олійність ускладнюють процес сорткування. Очисне обладнання має забезпечувати ефективне очищення зерна та насіння різних культур з високою продуктивністю. Попереднє очищення зернової маси проводиться при вологості зерна до 40 % та вмісті сміттєвих домішок не більше 20 %, зокрема соломи – не більше 5 %. В результаті цього процесу зерно розділяється на дві фракції: чисте зерно та відходи, при цьому з відходів повинно бути вилучено не менше 50 % домішок рослинного походження. У насіннєвому матеріалі допускається не більше 0,2 % соломистих домішок довжиною до 50 мм, а втрати повноцінного насіння у відходах не повинні перевищувати 0,05 % від маси вхідного матеріалу. Домішки соломи довжиною понад 50 мм у насіннєвій суміші не допускаються [34–35].

Доведення зерна (насіння) до товарної кондиції, що передбачає видалення легких, крупних та дрібних домішок, виконується у решітно-повітряних сортувальних машинах, і саме це визначає *процес первинного очищення*. Очищенню підлягає зерно з вологістю не менше 18 % та вмістом сміттєвих домішок трохи більше 8 %, що потребує високої продуктивності сортувального обладнання. Для досягнення необхідної ефективності очищення важливе значення має площа решітної поверхні сортувальної машини, тому до таких умов найкраще пристосовані плоскорешітні сортувальні машини, які працюють у поєднанні з повітряними сортувальними пристроями. За умови, що одноразове очищення не дозволяє досягти потрібного рівня чистоти, суміш повторно проходить через ту саму машину. У процесі очищення вхідний матеріал поділяють на три основні фракції: насіння, великі фуражні домішки, а також легкі й дрібні домішки. Масова частка якісного

насіння у фуражних відходах та інших домішках не повинна бути більшою за 1,5 %, а в дрібних домішках – не перевищувати 0,05 % від загальної маси повноцінного насіння у початковому матеріалі. Маса якісного насіння у відходах не повинна становити більше 3 % від загальної маси вхідної сировини [36–37].

Доведення зерна до кондицій, необхідних для використання в харчовій промисловості, здійснюється за допомогою **вторинного очищення** (рис. 1.1). У цьому процесі зерно може проходити багаторазове очищення, зокрема в плоскорешітно-повітряних сепараторах. Оскільки на попередніх етапах очищення основна увага приділяється видаленню легковідокремлюваних домішок, основним завданням вторинного очищення стає усунення важковідокремлюваних домішок [38]. Вибір методів їх видалення залежить від складу та характеристик цих домішок, а для досягнення потрібного рівня чистоти можуть використовуватися окремі або всі доступні способи очищення. Зазвичай вторинне очищення проводять на переробних підприємствах. Зерновий (насіннєвий) матеріал, що підлягає вторинному очищенню, має вологість не більше 18 % і містить до 8 % домішок, з яких смітєві домішки становлять до 3 %. Під час процесу очищення вхідний матеріал поділяється на чотири фракції: насіння, фуражні відходи, легкі відходи, а також великі та дрібні домішки. Після очищення вміст домішок у насінні має бути не більшим за 1 %, при цьому допускається наявність не більше 10 насінин інших рослин на 1 кг загальної маси. Відходи не повинні містити більше 1 % повноцінного насіння від їх загальної маси у вихідному матеріалі [39–40].

Остаточне очищення застосовується тому, що поширені методи сортування не забезпечують належної кондиції при сепарації насіннєвого матеріалу до необхідного рівня сортових та посівних норм якості. У цьому випадку застосовують остаточне очищення у спеціальних агрегатах, що використовують відмінності у фізичних властивостях насіння. Насамперед, це недорозвинені та пророслі зерна основних культур; насіння, уражене пліснявою або сажкою (візуально виявлені за кольором – від коричневого до чорного); деякі насіння бур'янів, близькі за розмірами до насіння культурних рослин [41–43].

Найчастіше застосовують пневмовібраційне сортування, засноване на різниці щільності ендосперму насіння. Шар зернової маси на вібраційному столі за допомогою потоку повітря переводять у псевдорозріджений стан, внаслідок чого відбувається стратифікація зернової маси по щільності, менш щільні зерна підіймаються вгору, а щільніші – занурюються вниз [44–48].

Ще один відомий метод сортування – поділ, заснований на відмінності фрикційних властивостей, відмінності в силі тертя об поверхню у повноцінного і неповноцінного насіння, а також у насіння культурних рослин і бур'янів. Для цих цілей використовують гвинтові та фрикційні гірки, нахил яких підбирають таким чином, щоб швидкість скочування шорстких і гладких насінин була різною [49–51].

Також використовується метод сортування в електромагнітному полі. Застосовується він для відділення насіння льону, люцерни та конюшини від подорожника, волошки та гірчака. За морфометричними ознаками та щільністю вони близькі, тому у сортувальних машинах поділ практично не відбувається. Для цілей сортування в зернову суміш додають невелику кількість феромагнітного порошку, частинки якого прилипають до волосистого насіння бур'янів і практично не з'єднуються з гладким насінням культурних рослин. Потім суміш потрапляє на електромагнітний барабан, який притягує зерна бур'янів із намагніченим порошком і скидає їх у відходи [52–55].

Перспективним способом сепарації є спосіб фотосепарації. Метод дозволяє одержувати дуже великий відсоток чистоти насіння – 99,9 % у кінцевому продукті, але спосіб має низку обмежень, що визначає раціональну сферу застосування способу тільки на фінішних етапах сепарації [56–59].

1.2 Аналіз досліджень щодо визначення фізико-механічних характеристик компонентів насіннєвої суміші соняшнику

Технічні умови стосовно якості насіння соняшнику регламентуються ДСТУ 4694:2006 [60] – олійну сировину, яку заготовляють та постачають на промислове перероблення. Також сфера застосування національного стандарту

ДСТУ 7011:2009 [61] поширюється на насіння соняшнику, призначеного для використання на продовольчі потреби, для виробництва олеїнової кислоти і для потреб експорту.

Номенклатура показників якості досить обмежена та стосується фракційного складу насіннєвої суміші, показників харчової безпеки та біопсування, загальних правил безпеки та охорони довкілля. Обмеженість у показниках якості насіння є наслідком стохастичності показників, притаманних насіннєвій суміші соняшнику.

Із фізико-механічних показників стандартним показником є вологість насіння та натурна маса для насіння, призначеного для промислової переробки, також для насіння, призначеного для продовольчих потреб, стандартом ДСТУ 7011:2009 [61] передбачено 5 класів якості соняшнику, для кожного із класів регламентована окрема група показників, загальним показником є фракційний склад насіння (кількість олійної домішки, сміттевої домішки, масова частка олії, масова частка сирого протеїну, масова частка олеїнової кислоти, кислотне число олії).

Стандартом ДСТУ 4694:2006 [60] передбачено норми, згідно до яких проводять розрахунки за товарне насіння соняшнику: базисні норми, обмежувальні заготівельні норми, обмежувальні постачальні норми. (таблиця 1.1). Елеватори, підприємства, які приймають, зберігають, постачають насіння та зерно для промислової переробки, залежно від своїх технологічних можливостей вирішують можливість прийняття на доробку та зберігання зерна на комерційних засадах [62–64].

Таблиця 1.1 – Норми якості при постачанні насіння соняшнику на промислову переробку

Показник	Базисні норми	Обмежувальні заготівельні норми	Обмежувальні постачальні норми
Максимальна вологість, %	немає	< 15,0	< 8,0
Мінімальна вологість, %	> 7,0	> 6,0	> 6,0
Сміттєві домішки, %	< 1,0	< 10,0	< 3,0
Олійні домішки, %	< 3,0	< 7,0	< 7,0
Кислотне число олії, мг КОН	–	< 3,5	< 5,0
Зараженість шкідниками	немає	Кліщ	Кліщ, II ступ.

Соняшникове насіння характеризується рядом фізико-механічних властивостей, серед яких олійність, міцність оболонки, щільність, натура, парусність, швидкість вітання, шпаруватість, геометричні параметри та лінійні розміри. При надходженні на промислову переробку визначаються такі значення фізико-механічних та аеродинамічних характеристик: вологість насіння від 4,2 до 9,1 %, відносна щільність у межах 0,652–0,828 г/см³, насипна щільність (натура) від 320 до 480 г/дм³, абсолютна маса 1000 насінин становить 39,0–95,0 г, шпаруватість коливається в межах 41–62 %, критична швидкість сягає 3,1–8,7 м/с, коефіцієнт парусності змінюється в діапазоні 0,23–0,31 м⁻¹, кут природного укусу сухого насіння знаходиться в межах 26–34°, а для вологого насіння – 31–43° [65–70].

Фракційний склад насіння соняшнику, який піддається переробці на олієекстракційних підприємствах, має значні відхилення від нормативних показників технологічних регламентів.

Успіхи в агрономії дозволили втричі збільшити врожайність соняшнику за 20–30 останніх років [71–72], а з тим і підвищити генерацію відходів. Наприклад, при олієдобуванні сміттєва домішка дорівнює 3 %, знімання лушпиння 17 %, тобто генерується 20 % відходів, і незважаючи на успіхи у використанні відходів для виготовлення продукції, показник має тенденцію збільшення у 6 разів за рахунок підняття врожайності соняшнику до рівня національного рекорду у 53 ц/га [73]. Маючи таке сировинне джерело, та його потенційно небезпечні властивості, впровадження нових сортувальних процесів у існуючі процеси має дати значний екологічний і економічний ефект.

Сучасна технологія добування соняшникової олії має історію майже у два століття. За цей час технологія вдосконалювалася не лише у напрямі збільшення виходу олії, а й у напрямку одержання нових видів продукції з відходів. Одним з перспективних напрямів удосконалення технології олієдобування є сортування відходів та лушпиння соняшнику та повернення олійної домішки в основний процес. Дослідженнями [74–75] встановлено вміст олійної домішки у насінні соняшнику 4,5–12,0 %, у відходах насіння соняшнику до 45 %, вміст олійної домішки у лушпинні соняшнику 5–16 %.

Насіння, яке надходить на переробні підприємства, піддається обробці на решітних сепараторах, що використовують ознаку подільності зернової (насіннєвої) суміші за геометричними розмірами. При цьому у відходи відбираються домішки, отримані зі сходу першого решета і проходу з останнього решета. Переважна більшість конструкцій решітних сепараторів мають загальний вихід, тобто дві фракції відходів об'єднуються [76]. Отримані відходи мають притаманні йому наступні характеристики. Перш за все, маючи тонкі й довгі частки, суміш має якості армованого продукту за рахунок довгих домішок, що проявляється в злежуваності, так само відходи мають підвищений опір зрушенню в горизонтальній площині, невизначений кут природного укосу, що викликає зависання в бункерах. Тому основною рекомендацією для очищення відходів є перш за все роз'єднання двох потоків відходів решітної сортувальної машини на схід з верхнього решета і прохід з нижнього.

Відходи з нижнього решета мають в своєму складі зернову/олійну, органічну і мінеральну домішки. Компоненти відходів мають близькі показники подільності за геометричними ознаками, але мають значну розбіжність по питомій масі. Такі показники суміші здавалося б, дозволяють віддавати перевагу пневмосепараційному методу з використанням пневмосепараційного столу, однак властивість органічної домішки утворювати псевдорозріджений шар блокується наступними властивостями суміші: фрагменти органічної домішки (уламки стебел і фрагменти листових пластинок з пилкоподібними і рубчастими краями, черешки покриті короткими жорсткими волосками) [77] вступають в зчеплення один з одним, утворюючи псевдосітку, яка перешкоджає переміщенню компонентів суміші (зернової/олійної і мінеральної домішки) при процесах стратифікації. Вібрація, яка інтенсифікує процес пневмосепарації при звичайних продуктах сепарації на пневмосепараційному столі (зернові суміші з вмістом сміттевої і олійної домішок в межах стандартів технічних умов на зерно), в разі обробки сміття призводить тільки до ущільнення сміття і блокування переміщення цільних зернових/олійних і мінеральних домішок по перетину зернової (насіннєвої) суміші і по поверхні столу.

Основна проблема вилучення олійної домішки з відходів насіння соняшнику та з лушпиння є стохастичність властивостей компонентів сміття насіння, емерджентність системи, тобто поява у суміші властивостей, що не притаманні її компонентам окремо, не зведення властивостей суміші до суми властивостей її компонентів. Окремі показники стану суміші (кут природного укусу, опір зсуву та деякі інші), які необхідні при розрахунках технологічного обладнання, є невизначеними і через це потребують додаткових досліджень.

У ході досліджень [78–85] із застосуванням стандартних методик було встановлено залежність фізичних властивостей насіння соняшнику від рівня його вологості в межах 4–22 %. При збільшенні вмісту води з 4 % до 22 % спостерігалось варіювання середньої довжини від 12,13 до 12,56 мм, ширини – від 5,78 до 6,37 мм, товщини – від 3,85 до 4,08 мм, середнього геометричного діаметра – від 6,46 до 6,84 мм, еквівалентного діаметра – від 6,54 до 6,95 мм, арифметичного діаметра – від 7,24 до 7,62 мм, сферичності – від 53,4 % до 55,5 %, площі поверхні – від 112,2 до 125,1 мм², а також збільшення статичного кута природного укусу з 42° до 58°. У той же час маса 1000 насінин зросла з 80,4 до 96,7 г, тоді як насипна щільність знизилася з 400 до 390 кг/м³. Шпаруватість змінювалася в межах 44,6–61,3 %. Лінійне зростання статичного коефіцієнта тертя насіння соняшнику спостерігалось на різних поверхнях конструкційних матеріалів: на пластику – від 0,28 до 0,54, фанері – від 0,35 до 0,54, оцинкованій сталі – від 0,35 до 0,54.

Зважаючи на технологічну ефективність решітного сортувального обладнання, яка не є високою (60–80 %), втрати повноцінного зерна та зернової/олійної домішки при виконанні завдань очищення, досить високі [86–87].

Нагальним завданням сьогодні є не тільки покращення показників сортувального обладнання при сортуванні збіжжя, але й сортування сміття і відходів з метою вилучення повноцінного зерна і домішок, використання їх як сировини для одержання харчових продуктів, кормів, та палива із відновлювальних природних джерел.

Класифікація відходів і домішок може базуватися на ботанічних характеристиках, а також на фізичних властивостях, що застосовуються у зернопереробній промисловості (рис. 1.2) [88].

Найбільшу увагу приділено проблемі переробки зернових відходів. Відходи мають у своєму складі велику кількість зернових/олійних домішок, рівноцінних за біохімічним складом основному зерну (насінню), проте через відсутність сортувального обладнання, що забезпечує необхідну технологічну ефективність сортування відходів, проблема використання відходів має обмежені рішення.

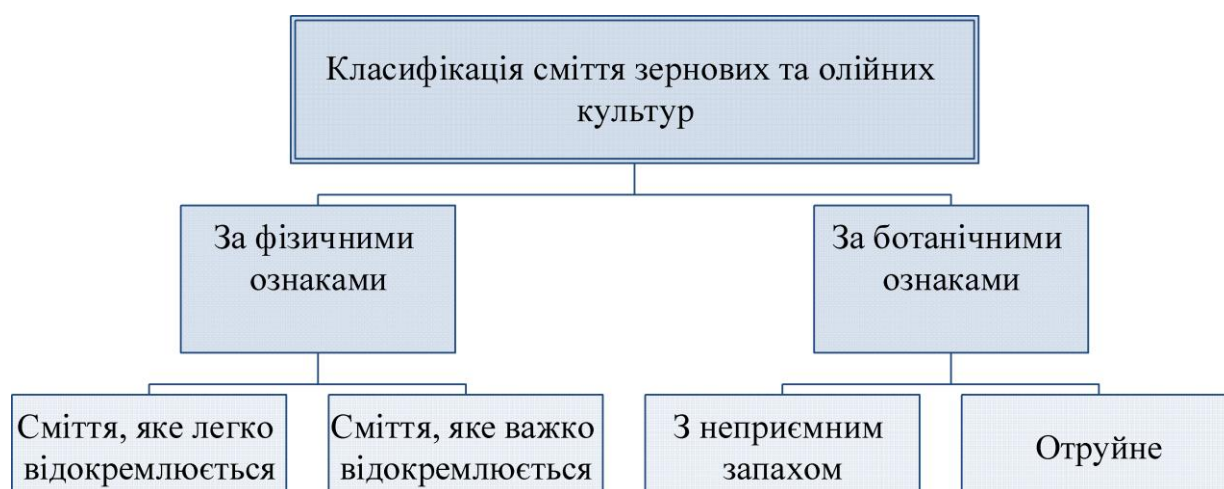


Рисунок 1.2 – Класифікація відходів і домішок зернової (насінневої) суміші

Якщо у побічному продукті зернової (насінневої) суміші після первинного оброблення або у відходах міститься понад 10 % зерен (насіння) пшениці чи жита або більше 20 % зерен (насіння) інших культур, які згідно зі стандартами належать до основної культури, ці відходи та суміші необхідно додатково переробляти з метою вилучення цільового (ліквідного) зерна (насіння) [63, 64, 89]. Тому розробка сортувального обладнання, призначеного для обробки таких відходів, є актуальним завданням у сфері сільськогосподарського машинобудування.

1.3 Аналіз способів і технологій очищення насінневої суміші соняшнику

Методи та технології очищення зернової (насінневої) суміші (в тому числі соняшнику), втілені в конструкціях зерносортувальних машин, мають тривалу історію розвитку. Вітчизняні науковці зробили вагомий внесок у вивчення процесів

післязбиральної обробки насіння, зокрема його очищення, сортування та сепарації, що детально висвітлено в наукових дослідженнях [90–106].

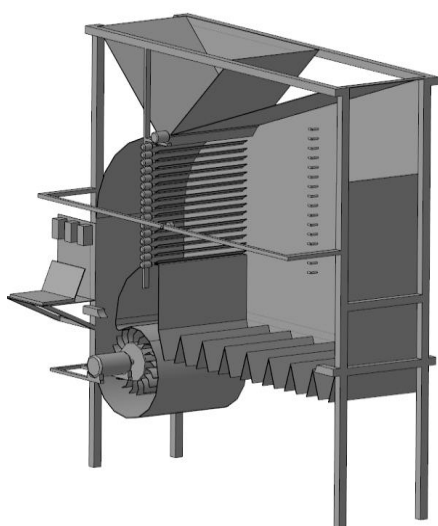
Методи сепарації насіннєвого матеріалу визначаються його фізико-механічними характеристиками [59, 107–114], які впливають на процес сортування: за морфометричними характеристиками (ширина і товщина – на решетах, довжина – на трієрах); за трибометричними властивостями поверхні та форми (на фрикційних сепараторах і гірках); за густиною, щільністю або об’ємною масою (на пневмовібросепараторах, пневматичних столах); за аеродинамічними властивостями (на аспіраторях, пневматичних колонках, повітряних каналах, аеродинамічних сепараторах); за пружністю (на сортувальних столах відбивного типу); за електрофізичними характеристиками (у діелектричних сепараторах, пристроях коронного розряду); за кольорометричними показниками (фотосепаратори); за комбінованими параметрами.

Головна мета процесу сепарації – отримання високоякісного зерна (насіння). Тому визначення оптимального рівня технологічного оснащення та кількості необхідних операцій є важливим завданням.

Для усунення аспіраційних домішок із зернової суміші (до яких належать нерозвинені зерна, плюскле насіння, полова, залишки соломи тощо) застосовуються пневмосортувальні машини (рис. 1.3, а) [115–121]. У більшості випадків вони представлені вертикальними каналами, де зернова суміш, що падає під дією сили тяжіння, продувається висхідним потоком повітря. Пневмосортувальні машини поділяють на машини замкнутого і розімкнутого типу. В останніх відпрацьоване повітря викидається в навколишнє середовище. У пневмосортувальних машинах замкнутого типу після відокремлення домішок у спеціальній камері очищене повітря рециркулюється завдяки вбудованому вентилятору. Такі системи мають перевагу, оскільки мінімізують викиди в навколишнє середовище й не потребують додаткових пристроїв для роботи. Їх ефективність у видаленні легких домішок сягає 65–75 %.

Для видалення домішок, що різняться за довжиною, використовується сортування зерна (насіння) в трієрах (рис. 1.3, б) [122–124]. Короткі домішки в суміші представлені насінням кукулю, польового горошку, битими зернами, а довгі – зернами вівсюга, вівса, ячменю. Якщо необхідно відокремити коротші від основного зерна частки, застосовують

трієри-кукілевідбірники, а якщо довші – трієри-вівсюговідбірники. Їх конструкція передбачає обертання горизонтального циліндра з чарунковою поверхнею, яка захоплює домішки й розділяє зерно за розмірами. Ефективність трієрів-кукілевідбірників досягає 80–90 %, а трієрів-вівсюговідбірників – 80–85 %. Процес вважається ефективним, якщо після одного проходу через трієр видаляється не менше 80 % відповідних домішок.



Розробка Алієва Е.Б.
[90, 108, 116]

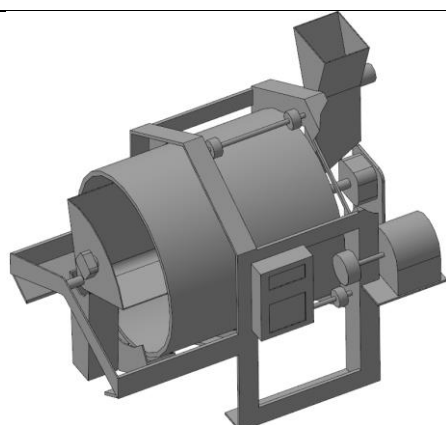


Аеродинамічний
сепаратор ІСМ [125]



Аеродинамічний
сепаратор САД [126]

Пневмосортувальні машини (а)



Розробка Алієва Е.Б.,
Лупко К.О. [106, 124]



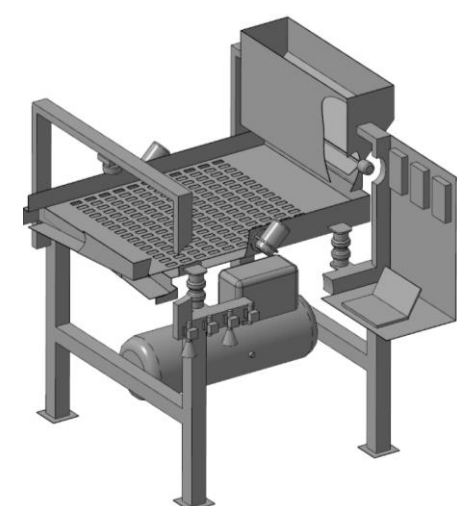
Циліндричний трієр
Cimbria HSR 1010 [127]



Трієри БТХМ [128]

Трієрні сепаратори (б)

Рисунок 1.3 – Типи обладнання для очищення, розділення і сепарації зернової (насінневої) суміші



Розробка Алієва Е.Б.
[90, 108, 133]

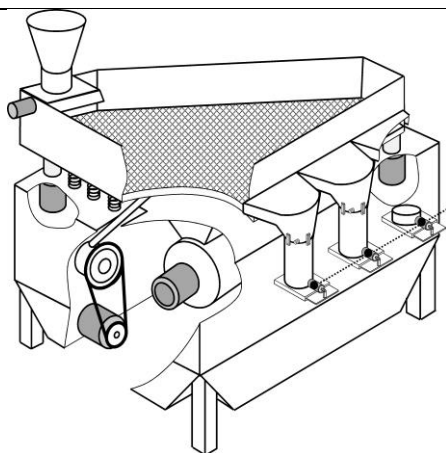


Сепаратор ГОРИЗОНТ-
К-130 [129]



Очисна-калібруюча машина
Фадєєва [130]

Решітні сепаратори (в)



Розробка Алієва Е.Б.
[90, 108, 139]



Пневмосортувальний
стіл ПСС-3,5 [131]



Вібропневмостіл
ВПС [132]

Вібропневматичні сепаратори (г)

Рисунок 1.3 – Типи обладнання для очищення, розділення і сепарації зернової (насінневої) суміші (продовження)

Легковідокремлювані домішки (що усуваються за допомогою просіювання на решетах або пневмосортуванням) видаляються решітними та повітряними сортувальними машинами, які можуть комбінуватися в єдині агрегати (рис. 1.3, в) [133–138].

Важкі домішки та матеріал, що відрізняється питомою вагою, сортуються за допомогою вібропневматичних методів (рис. 1.3, г) [139–148]. При оцінці ефективності очищення зерна (насіння) кожен процес оцінюється за рівнем видалення певного типу домішок.

1.4 Аналіз технічних засобів аеродинамічної безрешітної сепарації насіннєвої суміші

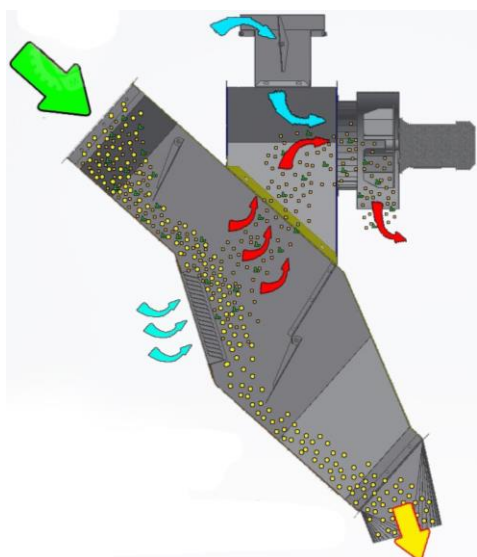
Методи обробки насіннєвої суміші за допомогою повітряного потоку мають багаторічну історію застосування у зерноочисних машинах, що зумовило їх термінологічну й визначальну розбіжність, а також різноманітні назви (повітряна, пневматична, аеродинамічна, аспіраційна сепарація).

Дякі технологічні схеми системи повітряного сортування зернової (насіннєвої) суміші, які інтегруються у зерноочисні машини наведені на рис. 1.4.

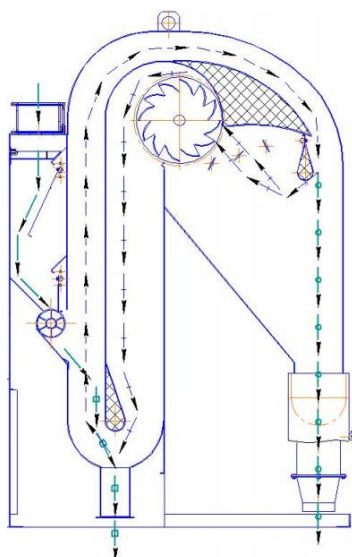
Налаштування зерноочисних агрегатів для повітряного очищення передбачає регулювання швидкості повітряного потоку в каналах сортування. Це дає змогу досягти максимального видалення легких домішок із вхідної суміші без втрати насіння основної культури у відходи. Мінімальна критична швидкість насіння (швидкість витання) визначає необхідний рівень швидкості повітря в сортувальному каналі.

Функціонування аеродинамічних сортувальних машин ґрунтується на простому принципі. У повітряному потоці, що створюється вентилятором, частинки сировини, що очіщується, змінюють траєкторію свого падіння відповідно до аеродинамічних характеристик, зокрема швидкості витання (рис. 1.5) [9]. Перед цим зернова маса надходить у сортувальну камеру, рівномірно розподіляючись за шириною бункера-приймача під дією власної ваги.

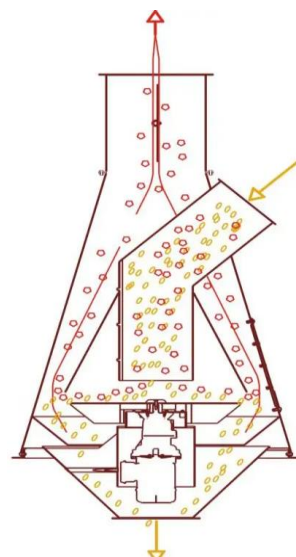
Машини для сортування зернових сумішей за аеродинамічними властивостями працюють із вертикальними, похилими, поперечними та горизонтальними повітряними потоками [9, 149].



Повітряний зерновий
сепаратор ПС-60 [150]



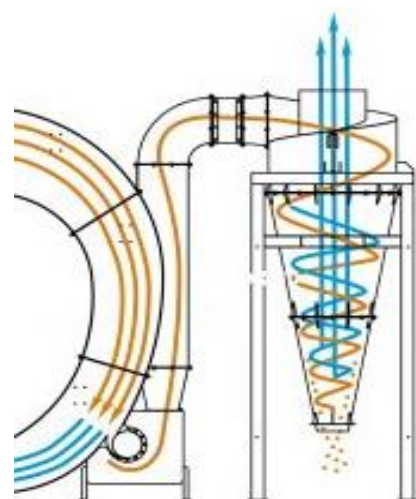
Сепаратор зерна і круп
ACX-10 [151]



Повітряний сепаратор
CBO-1 [152]



Аеродинамічний сепаратор ICM [153]



Циклоний сепаратор [154]

Рисунок 1.4 – Технологічні схеми повітряних сепараторів

Принцип роботи аеродинамічного сепаратора базується на тому, що зернова (насіннєва) суміш із бункера подається до зони взаємодії з горизонтальним повітряним потоком. Частинки матеріалу розподіляються за фракціями залежно від аеродинамічних властивостей і спрямовуються у відповідні приймальні камери. Відмінність аеродинамічних сепараторів від інших повітряних сепараторів полягає у використанні горизонтального потоку замість вертикального (висхідного), проте з

точки зору принципу аеросепарування нових концепцій вони не пропонують. Ця технологія ефективна для видалення легких домішок і щуплого зерна, але не дозволяє здійснювати глибоке очищення.

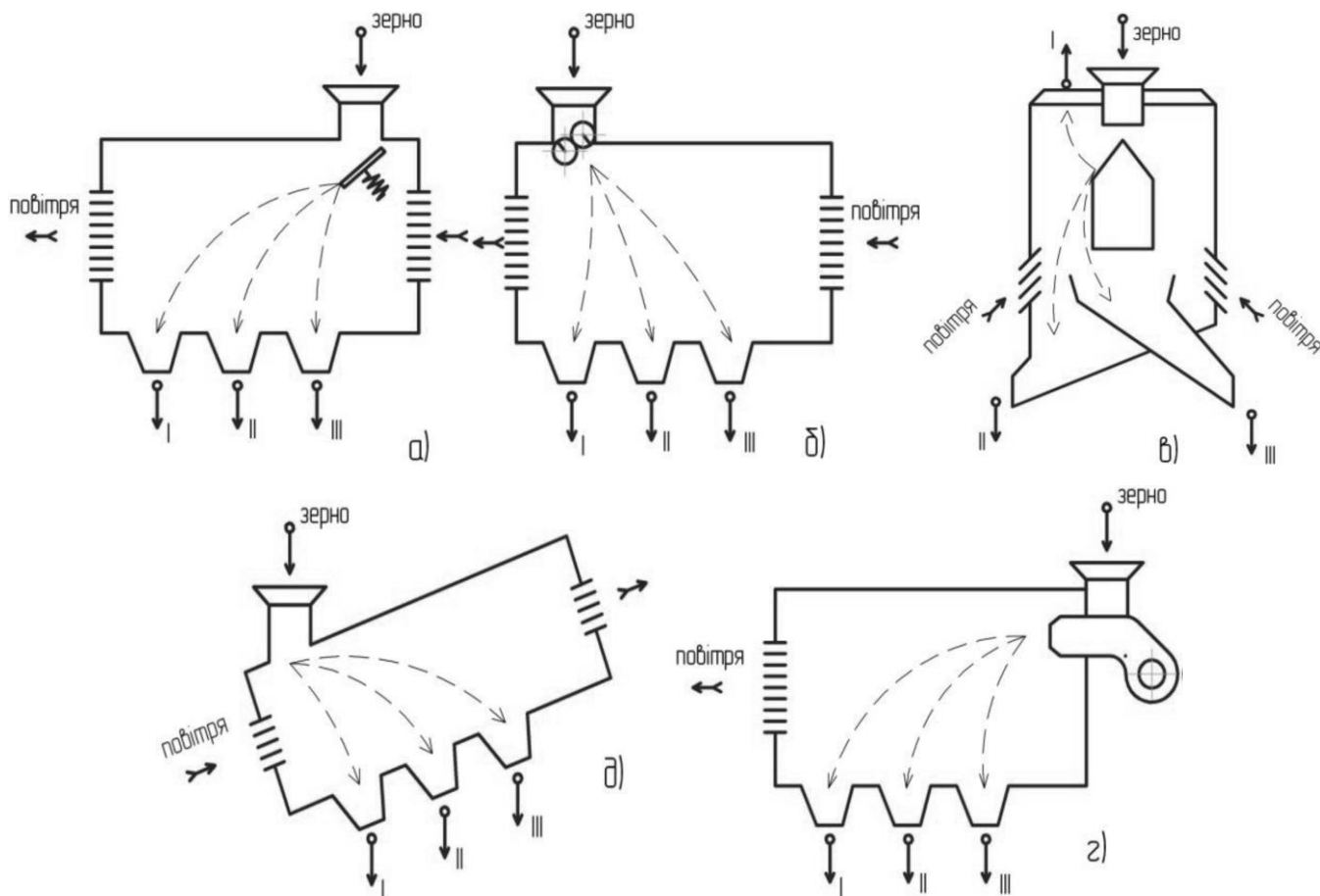


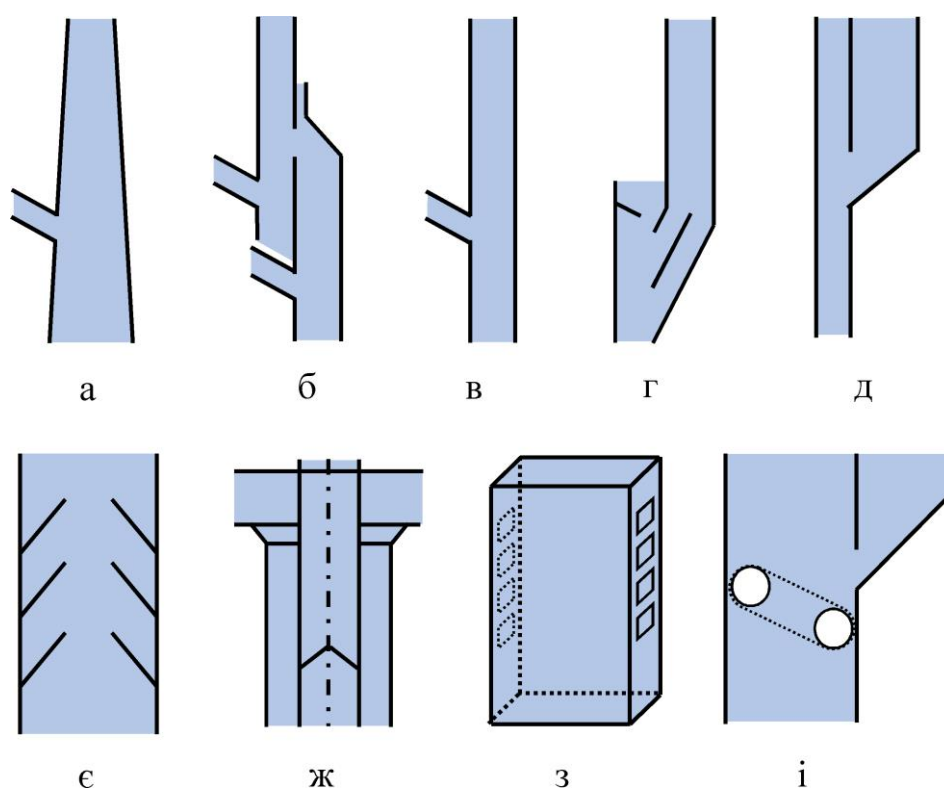
Рисунок 1.5 – Схеми аеродинамічних сепаруючих систем [9]

Найбільш поширеним є використання повітряних сортувальних машин із висхідним повітряним потоком. Їх перевага – конструктивна простота, компактність і низькі експлуатаційні витрати. У таких каналах зерновий матеріал піддається тривалішому впливу повітряного потоку, ніж у горизонтальних або похилих системах, що сприяє якіснішому розподілу частинок. Триваліший вплив повітряного потоку збільшує ефективність поділу легких компонентів.

У пневмосортувальних машинах із безперервною подачею матеріалу час взаємодії зернової (насіннєвої) суміші з повітряним потоком визначається

швидкістю її надходження, висотою та глибиною сортувального каналу. Проте в каналах прямокутної форми ефективність очищення залежить від глибини каналу, яка не повинна перевищувати допустимих значень, оскільки складні аеродинамічні процеси можуть знижувати якість очищення.

Сепаруючі пристрої, що функціонують із вертикальним повітряним потоком, є найбільш поширеними. Їх пневмоканали можуть мати різні форми поперечного перерізу, зокрема квадратну, круглу, кільцеву або прямокутну. Схематичне зображення сортувальних каналів наведено на рис. 1.6 [9].



а – конічна; б – похилий з подвійним продуванням; в – прямокутна постійного перерізу; г – подвійний; д – клиноподібний верх, що розширюється; є – з відбивними козирками, ж – з кільцевою формою перерізу; з – з отворами у бокових стінках; і – з ситовим транспортером

Рисунок 1.6 – Схеми сортувальних каналів [9]

Багато конструкторів і дослідників віддають перевагу каналам кільцевої форми, оскільки вони відповідають основним вимогам до ефективності очищення,

компактності та раціонального компоновання. Завдяки вирівнювальним решіткам у таких каналах легше досягти рівномірного розподілу швидкості повітряного потоку. Однак їх недоліком є складність забезпечення рівномірності повітряного потоку вздовж довжини каналу через місцеве або одностороннє відсмоктування повітря. У повітряно-решітних сепараторах використовуються канали прямокутного перерізу, що дозволяє рівномірно подавати зерновий матеріал по ширині решета. Водночас для зменшення нерівномірності повітряного потоку застосовують спеціальні конструктивні елементи, такі як перегородки, сітки та бар'єри, що порушують ламінарність потоку [9].

Круглі канали в очисних машинах для зерна використовуються рідко через їх низьку продуктивність, що не дозволяє конкурувати з іншими типами сортувальних каналів. Дослідження швидкості повітряного потоку у глибоких сортувальних каналах показали, що під час його повороту з прямолінійної ділянки до осадової камери швидкість біля задньої стінки каналу збільшується, тоді як поблизу передньої зменшується, а у центральній частині змін швидкості майже не відбувається [9].

Використання традиційних сортувальних каналів із глибиною понад 300 мм може знижувати ефективність поділу через нерівномірний розподіл швидкості повітряного потоку. Однак за умови впровадження конструктивних рішень, що дозволяють вирівняти швидкість потоку, ефективність роботи глибоких каналів суттєво зростає.

На якість сортування впливає багато чинників, одним із ключових є рівномірність повітряного потоку в робочій зоні пневмосепаруючого каналу [155–158]. Недостатня рівномірність потоку суттєво погіршує ефективність процесу, особливо при підвищеному завантаженні зернової маси, що призводить до збільшення втрат зерна та зниження повноти розділення.

Перспективним напрямом удосконалення аеродинамічних сортувальних машин є розробка адаптивного сортувального агрегату, який працює з раціонально узгодженими режимними параметрами (витрата насіння, швидкість повітряного потоку), що оптимізуються за допомогою програмного забезпечення. Це дозволяє

підвищити продуктивність та якість поділу насіннєвих сумішей соняшнику за аеродинамічними характеристиками.

Сучасні конструкції пневмосепаруючих каналів не забезпечують ефективного очищення зерна з високим вмістом домішок відповідно до чинних стандартів. Цю проблему вирішує новий пристрій, що усуває головний недолік – нерівномірний розподіл швидкості повітряного потоку в сепараційному каналі. Завдяки аеродинамічному стабілізатору, розташованому під зерною сумішшю, створюється псевдорозріджений шар, який знижує внутрішнє тертя матеріалу. Над стабілізатором формується буферна зона з рівномірною швидкістю повітряного потоку, що є критично важливим для ефективного сортування у верхній частині каналу.

Щоб досягти максимальної чистоти зерна (насіння), необхідно забезпечити його розділення в рідкому шарі з низькою концентрацією, коли кожна частинка знаходиться на певній відстані одна від одної, що дозволяє легким домішкам безперешкодно відокремлюватися від основної маси.

На сьогодні існує ряд теоретичних досліджень роботи різних конструкцій аеродинамічних сепараторів: [90–106, 159–163]. Більшість з представлених досліджень є аналітичними, сутність яких зводиться до вирішення складених диференціальних рівнянь традиційними способами. Однак ряд наукових робіт використовує методи чисельного моделювання. Особлива увага приділяється чисельному моделюванню на основі CFD з DEM моделями з використанням програмного пакету Simcenter Star-CCM+ і Ansys.

CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання дозволяє детально аналізувати поведінку повітряного потоку всередині аеродинамічного сепаратора. Використання цього методу дає змогу оцінити розподіл швидкостей, тиску та турбулентності в потоці, що є важливим для оптимізації конструкції та підвищення ефективності роботи сепаратора. Основними моделями турбулентності, що застосовуються в CFD-дослідженнях, є k - ϵ , k - ω SST та RANS, які дозволяють отримати більш точні результати для різних типів потоків.

Метод DEM (Discrete Element Method) використовується для моделювання руху твердих частинок у сепараторі. Він дозволяє аналізувати їх траєкторії, швидкість та взаємодію з потоком повітря. Поєднання CFD та DEM підходів дає змогу отримати комплексне уявлення про процес сепарації, оскільки враховує як аеродинамічні характеристики потоку, так і поведінку частинок у ньому. Тому подальші теоретичні дослідження будуть проведені з використанням методів чисельного моделювання.

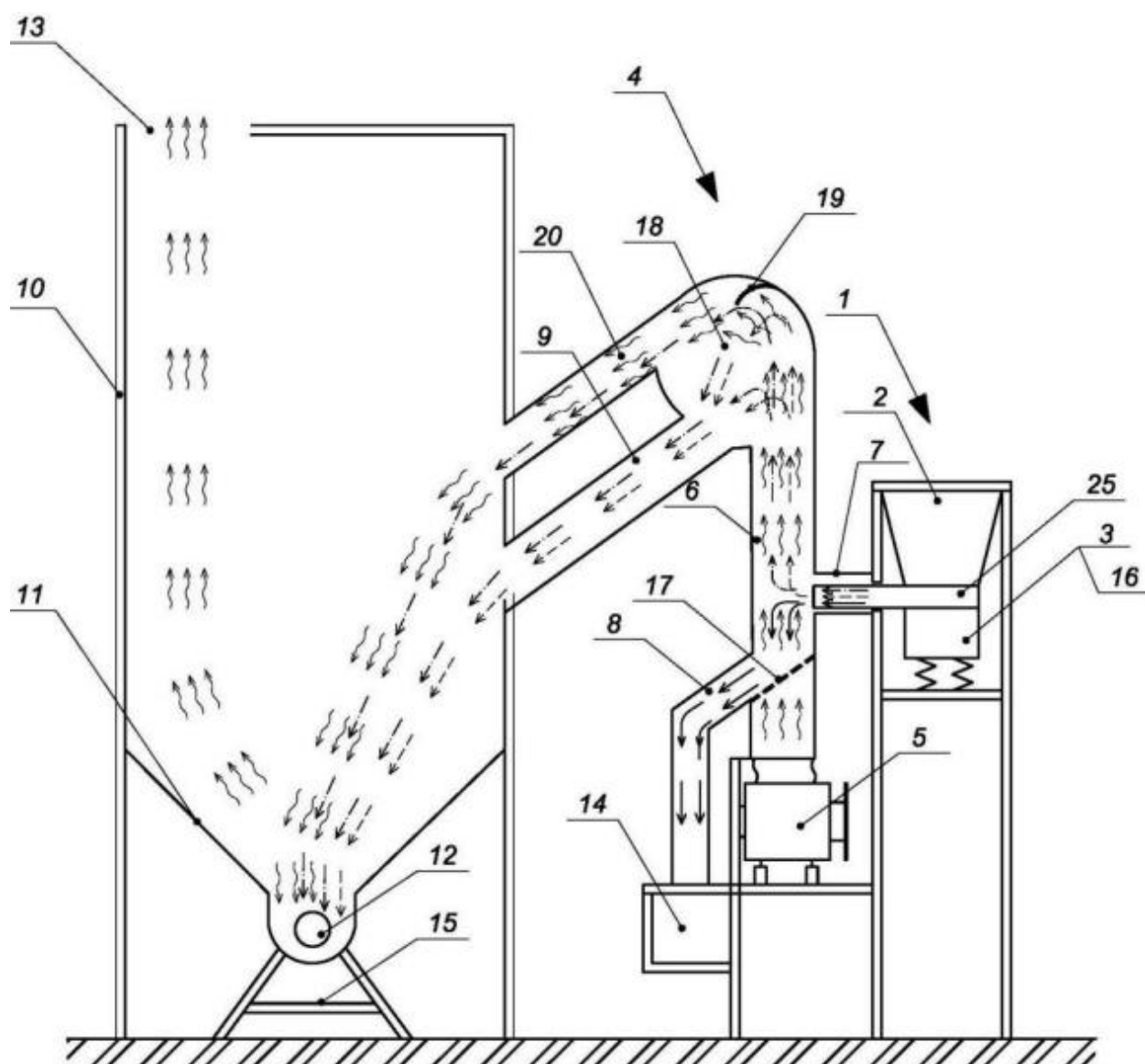
1.5 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми аеродинамічного сепаратора колонного типу

Аеродинамічний сепаратор колонного типу для очищення відходів насіннєвої суміші соняшнику (рис. 1.7) включає блок (1) завантаження, який складається із завантажувального бункера (2) та віброживильника (3), який оснащений електронним пристроєм (16) керування коливань.

Як електронний пристрій (16) керування коливань може бути застосований регулятор подачі матеріалу з мікропроцесорним контролем керуючого симістора, який залежно від якісного складу засміченого насіннєвого матеріалу дозволяє встановлювати необхідні параметри коливань: амплітуду і частоту коливань та інтенсивність подачі потоку повітря, а також для живлення двигуна віброживильника встановлюють частотний перетворювач.

У варіанті виконання лоток (25) віброживильника (3) виконано із нержавіючої сталі або має покриття з низьким коефіцієнтом тертя.

Також аеродинамічний сепаратор колонного типу для очищення засмічених насіннєвих матеріалів включає блок (4) пневмосепарації, який містить джерело (5) повітряного потоку з можливістю регулювання інтенсивності повітряного потоку в зоні сепарації та пневмосепараційний канал (6) із патрубком (7) для подачі засмічених насіннєвих матеріалів, патрубком (8) для виходу насіннєвого матеріалу й патрубком (9) для виходу сміття.



1 – блок завантаження; 2 – завантажувальний бункер; 3 – віброживильник; 4 – блок пневмосепарації; 5 – джерело повітряного потоку; 6 – пневмосепаруючий канал; 7 – патрубок для подачі засмічених насінневих матеріалів; 8 – патрубок для виходу корисної фракції; 9 – патрубок для виходу сміття; 10 – осадова камера; 11 – конусний бункер; 12 – шнек; 13 – віддушина; 14 – збірник корисної фракції; 15 – збірник сміття; 16 – електронний пристрій керування коливань віброживильника; 17 – повітророзподільник; 18 – камера розрідження; 19 – відбійник; 20 – патрубок для виходу повітря й пилу; 21 – блок розподілення; 22 – бункер-розподільник; 23 – вібратор; 24 – патрубок для подачі засмічених насінневих матеріалів; 25 – лоток віброживильника

Рисунок 1.7 – Конструктивно-технологічна схема аеродинамічного сепаратора колонного типу

Джерело (5) повітряного потоку являє собою нагнітальний вентилятор, який дозволяє залежно від якісного складу засміченого насіннєвого матеріалу встановлювати необхідні параметри інтенсивності повітряного потоку: швидкість й потужність.

Для зниження вібрації й шуму, що створюються нагнітальним вентилятором, останній встановлюється на гумову амортизаційну подушку та поєднується із пневмосепараційним каналом (6) за допомогою демпферної тканинної гофри.

Додатково для економії електроенергії й зручного регулювання на двигун нагнітального вентилятора може встановлюватись частотний перетворювач.

Патрубок (7) для подачі засмічених насіннєвих матеріалів, в який встановлено лоток (25) віброживильника (3), додатково виконує функцію пневмозатвору, який запобігає виходу засміченого насіннєвого матеріалу назовні при працюючому пристрої. Додатково для мінімізації вібрації й шуму, що створюються віброживильником, на патрубок й лоток можуть встановлювати демпферну тканинну гофру.

Пневмосепараційний канал (6), патрубок (7) для подачі засмічених насіннєвих матеріалів, патрубок (8) для виходу насіннєвого матеріалу й патрубок (9) для виходу сміття виконано із нержавіючої сталі або мають покриття із низьким коефіцієнтом тертя.

В нижній частині пневмосепараційного каналу (6) в безпосередній близькості від джерела (5) повітряного потоку під кутом 40-50 градусів, переважно 45 градусів, у напрямку до виходу насіннєвого матеріалу, встановлено повітророзподільник (17) для розділення висхідного повітряного потоку на менші потоки. Виявляється, що якщо кут буде меншим, то насіннєвий матеріал буде надходити до патрубка (8) для виходу насіннєвого матеріалу переривчасто й з неякісним розподілом, тобто із сміттям та пилом, якщо кут буде більше, то у патрубок (8) для виходу насіннєвого матеріалу буде виходити потік повітря, що призведе до погіршення якості сепарації насіннєвого матеріалу взагалі.

Таким чином розташування повітророзподільника під кутом 40-45 градусів, з однієї сторони, забезпечує рівномірність виходу насіннєвого матеріалу після сепарації, а з іншої сторони, її якість.

Аеродинамічний стабілізатор (17) являє собою решітку з діаметром отворів 1–3 мм, переважно 3 мм. Оскільки сепарація відбувається в невеликих потоках повітря, а розмір засміченого насіннєвого матеріалу може бути 1–3 мм, використання решітки з більшим діаметром отворів недоцільно, оскільки буде знижена інтенсивність повітряного потоку й насіннєвий матеріал, при потраплянні у пневмосепараційний канал (6), буде провалюватися через аеродинамічний стабілізатор (17) й потрапляти у джерело (5) повітряного потоку, що призведе до виходу із ладу обладнання. Зменшення діаметра отворів призведе до необхідності збільшення інтенсивності повітряного потоку, що, по-перше, призведе до порушення процесу сепарації і насіннєвий матеріал буде підніматися догори й потрапить у сміття, що призведе до відсутності доцільності процесу сепарації як такого, а, по-друге, призведе до додаткових енерговитрат, що є недоцільним у даному випадку.

В верхній частині пневмосепараційного каналу (6) виконана камера розрідження (18), яка оснащена відбійником (19) та патрубком (20) для виходу повітря й пилу. Камера розрідження (18) являє собою розширення перетину пневмосепараційного каналу (6).

Відбійник (19) являє собою лист металу, який повторює кут нахилу верхньої частини пневмосепараційного каналу (6) та закріплений до верхньої стінки каналу. Патрубок (20) для виходу повітря й пилу повторює форму патрубка (9) для виходу сміття.

У варіанті виконання камера розрідження (18), відбійник (19), патрубок (20) для виходу повітря й пилу виконані із нержавіючої сталі або мають покриття з низьким коефіцієнтом тертя.

Також аеродинамічний сепаратор колонного типу для очищення засмічених насіннєвих матеріалів включає осадову камеру (10) з пірамідальним бункером (11)

для подання сміття у шнек (12) та віддушиною (13), збірник (14) насіннєвого матеріалу й збірник (15) сміття.

Збірник (14) насіннєвого матеріалу, розташований під патрубком (8) для насіннєвого матеріалу, та збірник (15) сміття, розташований під шнеком (12), можуть бути у вигляді транспортерів.

У варіанті виконання аеродинамічного сепаратора колонного типу для очищення засмічених насіннєвих матеріалів для забезпечення більшої продуктивності конструкція доповнена принаймні двома блоками (1) завантаження, принаймні двома блоками (4) пневмосепарації та додатково одним блоком (21) розподілення, що містить бункер-розподільник (22), вібратор (23), й принаймні два патрубки (24) для подачі засмічених насіннєвих матеріалів у кожний із двох блоків (1) завантаження.

Для зниження вібрації й шуму, що створюються вібратором (23), бункер-розподільник (22) встановлюється на гумову амортизаційну подушку.

Як вібратор (23) може бути застосований, наприклад, вібратор з ексцентриком, який з певною періодичністю, яка залежить від виду засміченого насіннєвого матеріалу, здійснює коливання для подання матеріалу через патрубок (24) до завантажувального бункера (2).

Патрубки (24) для подачі засмічених насіннєвих матеріалів встановлюються під кутом не менше 45 градусів для надходження самопливом засмічених насіннєвих матеріалів до завантажувальних бункерів (2).

Аеродинамічний сепаратор колонного типу для очищення засмічених насіннєвих матеріалів працює наступним чином.

Вмикають джерело (5) повітряного потоку й залежно від якісного складу засміченого насіннєвого матеріалу встановлюють необхідні параметри інтенсивності повітряного потоку.

Висхідний повітряний потік, створюваний джерелом (5) повітряного потоку, потрапляє на повітророзподільник (17), де він розділяється на менші потоки, надходить до пневмосепараційного каналу (6) під кутом 40-50 градусів, переважно

45 градусів, й рівномірно розподіляється по всьому його перетину, утворюючи "повітряну подушку".

Одночасно з джерелом (5) повітряного потоку вмикають віброживильник (3) й також, приймаючи до уваги якісний склад засміченого насінневого матеріалу, встановлюють необхідні параметри коливань, узгоджуючи їх із параметрами інтенсивності повітряного потоку.

Засмічений насінневий матеріал, що підлягає сепарації, подається до завантажувального бункера (2), а з нього під дією сили тяжіння на лоток (25) віброживильника (3). Завдяки створюванню контрольованих коливань засмічений насінневий матеріал через патрубок (7) для подачі засмічених насінневих матеріалів стабільним рівномірним потоком потрапляє до пневмасепараційного каналу (6), де вже створена "повітряна подушка". Під дією рівномірних невеликих струменів повітря компоненти засміченого насінневого матеріалу обдуваються з усіх боків й більш якісно, за питомою вагою та аеродинамічними властивостями, розділяються на окремі фракції.

Насінневий матеріал через патрубок (8) для виходу насінневого матеріалу потрапляє у збірник (14) насінневого матеріалу. Сміття та пил разом із повітряним потоком піднімаються догори й потрапляють у камеру (18) розрідження, де за допомогою відбійника (19), який плавно повертає по дузі потік повітря, сміття через патрубок (9) для виходу сміття потрапляє в осадову камеру (10), а відпрацьований потік повітря разом з пилом також потрапляє в осадову камеру (10) через патрубок (20) для виходу повітря й пилу.

В осадовій камері (10) сміття й пил осідають в конусному бункері (11) та за допомогою шнека (12) виводяться у збірник (15) сміття, а відпрацьований чистий повітряний потік через віддушину (13) виходить назовні.

У варіанті виконання, який забезпечує більшу продуктивність, аеродинамічний сепаратор колонного типу для очищення засмічених насінневих матеріалів працює наступним чином.

Аналогічно налаштовуються параметри інтенсивності повітряного потоку й параметри коливань для, принаймні, обох блоків (1) завантаження та, принаймні,

двох блоків (4) пневмосепарації. Слід зазначити, що продуктивність й ефективність сепарації суттєво залежать від настройки режимів роботи зазначеного обладнання по максимальному використанню ознак відділення насіннєвого матеріалу та сміття й пилю в кожному конкретному випадку виробничої ситуації.

Засмічений насіннєвий матеріал, що підлягає сепарації, спочатку подається до бункеру розподільника (22), а з нього самопливом у вібратор (23). Завдяки періодичним коливанням насіннєвий матеріал через патрубки (24) для подачі засмічених насіннєвих матеріалів потрапляє до завантажувальних бункерів (2), а з них по описаній схемі у пневмосепараційні канали (6), осадову камеру (10) та у збірник (14) насіннєвого матеріалу й збірник (15) сміття.

У зазначеному варіанті за один етап проходження сепарується, принаймні, в два рази більше засміченого насіннєвого матеріалу.

На рис. 1.8 зображено варіант розміщення сортувальної машини та засобів інженерно-будівельного забезпечення у виробничому приміщенні олійноекстракційного підприємства. На рис 1.9 представлено технологічну лінію очищення та розділення насіннєвого матеріалу в шеретувально віяльному відділенні (ШВВ) олійноекстракційного заводу (ОЕЗ) [11].

Залежно від виробничої потужності виробництва окремі сортувальні машини конструктивно можуть бути скомплектовані у автоматичну адаптивну мехатронну багатокритеріальну каскадну лінію сортування відходів соняшнику при відповідній інсталяції програмного забезпечення.

Аеродинамічний сепаратор колонного типу може бути виготовлено в умовах промислового виробництва з використанням стандартного обладнання, сучасних матеріалів, вузлів й комплектуючих. Запропоноване обладнання може знайти широке промислове застосування у галузях сільського господарства для розділення засмічених насіннєвих матеріалів. Використання таких технологічних рішень дозволяє суттєво підвищити ефективність процесів сортування та очистки, що сприяє зниженню втрат і покращенню якості кінцевого продукту. Розроблені механізми та системи можуть бути адаптовані під різні умови експлуатації, забезпечуючи високу продуктивність і надійність роботи обладнання.

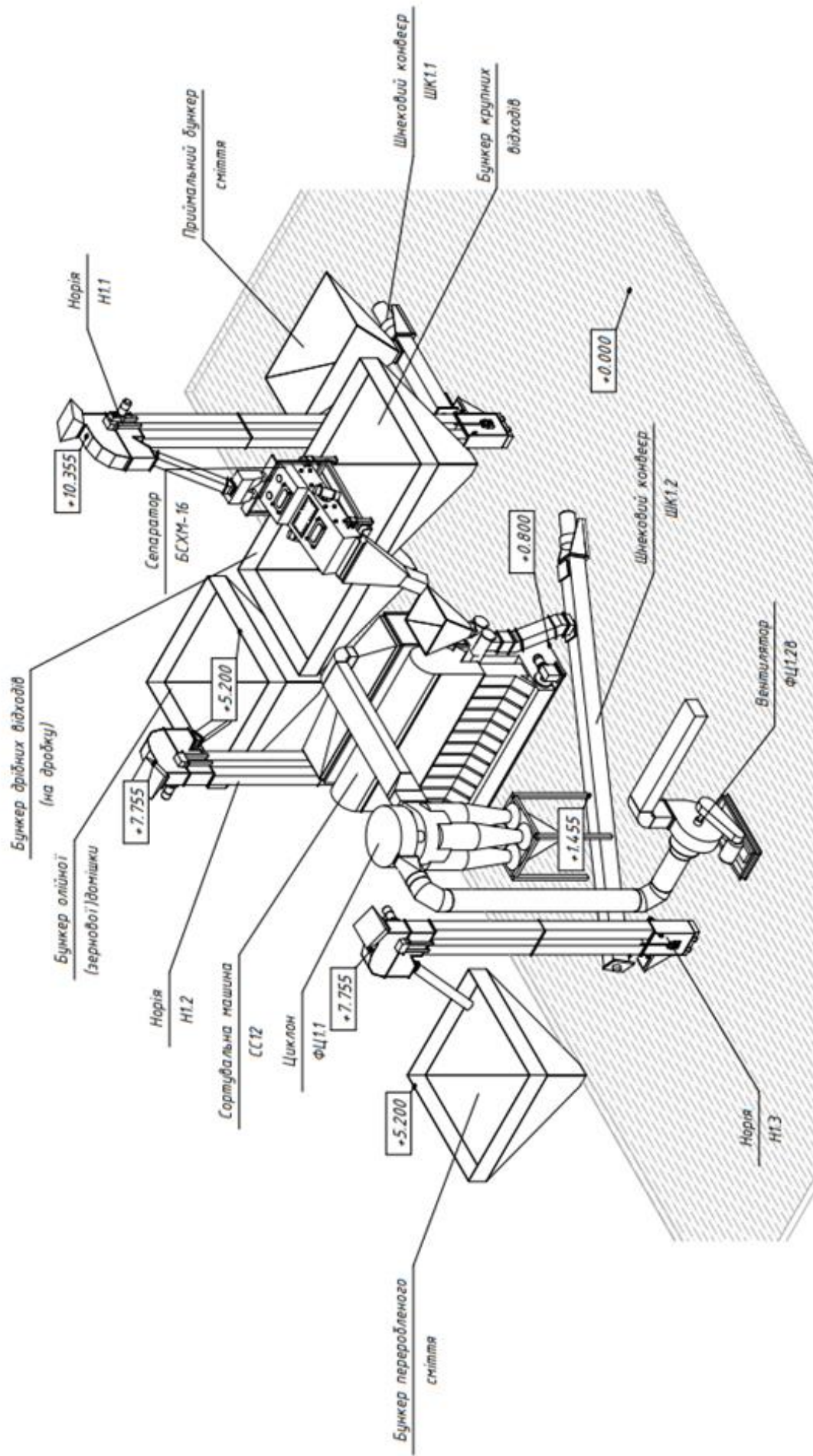


Рисунок 1.8 – Проект приміщення з розміщенням сортувальної машини та іншого обладнання

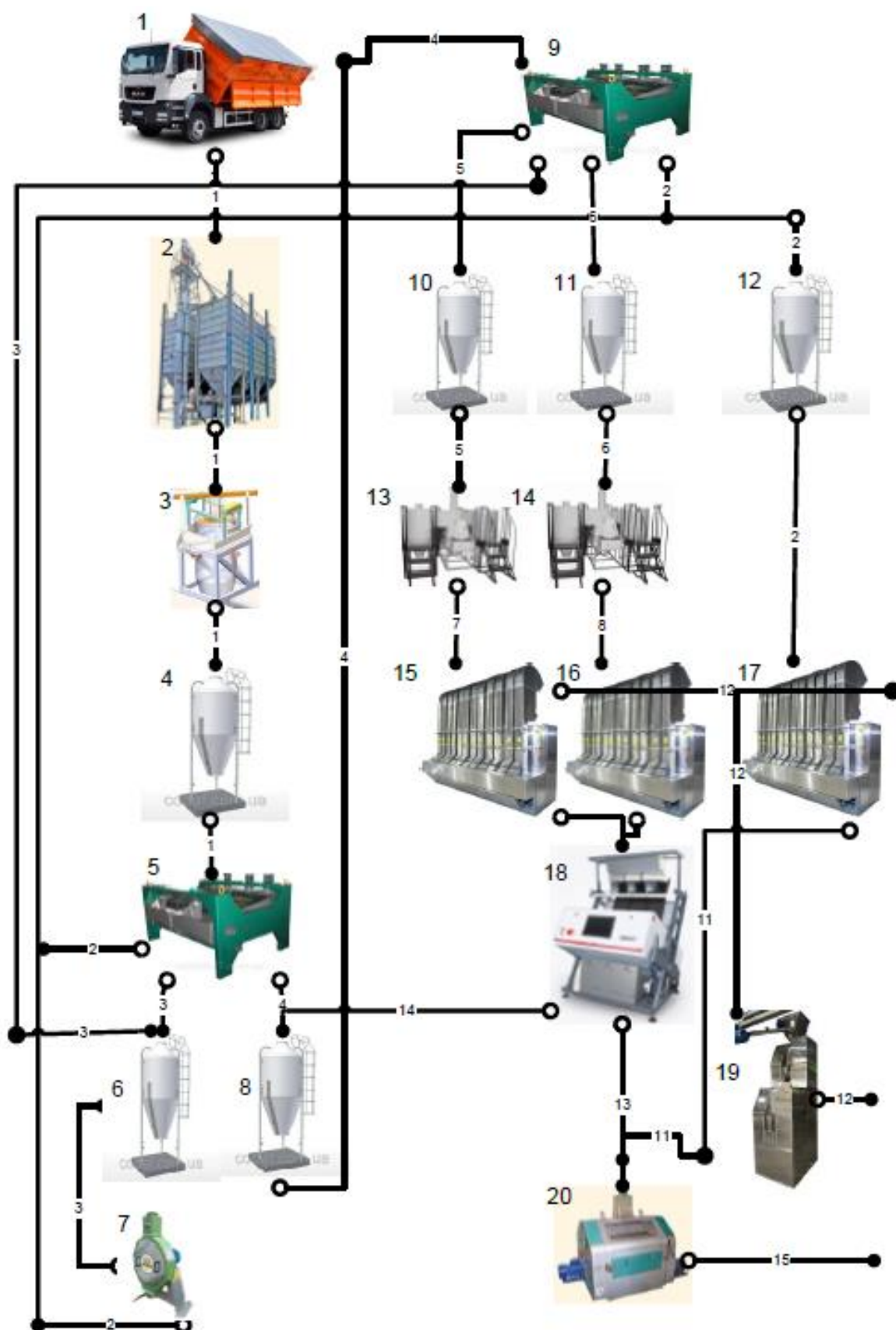


Рисунок 1.9 – Технологічна лінія очищення та розділення насіннєвого матеріалу в шеретувально віяльному відділенні (ШВВ) олійноекстракційного заводу (ОЕЗ)

1.6 Висновки з розділу

1. В процесі аналізу способів, технологій і засобів очищення насіннєвої суміші соняшнику виявлено ряд недоліків:

- сучасне технологічне забезпечення генерує велику кількість відходів, які за своїми біохімічними та технологічними властивостями є цінною сировиною для подальшого використання у виготовленні харчових та кормових продуктів, а також для виготовлення низки окремих видів продукції (наприклад, твердого біопалива);

- технологічні лінії не мають у своєму складі обладнання для вилучення із складу відходів зернової/олійної домішки, при чому обладнання для сортування повинно мати раціонально узгоджені режимні параметри за рахунок використання програмного забезпечення на основі алгоритмів, які визначають технологічний процес сортування зернової (насіннєвої) суміші за комплексом ознак подільності;

- підвищення продуктивності ліній забезпечувалося мультиплікацією кількості обладнання невеликої продуктивності, що потребує збільшення встановленої потужності та зниження коефіцієнта використання обладнання.

2. Встановлено, що потенційно тільки аеродинамічна сепарація може створити умови для вилучення з відходів зернової/олійної домішки за рахунок створення текучого (псевдорозрідженого) шару зернової (насіннєвої) суміші. Створення текучого (псевдорозрідженого) шару можливо при виконанні декількох умов:

- забезпечення значно більших відстаней між частинками суміші, ніж при сепаруванні на пневмосепараційному столі для максимального зниження внутрішнього тертя;

- забезпечення зниження тертя між частинками сміття і стінками сепараційного каналу;

- забезпечення стабілізації повітряного потоку, ламінарності повітряного потоку;

- використання аеродинамічної сепарації в вертикальному повітряному потоці.

3. В результаті інформаційного аналізу встановлено, що існуючими способами сепарації зернової суміші неможливо у повному обсязі провести вилучення зернової/олійної домішки з відходів для виконання завдань «циркулярної економіки», при тому, що кількість домішок, які по своїм біохімічним властивостям еквівалентні основному зерну (насінню), сягає до 50 % кількості сміття зерна. Тому є економічна доцільність та перспективність створення машин для тонкого очищення відходів зернових (насінневих) сумішей, побічних продуктів з метою вилучення олійної та зернової домішок та їх використання для підвищення сортності насіння або використання за різним призначенням;

4. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему аеродинамічного сепаратора колонного типу, який призначений для тонкого очищення насінневих матеріалів, складається з кількох функціональних блоків. Зокрема, він містить завантажувальний блок, до якого входять завантажувальний бункер та віброживильник. Блок пневмосепарації включає джерело повітряного потоку з можливістю регулювання його інтенсивності в зоні сепарації, а також пневмосепаруючий канал, що має патрубки для подачі відходів, виходу очищеної фракції та видалення відходів. Також у конструкцію входить осадова камера з конусним бункером, через який сміття спрямовується в шнек-пастку, а повітря виводиться через віддушину. Передбачені окремі збірники для очищеного матеріалу та відходів. Відповідно до розробки, віброживильник додатково обладнаний електронним пристроєм керування коливаннями, а у нижній частині пневмосепаруючого каналу розташований повітророзподільник (аеродинамічний стабілізатор). Верхня частина каналу оснащена камерою розрідження, в якій встановлено відбійник, а також передбачено патрубок для виведення повітря і пилу.

1.7 Мета і задачі досліджень

Мета дослідження: підвищення ефективності технологічного процесу тонкого очищення насіння соняшнику з відходів шляхом розробки конструкції аеродинамічного сепаратора колонного типу з раціональними технологічними і

конструктивними параметрами, які дозволяють досягти заданої якості продукції з мінімальними питомими енерговитратами.

Задачі дослідження:

- здійснити аналіз техніко-технологічного обґрунтування процесу сепарації насіння соняшнику аеродинамічним безрешітним способом і обґрунтувати конструкцію відповідного аеродинамічного сепаратора колонного типу;
- здійснити аналітичне дослідження процесу взаємодії компонентів насінневої суміші з повітряним потоком;
- здійснити чисельне моделювання процесу сепарації насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу та виявити закономірності впливу його конструктивних і режимних параметрів на якість і продуктивність процесу сепарації;
- розробити методику і провести експериментальні дослідження процесу сепарації насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу та виявити основні закономірності процесу її функціонування;
- здійснити випробування та оцінити економічну ефективність розробленого аеродинамічного сепаратора колонного типу, а також впровадити результати досліджень у виробничу практику.

Ключові наукові результати розділу були опубліковані в роботах автора [10–17].

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО ТИПУ

2.1 Постановка задачі

Для обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів запропонованого (розділ 1) аеродинамічного сепаратора колонного типу для очищення відходів насіннєвої суміші соняшнику розділимо аналітичні дослідження на три етапи:

- дослідження процесу сепарації компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі та обґрунтування його конструктивних параметрів;

- дослідження процесу сепарації компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження та обґрунтування її конструктивних параметрів;

- обґрунтування режимних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу залежно від складу засмічених відходів насіннєвої суміші соняшнику.

Для реалізації зазначених етапів були виконані наступні задачі аналітичних досліджень:

- розробка уточненого фізико-математичного апарату взаємодії компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику між собою і стінками аеродинамічного сепаратора колонного типу та їх руху під дією повітряного потоку;

- розробка методики чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу для зазначених етапів аналітичного дослідження;

- проведення і аналіз результатів чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу для зазначених етапів аналітичного дослідження.

2.2 Фізико-математична модель руху компонентів відходів насіннєвої суміші соняшника під впливом повітряного потоку

Для аналізу характеристик двофазного потоку повітря із компонентами відходів насіннєвої суміші створено математичну модель на основі методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та дискретних елементів (DEM) для теоретичного пояснення їх поведінки в окремих частинах аеродинамічного сепаратора колонного типу. Компонент суміші займає невелику частку в аеродинамічному сепараторі, а газова фаза розглядається як нестислива рідина. Компоненти відходів насіннєвої суміші розглядаються як сукупність окремих частинок, рух яких регулюється другим законом Ньютона.

Метод двостороннього зв'язку, використаний при чисельному моделюванні, розглядає взаємодію між компонентами та газом. Для методу двостороннього зв'язку необхідно проводити моделювання перехідного стану, оскільки враховується вплив частинок на рідину [164]. Рівняння неперервності та збереження імпульсу неперервної фази можна представити наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_f \rho_f u_i) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_f \rho_f u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_f u_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \alpha_f \rho_f g + F_s, \end{cases} \quad (2.1)$$

де ρ_f – густина газу (для повітря в нормальних умовах приймаємо $1,2255 \text{ кг/м}^3$), кг/м^3 ; u – швидкість газу, м/с ; p – тиск газу, Па ; x_i, x_j – координати (для декартової системи координат $x_1 \rightarrow x, x_2 \rightarrow y, x_3 \rightarrow z$), м ; F_s – сила опору між компонентами суміші та газом, Н ; α_f – шпаруватість поблизу частинок, яку можна обчислити наступним чином:

$$\alpha_f = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{V_{p,i}}{V_{\text{cell}}}, \quad (2.2)$$

де V_{cell} – об'єм обраної комірки CFD, м^3 ; n – представляє кількість компонентів всередині комірки, а $V_{p,i}$ – об'єм компонентів, м^3 .

Крім того, стандартна k - ε модель турбулентності була використана для розрахунку ефективної в'язкості μ_{eff} .

Обчислювальна модель дискретних елементів (DEM) може описувати взаємодію між компонентами суміші між собою та поверхнями конструкції сепаратора. Враховуючи, що контакт між частинками і швидкість частинок змінюється залежно від сили контакту, тут в [165] використовується теорія контактної взаємодії Герца-Міндліна (без ковзання). Однак модель Герца-Міндліна враховує взаємодію лише сферичних частинок. Проведений аналіз компонентів відходів насінневої суміші соняшнику показав виразну відмінність їх форми від сферичної. Тому в подальшому застосуємо метод апроксимації довільної форми компонента до нерозривного скупчення сферичних субчастинок. Отже, кожна форма компонентів може бути визначена декількома субчастинками, які мають постійну відстань від центру маси. Форму компонентів можна визначити відстанню від центру мас і центру кожної субчастинки з постійним радіусом [166, 167].

Для проведення моделювання приймемо, що компоненти відходів насінневої суміші соняшнику можна розділити три основні групи: ядро соняшнику, лушпиння і дрібні частинки. На рис. 2.1 показано, як шляхом поетапного перетворення можна з реального компонента відходів насінневої суміші створити його 3D-модель та модель DEM з різною кількістю сферичних субчастинок. Кількість сфер, які використовуються в кожній категорії, залежить від ступеня кулястості. Як видно, створені форми з цими сферичними субчастинками дуже схожі на реальні (початкові) форми компонентів.

Щоб представити орієнтацію компонента суміші використаємо матрицю обертання 3×3 [168, 169] або одиничні кватерніони [170, 171]. Оскільки розглядаємо невеликий крок у часі для кожного циклу та статичні умови для тривісного випробування, у цьому дослідженні використовується матриця обертання 3×3 і метод, подібний до [169] для представлення орієнтації несферичних компонентів (рис. 2.2).

Як згадувалося раніше, шляхом імітації компонентів неправильної форми з кількома сферичними субчастинками, що перекриваються, відбувається контакт між

двома або більше сферичними субчастинками. Таким чином, розрахунок сили та імпульсу для двох контактуючих компонентів ініціюється від двох субчастинок у контакті; отже, це полегшує використання деяких співвідношень сферичних частинок, які є звичайними в дискретному моделюванні сферичних частинок і є більш поверхневими, порівняно зі складним співвідношенням нерегулярно жорсткої маси в контакті. Для двох компонентів неправильної форми, які контактують, сили та моменти розраховуються згідно схеми на рис. 2.2.

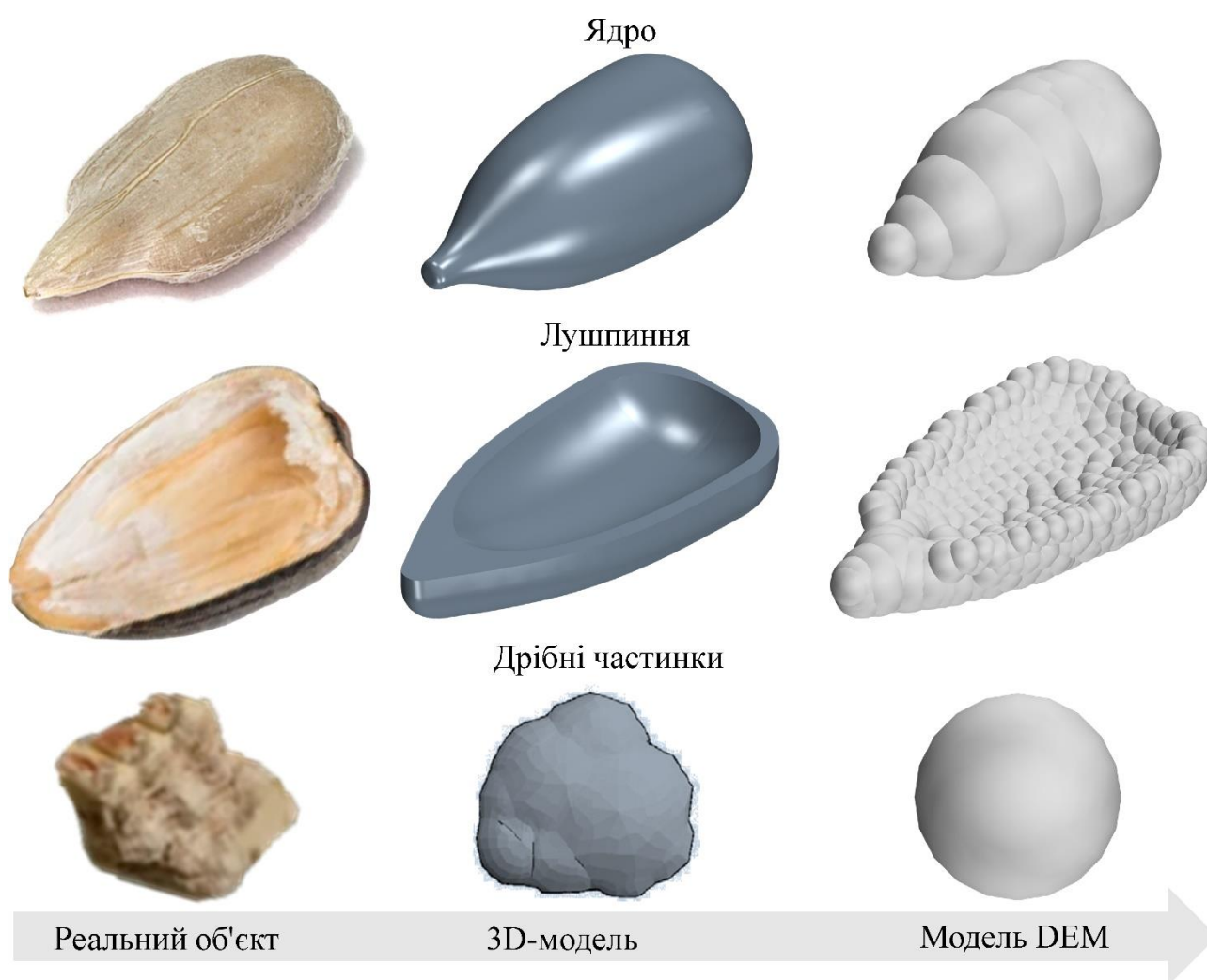


Рисунок 2.1 – Апроксимація форми компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику

Згідно з другим законом Ньютона, рівняння руху компонентів має вигляд [172, 173]:

$$\begin{cases} m_i \frac{dV_i}{dt} = m_i g + P + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{t,ij}), \\ I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}), \end{cases} \quad (2.3)$$

де V_i – швидкість частинки, м/с; ω_i – кутова швидкість частинки, рад/с; I_i – моментом інерції частинки, кг·м²; m_i – маса частинки, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; P – сила, що отримується при русі частинки відносно повітряного потоку, Н; $F_{n,ij}$ – нормальна складова сили, Н; $F_{t,ij}$ – дотична складова сили, Н; $T_{t,ij}$ – дотичний момент, Н/м, а $T_{r,ij}$ – момент тертя кочення, Н/м.

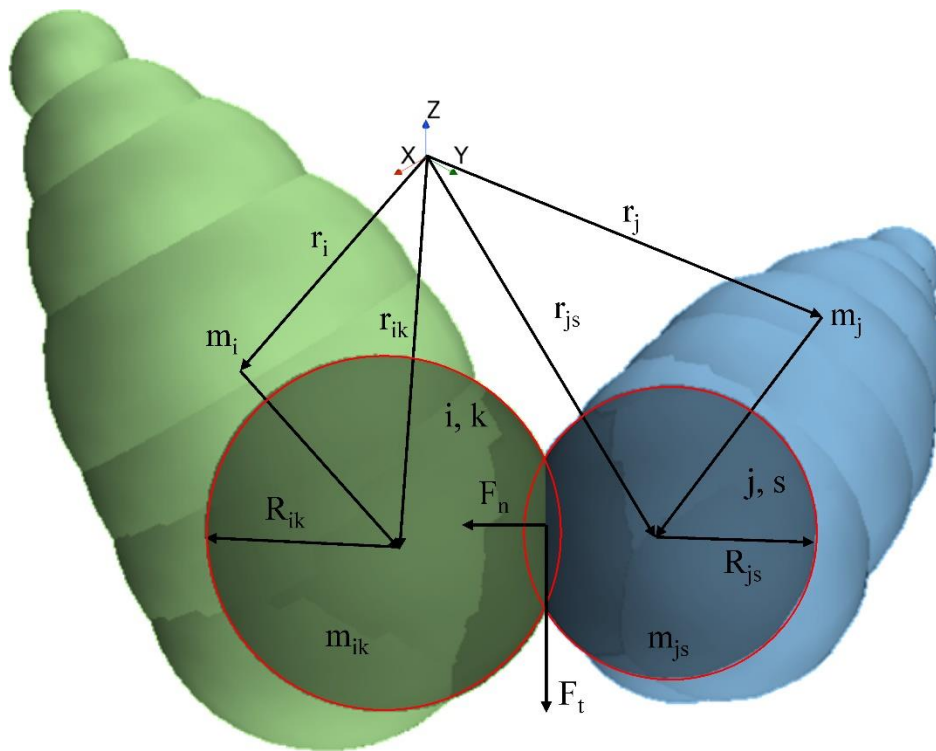


Рисунок 2.2 – Схема взаємодії сферичних субчастинок двох компонентів суміші

Модель взаємодії має дві нормальні сили, що діють перпендикулярно площині контакту компонентів, і тангенціальні сили, що діють в площині контакту [174, 175]. Тому сумарну контактну силу, що діє на частинки в контактній площині, можна проаналізувати в тангенціальних і нормальних координатах, які можна описати математичними рівняннями, як показано на рисунку 2.2 (індекс k та s в рівняннях не вказується для сприйняття рівнянь взаємодії субчастинок компонентів):

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n^T + \mathbf{F}_t^T, \quad (2.4)$$

де $\mathbf{F}$ – сумарна сила, що діє на компонент, Н; $\mathbf{F}_n^T$ – нормальна сила контакту пружно-пластичної взаємодії в даний момент часу T , Н; $\mathbf{F}_t^T$ – тангенціальна сила пружно-пластичної взаємодії в поточний момент часу T , Н.

Відповідно до контактної теорії Герца, математичний опис тангенціальної і нормальної складових задаються рівняннями:

$$F_{n,ij} = -\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} (\delta_n)^{3/2} n_c - \sqrt{\frac{5}{6} k_n m^*} \frac{2 \ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} (v_{n,ij} n_c) n_c, \quad (2.5)$$

$$F_{t,ij} = -\frac{4}{3} G^* \sqrt{R^* \delta_n \delta_t} - \sqrt{\frac{5}{6} k_t m^*} \frac{2 \ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} (v_{t,ij} n_c) n_c, \quad (2.6)$$

де E^* – еквівалентний модуль пружності, Па; R^* – еквівалентний радіус, м; m^* – еквівалентна маса, кг; G^* – еквівалентний модуль зсуву, Па; δ_n – нормальне перекриття, м; δ_t – тангенціальне перекриття, м; k_n – нормальна жорсткість, Н/м; k_t – тангенціальна жорсткість, Н/м; n_c – одиничний вектор, що з'єднує центри двох субчастинок; ε – коефіцієнт пружного відновлення; $v_{n,ij}$ – відносна нормальна швидкість субчастинок i до j , м/с; $v_{t,ij}$ – відносна тангенціальна швидкість субчастинок i до j , м/с.

Математичний опис дотичного моменту і моменту тертя кочення показано в рівняннях:

$$T_{t,ij} = R_i F_{n,ij}, \quad (2.7)$$

$$T_{r,ij} = -\mu R_i F_{t,ij} \omega_i, \quad (2.8)$$

де μ – коефіцієнт тертя кочення; R_i – одиничний вектор напрямку центроїда субчастинки i до точки контакту, м; R_i – одиничний вектор кутової швидкості точки контакту субчастинки i .

Як показано в рівнянні (2.3), існує чотири типи сил, які діють на компоненти суміші з боку повітря: сила опору F_d , підйомна сила Сафмана F_{ls} , підйомна сила Магнуса F_{lm} і виштовхувала сила Архімеда F_d .

Для сили опору компонентів в багаточастинковій системі прийнята модель сили опору, запропонована в [176]:

$$F_d = F_{d0} \alpha_f^{-(y+1)}, \quad (2.9)$$

де F_{d0} – сила опору повітря, що діє на частинку, коли немає інших частинок:

$$F_{d0} = \frac{1}{2} \rho_f C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \alpha_f^2 |v_f - v_p| (v_f - v_p) \quad (2.10)$$

де v_f , v_p – швидкість повітря і компонентів відповідно, м/с; d_p – діаметр компонентів, м; C_D – коефіцієнт лобового опору:

$$\begin{cases} C_D = \frac{24}{Re_{p,\alpha}}, & Re_{p,\alpha} \leq 1, \\ C_D = \left[0,63 + \frac{4,8}{Re_{p,\alpha}^{0,5}} \right], & Re_{p,\alpha} \geq 1, \end{cases} \quad (2.11)$$

де $Re_{p,\alpha}$ – число Рейнольдса компонента для сили опору:

$$Re_{p,\alpha} = \frac{\rho_f d_p \alpha_f |v_f - v_p|}{\mu_f}, \quad (2.12)$$

де μ_f – в'язкість рідини:

$$\mu_f = 3,7 - 0,65 \exp \left[-\frac{(1,5 - \lg Re_{p,\alpha})^2}{2} \right], \quad (2.13)$$

Підйомна сила Саффмана [177]:

$$F_{is} = 1,615 d_p^2 \left(\frac{\rho_f \mu_f}{|\omega_f|} \right)^{1/2} C_{is} [(v_f - v_p) \omega_f], \quad (2.14)$$

де ω_f – це швидкість обертання рідини, яка задається формулою:

$$\omega_f = \nabla \times v_f. \quad (2.15)$$

Коефіцієнт підйомної сили для можна записати у вигляді [178]:

$$C_{is} = \begin{cases} \left(1 - 0,3314 \beta^{1/2} \right) \exp(Re_{p/10}) + 0,3314 \beta^{1/2}, & Re_p \leq 40, \\ 0,5524 (\beta Re_p)^{1/2}, & Re_p \geq 40, \end{cases} \quad (2.16)$$

де Re_p – число Рейнольдса компонента суміші для підйомної сили Саффмана:

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |v_f - v_p|}{\mu_f}, \quad (2.17)$$

β в рівнянні (2.16) задається формулою:

$$\beta = \frac{d_p |\omega_f|}{2 |v_f - v_p|}, \quad (2.18)$$

Підйомна сила Магнуса задається наступним виразом [179]:

$$F_{IM} = \frac{\pi}{8} \rho_f d_p^3 \frac{Re_p}{Re_f} C_{IM} [\omega \times (v_f - v_p)], \quad (2.19)$$

де C_{IM} – коефіцієнт підйомної сили Магнуса [180]:

$$C_{IS} = 0,45 + \left(\frac{Re_p}{Re_f} - 0,45 \right) \exp(-0,5684 Re_r^{0,4} Re_p^{0,3}), \quad (2.20)$$

де Re_r – число обертання частинок Рейнольдса і задається формулою:

$$Re_r = \frac{\rho_f d_p^2}{\mu_f}, \quad (2.21)$$

в якому

$$\omega = 0,5 \nabla \times v_f - \omega_{p35}. \quad (2.22)$$

Виштовхувальна сила Архімеда на частинку можна обчислити наступним чином:

$$F_b = -V_p \rho_f g, \quad (2.23)$$

де V_p – об'єм частинки, m^3 .

Крутний момент, прикладений до частинок повітрям можна обчислити наступним чином, згідно з [181]:

$$T_f = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 C_R |\omega_r| \omega_r, \quad (2.24)$$

де C_R – коефіцієнт крутного моменту обертання можна отримати з [182]:

$$C_R = \begin{cases} \frac{64}{Re_r}, & Re_r \leq 32 \\ \frac{12,9}{Re_r^{1/2}} + \frac{128,4}{Re_r}, & 32 < Re_r < 1000. \end{cases} \quad (2.25)$$

Перераховані вище сили і моменти підставляються в рівняння (2.3). Потім можна обчислити рух компонентів в кожен момент часу. Рішенням системи рівнянь

(2.3) в поточний час є початковими умовами для наступного проміжку часу. Таким чином в результаті чисельного моделювання можна розрахувати траєкторію польоту і швидкість кожного компонента суміші.

Коли компонент суміші вперше потрапляє у поле потоку, силу, що діє на поле потоку в комірці CFD можна обчислити наступним чином:

$$F_s = - \frac{\sum_{i=1}^n (F_d^i + F_{is}^i + F_{im}^i + F_b^i)}{V_{cell}}, \quad (2.26)$$

де V_{cell} – об'єм комірки, n – загальна кількість компонентів у цій комірці. Для сили, що діє з боку компонентів на потік повітря, основним принципом є третій закон Ньютона.

2.3 Методика чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу

Системи рівнянь (2.1)–(2.26) використаємо, як фізико-математичний апарат чисельного моделювання DEM-CFD в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ [183, 184]. У моделюванні всі диференціальні рівняння були розв'язані із застосуванням методу скінченних об'ємів та на основі маси та імпульсу повітряної фази. По-перше, поле повітряного потоку моделювалося за допомогою розв'язувача CFD. Коли була отримана стабільна ситуація, газове поле з розв'язувача CFD було перенесено на інтерфейс зв'язку DEM-CFD, який імпортував обчислення сил, що діють на кожен компонент. Потім часовий крок DEM починався в кінці часового кроку моделювання потоку повітря. Обчислені сили інтерфейсу були передані на розв'язувач DEM, який обчислював положення компонентів, їх швидкості і об'ємну частку до кінця кроку CFD. Наступний, інтерфейс зв'язку DEM-CFD, брав дані про рух компонентів з розв'язувача DEM і обчислив частки об'єму та обмін імпульсом у сітчастій комірці CFD. Нарешті, розв'язувач CFD використав ці дані для розв'язання газового поля для оновлення домену потоку повітря. Розв'язувачі CFD і DEM

вступали в цикли наступного кроку часу, поки поле повітряного потоку знову не збігалось до стійкого рішення [185, 186].

В якості сітчастих моделей використано генератор багатограних комірок і генератор поверхневої сітки. Базовий розмір комірки сітки встановлено 0,02 м.

В якості фізичних моделей використано модель ідеального газу, модель роздільної течії газу, лагранжеву багатозфазність, модель багатозфазної взаємодії Герца-Міндліна, модель опору кочення. Модель частинки встановлюється за фактичною формою об'єкта координатним методом.

Моделювання в Simcenter Star-CCM+ використовує стандартну модель турбулентності k-ε, точність збіжності дорівнює 10^{-4} . При встановленні граничних умов у всіх моделюваннях для входу та виходу повітряного потоку приймаються «швидкість на вході» та «тиск на виході» відповідно. Рух газової фази вирішується стандартною моделлю турбулентності k-ε. В якості методів обробки стін використовуються стандартні функції стін Simcenter Star-CCM+ [187, 188].

Згідно розділу 2.1 створено три лагранжеві фази методом дискретних елементів (DEM): ядро соняшнику, лущиння і дрібні частинки. Фізико-механічні властивості частинок DEM і їх взаємодії наведено в табл. 2.1 [81, 189, 190, 191, 192].

Для моделювання були прийняті наступні властивості повітря: молярна маса – 28,8 г/моль, динамічна в'язкість – $1,86 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Опорною величиною моделювання є вектор сили тяжіння, який має наступні координати (0,0; 0,0; -9,81) м/с².

Моделювання проведено нестационарним неявним методом із кроком 0,001 с. При цьому на кожному кроці відбувалось 5 ітерацій. Для переміщення частинок DEM число Куранта складало 0,05–0,35.

Перший етап моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі проводився за схемою, яка представлена на рис. 2.3.

Приймаємо, що компоненти відходів насінневої суміші одиночно інжектуються в одній точці кожні 10 с. При цьому їх ефективний діаметр D_p (закодоване – x_1) є фактором досліджень і змінюється в діапазоні 0,005–0,025 м.

Таблиця 2.1 – Середні значення фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші

Властивість	Ядро сояшника	Лущпиння	Дрібні частинки
Ефективний діаметр, мм	5–25	5–25	5–25
Дійсна щільність, кг/м ³	990±30	510±50	200±70
Модуль пружності, МПа	1,07±0,11	1,23±0,15	0,52±0,10
Коефіцієнт тертя спокою о стінку (AISI 201)	0,39±0,15	0,32±0,12	0,25±0,04
Коефіцієнт Пуассона	0,28±0,04	0,32±0,06	0,22±0,05
Коефіцієнт тертя спокою частинок між собою	0,42±0,06	0,48±0,07	0,38±0,07
Коефіцієнт відновлення	0,44±0,10	0,35±0,12	0,36±0,10
Коефіцієнт опору кочення	0,36±0,02	0,33±0,03	0,37±0,09

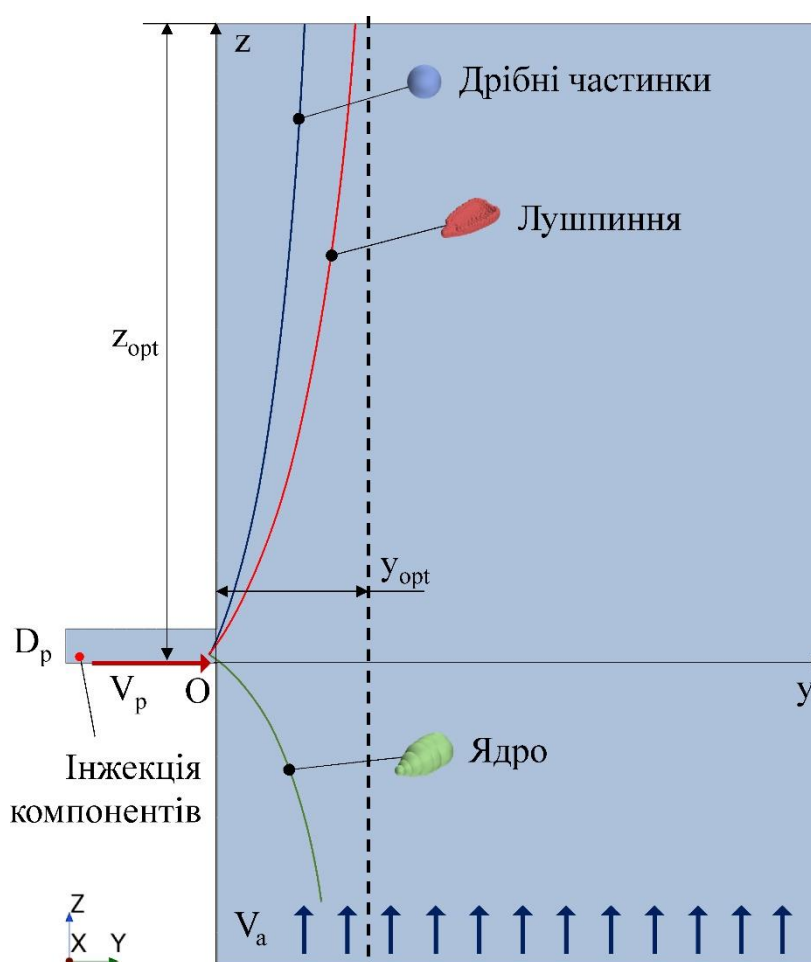


Рисунок 2.3 – Схема моделювання руху компонентів відходів насінневої суміші сояшнику в пневмосепаруючому каналі

Далі під дією формалізованого стрічкового конвеєра компоненти подаються до пневмосепаруючого каналу зі швидкістю V_p (закодоване – x_2), яка змінюється в діапазоні 0,05–0,25 м/с. Повітряний потік є рівномірним на вході в пневмосепаруючий канал, його швидкість V_a (закодоване – x_3) змінюється в діапазоні 1–5 м/с. Повнофакторний план чисельного досліду для трьох факторів на трьох рівнях наведений в таблиці додатку Б.

Завдяки різним аеродинамічним характеристикам компонентів відходів насінневої суміші соняшнику, ядро насіння соняшнику рухається по траєкторії вниз, а лушпиння і дрібні частинки піднімаються вгору. Таким чином відбувається процес сепарації в пневмосепаруючому каналі.

Кількісним критерієм оцінки процесу є його продуктивність q , яка прямо пропорційна швидкості подачі компонентів суміші соняшнику V_p і повинна прагнути до максимального значення [108]:

$$q \sim V_p \rightarrow \max. \quad (2.27)$$

Енергетичним критерієм є витрати енергії генератора повітряного потоку E , яка прямо пропорційна квадрату швидкості повітряного потоку V_a і площі пневмосепаруючого каналу і повинна прагнути до мінімального значення [193, 194]. Приймаючи, що поперечний переріз пневмосепаруючого каналу – квадрат із стороною y_{opt} маємо:

$$E \sim V_a^2 \cdot y_{opt}^2 \rightarrow \min. \quad (2.28)$$

Умовою якісного розділення відходів насінневої суміші соняшнику є максимізація вертикальної швидкості лушпиння соняшнику V_{hz} і дрібних частинок V_{dz} в напрямку Oz і мінімізація вертикальної швидкості ядра соняшнику V_{kz} в напрямку $-Oz$. Ця умова забезпечує найменшу горизонтальну відстань польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) y_{opt} (рис. 2.3), тобто:

$$y_{opt} \rightarrow \min. \quad (2.29)$$

Для дослідження впливу подачі відходів насінневої суміші та фракційного вмісту компонентів в ній на якість процесу сепарації було проведено *другий етап*

моделювання взаємодії потоків відходів насінневої суміші і повітря. Схема моделювання наведена на рис. 2.4.

Прийнято, що насінневу суміш попередньо калібрували на решетах і ефективний діаметр компонентів знаходиться в межах 0,009 м до 0,013 м.

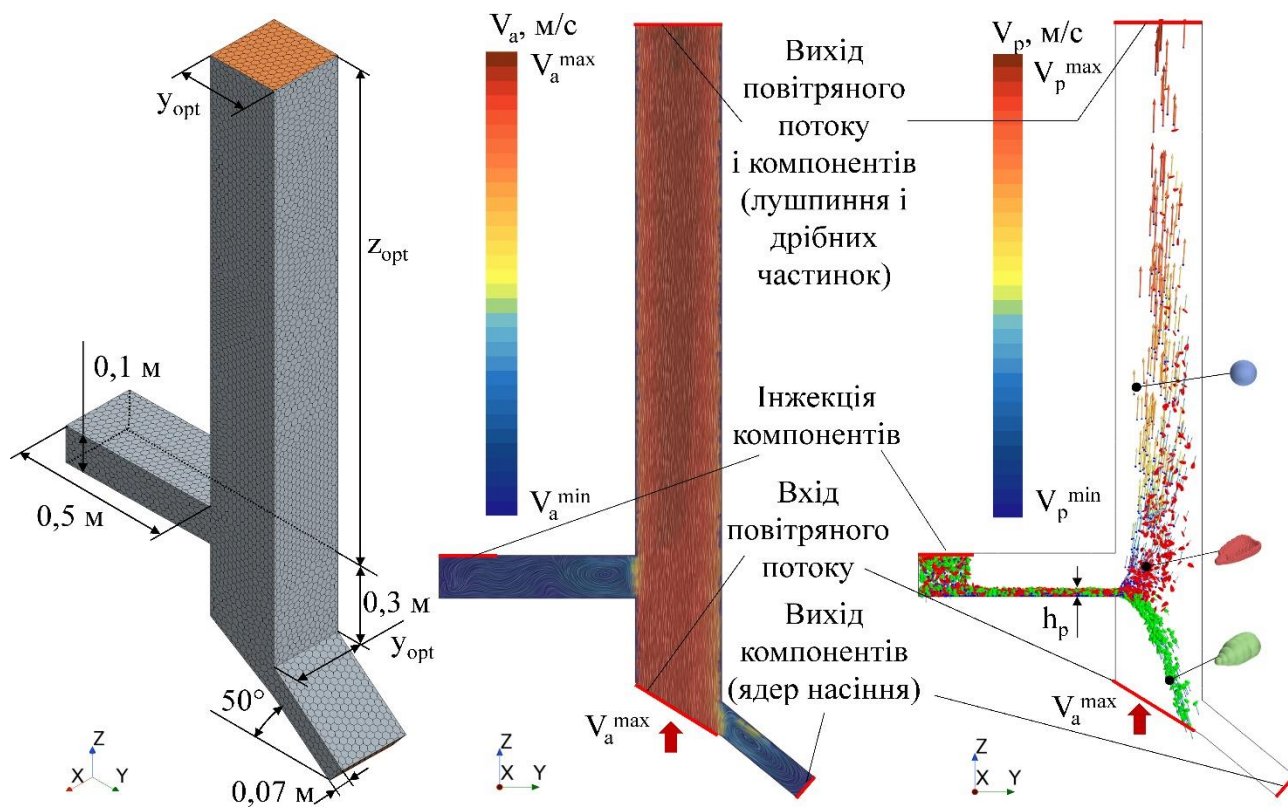


Рисунок 2.4 – Схема моделювання сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі

Так як згідно попереднього моделювання визначені раціональні значення швидкості формалізованого стрічкового конвеєра V_{p-opt} і його ширина y_{opt} , то подача визначається висотою шару відходів насінневої суміші h_p : $q \sim V_{p-opt} y_{opt} h_p$,

Тому, в якості факторів досліджень обрано висоту шару відходів насінневої суміші соняшнику h_p (закодоване – x_4) в межах 0,02–0,06 м і швидкість повітряного потоку V_a (закодоване – x_3). Повнофакторний план чисельного дослідження для двох факторів на п'яти рівнях наведений в таблиці додатку В.

За критерій оцінки якості сепарації було обрано вміст ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , який повинен бути максимальним.

Третім етапом моделювання є дослідження процесу сепарації компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження. У відповідності до першого етапу моделювання в камеру розрідження надходять лушпиння соняшника і дрібні частинки. Попередньо камеру розрідження представимо у вигляді призми із виходом повітряного потоку на нижній грані (рис. 2.5).

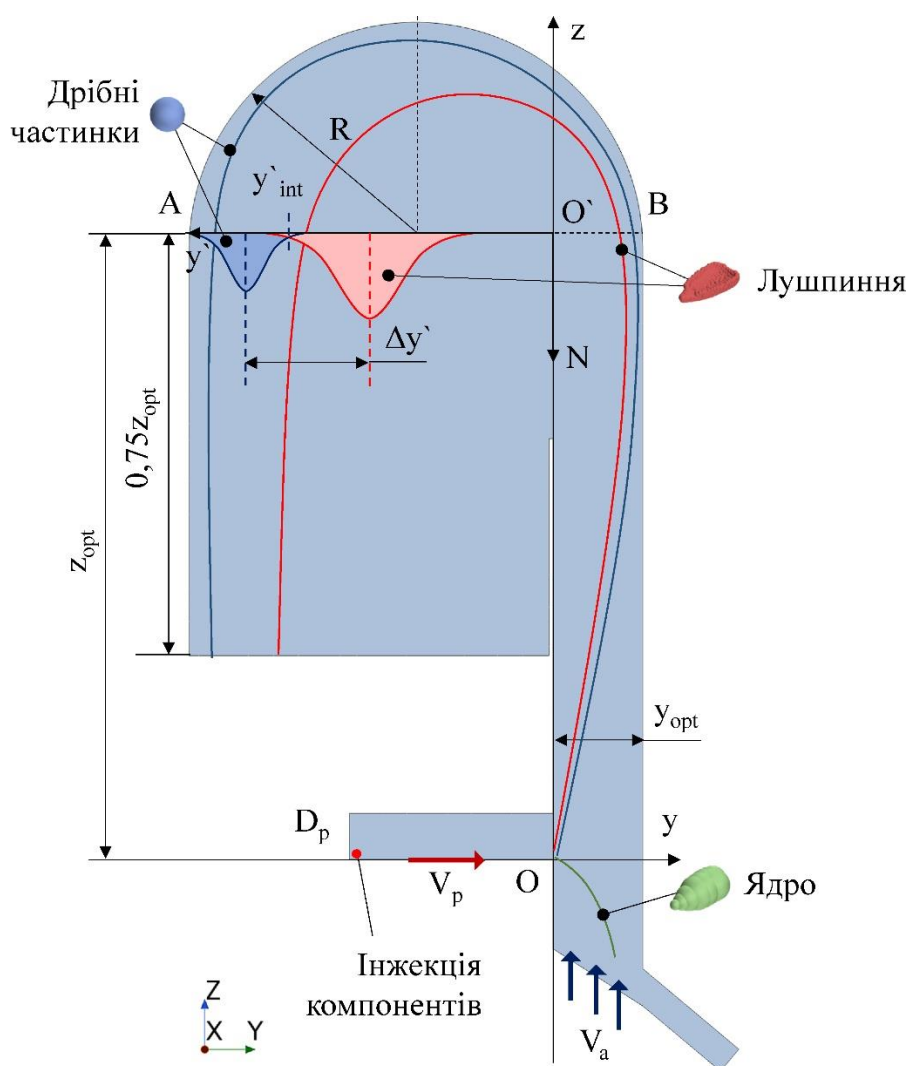


Рисунок 2.5 – Схема моделювання руху компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі і камері розрідження

Факторами чисельного моделювання руху компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі і камері розрідження є ефективний діаметр компонентів D_p (0,005–0,025 м, задоване – x_1), швидкість повітряного потоку

V_a (5–15 м/с, задоване – x_3), радіус кривизни верхньої грані камери розрідження R (0,4–0,6 м, задоване – x_5). Повнофакторний план чисельного досліду для трьох факторів на трьох рівнях наведений в таблиці додатку Г.

Після пневмосепаруючого каналу суміш, яка складається з лушпиння соняшнику і дрібних частинок, рухається вгору до камери розрідження, де відбувається їх розділення. Визначимо траєкторії польоту компонентів суміші в камері розрідження враховуючи їх неоднорідність за фізико-механічними властивостями (згідно табл. 2.1). Побудуємо розподіли компонентів суміші (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) вздовж лінії АВ (рис. 2.5) і визначимо відстань між їх піками Δy^* і точку перетину y_{int}^* в системі координат y^*O^*N (де N – кількість компонентів). Умовою якісного розділення лушпиння соняшнику і дрібних частинок в камері розрідження є максимізація відстані Δy^* :

$$\Delta y^* \rightarrow \max, \quad (2.30)$$

а точка перетину y_{int}^* визначає координату розділення двох забірників компонентів суміші.

Для обґрунтування режимних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу в залежності від складу засміченої насінневої суміші соняшнику проведемо *четвертий етап чисельного моделювання*. Схема моделювання наведена на рис. 2.6.

Прийнято, що насінневу суміш попередньо калібрували на решетах і ефективний діаметр компонентів знаходиться в межах 0,009 м до 0,013 м.

В якості факторів досліджень приймаємо швидкість повітряного потоку V_a (1–5 м/с) – x_3 , подачу суміші q (50–150 кг/год) – x_9 і вміст компонентів в насінневій суміші – $\psi_h(x_6)$, $\psi_d(x_7)$, $\psi_k(x_8)$. При цьому виконується умова:

$$\psi_h + \psi_d + \psi_k = 1. \quad (2.31)$$

План досліджень впливу фракційного вмісту компонентів на якість сепарації в пневмосепаруючому каналі наведений в таблиці додатку Д.

За критерій оцінки якості сепарації було обрано вміст кожного компонента відходів насінневої суміші соняшнику у відповідних забірниках η .

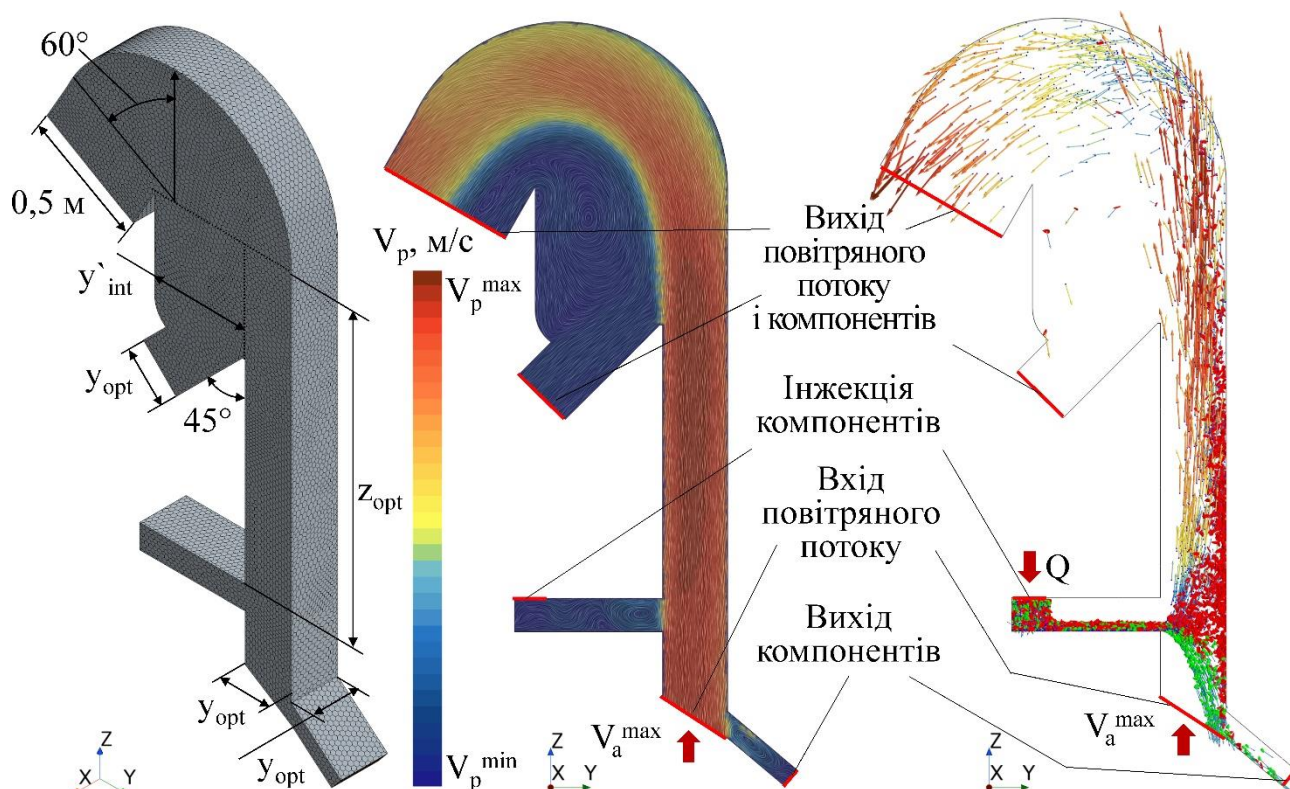


Рисунок 2.6 – Схема моделювання сепарації компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі

Спираючись на дослідження Алієва Е. Б. [90] якісним критерієм оцінки роботи розробленого аеродинамічного сепаратора є коефіцієнт розподілу δ , що визначається як середнє значення вмісту компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику у відповідних забірниках η :

$$\delta = \frac{\eta_{h-h} + \eta_{d-d} + \eta_{k-k}}{3}. \quad (2.32)$$

2.4 Результати чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу

У результаті *першого етапу* чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі отримані траєкторії руху її компонентів, які представлені на рис. 2.7.

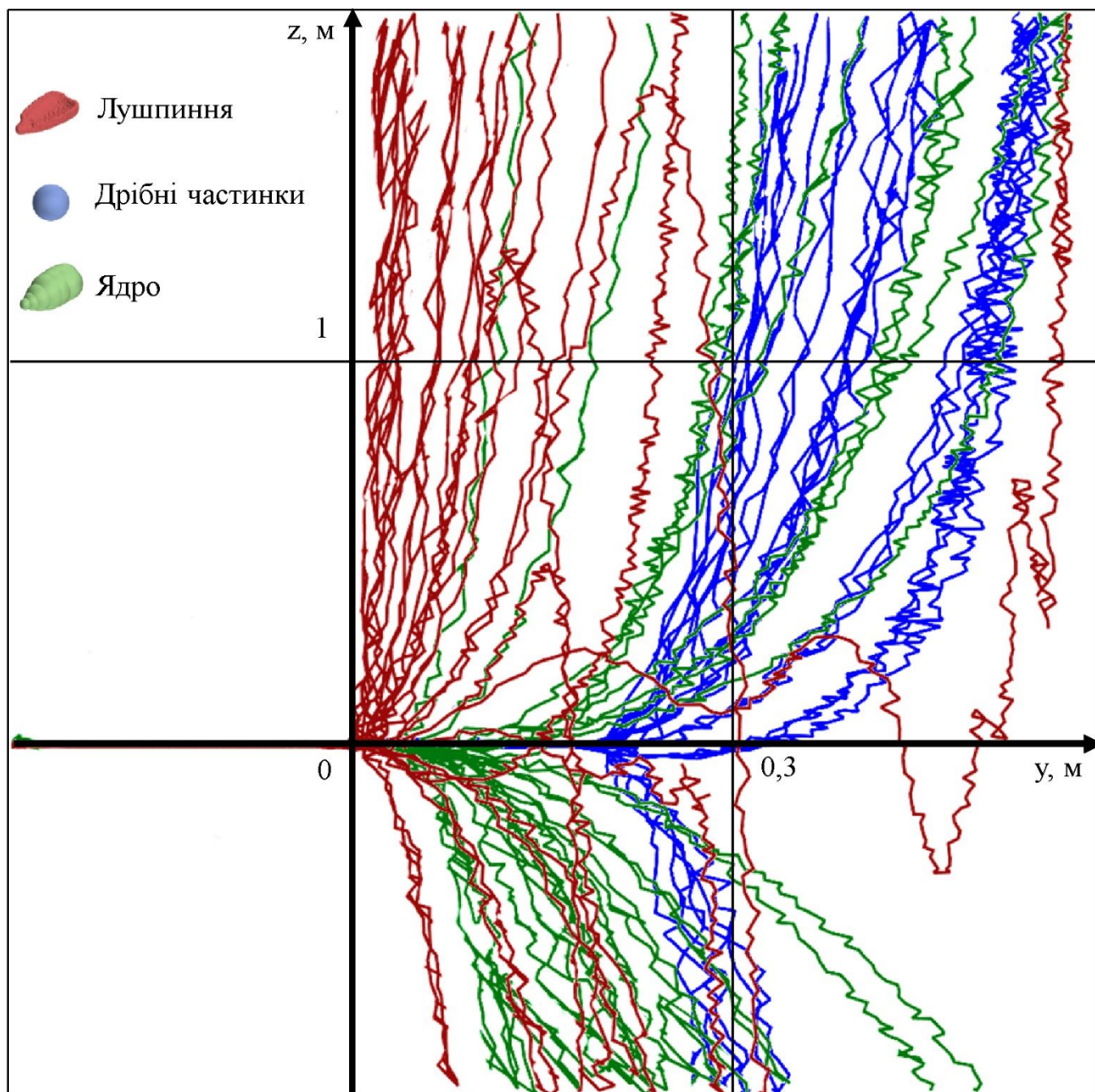


Рисунок 2.7 – Об'єднаний графік траєкторій руху компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі для різних режимі роботи

Для різних варіантів чисельного досліду при різних значеннях факторів спостерігаються різні траєкторії польоту компонентів відходів насінневої суміші соняшнику. Визначимо для кожної комбінації факторів значення відстані польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y_{орт}$, які зведені в таблицю додатка Б.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності y_{opt} від факторів досліджень в закодованому вигляді (додаток Б):

$$y_{\text{opt}} = 0,286222 + 0,0136111 x_1 + 0,0498333 x_1^2 + 0,0834444 x_2 - 0,0000833333 x_1 x_2 + 0,006 x_2^2 - 0,0756111 x_3 + 0,0400833 x_1 x_3 - 0,0615 x_2 x_3 + 0,0818333 x_3^2. \quad (2.33)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2.2. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(27) = 2,05$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо знехтувати, як статистично незначущими.

Таблиця 2.2 – Статистичні показники рівняння регресії (2.33)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	0,286222	0,0250114	11,4437	$2,07281 \cdot 10^{-9}$
a_{10}	0,0136111	0,011578	1,1756	0,255958
a_{20}	0,0834444	0,011578	7,20714	$1,46642 \cdot 10^{-6}$
a_{30}	-0,0756111	0,011578	-6,53057	$5,13676 \cdot 10^{-6}$
a_{12}	-0,0000833333	0,0141801	-0,00587677	0,995379
a_{13}	0,0400833	0,0141801	2,82673	0,0116317
a_{23}	-0,0615	0,0141801	-4,33706	0,000447816
a_{11}	0,0498333	0,0200537	2,48499	0,0236631
a_{22}	0,006	0,0200537	0,299196	0,768417
a_{33}	0,0818333	0,0200537	4,0807	0,000778548

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 2.8):

$$y_{\text{opt}} = 0,639806 - 51,8917 D_p + 1993,33 D_p^2 - 0,154514 V_a + 4,00833 D_p V_a + 0,0204583 V_a^2 + 1,75694 V_p - 0,3075 V_a V_p. \quad (2.34)$$

Згідно рис. 2.8 збільшення ефективного діаметра компонентів D_p при певних значеннях швидкості повітряного потоку V_a призводить до зменшення горизонтальної відстані y_{opt} . Це пояснюється збільшенням маси компонентів і відповідно зменшенням дальності їх польоту.

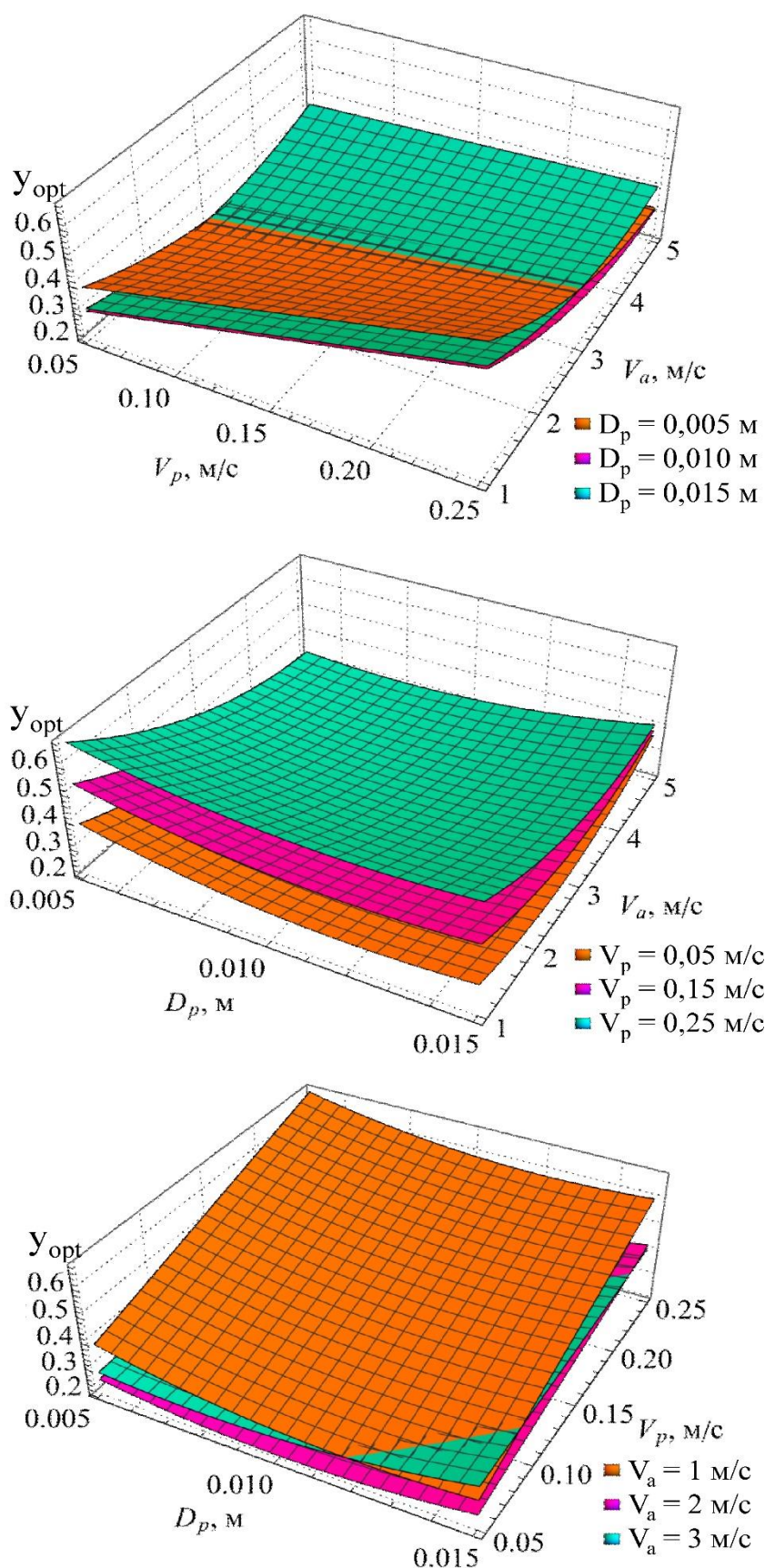


Рисунок 2.8 – Залежність горизонтальної відстані польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) y_{opt} від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і швидкості повітряного потоку V_a

Збільшення швидкості подачі компонентів V_p логічним чином призводить до збільшення відстані y_{opt} . В свою чергу для швидкості повітряного потоку V_a при певних значеннях швидкості подачі компонентів V_p спостерігається певний оптимум, що можна пояснити зміною вектору руху компонентів суміші у просторі.

Вирішуючи систему рівнянь (2.27)–(2.29) спільно з (2.34) в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Б) отримуємо раціональне рівняння, яке зв'язує фактори досліджень між собою:

$$0,420403 - 51,8917 D_p + 1993,33 D_p^2 - 0,154514 V_a + 4,00833 D_p V_a + 0,0204583 V_a^2 + 1,75694 V_p - 0,3075 V_a V_p = 0. \quad (2.35)$$

При цьому $y_{opt} = 0,2195$ м. Тоді для подальших розрахунків приймаємо поперечний переріз пневмосепаруючого каналу – квадрат із стороною 220 мм.

Для компонентів, ефективний діаметр яких знаходить в межах 0,009–0,013 м швидкість формалізованого стрічкового конвеєра складає $V_{p-opt} = 0,069$ – $0,077$ м/с. Приймаємо середнє значення 0,073 м/с.

У результаті *другого етапу чисельного моделювання* взаємодії потоків відходів насінневої суміші і повітря в пневмосепаруючому каналі отримано їх візуалізацію для різних комбінацій факторів, які представлені на рис. 2.9.

Рис. 2.9 демонструє розподіл компонентів відходів насінневої суміші в пневмосепаруючому каналі і векторне поле їх швидкостей.

Значення продуктивності процесу сепарації q , об'ємних витрат повітряного потоку Q_a і вміст ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} для кожного дослідження, які зведені в таблицю додатка В.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності η_{k-k} від факторів досліджень в закодованому вигляді (додаток В):

$$\eta_{k-k} = 0,924629 - 0,0524 x_4 - 0,0245714 x_4^2 + 0,0604 x_3 - 0,012 x_4 x_3 - 0,0382857 x_3^2. \quad (2.36)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2.3. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(25) = 2,06$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо знехтувати, як статистично незначущими.

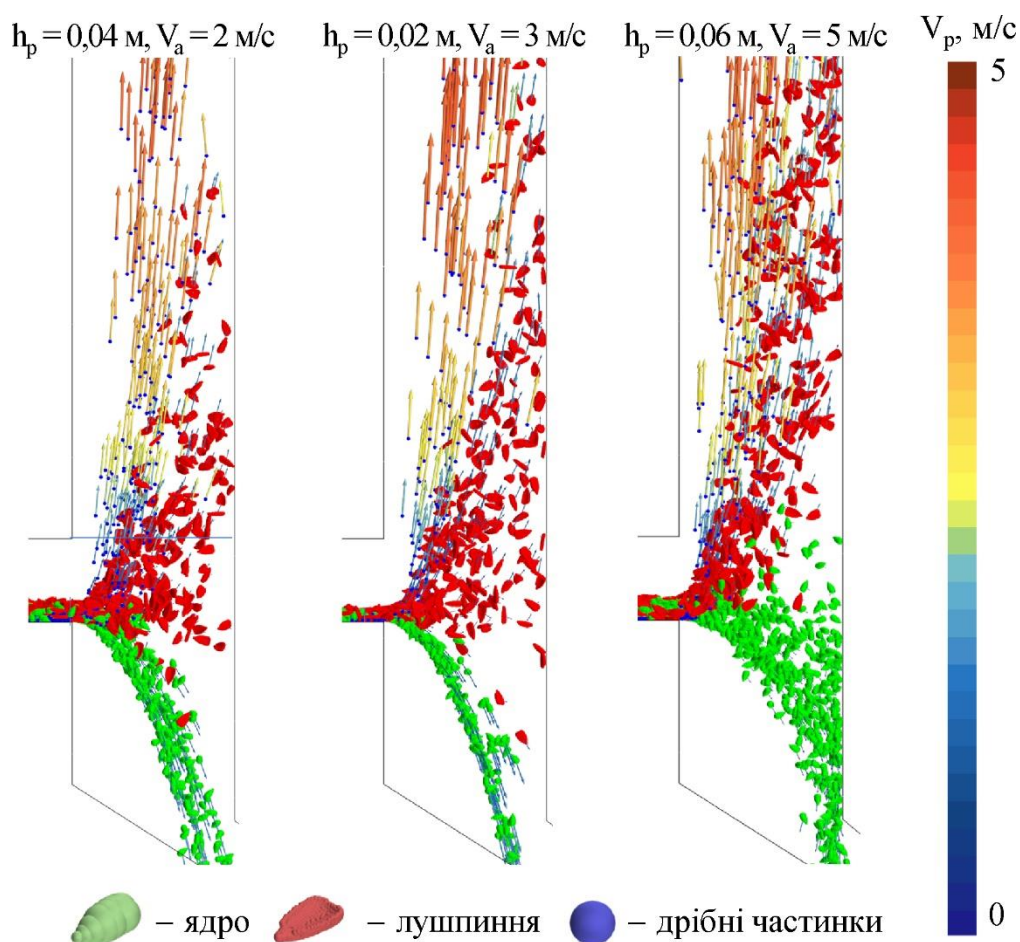


Рисунок 2.9 – Розподіл компонентів відходів насіннєвої суміші
в пневмосепаруючому каналі

Таблиця 2.3 – Статистичні показники рівняння регресії (2.36)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	0,924629	0,0014689	629,468	$1,67618 \cdot 10^{-42}$
a_{40}	-0,0524	0,00105773	-49,54	$1,48098 \cdot 10^{-21}$
a_{30}	0,0604	0,00105773	57,1033	$1,01302 \cdot 10^{-22}$
a_{43}	-0,012	0,00149586	-8,02215	$1,60849 \cdot 10^{-7}$
a_{44}	-0,0245714	0,00178789	-13,7432	$2,53874 \cdot 10^{-11}$
a_{33}	-0,0382857	0,00178789	-21,4139	$9,16773 \cdot 10^{-15}$

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 2.10):

$$\eta_{k-k} = 0,7184 + 3,19429 h_p - 61,4286 h_p^2 + 0,0996286 V_a - 0,4 h_p V_a - 0,00957143 V_a^2. \quad (2.37)$$

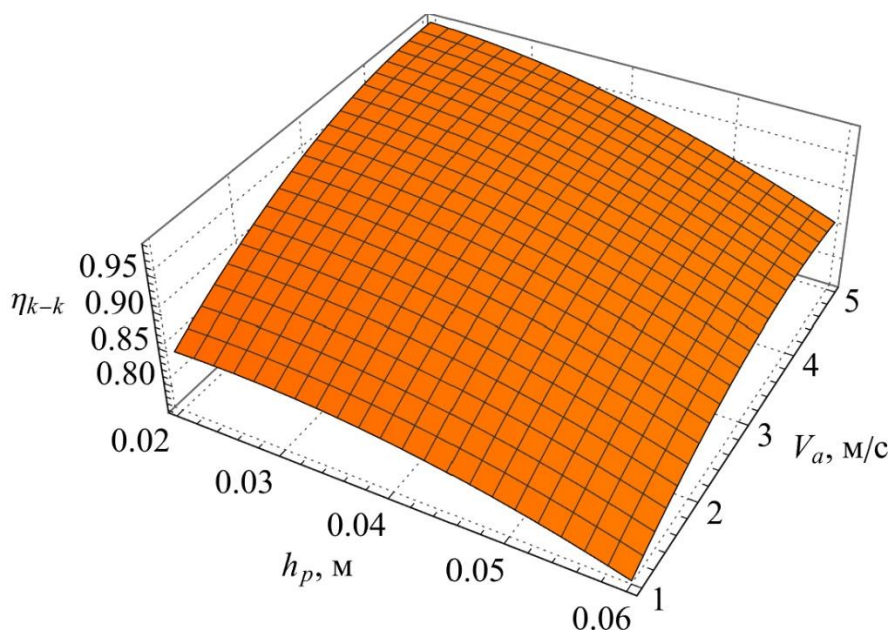


Рисунок 2.10 – Залежність вмісту ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} від висоту шару відходів насінневої суміші соняшника, що подається, h_p і швидкості повітряного потоку V_a

Згідно рис. 2.10 збільшення висоти шару відходів насінневої суміші соняшнику, що подається, h_p призводить до зменшення вмісту ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} . Це пояснюється тим, що в область пневмосепаруючого каналу подається велика кількість компонентів, які зіштовхуються і заважають одне одному переміщуватися під дією повітряного потоку. Окрім цього скупчення компонентів відходів насінневої суміші призводить до зменшення швидкості повітряного потоку. В свою чергу збільшення швидкості повітряного потоку V_a дозволяє покращити якість сепарації, тим самим збільшуючи вміст ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} .

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності продуктивності процесу сепарації q і об'ємних витрат повітря (продуктивність генератора повітряного потоку) Q_a від факторів досліджень в закодованому вигляді (додаток В):

$$q = 136,279 + 69,608 x_4 + 0,24 x_4^2 + 0,072 x_3 - 0,452 x_4 x_3 - 0,022857 x_3^2, \quad (2.38)$$

$$Q_a = 514,331 + 1,84 x_4 - 2,8 \cdot 10^{-13} x_4^2 + 349,6 x_3 - 1,16 x_4 x_3 - 0,3428 x_3^2. \quad (2.39)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2.4. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(25) = 2,06$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо нехтувати, як статистично незначущими.

Таблиця 2.4 – Статистичні показники рівняння регресії (2.38)–(2.39)

	Estimate	Standard Error	t–Statistic	P–Value	Estimate	Standard Error	t–Statistic	P–Value
	(2.38)				(2.39)			
a ₀₀	136,279	0,326024	418,004	4,0·10 ⁻³⁹	514,331	1,4477	355,2	8,7·10 ⁻³⁸
a ₄₀	69,608	0,234764	296,502	2,7·10 ⁻³⁶	1,84	1,042	1,764	0,0936
a ₃₀	0,072	0,234764	0,306691	0,76241	349,6	1,042	335,34	2,6·10 ⁻³⁷
a ₄₃	-0,452	0,332007	-1,36142	0,18930	-1,16	1,4743	-0,7868	0,4411
a ₄₄	0,24	0,396824	0,604803	0,55246	-2,8·10 ⁻¹³	1,7621	-1,5·10 ⁻¹³	1
a ₃₃	-0,0228	0,396824	-0,05760	0,95466	-0,3428	1,7621	-0,1945	0,8477

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо:

$$q = -2,93657 + 3480,4 h_p, \quad (2.40)$$

$$Q_a = -10,0686 + 174,8 V_a. \quad (2.41)$$

Вирішуючи систему рівнянь:

$$\begin{cases} \eta_{k-k} \rightarrow \max, \\ q \rightarrow \max, \\ Q_a \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2.42)$$

Провівши ранжування критеріїв і провівши зведення до єдиного узагальнюючого критерію приведемо систему (2.42) до наступного вигляду:

$$K_2 = \frac{\eta_{k-k} - \min(\eta_{k-k})}{\max(\eta_{k-k}) - \min(\eta_{k-k})} \frac{q - \min(q)}{\max(q) - \min(q)} \frac{\max(Q_a) - Q_a}{\max(Q_a) - \min(Q_a)} \rightarrow \max. \quad (2.43)$$

Вирішуючи (2.43) спільно з (2.37), (2.40) і (2.41) в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток В) отримуємо раціональні значення факторів досліджень: $h_p = 0,036$ м, $V_a = 3,42$ м/с. При цьому $\eta_{k-k} = 0,94$, $q = 122,9$ кг/год, $Q_a = 588$ м³/год.

У результаті *третього етапу чисельного моделювання* процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження отримано візуалізацію руху її компонентів, які представлені на рис. 2.11.

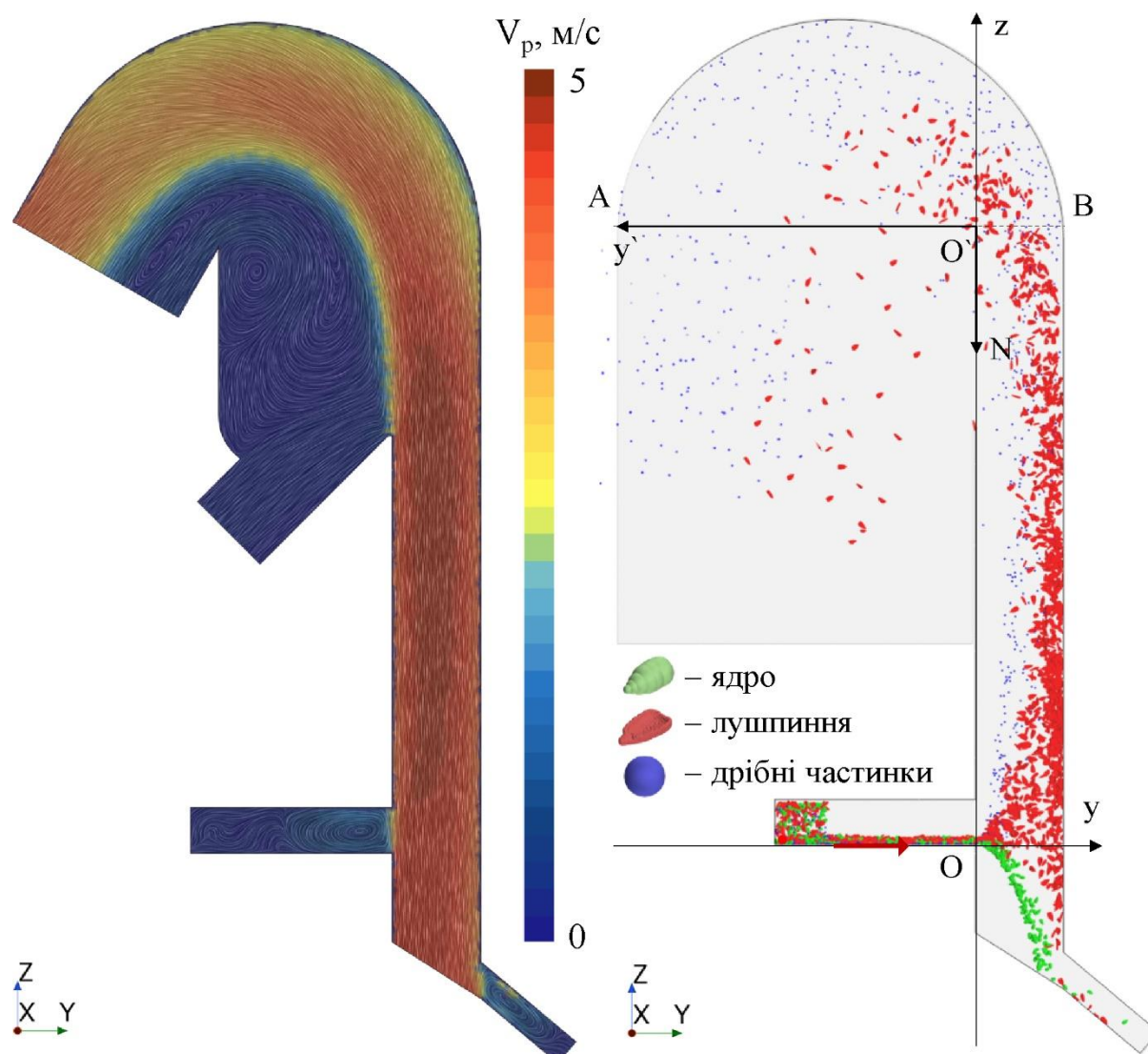


Рисунок 2.11 – Візуалізація руху компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження

Для різних варіантів чисельного дослідження при різних значеннях факторів спостерігаються різні траєкторії польоту компонентів відходів насінневої суміші соняшнику (лушпиння соняшнику і дрібних частинок). На траєкторії польоту компонентів впливає не тільки потік повітряного потоку, а й контактна взаємодія компонентів між собою і стінками аеродинамічного сепаратора колонного типу.

Тому на рис. 2.12 побудовані розподіли компонентів суміші (лушпиння соняшника і дрібних частинок) вздовж лінії АВ (рис. 2.5).

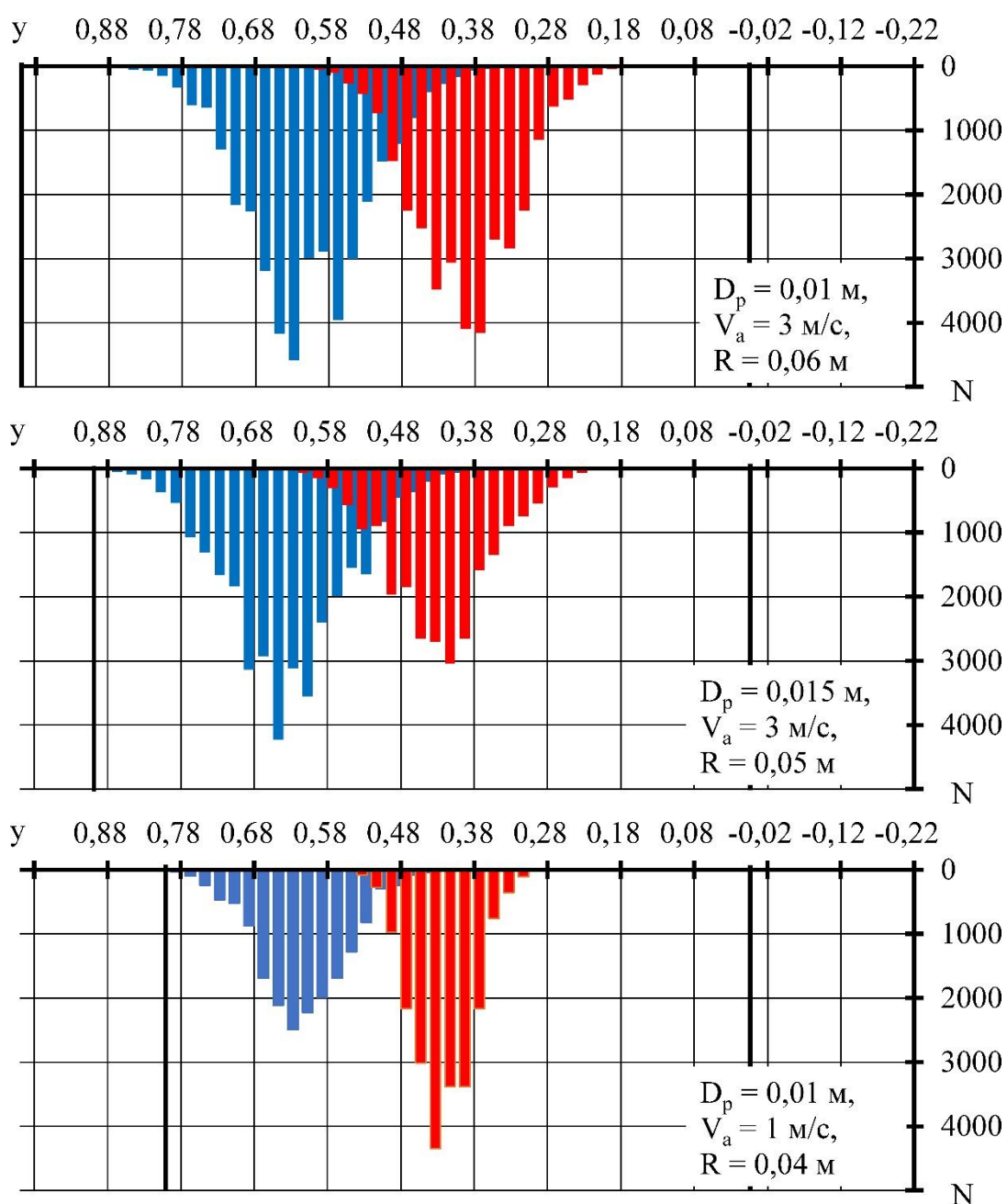


Рисунок 2.12 – Розподіли компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження для різних комбінацій факторів дослідження

Згідно рис. 2.12 визначена відстань між піками розподілів $\Delta y'$ в системі координат $y'O'N$ (де N – кількість компонентів). Дані зведені у таблиці додатку Г.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності $\Delta y'$ від факторів досліджень в закодованому вигляді (додаток Г):

$$\begin{aligned} \Delta y' = & 0,442778 + 0,033 x_1 - 0,0173333 x_1^2 + 0,0168889 x_3 + 0,0065 x_1 x_3 - \\ & - 0,0473333 x_3^2 + 0,0465 x_5 + 0,00308333 x_1 x_5 - 0,00158333 x_3 x_5 - \\ & - 0,0461667 x_5^2. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2.5. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(27) = 2,05$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо нехтувати, як статистично незначущими.

Таблиця 2.5 – Статистичні показники рівняння регресії (2.44)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	0,442778	0,00506364	87,4427	$5,27332 \cdot 10^{-24}$
a_{10}	0,033	0,00234401	14,0785	$8,4308 \cdot 10^{-11}$
a_{30}	0,0168889	0,00234401	7,20513	$1,47174 \cdot 10^{-6}$
a_{50}	0,0465	0,00234401	19,8378	$3,4185 \cdot 10^{-13}$
a_{13}	0,0065	0,00287081	2,26417	0,0369301
a_{15}	0,00308333	0,00287081	1,07403	0,297819
a_{35}	-0,00158333	0,00287081	-0,551528	0,588449
a_{11}	-0,0173333	0,00405994	-4,26936	0,000518056
a_{33}	-0,0473333	0,00405994	-11,6586	$1,56274 \cdot 10^{-9}$
a_{55}	-0,0461667	0,00405994	-11,3713	$2,28186 \cdot 10^{-9}$

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 2.13):

$$\begin{aligned} \Delta y' = & -1,19156 + 18,5167 D_p - 693,333 D_p^2 + 5,08167 R - 4,61667 R^2 + \\ & + 0,0729444 V_a + 0,65 D_p V_a - 0,0118333 V_a^2. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Згідно рис. 2.8 збільшення ефективного діаметра компонентів D_p призводить до збільшення відстані між піками розподілів лушпиння соняшнику і дрібних частинок $\Delta y'$. Це пояснюється тим, що збільшується маса лушпиння і воно знижується раніше.

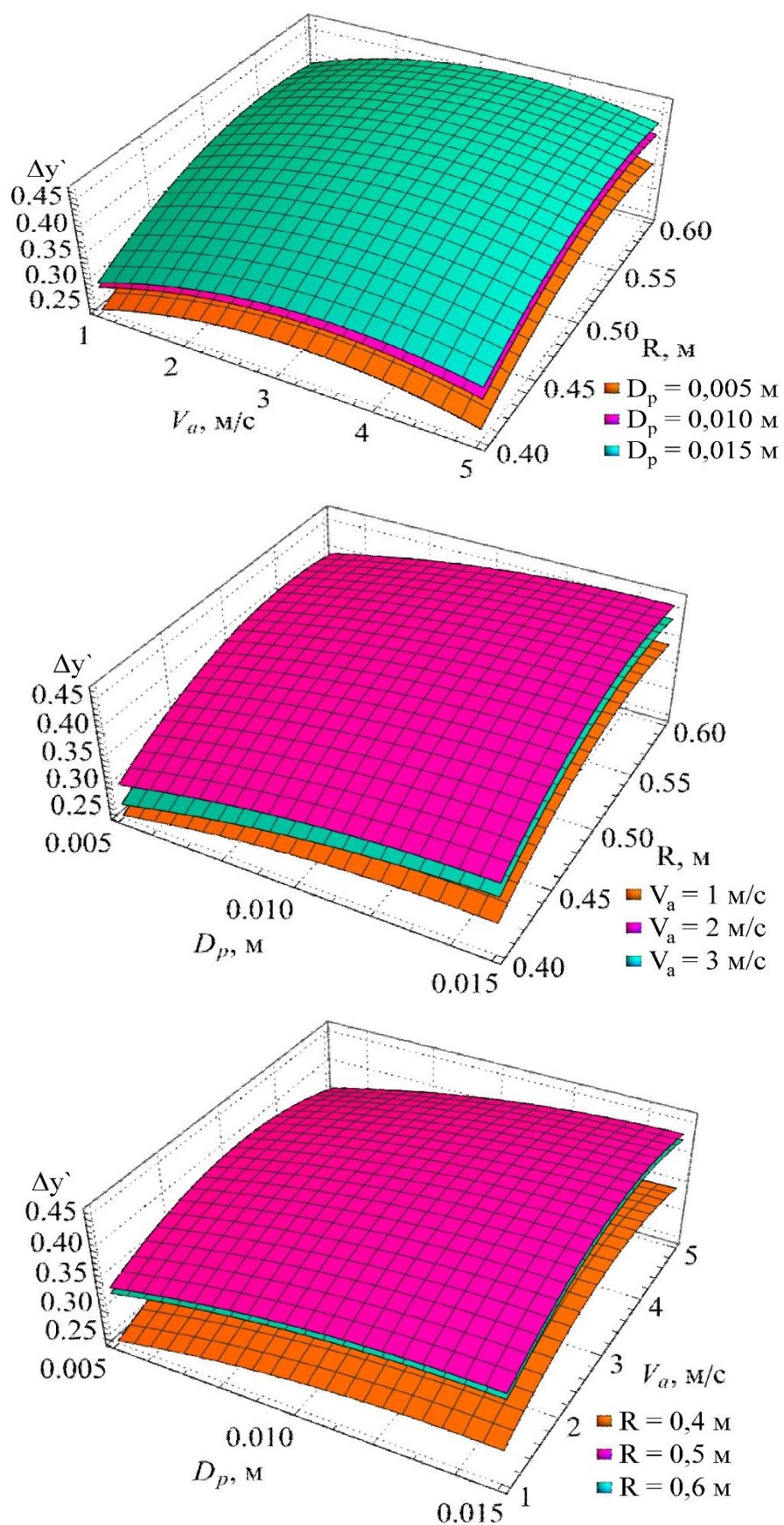


Рисунок 2.13 – Залежність відстані між піками розподілів лущиння соняшнику і дрібних частинок $\Delta y'$ від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R

Із збільшенням радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R відстань між піками розподілів $\Delta y'$ збільшується. В свою чергу, для швидкості повітряного потоку V_a спостерігається оптимум для відстані між піками розподілів $\Delta y'$.

Вирішуючи рівняння (2.31) спільно з (2.45) в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо раціональні значення факторів досліджень: для $D_p = 0,005$ м $\rightarrow V_a = 3,21$ м/с, $R = 0,055$ м; для $D_p = 0,010$ м $\rightarrow V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,056$ м; для $D_p = 0,015$ м $\rightarrow V_a = 3,49$ м/с, $R = 0,054$ м. При цьому середнє значення відстані між піками розподілів лушпиння соняшнику і дрібних частинок $\Delta y' = 0,443$ м.

Підставивши середні раціональні значення факторів ($D_p = 0,01$ м, $V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,054$ м) в створену чисельну модель Simcenter Star-CCM+ отримано раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) вздовж лінії АВ (рис. 2.5) $y'_{int} = 0,43$ м (рис. 2.14).

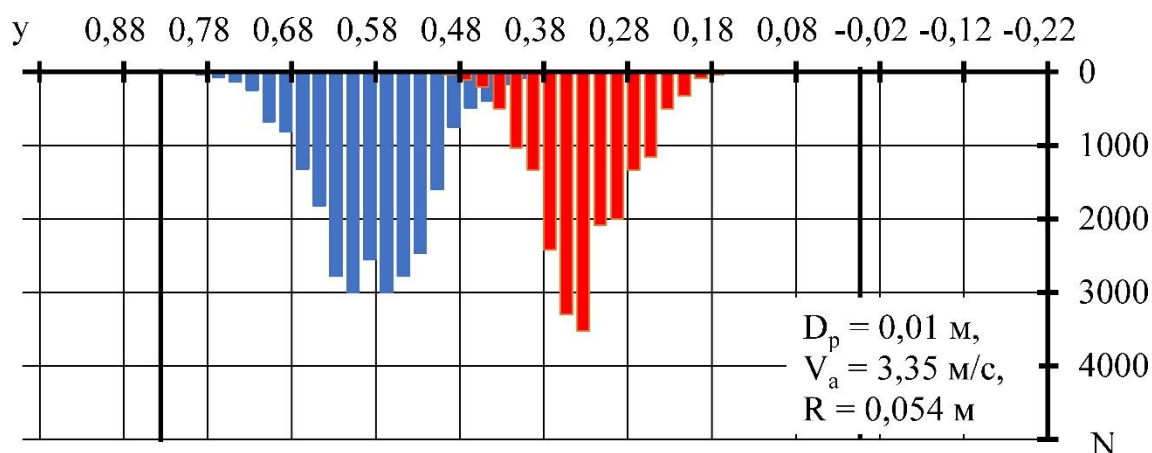


Рисунок 2.14 – Розподіли компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження для раціональних значеннях факторів

$$(D_p = 0,01 \text{ м}, V_a = 3,35 \text{ м/с}, R = 0,054 \text{ м})$$

Четвертий етап чисельного моделювання дозволив встановити вплив вмісту компонентів в насіннєвій суміші – ψ_h , ψ_d , ψ_k .

Результати моделювання зведені в таблиці додатка Д. З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії неповного

третього порядку залежності δ від факторів досліджень в закодованому вигляді (додаток Д):

$$\begin{aligned} \delta = & 0,421462 - 0,3611 x_6 + 0,200243 x_6^2 - 0,361757 x_7 + 0,220409 x_6 x_7 - \\ & - 0,0210008 x_6^2 x_7 + 0,199692 x_7^2 - 0,0291192 x_6 x_7^2 - \\ & - 0,361464 x_8 + 0,219188 x_6 x_8 - 0,0245388 x_6^2 x_8 + 0,221527 x_7 x_8 - \\ & - 0,221706 x_6 x_7 x_8 - 0,0248648 x_7^2 x_8 + 0,200336 x_8^2 - \\ & - 0,024224 x_6 x_8^2 - 0,0265838 x_7 x_8^2. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2.6. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(22) = 2,07$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо нехтувати, як статистично незначущими.

Таблиця 2.6 – Статистичні показники рівняння регресії (2.46)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a ₀₀	0,421462	0,00973401	43,2979	1,2402·10 ⁻⁷
a ₆₀	-0,3611	0,0104079	-34,6949	3,74211·10 ⁻⁷
a ₇₀	-0,361757	0,0104079	-34,758	3,70838·10 ⁻⁷
a ₈₀	-0,361464	0,0103973	-34,7651	3,70465·10 ⁻⁷
a ₆₇	0,220409	0,0221995	9,92857	0,000176924
a ₆₈	0,219188	0,022182	9,88137	0,000181011
a ₇₈	0,221527	0,022182	9,9868	0,000172034
a ₆₇₈	-0,221706	0,0263672	-8,40839	0,000390013
a ₆₆₇	-0,0210008	0,0367308	-0,571748	0,592236
a ₆₆₈	-0,0245388	0,0367358	-0,667979	0,533738
a ₇₇₈	-0,0248648	0,0367358	-0,676853	0,528541
a ₇₇₆	-0,0291192	0,0367308	-0,792774	0,463848
a ₈₈₆	-0,024224	0,0367112	-0,659852	0,538526
a ₈₈₇	-0,0265838	0,0367112	-0,724133	0,501436
a ₆₆	0,200243	0,0242769	8,24831	0,00042698
a ₇₇	0,199692	0,0242769	8,22559	0,000432557
a ₈₈	0,200336	0,0242713	8,25403	0,000425588

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 2.15):

$$\delta = 2,98888 - 2,84911 \psi_d + 0,801345 \psi_d^2 - 2,84957 \psi_h + 1,77293 \psi_d \psi_h + \quad (2.47)$$

$$+ 0,798767 \psi_h^2 - 2,84578 \psi_k + 1,76358 \psi_d \psi_k + 1,76846 \psi_h \psi_k - \\ - 1,77365 \psi_d \psi_h \psi_k + 0,800973 \psi_k^2.$$

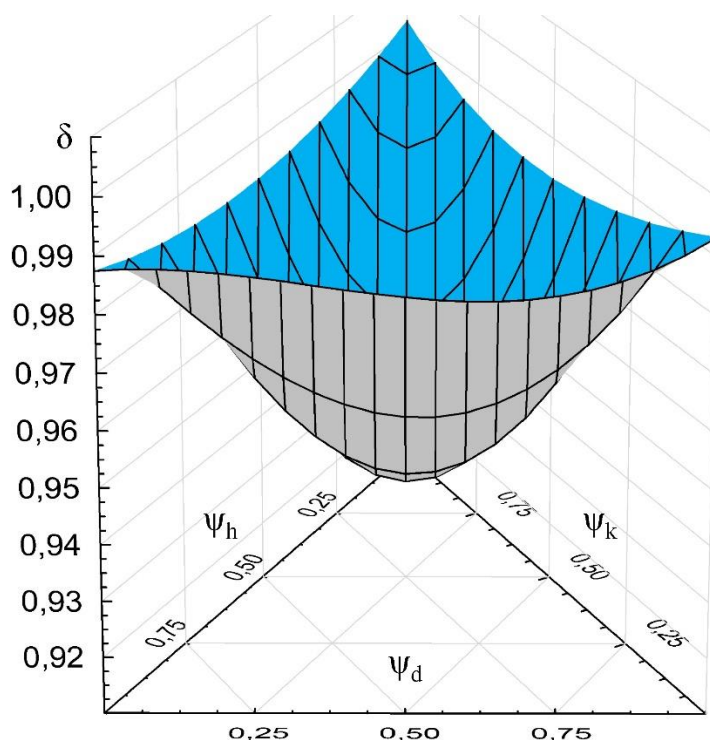


Рисунок 2.15 – Залежність коефіцієнта розподілу δ розробленого аеродинамічного сепаратора від вмісту компонентів в насіннєвій суміші ψ_h , ψ_d , ψ_k

Згідно рис. 2.15 коефіцієнта розподілу δ змінюється в діапазоні від 0,931 до 0,993. Найменше значення спостерігається для наступного вмісту компонентів: $\psi_d = 0,331$, $\psi_h = 0,335$, $\psi_k = 0,334$.

Далі, варіюючи факторами досліджень V_a і q проведено моделювання, результати якого зведені в таблиці додатка Д.

З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розрахуємо рівняння регресії другого порядку залежності коефіцієнта розподілу δ від факторів досліджень $V_a(x_3)$ і $q(x_9)$ в закодованому вигляді (додаток Д):

$$\delta = 0,949903 - 0,02576 x_9 - 0,0064 x_9^2 + 0,03472 x_3 - 0,00956 x_9 x_3 - \\ - 0,0238857 x_3^2. \quad (2.48)$$

Розраховані статистичні показники наведені в табл. 2.7. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менше за табличне значення $t_{0,05}(25) = 2,06$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо нехтувати, як статистично незначущими.

Таблиця 2.5 – Статистичні показники рівняння регресії (2.48)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	0,949903	0,00103881	914,413	$1,39065 \cdot 10^{-45}$
a_{90}	-0,02576	0,00074803	-34,4371	$1,37735 \cdot 10^{-18}$
a_{30}	0,03472	0,00074803	46,4153	$5,05772 \cdot 10^{-21}$
a_{93}	-0,00956	0,00105787	-9,03699	$2,61997 \cdot 10^{-8}$
a_{99}	-0,0064	0,0012644	-5,06168	0,0000692824
a_{33}	-0,0238857	0,0012644	-18,8909	$8,96095 \cdot 10^{-14}$

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 2.16):

$$\delta = 0,84132 + 0,0002836 q - 2,56 \cdot 10^{-6} q^2 + 0,0627486 V_a - 0,0000956 q V_a - 0,00597143 V_a^2. \quad (2.49)$$

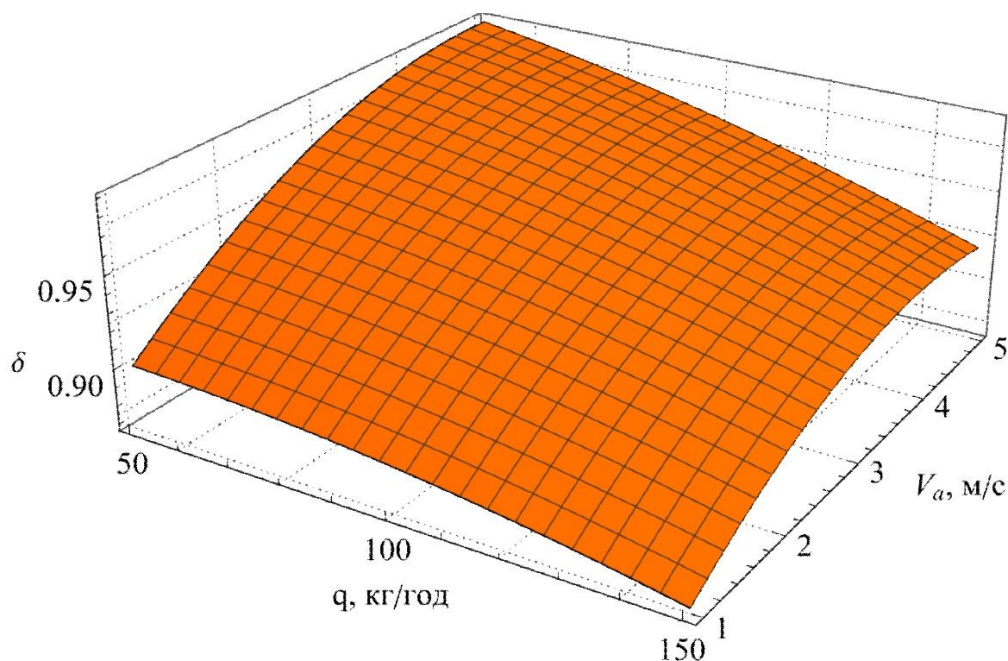


Рисунок 2.16 – Залежність коефіцієнта розподілу δ від подачі суміші q і швидкості повітряного потоку V_a

У відповідності до рис. 2.16 збільшення подачі суміші q призводить до зменшення коефіцієнта розподілу δ , а збільшення швидкості повітряного потоку V_a навпаки до його збільшення.

Для забезпечення високої якості сепарації при достатньо високій продуктивності і зменшених енерговитратах скористаємося наступною математичною умовою:

$$\begin{cases} \delta \rightarrow \max, \\ q \rightarrow \max, \\ V_a \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2.50)$$

Провівши ранжування критеріїв і провівши зведення до єдиного узагальнюючого критерію перетворимо систему (2.50) до наступного вигляду:

$$K_4 = \frac{\delta - \min(\delta)}{\max(\delta) - \min(\delta)} \frac{q - \min(q)}{\max(q) - \min(q)} \frac{\max(V_a) - V_a}{\max(V_a) - \min(V_a)} \rightarrow \max. \quad (2.51)$$

Вирішуючи (2.51) спільно з (2.49) в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Д) отримуємо раціональні значення факторів: $q = 133$ кг/год, $V_a = 2,46$ м/с. При цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

2.5 Висновки з розділу

1. Розроблено уточнений фізико-математичний апарат взаємодії компонентів відходів насінневої суміші соняшнику між собою і стінками аеродинамічного сепаратора колонного типу та їх руху під дією повітряного потоку. Фізико-математичний апарат базується на представленні компонентів відходів насінневої суміші соняшнику (ядро соняшнику, лущиння і дрібні частинки) у вигляді моделі скупчення сферичних субчастинок DEM різної кількості і діаметра. Складено систему диференціальних рівнянь руху компонентів відходів насінневої суміші з урахуванням сили опору повітряного потоку, підйомної сили Сафмана, підйомної сили Магнуса, виштовхувальної сили Архімеда, контактної сили Герца. Уточнений фізико-математичний апарат чисельного моделювання DEM-CFD використано в подальшому чисельному моделюванні в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+.

2. В результаті першого етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі отримані траєкторії руху її компонентів. Обробка результатів моделювання в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила розрахувати рівняння регресії другого порядку залежності горизонтальної відстані польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) y_{opt} від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і швидкості повітряного потоку V_a . З урахуванням умови мінімізації y_{opt} і V_a для компонентів, ефективний діаметр яких знаходить в межах 0,009–0,013 м, отримана швидкість формалізованого стрічкового конвеєра складає $V_{p-opt} = 0,073$ м/с і відстань польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y_{opt} = 0,2195$ м. Прийнято поперечний переріз пневмосепаруючого каналу – квадрат із стороною 220 мм.

3. В результаті другого етапу чисельного моделювання процесу взаємодії потоків відходів насінневої суміші і повітря в пневмосепаруючому каналі отримано їх візуалізацію для різних комбінацій факторів. З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розраховано рівняння регресії другого порядку залежності вмісту ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності процесу сепарації q і об'ємних витрат повітря (продуктивність генератора повітряного потоку) Q_a від висоти шару відходів насінневої суміші соняшнику, що подається, h_p і швидкості повітряного потоку V_a . Враховуючи умову максимізації η_{k-k} і q при мінімальному значенні Q_a отримані раціональні значення факторів досліджень: $h_p = 0,036$ м, $V_a = 3,42$ м/с. При цьому $\eta_{k-k} = 0,94$, $q = 122,9$ кг/год, $Q_a = 588$ м³/год.

4. В результаті третього етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження отримані траєкторії руху і розподіли її компонентів. З використанням програмного пакету Wolfram Cloud розраховані рівняння регресії другого порядку залежності відстань між піками розподілів лушпиння соняшнику і дрібних частинок $\Delta y'$ в камері розрідження від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R . Враховуючи умову максимізації $\Delta y'$ отримані раціональні значення факторів досліджень: для $D_p =$

0,005 м $\rightarrow V_a = 3,21$ м/с, $R = 0,055$ м; для $D_p = 0,010$ м $\rightarrow V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,056$ м; для $D_p = 0,015$ м $\rightarrow V_a = 3,49$ м/с, $R = 0,054$ м. При цьому середнє значення відстані між піками розподілів лушпиння соняшнику і дрібних частинок $\Delta y' = 0,443$ м. Підставивши середні раціональні значення факторів ($D_p = 0,01$ м, $V_a = 3,35$ м/с, $R = 0,054$ м) в створену чисельну модель Simcenter Star-CCM+ отримане раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y'_{int} = 0,43$ м.

5. В результаті четвертого етапу чисельного моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу і подальшої обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud розраховані рівняння регресії коефіцієнта розподілу δ розробленого аеродинамічного сепаратора від вмісту компонентів в насіннєвій суміші ψ_h , ψ_d , ψ_k і подачі суміші q та швидкості повітряного потоку V_a . Найменше значення коефіцієнта розподілу δ спостерігається для наступного вмісту компонентів: $\psi_d = 0,331$, $\psi_h = 0,335$, $\psi_k = 0,334$. Для забезпечення високої якості сепарації ($\delta \rightarrow \max$) при достатньо високій продуктивності ($q \rightarrow \max$) і зменшених енерговитрат ($V_a \rightarrow \min$) встановлені раціональні значення факторів досліджень: $q = 133$ кг/год, $V_a = 2,46$ м/с. При цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

Ключові наукові результати розділу були опубліковані в роботах автора [18–20].

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО ТИПУ

3.1 Планування експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження передбачали виконання мети – перевірка адекватності зроблених теоретичних висновків і емпіричне обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу для очищення відходів насінневої суміші соняшнику.

Задачі експериментальних досліджень:

- дослідити склад і фізико-механічні властивості компонентів відходів насінневої суміші соняшнику;
- встановити емпіричні закономірності роботи аеродинамічного сепаратора колонного типу;
- обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри аеродинамічного сепаратора колонного типу.

Програмою експериментальних досліджень передбачено:

- розробити методики і провести лабораторні дослідження з визначення складу і фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші соняшнику;
- виготовити експериментальний зразок аеродинамічного сепаратора колонного типу;
- розробити методику і провести експериментальні дослідження аеродинамічного сепаратора колонного типу;
- виконати статистичну оцінку результатів лабораторних і експериментальних досліджень.

Отримані результати експериментальних досліджень планується використати для розробки дослідного зразка аеродинамічного сепаратора колонного типу, а також для розробки науково-методичних рекомендацій щодо його використання у виробничих умовах.

3.2 Методики лабораторних досліджень

Визначення вологості відходів насіннєвої суміші соняшнику. Вологість відходів насіннєвої суміші соняшнику визначалась за допомогою вологоміра Kett РМ-450 (рис. 3.1, а) стандартним методом згідно з [195]. Відбір проб здійснювався відповідно до [196]. Із середньої проби виділяли три робочі проби, маса яких достатня для заповнення стакану вологоміра. Перед початком роботи здійснювали перевірку стану вологоміра і його відповідності нормативним [197] та технічним вимогам. Вологомір повірений відповідно до чинних нормативів у незалежних метрологічних організаціях [198].

Під час вимірювання відходів насіннєвої суміші соняшнику за допомогою вологоміра враховувалась його абсолютна інструментальна похибка $\Delta W_{\text{інст.}}$, абсолютна випадкова похибка вимірювання $\Delta W_{\text{вип.}}$ та похибка зчитування $\Delta W_{\text{зч.}}$ [199]. Похибка зчитування $\Delta W_{\text{зч.}}$ обчислювалась як половина поділки шкали вимірювання вологості. Абсолютна випадкова похибка $\Delta W_{\text{вип.}}$ вимірювань вологості, що проводилися у N-кратній повторності, розраховувалась наступним чином [200, 201, 202]:

$$\Delta W_{\text{вип.}} = t_{0,95}(N) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (W_i - \bar{W})^2 / (N(N-1))}, \quad (3.1)$$

де i – порядковий номер вимірювання; W_i – виміряна вологість i -ї проби, %; N – загальна кількість вимірювань; $\bar{W}$ – середнє значення вологості, %; $t_{0,95}(N)$ – коефіцієнт Стюдента для довірчої ймовірності 0,95 при N-кратній повторності.

Абсолютна похибка вимірювання вологості ΔW розраховувалась за формулою:

$$\Delta W = \sqrt{(\Delta W_{\text{інст.}} + \Delta W_{\text{зч.}})^2 + \Delta W_{\text{вип.}}^2}. \quad (3.2)$$

Фракційний склад відходів насіннєвої суміші соняшнику. Склад фракцій, вміст олійних і сміттєвих домішок у насіннєвій суміші визначався за допомогою набору лабораторних решіт з використанням лабораторного розсіву РЛУ-3 (рис. 3.1, б) стандартним методом згідно з [203]. Відбір проб проводився відповідно до [196]. Із

середньої проби виділяли 100 г насіннєвої суміші. Зважування зразків здійснювалось на лабораторних вагах ТВЕ-0,6-0,01 (рис. 3.1, в) відповідного класу точності та діапазону вимірювання. Перевірка стану лабораторних ваг та їх відповідності нормативним здійснювалось згідно [204] і технічним вимогам. Лабораторні ваги калібровані згідно з діючими нормативами в акредитованих метрологічних організаціях.

При вимірюванні маси зразків суміші та компонентів за допомогою лабораторних ваг враховували їх абсолютну інструментальну похибку $\Delta m_{\text{інст.}}$, похибку зчитування $\Delta m_{\text{зч.}}$ та випадкову абсолютну похибку вимірювання $\Delta m_{\text{вип.}}$. Формули для розрахунку похибок подібні (3.1)–(3.2) із заміною $W \rightarrow m$.

Середнє значення масової концентрації компонента насіннєвої суміші $\overline{\varepsilon}_{\alpha}$, яке пройшло крізь отвори решета α , розраховується за формулою:

$$\overline{\varepsilon}_{\alpha} = 100 \% \cdot \frac{\overline{m}_{\alpha}}{100 \text{ г}}, \quad \Delta \varepsilon_{\alpha} = 100 \% \cdot \frac{\Delta m_{\alpha}}{100 \text{ г}}, \quad (3.3)$$

де $\overline{m}$ – усереднена маса, г.

Дійсна і об'ємна щільність компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику. Об'ємну щільність компонентів суміші визначали методом заповнення циліндричного лабораторного стакану об'ємом 500 мл ($0,0005 \text{ м}^3$) на лабораторному приладі ASTM K-6721 (рис. 3.1, г). Контейнер заповнювали компонентами суміші і вирівнювали його верх без будь-якого ручного ущільнення. Для визначення маси використовували електронні ваги ТВЕ-0,6-0,01. Об'ємну щільність визначали як відношення маси до об'єму суміші:

$$\overline{\rho}_b = \frac{\overline{m}}{1000 \cdot 0,0005 \text{ м}^3}, \quad \Delta \rho_b = \frac{\Delta m}{1000 \cdot 0,0005 \text{ м}^3}. \quad (3.4)$$

Дійсну щільність визначали методом витіснення гліцерину в пікнометрі. Об'єм витісненого гліцерину V_g було знайдено шляхом занурення зваженої кількості компонентів суміші соняшнику (100 г). Формула для розрахунку:

$$\overline{\rho}_t = \frac{100 \text{ г}}{1000 \cdot \overline{V}_g}, \quad \Delta \rho_t = \frac{100 \text{ г}}{1000 \cdot \overline{V}_g^2} \Delta V_g, \quad (3.5)$$

де V_g – об'єм витісненого гліцерину, m^3 .

Кут природнього укосу і коефіцієнт тертя спокою частинок компонентів суміш між собою. Кут природнього укосу – це кут, утворений вільною поверхнею сипкого матеріалу з горизонтальною площиною у рівноважному стані. Частинки матеріалу, що знаходяться на вільній поверхні насипу, перебувають у стані граничної (критичної) рівноваги. Кут природнього укосу залежить від коефіцієнта тертя і впливає на шорсткість частинок суміші, ступінь їх зволоження, гранулометричний склад та форму, а також від питомої ваги матеріалу.

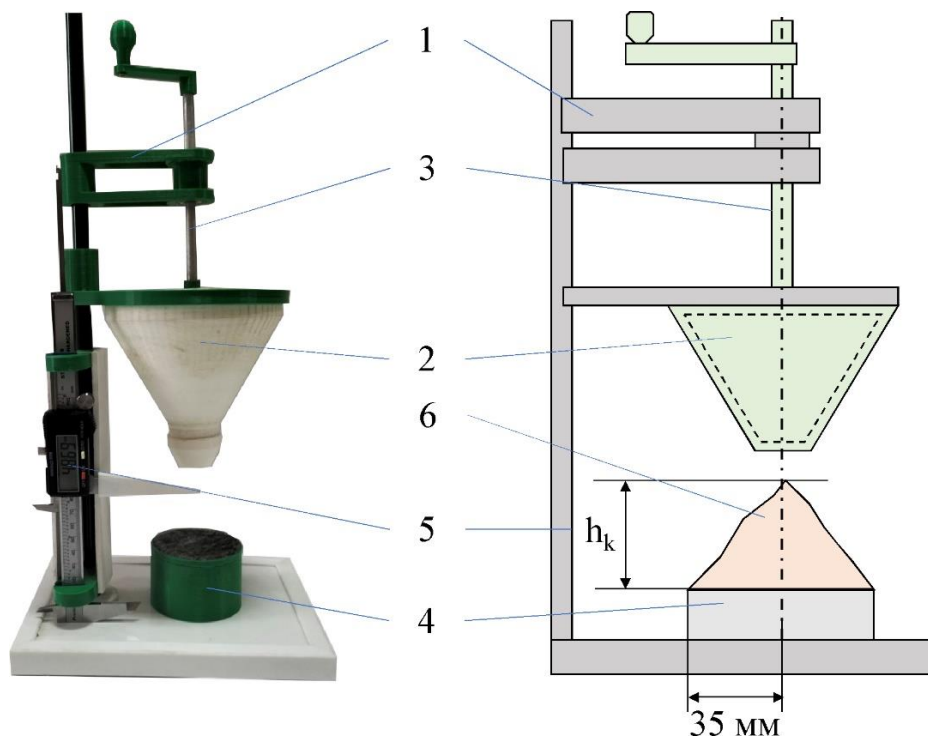


а – вологомір Kett PM-450; б – лабораторний розсів РЛУ-3; в – електронні лабораторні ваги TBE-0,6-0,01; г – прилад для визначення щільності ASTM K-6721

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд лабораторного обладнання

Кут природнього укосу визначали методом висипання насінневої суміші з лійки. Прилад, який використовувався при цьому є аналогом LFA ART 1 [205]. Його загальний вигляд наведений на рис. 3.2. Вимірювання відбувалося наступним чином: у лійку, закріплену на певній висоті, засипають зразок насінневої суміші. Компоненти суміші, висипаючись на горизонтальну поверхню циліндра радіусом 35 мм, утворюють при цьому конус. За допомогою штангенциркуля визначається висота конуса h_k (мм) і за наступною формулою розраховується кут природнього укосу φ :

$$\bar{\varphi} = \operatorname{arccctg} \frac{\bar{h}_k}{35 \text{ мм}}, \quad \Delta\varphi = \frac{1}{1 + \left(\frac{\bar{h}_k}{35 \text{ мм}} \right)^2} \frac{\Delta h_k}{35 \text{ мм}}. \quad (3.6)$$



1 – штатив; 2 – лійка; 3 – мішалка для прибирання склепінь; 4 – циліндр;
5 – штангенциркуль; 6 – сипкий матеріал

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд і схема лабораторного обладнання для визначення кута природнього укосу

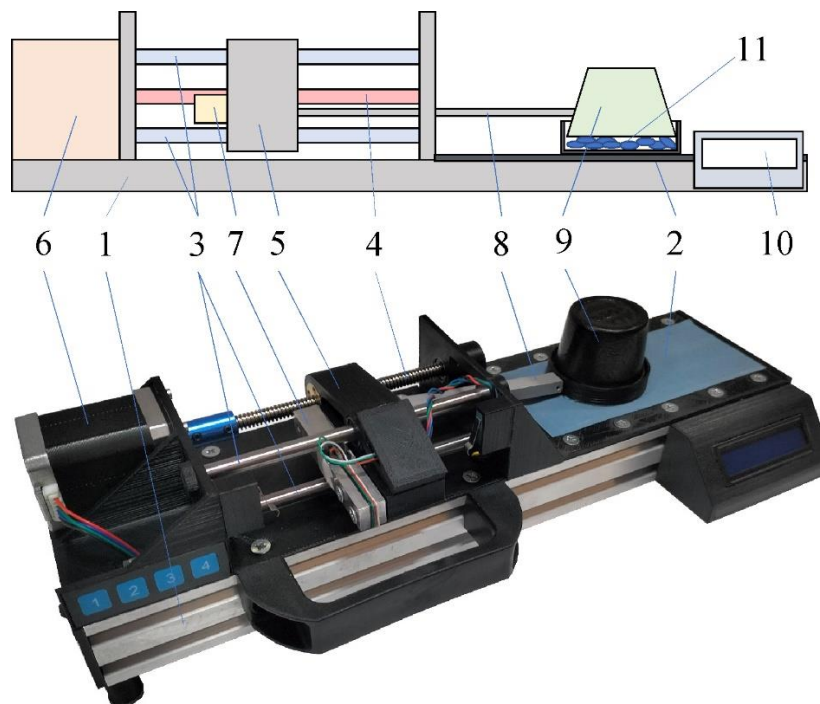
Кут природнього укосу при насипанні можна умовно прийняти рівним кута внутрішнього тертя або тангенсу коефіцієнта тертя спокою між частинками компонентів суміші μ_{p-p} :

$$\bar{\mu}_{p-p} = \frac{\bar{h}_k}{35 \text{ мм}}, \quad \Delta\mu_{p-p} = \frac{\Delta h_k}{35 \text{ мм}}. \quad (3.7)$$

Для визначення коефіцієнтів тертя спокою і ковзання компонентів суміші *о стінку* обладнання використовувався традиційний спосіб, який полягає у переміщенні навантаженого масою M компонента по поверхні. Зміна сили яка

протидії переміщенню визначається резистивним тензодатчиком і фіксується динамічно. Середнє значення сили F_m , що визначено з використанням тензодатчика поділене на масу вантажу M (500 г), помноженого на прискорення вільного падіння g ($9,81 \text{ м/с}^2$) і визначає коефіцієнт тертя насінини о поверхню μ_{p-s} .

На рисунку 3.3 представлено пристрій для визначення коефіцієнтів тертя компонентів суміші о стінку обладнання, який розроблений Алієвим Е.Б. [206].



- 1 – станина; 2 – робочий стіл; 3 – направляючі; 4 – гвинт; 5 – каретка;
 6 – кроковий двигун; 7 – тензодатчик; 8 – жорстке з'єднання; 9 – вантаж;
 10 – блок керування; 11 – компонент суміші

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд і схема пристрою для визначення коефіцієнта тертя

Пристрій працює наступним чином. На робочий стіл розміщується пластина, матеріал якої відповідає матеріалу стінки обладнання. Далі під вантаж розміщується компонента суміші в циліндрі без донця і на блоці керування натискається кнопка запуску вимірювання. Під час процесу вимірювання каретка по направляючим

рівномірно переміщується в бік під дією гвинта, який обертає кроковий двигун. В свою чергу каретка тягне направляючу, вантаж і відповідно компоненти суміші. Тензодатчик при цьому вимірює значення сили опору, а блок керування перераховує ці значення в коефіцієнти тертя спокою μ_{p-s} і ковзання μ_{p-s} .

Запропонований пристрій забезпечує високу точність індивідуального вимірювання коефіцієнтів тертя спокою та ковзання компонентів суміші, відповідаючи сучасним вимогам до вимірювальних приладів, а також характеризується низькою трудомісткістю та високою технологічністю.

Точність вимірювань (інструментальна похибка) складає 0,01. Формули для розрахунку похибок подібні (3.1)–(3.2) із заміною $W \rightarrow \mu$.

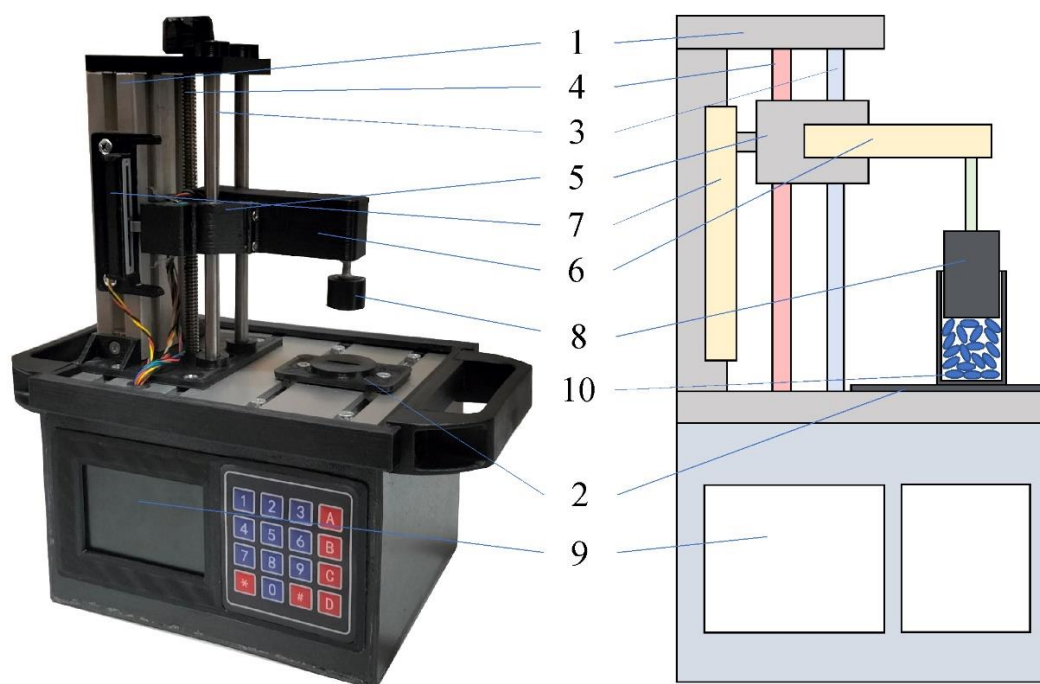
Коефіцієнт пружності визначали з використанням пенетрометра, розробленого Алієвим Е. Б., Дудіним В. Ю., Миколенко С. Ю. [207]. Загальний вигляд і схема пенетрометра наведена на рис. 3.4. Пристрій працює наступним чином: компонент суміші розміщали в циліндричну ємність в зону під індентором циліндричної форми (діаметр – 20 мм), який закріплений на тензодатчику, що переміщується у вертикальній площині. Тензодатчик із закріпленням на ньому індентором був відкалібрований і в стані спокою відповідав зусиллю 0 Н. Далі індентор рівномірно рухається вертикально вниз зі швидкістю 10 мм/с. При досягненні компонента зусилля на тензодатчику починає збільшуватися і даний момент фіксується як початок процесу вимірювання. Під час вимірювання визначається залежність тиску стискання P (Па) від відносної деформації ε_x . Далі на прямолінійній ділянці визначної залежності розраховується значення модуля пружності за формулою:

$$\overline{E_p} = \frac{\overline{P_{\max}}}{\varepsilon_{x\max}}, \quad \Delta E_p = \frac{\Delta P_{\max}}{P_{\max}} + \frac{\Delta \varepsilon_{x\max}}{\varepsilon_{x\max}}. \quad (3.8)$$

де $P_{\max}$ – максимальна напруженість на прямолінійній ділянці залежності $P(\varepsilon_x)$, Па; $\varepsilon_{x\max}$ – відносна деформація компонента при зусиллі $F_{\max}$, Н.

Інструментальна похибка вимірювань складає для $F = 50$ Па, $x = 0,0001$ м. Формули для розрахунку похибок подібні (3.1)–(3.2) із заміною $W \rightarrow P$, $W \rightarrow \varepsilon_x$.

Визначення швидкості витання. Як відомо з [68, 117] геометричні параметри та фізико-механічні властивості впливають на аеродинаміку компонентів насінневої суміші в повітряному потоці. Коли повітря проходить через шари насінневої суміші соняшнику під час технологічної обробки (очищення, теплове сушіння, активне вентилування тощо), його поведінка залежить від швидкості повітряного потоку.

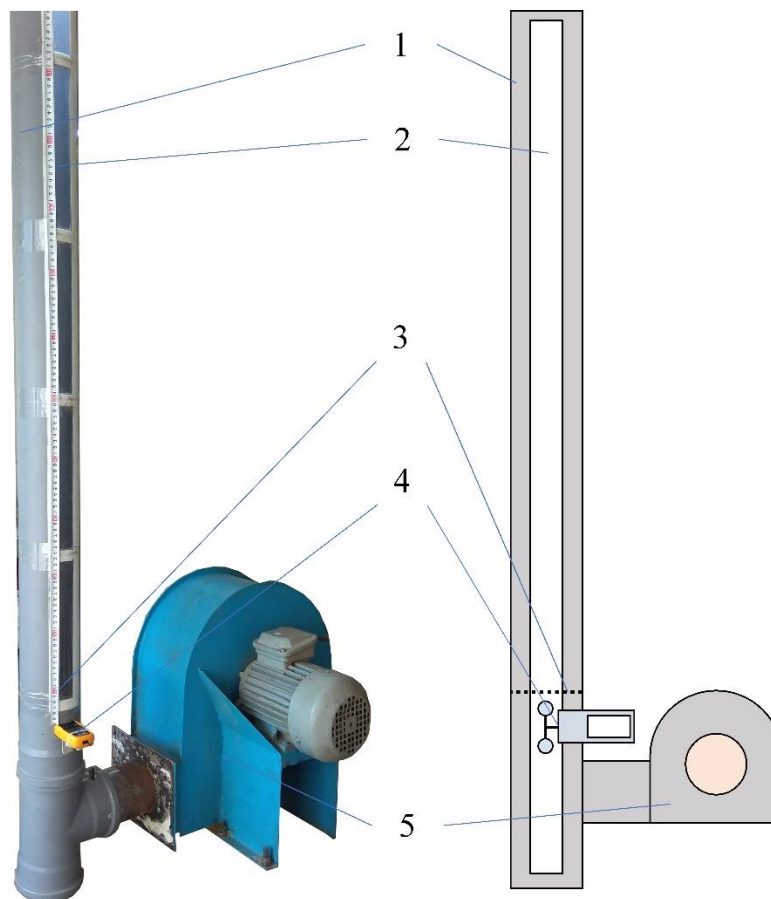


- 1 – станина; 2 – робочий стіл; 3 – направляючі; 4 – гвинт; 5 – каретка;
 6 – тензодатчик; 7 – лінійний потенціометр; 8 – індентор; 9 – блок керування;
 10 – компонент суміші

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд і схема пристрою для визначення коефіцієнта пружності

При низьких швидкостях компоненти суміші зберігають властивості шару, через який повітря проходить через його пори. Зі збільшенням швидкості повітря компоненти суміші починають рухатися один відносно одного, що призводить до зменшення їх концентрації в шарі та збільшення його об'єму. Це спричиняє псевдозрідження, а згодом і псевдокипіння, коли опір повітряного потоку майже дорівнює вазі компонентів суміші. Швидкість повітряного потоку, при якій

компоненти суміші перебувають у підвішеному стані, називається швидкістю витання V_v для цього матеріалу. Швидкість витання компонентів відходів насінневої суміші соняшнику була виміряна на випробувальному стенді (рис. 3.5).



1 – труба; 2 – оглядове вікно; 3 – сітка; 4 – анемометр GM816; 5 – генератор повітряного потоку (відцентровий вентилятор)

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд і схема пристрою для визначення швидкості витання компонентів суміші

Стенд представляє собою вертикальну трубу діаметром 110 мм із оглядовим вікном і підсвіткою, нижній отвір якої приєднано до генератора повітряного потоку (відцентрового вентилятора). Процес визначення швидкості витання відбувався наступним чином. Компоненти насінневої суміші розміщували на сітці рівномірним шаром товщиною 5–7 мм. Далі запускали генератор повітряного потоку, поступово збільшуючи швидкість обертання валу його електродвигуна з використанням ЛАТР-

2,5. Швидкість повітряного потоку контролювали анемометром GM816, а висоту підйому компонентів насіннєвої суміші – лінійкою. Коли приблизно 95 % компонентів насіннєвої суміші піднімалися в трубі на висоту 1 м, фіксували показники анемометра і записували як швидкість витання. Точність вимірювань (інструментальна похибка) складає 0,1 м/с. Формули для розрахунку похибок подібні (3.1)–(3.2) із заміною $W \rightarrow V_v$.

Кількість вимірювань для забезпечення адекватного рівня достовірності складала – 50.

3.3 Методика експериментальних досліджень

Враховуючи попередні теоретичні дослідження і обґрунтовані конструктивно-технологічні параметри аеродинамічного сепаратора колонного типу створено його експериментальний зразок, кресленик і загальний вигляд якого наведений на рис. 3.6–3.7. Машина призначена для очищення, сортування або калібрування відходів насіннєвої суміші соняшнику для подальшого їх застосування у олієпереробній промисловості. Машина може також встановлюватися в технологічні лінії первинної та вторинної обробки насіння, на елеватори, а також у складські приміщення у складі спеціальних ліній у всіх сільськогосподарських зонах для контролю та налаштування основного зерноочисного обладнання.

Виготовлений аеродинамічний сепаратор колонного типу працює наступним чином. Сировина подається в бункер вібраційного живильника, після чого через жолоб надходить у сортувальний канал. Потрапляючи в зону повітряного потоку, який створює вентилятор, сировина розділяється за показником подільності насіннєвої суміші «швидкість витання». Після цього частинки сировини та пил, що мають нижчу швидкість витання, піднімаються вгору по каналу, де додатково розділяються на два потоки. У верхній патрубок виходить аспіраційний пил і основний потік повітря, а в нижній патрубок – усі легкі частинки вхідної сировини. Вся олійна домішка осідає в патрубку відводу. У патрубку передбачене вікно для відбору проб, через яке здійснюється взяття зразків для контролю процесу сепарації.

За необхідності виконується налаштування режимів процесу сепарації на пульті блока керування.

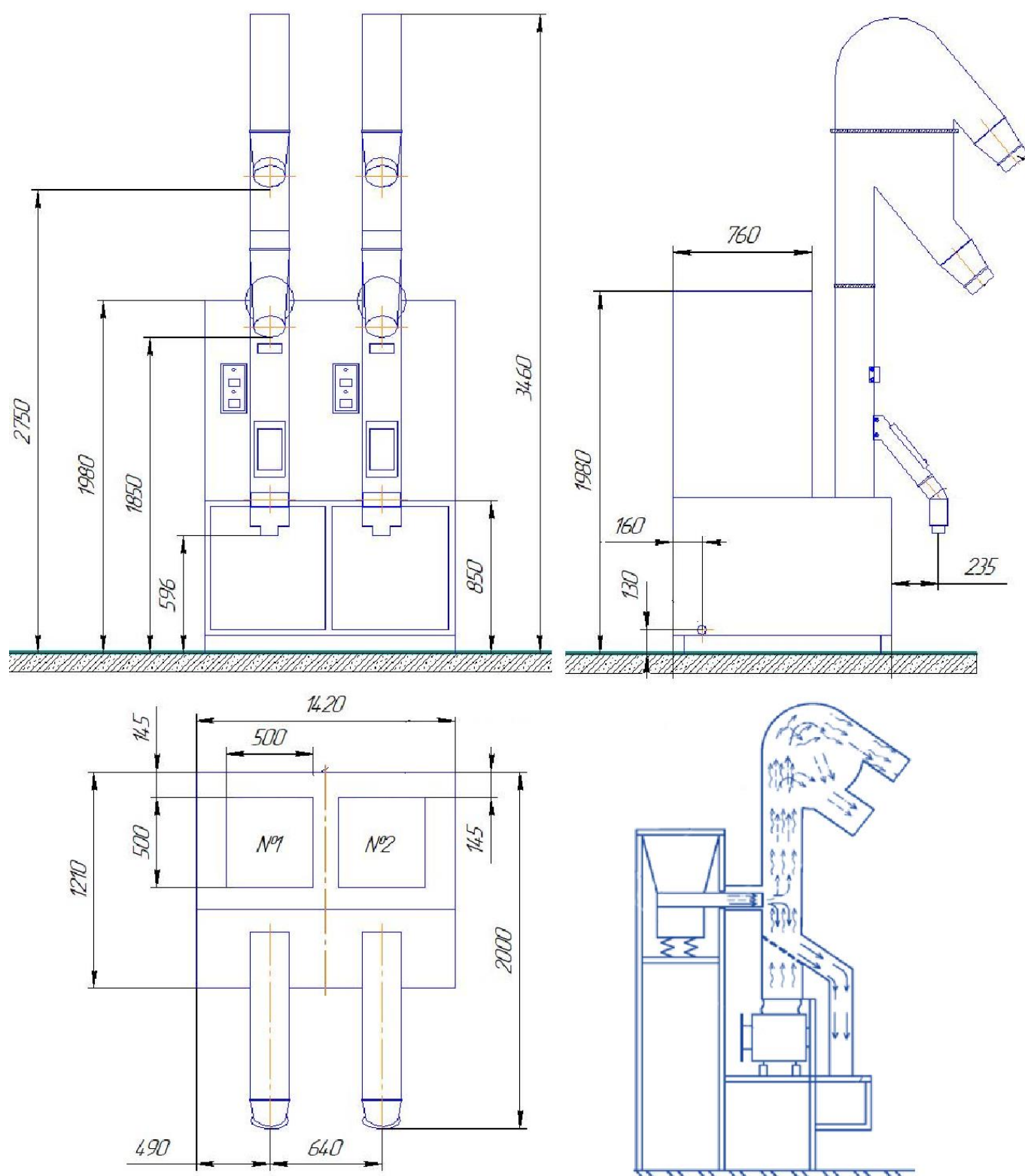


Рисунок 3.6 – Кресленик аеродинамічного сепаратора колонного типу

Технічна характеристика виготовленого аеродинамічного сепаратора колонного типу наведена в табл. 3.1. На створеному експериментальному зразку аеродинамічного сепаратора з використанням блока керування можна змінювати наступні параметри: швидкість подачі матеріалу і швидкість повітряного потоку. Електрична схема і загальний вигляд блока керування наведені на рис. 3.8–3.9.



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд експериментального зразка аеродинамічного сепаратора колонного типу

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика аеродинамічного сепаратора колонного типу

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Кількість робочих каналів	шт	1 / 2
Габаритні розміри, не менше		
– довжина	мм	710 / 1420
– ширина		2000
– висота		3460
Маса комплекту постачання, не більше	кг	120 / 240
Напруга живлення, частота струму	В, Гц	220, 50
Споживана потужність, не більше	кВт	0,7 / 1,4
Продуктивність (номінальна)	кг/год	100 / 200
Витрата повітря на сепарацію	м³/год	200–900
Наявність транспортерів	немає	
Загальний об'єм завантажуваної сировини	м³	0,02 / 0,04
Вологість сировини, не більше	%	9

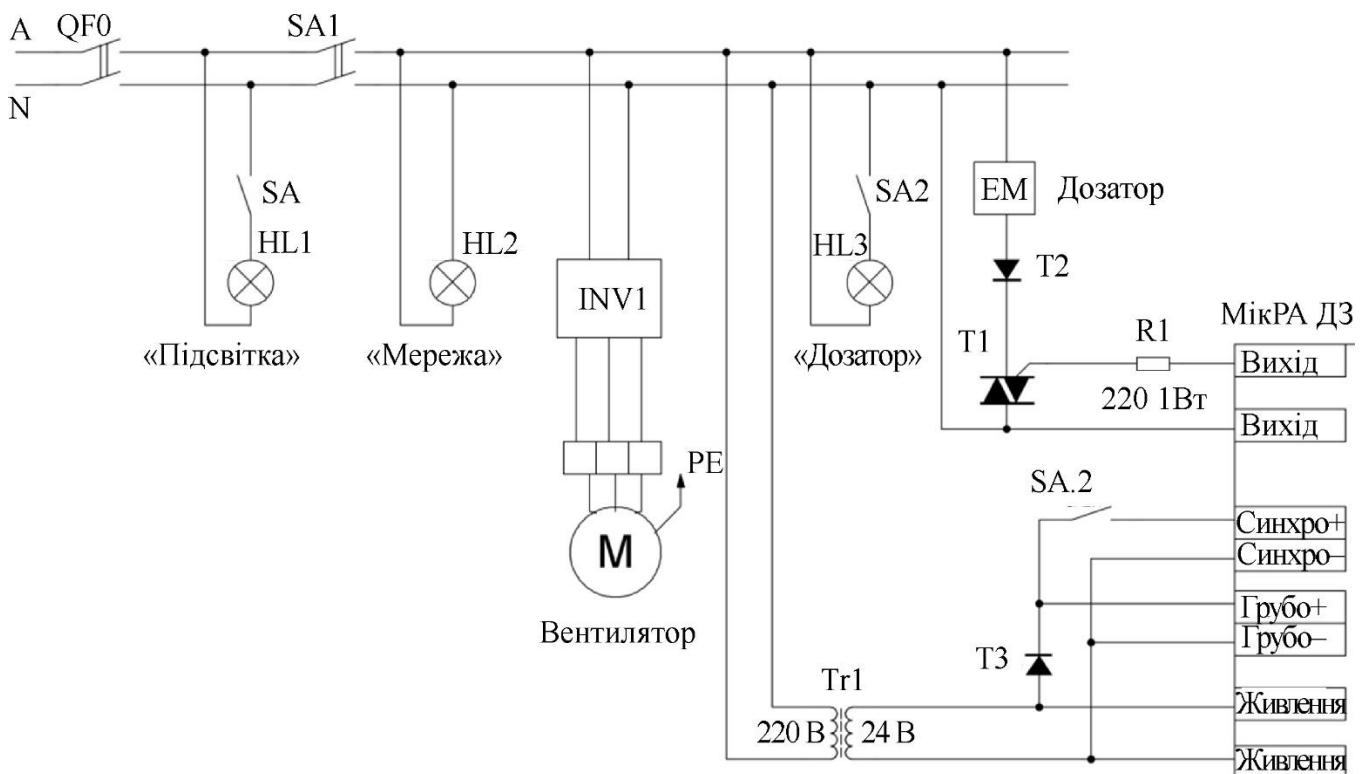


Рисунок 3.8 – Електрична схема аеродинамічного сепаратора колонного типу

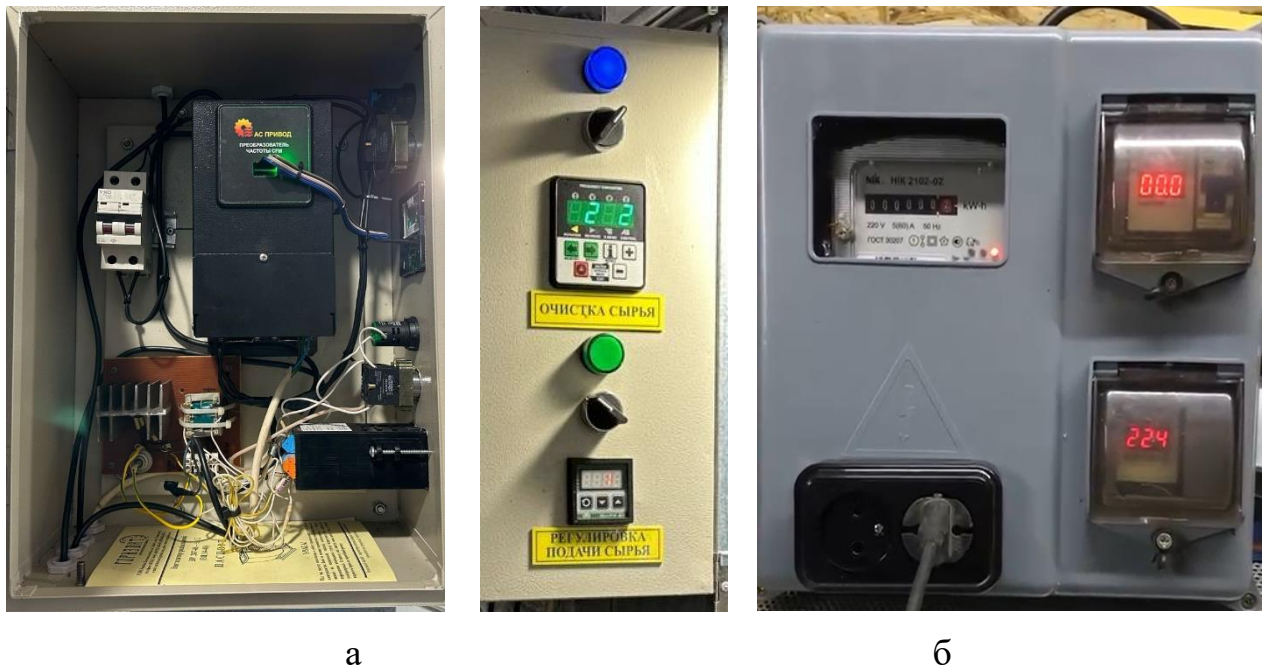


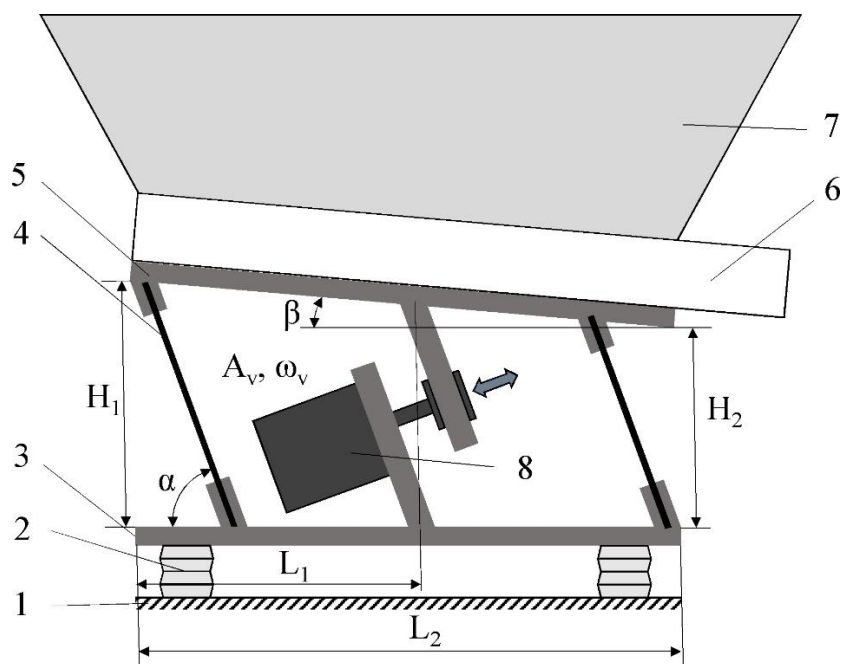
Рисунок 3.9 – Загальний вигляд блока керування аеродинамічного сепаратора колонного типу (а) і лічильник для реєстрації споживаної потужності (б)

Експериментальні дослідження проведені в декілька етапів. Процес експериментальних досліджень наведено в додатку Е.

На першому етапі досліджено комбінований віброживильник (рис. 3.10) для створення текучого середовища відходів насіннєвої суміші соняшнику. Віброживильник у верхній частині з'єднується за допомогою еластичної прокладки з живильником у лючку. Електромагнітний віброзбуджувач є джерелом коливань для віброживильника. Продукт, що подається на сепарацію, переміщується по віброживильнику в напрямку сепараційного каналу, де його підхоплює повітряний потік. Для очищення віброживильника та сепараційного каналу віброживильник може бути від'єднаний від живильника. З цією метою на передній стороні сепаратора передбачений оглядовий люк із засувками, що дозволяє за потреби легко виконати очистку.

Електромагнітний віброзбуджувач (рис. 3.10, а) являє собою електромагніт із регульованою амплітудою коливань, яка налаштовується перед запуском

сепаратора. Він також оснащений термореле, яке захищає його від перегріву, запобігає загорянню та автоматично відключає у разі перевантаження.



а



б

а – схема; б – загальний вигляд; 1 – основа; 2 – пружини; 3 – нижня рама;
4 – пружинний елемент (пластина); 5 – верхня рама; 6 – лоток; 7 – бункер;
8 – електромагнітний вібробуджувач

Рисунок 3.10 – Віброживильник аеродинамічного сепаратора колонного типу

Так як дослідження конструктивних параметрів віброживильника не є задачею досліджень, то вони розраховані у відповідності до запропонованих відомих методик [208, 209, 210] і складають: $H_1 = 185$ мм; $H_2 = 150$ мм; $L_1 = 200$ мм; $L_2 = 300$ мм; $\alpha = 78^\circ$; $\beta = 15^\circ$.

Керування роботою віброживильника здійснювалось з використанням мікропроцесорного контролера МікРА ДЗ за електричною схемою 3.8.

Факторами досліджень першого етапу є частота ω_v і амплітуда A_v вібрації віброживильника. Частоту вібрації віброживильника змінювали за допомогою мікропроцесорного контролера МікРА ДЗ, а амплітуду шляхом зміни робочої довжини якоря електромагнітного вібробуджувача. Рівні варіювання факторів досліджень наведені в табл. 3.2.

В якості критерію досліджень є продуктивність віброживильника q і висота шару відходів насінневої суміші соняшнику на виході h_p . При чому висота шару h_p згідно теоретичних досліджень (розділ 2) не повинна перевищувати 0,036 м.

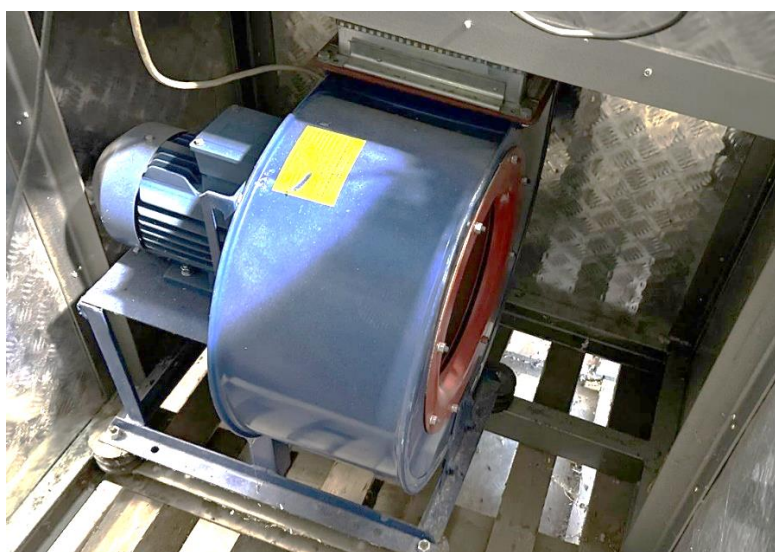
Дослідження проведені за повнофакторним планом для двох факторів на трьох рівнях варіювання з загальною кількістю дослідів – 9. Повторність – триразова.

Таблиця 3.2 – Рівні варіювання факторами експериментальних досліджень віброживильника

Рівень варіювання	Частота вібрації віброживильника ω_v	Амплітуда вібрації віброживильника A_v
Нижній (–1)	20	0,001
Нульовий (0)	60	0,002
Верхній (+1)	100	0,003
Інтервал (Δ)	40	0,001

На другому етапі досліджено вплив аеродинамічного стабілізатора в колоні на однорідність потоку повітря. Аеродинамічний стабілізатор виконує функції забезпечення рівномірного розподілу повітря і створення псевдорозрідженого шару відходів насінневої суміші соняшнику. Загальний вигляд аеродинамічного стабілізатора і відцентрового вентилятора наведена на рис. 3.11. Аеродинамічний

стабілізатор представляє собою решітку із діаметром отворів 3 мм, який встановлюється в безпосередній близькості від джерела повітряного потоку під кутом, у напрямку патрубку для виходу насіннєвого матеріалу та на деякій відстані від центра патрубка для подачі засміченого насіннєвого матеріалу. Над аеродинамічним стабілізатором, створюється буферна зона («повітряна подушка»), в якій зберігається рівномірна швидкість повітряного потоку по перетину пневмосепараційного каналу, що і є вирішальним моментом для подальшої якісної аеродинамічної сепарації у верхній частині пневмосепараційного каналу.



а



б

Рисунок 3.11 – Загальний вигляд відцентрового вентилятора (а) і аеродинамічного стабілізатора (б)

Після того, як потік повітря проходить через аеродинамічний стабілізатор, він рухається вгору через порожнечі між складниками (різноманітне сміття та власне насіннєвий матеріал) засміченої насіннєвої суміші. При низьких швидкостях повітря сили аеродинамічного лобового опору, що діють на складники насіннєвого матеріалу, є незначними, тому шар матеріалу залишається у зв'язаному стані. Зі збільшенням швидкості повітря ці сили зростають і починають протидіяти гравітаційним силам, змушуючи шар насіннєвого матеріалу збільшувати свій об'єм. Це відбувається тому, що тверді компоненти прагнуть відокремлюватися один від

одного. Подальше збільшення швидкості потоку призводить до того, що об'єм досягає критичного значення, при якому сили аеродинамічного лобового опору, що піднімають матеріал, зрівнюються з силами тяжіння, що діють на нього, внаслідок чого насіннєвий матеріал «підвішується» в потоці повітря.

В якості критерію досліджень є рівномірність швидкості повітряного потоку (коефіцієнт варіації δ_v) для двох варіантів наявності стабілізатора і п'яти значень продуктивності вентилятора (100, 250 400, 550, 700 м³/год). Швидкість повітряного потоку V_a визначалася з використанням анемометра Benetech GM8903 в 25 точках перерізу повітряного каналу (0,22 м × 0,22 м) на відстані 0,5 м від вентилятора (рис. 3.12). Дослідження проведені у п'ятиразовій повторності.

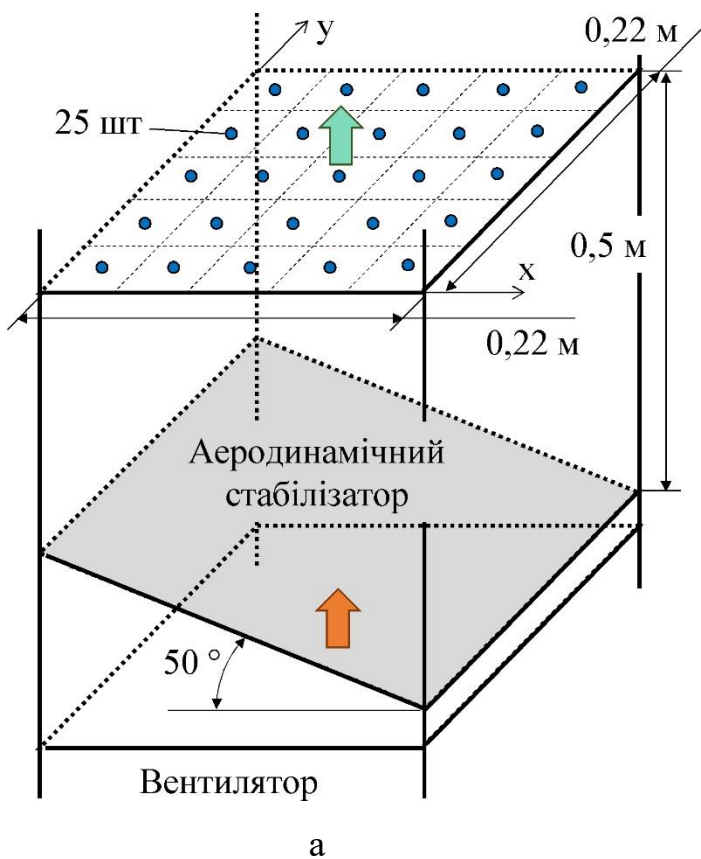


Рисунок 3.12 – Схема (а) і загальний вигляд (б) вимірювання швидкості потоку повітря

На третьому етапі досліджено процес роботи аеродинамічного сепаратора колонного типу в цілому.

В якості факторів досліджень обрано: подачу відходів насінневої суміші соняшнику q , швидкість повітряного потоку V_a , вміст ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k . Рівні варіювання факторів досліджень наведені в табл. 3.3.

Подачу відходів насінневої суміші соняшнику змінювали за допомогою зміни параметрів віброживильника.

Швидкість повітряного потоку змінювали за допомогою частотного перетворювача електродвигуна відцентрового вентилятора (рис. 3.9, а).

Вміст компонентів в насінневій суміші змінювали шляхом додавання і перемішування компоненти якої не вистачало.

Таблиця 3.3 – Рівні варіювання факторами експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора колонного типу

Рівень варіювання	Подача відходів насінневої суміші соняшнику q , кг/год	Швидкість повітряного потоку V_a , м/с	Вміст ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k
Нижній (–1)	50	1	0,2
Нульовий (0)	100	3	0,6
Верхній (+1)	150	5	0,8
Інтервал (Δ)	50	2	0,2

В якості критеріїв досліджень обрано коефіцієнт розподілу δ , вміст ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , споживану потужність P .

Вміст ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} визначався шляхом ручного розділення відібраних проб та їх зважування. Коефіцієнт розподілу δ визначали у відповідності до розділу 2. Споживану потужність P визначали з використанням електричного лічильника за встановлений проміжок часу (рис. 3.9, б).

Дослідження були проведені за планом Бокса-Бенкіна для трьох факторів на трьох рівнях варіації, з загальною кількістю експериментів – 15. Повторність – триразова.

3.4 Методика статистичного аналізу результатів експериментальних досліджень

Обробка експериментальних даних здійснювалась за допомогою стандартних методик [200], використовуючи статистичні методи аналізу експериментальних даних та методи багатофакторного планування експериментів. Багатофакторне планування виконане за допомогою симплекс-планування та методу центрально-композиційного планування [201]. Симплекс-планування являє собою формалізовану покрокову процедуру, де значення факторів на наступному кроці визначаються на основі результатів попереднього кроку.

Для переходу від кодованого значення фактору до натуральних проводиться за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.9)$$

де x_i – кодоване значення фактору; X_i – натуральне значення фактору; X_{i0} – натуральне значення фактору на нульовому рівні; ΔX_i – інтервал варіювання фактору.

Результати досліджень, здійснених за методом математичного факторного планування експериментів, оброблялись за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud. Математична модель розроблялася на основі одного критерію оптимізації. Коефіцієнти регресії для математичних моделей обчислювались за допомогою формул D-оптимальних планів експериментів [211]. За отриманими коефіцієнтами для кожного критерію були побудовані рівняння регресії другого порядку у кодованій формі:

$$y = a_0 + \sum_{k=1}^k a_i x_i + \sum_{k=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{k=1}^k a_{ii} x_i^2, \quad (3.10)$$

де a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} – коефіцієнти регресії.

Для перевірки відтворюваності експериментів (3 повторення) застосовувався критерій Кохрена, який визначався як відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій. Обчислене значення дисперсії порівнюється з табличним значенням,

і дисперсії вважаються однорідними, якщо $\sigma_p \leq \sigma_{\text{табл}}$. У випадку, коли $\sigma_p > \sigma_{\text{табл}}$, слід збільшити точність вимірювань або зменшити інтервали варіації факторів та збільшити кількість повторень експериментів [212].

При оцінці похибки результатів експериментів враховувалося, що відхилення від середнього арифметичного значення не повинно перевищувати межу похибки $\pm 3\sigma$ (де σ — середньоквадратичне відхилення). Тому будь-які відхилення, що перевищують $\pm 3\sigma$, були виключені з аналізу. Для визначення довірчих меж випадкової похибки вимірювань застосовувався критерій Стюдента [213].

Для перевірки гіпотези щодо адекватності моделі другого порядку був проведений статистичний аналіз рівняння регресії. Адекватність моделі перевірялась за допомогою критерію Фішера [214]. Після створення математичної моделі були визначені оптимальні параметри (координати оптимуму поверхні відгуку), а також досліджено поведінку цієї поверхні в околі оптимуму. Пошук оптимуму здійснювався за допомогою методу канонічного перетворення математичної моделі.

В результаті перетворення рівняння регресії були визначені форма поверхні відгуку та оптимальні значення факторів у розкодованому вигляді. Далі аналізували поверхню відгуку за допомогою двовимірних перетинів, побудованих за допомогою програми Wolfram Cloud.

Пошук оптимуму відбувався компромісним методом після побудови математичних моделей процесів на основі оцінювальних показників та визначення оптимальних параметрів. Спочатку визначались найбільш значущі фактори для кожної моделі та їх оптимальні параметри, а потім з загального списку виокремлювались спільні фактори, після чого аналізувався діапазон їх оптимальних параметрів.

3.5 Висновки з розділу

1. Розроблена програма експериментальних досліджень була спрямована на вивчення складу і фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої

суміші соняшнику та на перевірку співвідношення теоретичних досліджень з емпіричними даними.

2. Створено експериментальний зразок аеродинамічного сепаратора колонного типу, який дозволяє змінювати його конструктивно-технологічні параметри в широкому діапазоні варіюванні.

3. Обґрунтовано методи та обладнання для дослідження фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші соняшнику і визначення раціональних параметрів процесу аеродинамічної сепарації.

Ключові наукові результати розділу були опубліковані в роботах автора [21–23].

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЕПАРАТОРА КОЛОННОГО ТИПУ

4.1 Результати лабораторних досліджень

Лабораторні дослідження передбачали визначення окремих фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші соняшнику, які необхідні для проведення чисельного моделювання. На початковому етапі проведено розділення суміші на три групи (рис. 4.1): ядро соняшника, лушпиння, дрібні частинки.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд компонентів відходів насінневої суміші соняшника

Процес досліджень фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші соняшнику наведено на рис. 4.2 та включає визначення їх дійсної і об'ємної щільності, кута природнього укусу, коефіцієнтів тертя спокою і ковзання, коефіцієнта пружності і швидкості витання. Дослідження проводилися за допомогою спеціального лабораторного обладнання, що забезпечує високу точність вимірювань, згідно методик, які наведені в розділі 3.2. Отримані результати дозволяють при чисельному моделюванні оцінити поведінку компонентів під час

транспортування під дією повітряного потоку, що є важливим для вдосконалення технологічних процесів очищення та сортування насіннєвої суміші.



Рисунок 4.2 – Процес досліджень фізико-механічних властивостей компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику на лабораторному обладнанні

В результаті лабораторних досліджень отримані варіаційні розподіли дійсної і об'ємної щільності компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику, які представлені на рис. 4.3–4.4.

Узагальнені дані наведені в таблиці 4.1, а статистична обробка даних в додатку Ж. Перевірка відповідності отриманих розподілів нормальному здійснювалось за коефіцієнтом кореляції R і критерієм Пірсона χ^2 . Якщо розрахункове значення χ^2 менше за табличне χ^2 , то розподіл набору даних дійсно підпорядковується нормальному розподілу.

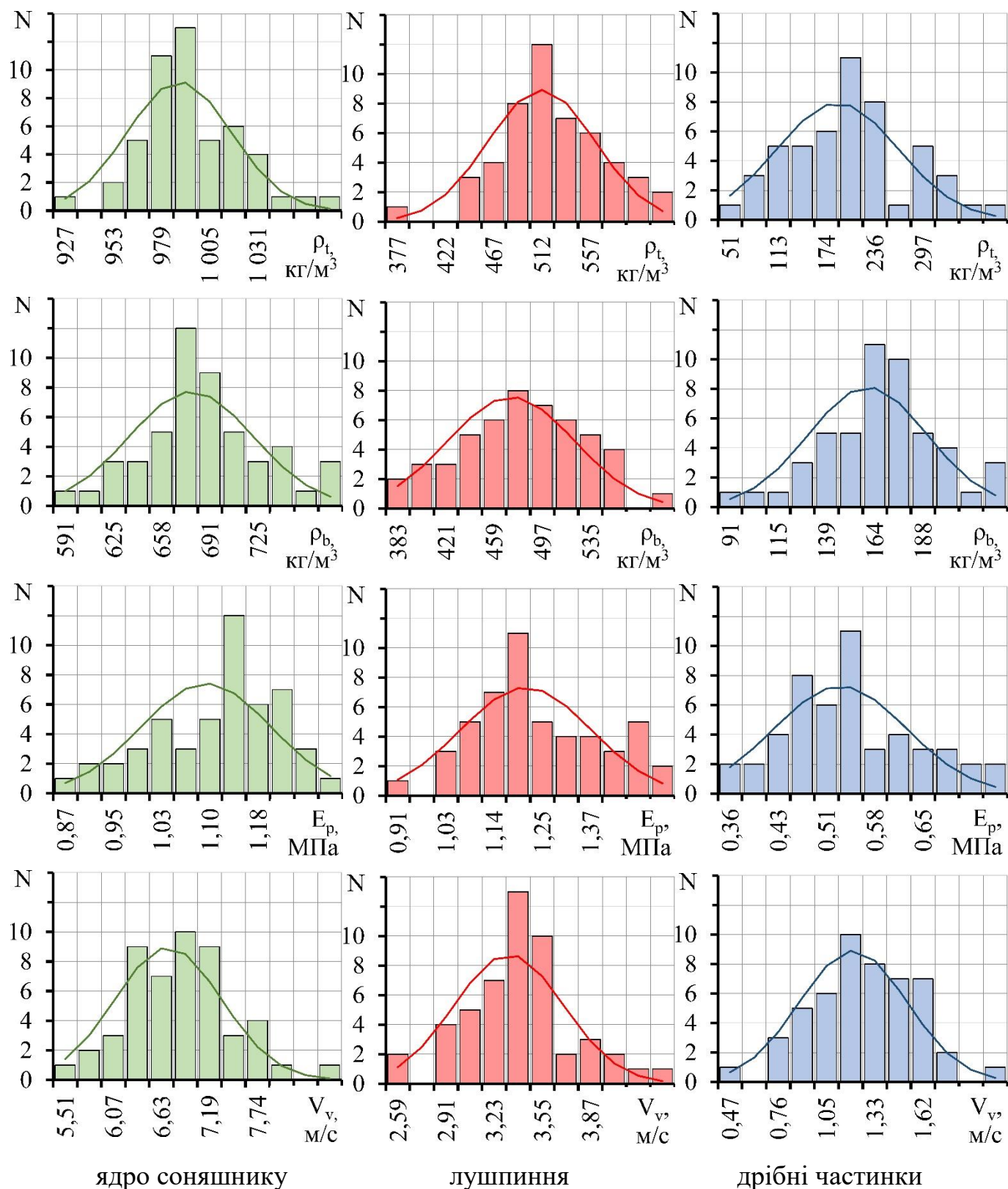


Рисунок 4.3 – Розподіл фізико-механічних властивостей (дійсна щільність ρ_t , об’ємна щільність ρ_b , модуль пружності E_b , швидкість витання V_v) компонентів відходів насінневої суміші соняшнику

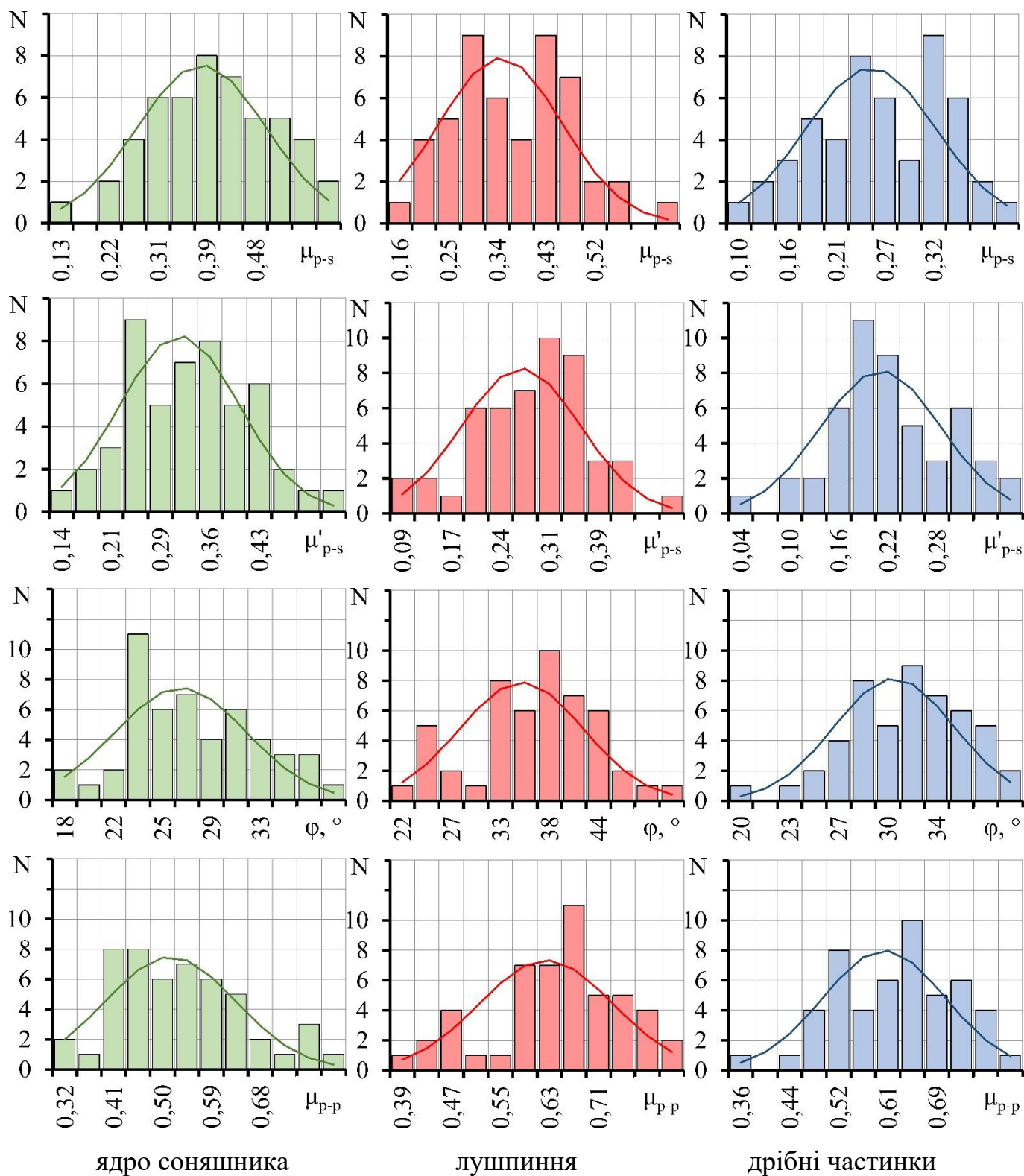


Рисунок 4.4 – Розподіл фізико-механічних властивостей (кут природнього укусу φ , коефіцієнт тертя спокою частинок між собою μ_{p-s} , коефіцієнт тертя спокою μ_{p-s} і ковзання μ'_{p-s} частинок о стінку обладнання) компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику

Таблиця 4.1 – Фізико-механічні властивості компонентів відходів насінневої суміші соняшнику

Характеристика	Ядро соняшнику	Лушпиння	Дрібні частинки
Дійсна щільність ρ_t , кг/м ³	988,8 ± 23,8	511,6 ± 42,2	188,3 ± 64,9
Об'ємна щільність ρ_b , кг/м ³	678,3 ± 36,1	472,1 ± 41,9	160,3 ± 25,2
Модуль пружності E_p , МПа	1,1 ± 0,09	1,22 ± 0,13	0,53 ± 0,09
Швидкість витання V_v , м/с	6,71 ± 0,52	3,33 ± 0,31	1,2 ± 0,27
Кут природного укусу, °	26,9 ± 4,4	35,3 ± 5,9	30,8 ± 3,7
Коефіцієнт тертя спокою частинок між собою μ_{p-p}	0,513 ± 0,099	0,627 ± 0,092	0,6 ± 0,086
Коефіцієнт тертя спокою частинок о стінку μ_{p-s}	0,383 ± 0,096	0,32 ± 0,12	0,25 ± 0,04
Коефіцієнт тертя ковзання частинок о стінку μ'_{p-s}	0,315 ± 0,075	0,272 ± 0,076	0,208 ± 0,06

Таблиця 4.1 містить дані щодо основних фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші соняшнику, а саме ядра соняшнику, лушпиння та дрібних частинок. Досліджувані характеристики включають дійсну та об'ємну щільність, модуль пружності, швидкість витання, кут природного укусу, а також коефіцієнти тертя.

Дійсна щільність (ρ_t) є показником маси матеріалу в одиниці його об'єму без урахування порожнеч. Вона має найбільше значення для ядра соняшнику (988,8 ± 23,8 кг/м³), що пояснюється високим вмістом маслянистих речовин. Лушпиння характеризується значно меншою дійсною щільністю (511,6 ± 42,2 кг/м³), а дрібні частинки мають найнижчий показник (188,3 ± 64,9 кг/м³). Це пов'язано з шпаруватістю та неоднорідністю структури цих компонентів.

Об'ємна щільність (ρ_b) враховує не лише масу матеріалу, а й наявність пустот між частинками. Вона також є найбільшою для ядра соняшнику (678,3 ± 36,1 кг/м³), тоді як для лушпиння і дрібних частинок вона суттєво нижча – 472,1 ± 41,9 кг/м³ та 160,3 ± 25,2 кг/м³ відповідно.

Модуль пружності (E_p) характеризує опір матеріалу до деформацій під впливом навантаження. Ядро соняшнику має значення 1,1 ± 0,09 МПа, що свідчить про його відносну твердість. Лушпиння має трохи вищий модуль пружності (1,22 ±

0,13 МПа), що може пояснюватися структурною особливістю оболонки. Найменшу пружність мають дрібні частинки ($0,53 \pm 0,09$ МПа), що пов'язано з їх розміром та меншим рівнем структурної міцності.

Швидкість витання (V_v) визначає здатність частинок утримуватись у повітрі під дією потоків газу. Найбільше значення має ядро соняшнику ($6,71 \pm 0,52$ м/с), що підтверджує його відносно велику масу та аеродинамічні характеристики. Лушпиння піднімається при швидкості $3,33 \pm 0,31$ м/с, а дрібні частинки – всього $1,2 \pm 0,27$ м/с. Це вказує на значну різницю у їхній поведінці при повітряному сепаруванні.

Кут природного укусу (ϕ) відображає здатність частинок формувати стійку насипну поверхню. Найменший кут спостерігається у ядра соняшнику ($26,9 \pm 4,4^\circ$), що пояснюється його відносно великою масою та сферичною формою. Лушпиння має найбільший кут ($35,3 \pm 5,9^\circ$), що обумовлено його легкою та плоскою формою, яка сприяє гіршій ущільненості насипу. Для дрібних частинок цей показник становить $30,8 \pm 3,7^\circ$.

Коефіцієнти тертя оцінюють силу взаємодії частинок між собою та із поверхнями інших матеріалів. Коефіцієнт тертя спокою частинок між собою (μ_{p-p}) є найбільшим для лушпиння ($0,627 \pm 0,092$), що свідчить про високу схильність до злипання. Для дрібних частинок він становить $0,6 \pm 0,086$, а для ядра соняшнику – $0,513 \pm 0,099$. Це означає, що ядро має найкращу сипкість серед усіх компонентів.

Коефіцієнт тертя спокою частинок о стінку (μ_{p-s}) є найбільшим для ядра соняшнику ($0,383 \pm 0,096$), що пояснюється його твердістю та щільністю. Для лушпиння цей показник дещо нижчий ($0,32 \pm 0,12$), а найнижче значення спостерігається у дрібних частинок ($0,25 \pm 0,04$), що вказує на їхню легкість переміщення.

Коефіцієнт тертя ковзання частинок о стінку (μ'_{p-s}) також є найбільшим у ядра соняшнику ($0,315 \pm 0,075$), що підтверджує його стабільність при контакті з поверхнями. Для лушпиння коефіцієнт тертя ковзання має значення $0,272 \pm 0,076$, а для дрібних частинок – $0,208 \pm 0,06$, що свідчить про їх більшу схильність до переміщення.

Отримані результати демонструють значні відмінності між фізико-механічними характеристиками компонентів відходів насінневої суміші соняшнику. Ядро соняшнику має найбільшу щільність і стабільність, тоді як лущиння характеризується високим коефіцієнтом тертя та великим кутом природного укусу. Дрібні частинки мають найменшу щільність і є найбільш легкими для транспортування та розподілу у повітряному потоці. Ці особливості можуть бути використані для ефективного розділення відходів у технологічних процесах.

4.2 Результати експериментальних досліджень допоміжних елементів сепаратора колонного типу

Дослідження першого і другого етапів були націлені на визначення основних режимів роботи допоміжних елементів сепаратора колонного типу, а саме віброживильника і аеродинамічного стабілізатора.

Результати першого етапу експериментальних досліджень наведені в додатку 3. Використовуючи програмний пакет Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді залежності продуктивності віброживильника від факторів досліджень:

$$q = 128,333 + 66,8667 x_{10} - 3,4 x_{10}^2 + 49,7167 x_{11} + 33,475 x_{10} x_{11} - 0,15 x_{11}^2, \quad (4.1)$$

де q – продуктивність віброживильника, кг/год; x_{10} , x_{11} – закодоване значення частоти ω_v і амплітуди A_v вібрації віброживильника.

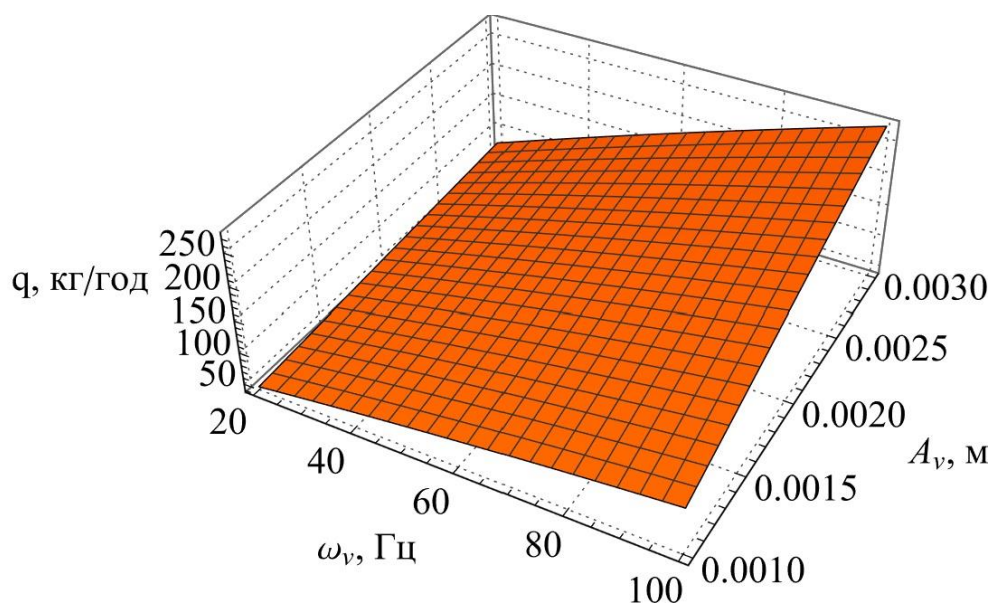
Розраховані статистичні показники наведені в табл. 4.1. Сірим кольором виділені коефіцієнти регресії із розрахованим коефіцієнтом Стюдента, який менший за табличне значення $t_{0,05}(9) = 2,26$. Цими коефіцієнтами регресії в подальшому будемо знехтувати, як статистично незначущими. Розрахований критерій Фішера складає $F = 26822$, що більше за табличне значення $F_t(6; 3; 0,05) = 8,94$. Це означає, що можна відкинути нульову гіпотезу і модель значущо впливає на залежний критерій.

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 4.5):

$$q = 21,375 - 495,833 A_v + 0,252917 \omega_v + 836,875 A_v \omega_v - 0,002125 \omega_v^2. \quad (4.2)$$

Таблиця 4.1 – Статистичні показники рівняння регресії (4.1)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	128,333	0,807851	158,858	$5,50027 \cdot 10^{-7}$
$a_{10\ 0}$	66,8667	0,442478	151,119	$6,38924 \cdot 10^{-7}$
$a_{11\ 0}$	49,7167	0,442478	112,36	$1,55424 \cdot 10^{-6}$
$a_{10\ 11}$	33,475	0,541923	61,7708	$9,34786 \cdot 10^{-6}$
$a_{10\ 10}$	- 3,4	0,766395	- 4,43636	0,0212889
$a_{11\ 11}$	- 0,15	0,766395	- 0,195722	0,857335

Рисунок 4.4 – Залежність продуктивності віброживильника q від частоти ω_v і амплітуди A_v його вібрації

Амплітуда вібрації A_v впливає на продуктивність негативно в лінійному виразі, проте в комбінації з частотою має значний позитивний внесок завдяки члену $836,875 A_v \omega_v$. Це означає, що окреме збільшення амплітуди зменшує продуктивність, але за умови одночасного збільшення частоти цей ефект може компенсуватися або навіть призводити до зростання продуктивності. Член $-0,002125 \omega_v^2$ свідчить про те, що при надто великих значеннях частоти продуктивність починає знижуватися. Таким чином, для досягнення необхідної продуктивності необхідно правильно

підбирати параметри частоти та амплітуди вібрації, уникаючи надмірно високих частот і враховуючи їхній взаємозв'язок з амплітудою.

Використовуючи програмний пакет Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді залежності висоти шару відходів насіннєвої суміші соняшнику від факторів досліджень:

$$h_p = 0,0340556 + 0,00708333 x_{10} + 0,000716667 x_{10}^2 + 0,0113833 x_{11} + 0,00225 x_{10} x_{11} + 0,00181667 x_{11}^2, \quad (4.3)$$

де h_p – висота шару відходів насіннєвої суміші соняшнику на виході з віброживильника, м.

Статистичні показники розраховані та представлені в таблиці 4.2. Коефіцієнти регресії, для яких розрахований коефіцієнт Стюдента менший за табличне значення $t_{0,05}(9) = 2,26$, виділені сірим кольором. Оскільки ці коефіцієнти є статистично незначущими, вони не враховуватимуться в подальшому аналізі. Розраховане значення критерію Фішера становить $F = 28493$, що перевищує табличне значення $F_t(6; 3; 0,05) = 8,94$. Це дозволяє відхилити нульову гіпотезу та підтвердити значущий вплив моделі на залежний критерій.

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 4.5):

$$h_p = 0,0162931 + 0,741667 A_v + 1816,67 A_v^2 + 0,0000108333 \omega_v + 0,05625 A_v \omega_v + 4,47917 \cdot 10^{-7} \omega_v^2. \quad (4.4)$$

Таблиця 4.2 – Статистичні показники рівняння регресії (4.4)

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a_{00}	0,0340556	0,000202352	168,298	$4,62569 \cdot 10^{-7}$
$a_{10\ 0}$	0,00708333	0,000110833	63,91	$8,44077 \cdot 10^{-6}$
$a_{11\ 0}$	0,0113833	0,000110833	102,707	$2,0348 \cdot 10^{-6}$
$a_{10\ 11}$	0,00225	0,000135742	16,5755	0,000477976
$a_{10\ 10}$	0,000716667	0,000191968	3,73325	0,0334997
$a_{11\ 11}$	0,00181667	0,000191968	9,46336	0,00250118

Аналізуючи рівняння, можна визначити основні тенденції впливу параметрів. Лінійний доданок $0,741667 A_v$ свідчить про те, що зі збільшенням амплітуди вібрації висота шару h_p зростає. Квадратичний член $1816,67 A_v^2$ вказує на значний нелінійний вплив амплітуди, що означає прискорене збільшення висоти шару при підвищенні A_v . Частота вібрації ω_v також впливає на висоту шару, однак її вплив значно слабший: лінійний коефіцієнт $0,0000108333$ дуже малий, а квадратичний доданок $4,47917 \cdot 10^{-7} \omega_v^2$ вказує на незначний прискорений ріст при підвищенні частоти. Значний вплив має взаємодія амплітуди та частоти, що описується членом $0,05625 A_v \omega_v$. Це свідчить про те, що збільшення частоти при фіксованій амплітуді додатково сприяє підвищенню шару відходів. Таким чином, висота шару відходів на виході з віброживильника найбільше залежить від амплітуди вібрації, причому її вплив має виражений квадратичний характер. Частота вібрації також впливає на h_p , але цей вплив менш значущий порівняно з амплітудою.

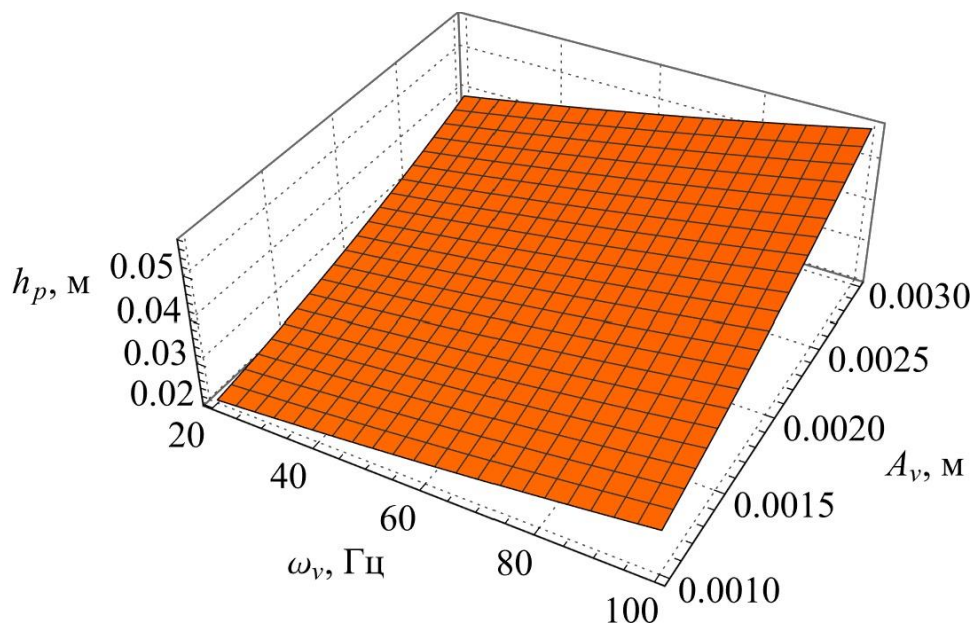


Рисунок 4.5 – Залежність висоти шару відходів насінневої суміші соняшнику на виході з віброживильника h_p від частоти ω_v і амплітуди A_v його вібрації

Згідно результатів чисельного моделювання висота шару відходів насінневої суміші соняшнику на виході з віброживильника h_p повинна бути менше за 0,036 м, а

продуктивність віброживильника q повинна знаходитися в межах від 50 до 150 кг/год:

$$\begin{cases} h_p(\omega_v, A_v) \leq 0,036, \\ 50 \leq q(\omega_v, A_v) \leq 150. \end{cases} \quad (4.5)$$

Вирішуючи систему рівнянь (4.5) спільно із (4.2) і (4.4) отримуємо, що $A_v \approx 0,0015$ м, а продуктивність віброживильника залежить від частоти його вібрації (рис. 4.6):

$$q = 20,6312 + 1,50823 \omega_v - 0,002125 \omega_v^2. \quad (4.6)$$

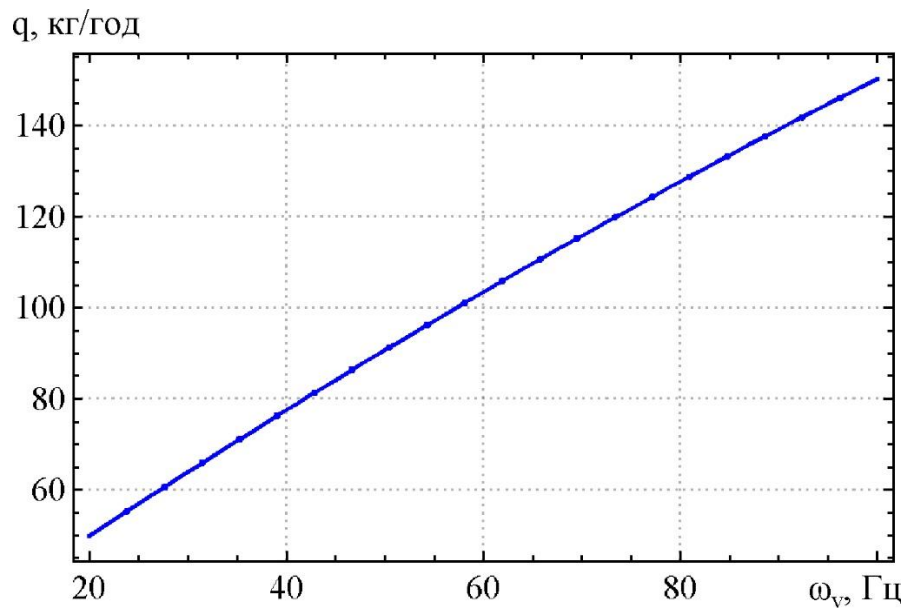


Рисунок 4.6 – Залежність продуктивності віброживильника q від частоти його вібрації ω_v

Рівняння (4.6) буде використовуватися для встановлення продуктивності віброживильника шляхом регулювання частоти вібрації з використанням мікропроцесорного контролера МікРА ДЗ.

Результати другого етапу експериментальних досліджень наведені в додатку И. Приклад розподілу швидкості повітряного потоку в вільному каналі та у каналі із аеродинамічним стабілізатором представлено на рис. 4.7. Наочний аналіз рисунку показує, що у вільному каналі спостерігається достатньо висока нерівномірність швидкості порівняно з каналом, у якому встановлений

аеродинамічний стабілізатор. Узагальнений аналіз даних швидкості повітряного потоку в каналі аеродинамічного сепаратора наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Аналіз даних швидкості повітряного потоку в каналі аеродинамічного сепаратора

Продуктивність вентилятора Q, м ³ /год	Швидкість потоку повітря V _a , м/с		Рівномірність розподілу швидкості (коефіцієнт варіації) δ_v	
	Без стабілізатора	Із стабілізатором	Без стабілізатора	Із стабілізатором
100	0,53±0,06	0,49±0,02	0,189	0,080
250	1,2±0,15	1,12±0,05	0,197	0,071
400	1,82±0,23	1,71±0,08	0,201	0,075
550	2,37±0,3	2,25±0,12	0,208	0,083
700	2,99±0,39	2,84±0,15	0,210	0,083
Середнє			0,201	0,078

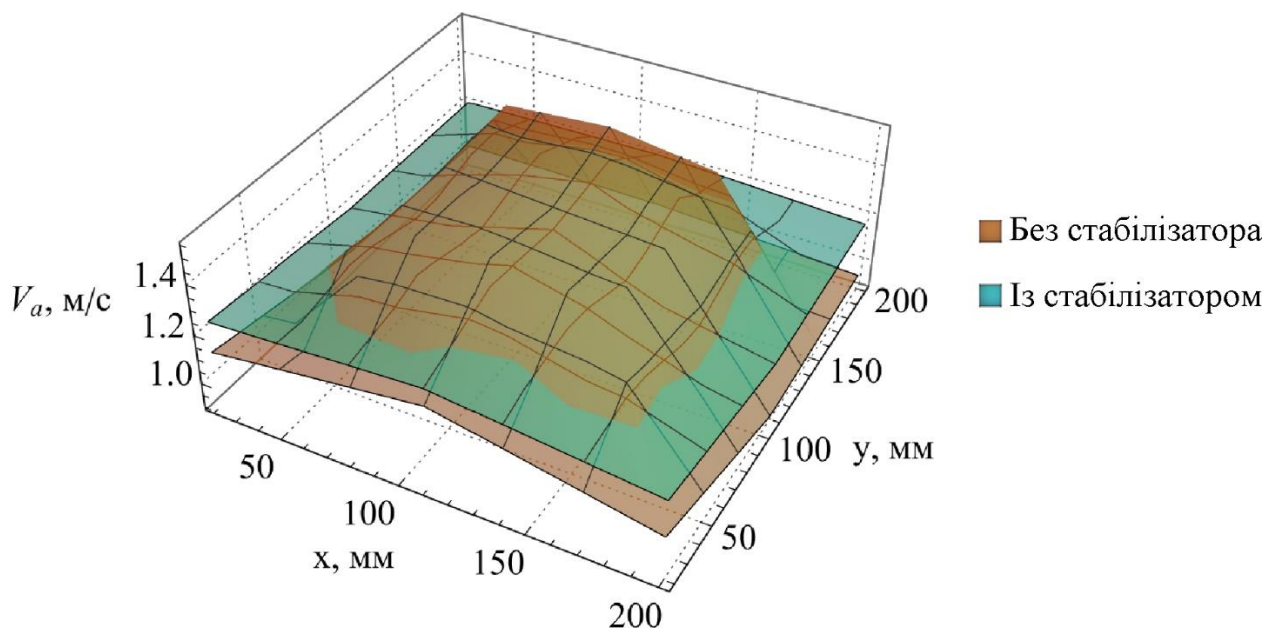


Рисунок 4.7 – Приклад розподілу швидкості повітряного потоку в вільному каналі та у каналі із аеродинамічним стабілізатором

Коефіцієнт варіації δ_v свідчить про коливання швидкості повітряного потоку в різних точках каналу. Без стабілізатора середнє значення коефіцієнта варіації становить 0,201, що вказує на значну нерівномірність потоку. Із використанням

стабілізатора цей показник суттєво зменшується до 0,078, тобто потік стає значно одноріднішим. Для всіх рівнів продуктивності вентилятора стабілізатор зменшує коефіцієнт варіації. Це підтверджує ефективність стабілізатора в забезпеченні рівномірного розподілу швидкості потоку. Одна при використанні стабілізатора зменшується швидкість потоку повітря на 5,1–7,5 % через наявний додатковий опір.

4.3 Результати експериментальних досліджень основних параметрів сепаратора

Результати третього етапу експериментальних досліджень подано в додатку К. За допомогою програмного пакета Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді, що описує залежність вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} від досліджуваних факторів.

$$\eta_{k-k} = 0,947667 - 0,010625 x_9 - 0,0112083 x_9^2 + 0,04225 x_3 - 0,00833333 x_9 x_3 - 0,0294583 x_3^2 + 0,0069583 x_8 - 0,00208333 x_9 x_8 - 0,0023333 x_3 x_8 + 0,0014583 x_8^2. \quad (4.7)$$

де η_{k-k} – вміст ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер; x_9 – закодоване значення продуктивності віброживильника q ; x_3 – закодоване значення швидкості повітряного потоку V_a ; x_8 – закодоване значення вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k .

Розраховані статистичні показники представлені в таблиці 4.4. Коефіцієнти регресії, для яких розрахований коефіцієнт Стюдента є меншим за табличне значення виділені сірим кольором. Оскільки ці коефіцієнти є статистично незначущими, вони не враховуватимуться в подальшому аналізі. Розраховані дисперсії є однорідними за критерієм Кохрена. Розраховане значення критерію Фішера перевищує табличне значення. Це свідчить про те, що нульову гіпотезу можна відхилити, а модель має значущий вплив на залежний критерій.

Провівши розкодування і прибравши незначущі коефіцієнти регресії маємо (рис. 4.8):

$$\eta_{k-k} = 0,748552 - 4,48333 \cdot 10^{-6} q^2 + 0,000934167 q - 0,0000833333 V_a q + 0,0736458 V_a - 0,00736458 V_a^2 + 0,0347917 \psi_k. \quad (4.8)$$

Аналіз отриманого рівняння показує, що продуктивність віброживильника впливає на η_{k-k} нелінійно: лінійний доданок свідчить про позитивний вплив, тобто зі збільшенням q кількість ядер у забірнику зростає, однак квадратичний член вказує на наявність точки насичення, після якої подальше збільшення продуктивності призводить до зниження ефективності відбору.

Таблиця 4.4 – Статистичні показники рівняння регресії (4.7)

b ₀	b ₉	b ₃	b ₈	b ₉₃	b ₉₈	b ₃₈	b ₉₉	b ₃₃	b ₈₈
0,94767	-0,01063	0,04225	0,00696	-0,00833	-0,00208	-0,00233	-0,01121	-0,02946	0,00146
Δb ₀	Δb ₉	Δb ₃	Δb ₈	Δb ₉₃	Δb ₉₈	Δb ₃₈	Δb ₉₉	Δb ₃₃	Δb ₈₈
0,00713	0,00437	0,00437	0,00437	0,00618	0,00618	0,00618	0,00643	0,00643	0,00643
b ₀	b ₉	b ₃	b ₈	b ₉₃	b ₉₈	b ₃₈	b ₉₉	b ₃₃	b ₈₈
0,94767	-0,01063	0,04225	0,00696	-0,00833	0,00000	0,00000	-0,01121	-0,02946	0,00000
Критерій Кохрена			G	G(0,05;2;15)		Результат			
			0,1943	0,3346		Дисперсії однорідні			
Критерій Стюдента				t(0,05;30)		S _{вос} ²		S _{ад} ²	
				2,04		7,47778·10 ⁻⁶		0,000167797	
Критерій Фішера			F	F(0,05;8;30)		Результат			
			22,4394	2,27		Модель адекватна			

Взаємодія продуктивності віброживильника зі швидкістю повітряного потоку показує, що при високих значеннях V_a збільшення q може мати негативний ефект, що пояснюється посиленням винесення легких частинок разом із ядрами. Швидкість повітряного потоку також чинить значний вплив: на початкових етапах її збільшення покращує ефективність розділення, однак при надто високих значеннях V_a з'являється негативний ефект, що може бути пов'язано з надмірним винесенням частинок.

Вміст ядер і насіння у вихідній суміші має безпосередній позитивний вплив на кінцевий результат, що є цілком закономірним, оскільки чим більше ядер у початковій суміші, тим більше їх може бути відібрано у забірник. Загалом аналіз рівняння регресії підтверджує, що для досягнення оптимальної ефективності необхідно раціонально поєднувати параметри продуктивності віброживильника і швидкості повітряного потоку, враховуючи їх нелінійний вплив на кінцевий показник відбору ядер. При умові максимізації $\eta_{k-k} = 0,976$ отримуємо значення факторів $q = 60,91$ кг/год, $V_a = 4,65$ м/с, $\psi_k = 0,8$.

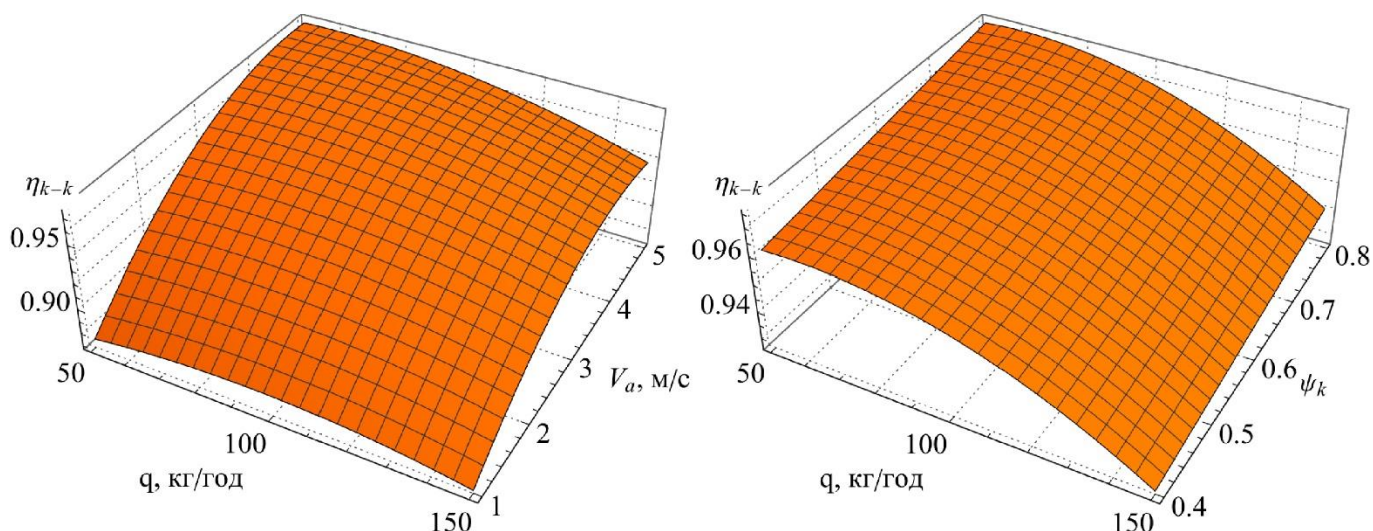


Рисунок 4.8 – Залежність вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} від продуктивності віброживильника q , швидкості повітряного потоку V_a і вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k

Наочне порівняння результатів експериментальних досліджень (4.8) при $q = 60,91$ кг/год і $\psi_k = 0,8$ та результатів чисельного моделювання (2.37) при $h_p = 0,036$ м наведено на рис. 4.9. Характер кривих є тотожним.

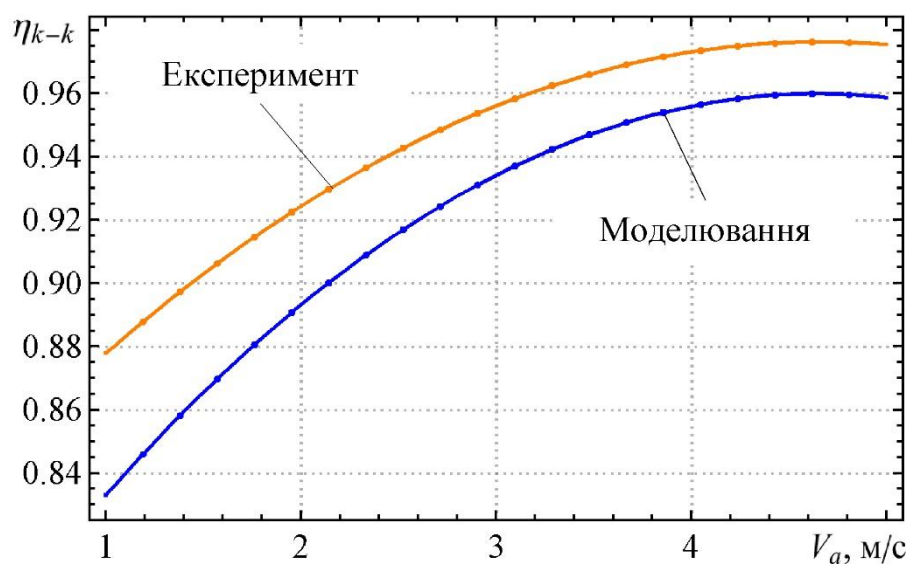


Рисунок 4.9 – Порівняння залежностей (експериментальної і модельної) вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} від швидкості повітряного потоку V_a

Коефіцієнт кореляції залежностей складає 0,94, однак при цьому спостерігається більш завищене значення η_{k-k} , яке отримано при експериментах.

За використання програмного пакета Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді, яке описує залежність коефіцієнта розподілу δ від досліджуваних факторів:

$$\delta = 0,928111 - 0,0170833 x_9 - 0,00868056 x_9^2 + 0,0426667 x_3 - 0,00991667 x_9 x_3 - 0,0266806 x_3^2 + 0,0128333 x_8 - 0,00475 x_9 x_8 + 0,00258333 x_3 x_8 + 0,00765278 x_8^2. \quad (4.9)$$

де δ – коефіцієнт розподілу.

Розраховані статистичні показники наведено в таблиці 4.5. Коефіцієнти регресії, для яких розрахований коефіцієнт Стюдента є меншим за табличне значення, виділено сірим кольором. Оскільки ці коефіцієнти статистично незначущі, вони не враховуються в подальшому аналізі. Перевірка за критерієм Кохрена показала, що дисперсії є однорідними. Розраховане значення критерію Фішера перевищує табличне значення, що дозволяє відхилити нульову гіпотезу та підтвердити значущий вплив моделі на залежний критерій.

Після розкодування та виключення незначущих коефіцієнтів регресії отримано наступне рівняння (рис. 4.10):

$$\delta = 0,799747 - 0,000341667 q + 0,0613542 V_a - 0,00667014 V_a^2 + 0,0641667 \psi_k. \quad (4.10)$$

Таблиця 4.5 – Статистичні показники рівняння регресії (4.9)

b ₀	b ₉	b ₃	b ₈	b ₉₃	b ₉₈	b ₃₈	b ₉₉	b ₃₃	b ₈₈
0,92811	-0,01708	0,04267	0,01283	-0,00992	-0,00475	0,00258	-0,00868	-0,02668	0,00765
Δb ₀	Δb ₉	Δb ₃	Δb ₈	Δb ₉₃	Δb ₉₈	Δb ₃₈	Δb ₉₉	Δb ₃₃	Δb ₈₈
0,01416	0,00867	0,00867	0,00867	0,01226	0,01226	0,01226	0,01276	0,01276	0,01276
b ₀	b ₉	b ₃	b ₈	b ₉₃	b ₉₈	b ₃₈	b ₉₉	b ₃₃	b ₈₈
0,92811	-0,01708	0,04267	0,01283	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	-0,02668	0,00000
Критерій Кохрена			G	G(0,05;2;15)		Результат			
			0,16579	0,3346		Дисперсії однорідні			
Критерій Стюдента				t(0,05;30)		S _{вос} ²		S _{ад} ²	
				2,04		0,000029437		0,00594582	
Критерій Фішера			F	F(0,05;8;30)		Результат			
			201,984	2,16		Модель адекватна			

Аналіз рівняння показує, що продуктивність віброживильника має незначний негативний вплив на коефіцієнт розподілу, оскільки коефіцієнт при q є від'ємним. Це свідчить про те, що зі збільшенням подачі матеріалу рівномірність його розподілу може погіршуватися, через перевантаження потоку або нерівномірне надходження частинок у сепараційну зону. Швидкість повітряного потоку V_a чинить значний вплив на коефіцієнт розподілу. Лінійний член має позитивний знак, що означає, що при збільшенні швидкості V_a коефіцієнт розподілу покращується, тобто ефективність поділу частинок зростає. Проте квадратичний доданок є від'ємним, що свідчить про наявність оптимального значення швидкості повітряного потоку. Якщо швидкість перевищує певний рівень, ефективність розподілу починає знижуватися, можливо, через турбулентні ефекти або надмірне винесення частинок. Вміст ядер і насіння у вихідній суміші ψ_k позитивно впливає на коефіцієнт розподілу, що є логічним, оскільки збільшення кількості ядер у початковому матеріалі сприяє їх більш рівномірному розподілу в потоці.

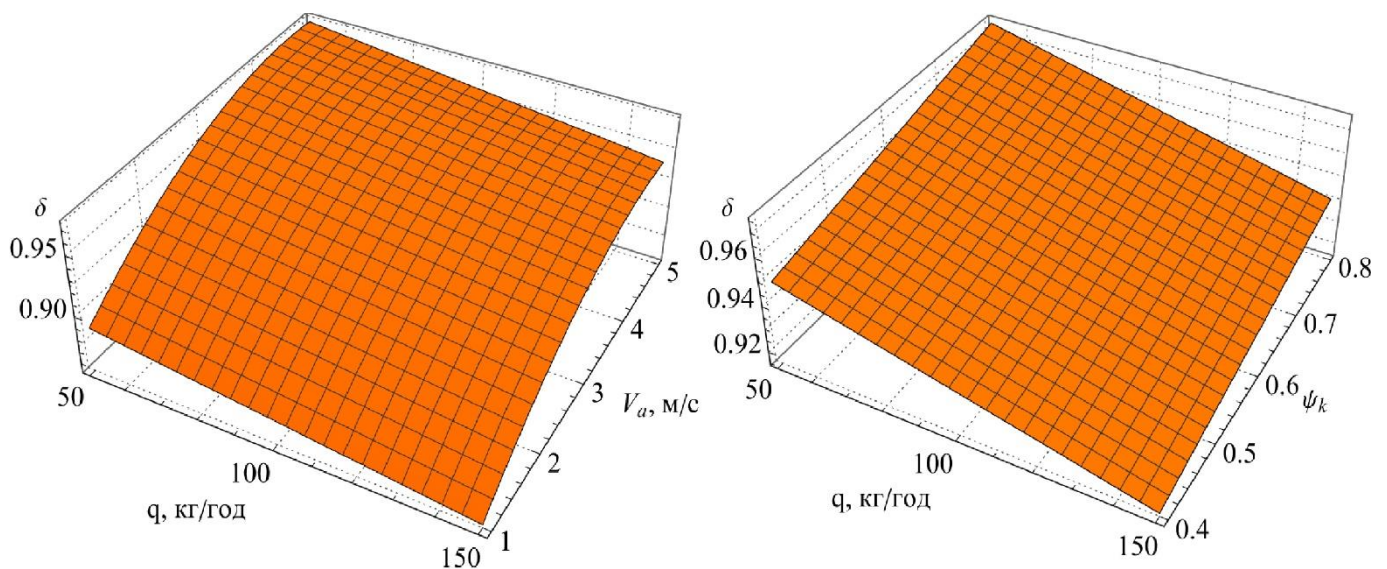


Рисунок 4.10 – Залежність коефіцієнта розподілу δ від продуктивності віброживильника q , швидкості повітряного потоку V_a і вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k

Отже, для досягнення оптимального коефіцієнта розподілу необхідно контролювати продуктивність віброживильника, уникаючи надмірного збільшення q , а також встановлювати швидкість повітряного потоку в оптимальному діапазоні, щоб забезпечити ефективне розділення частинок без втрат. При умові максимізації $\delta = 0,975$ отримуємо значення факторів $q = 50$ кг/год, $V_a = 4,59$ м/с, $\psi_k = 0,8$.

На рисунку 4.11 представлено наочне порівняння результатів експериментальних досліджень (4.10) з результатами чисельного моделювання (2.47) і (2.49). Спостерігається схожість характеру кривих, що вказує на узгодженість отриманих залежностей. Коефіцієнт кореляції між експериментальними та модельними даними становить 0,92, що свідчить про високу ступінь відповідності. Однак при чисельному моделюванні спостерігається дещо завищене значення коефіцієнта розподілу δ , що пов'язано зі спрощенням моделі, ідеалізацією умов або неврахуванням деяких факторів, що впливають на реальний процес розподілу компонентів суміші.

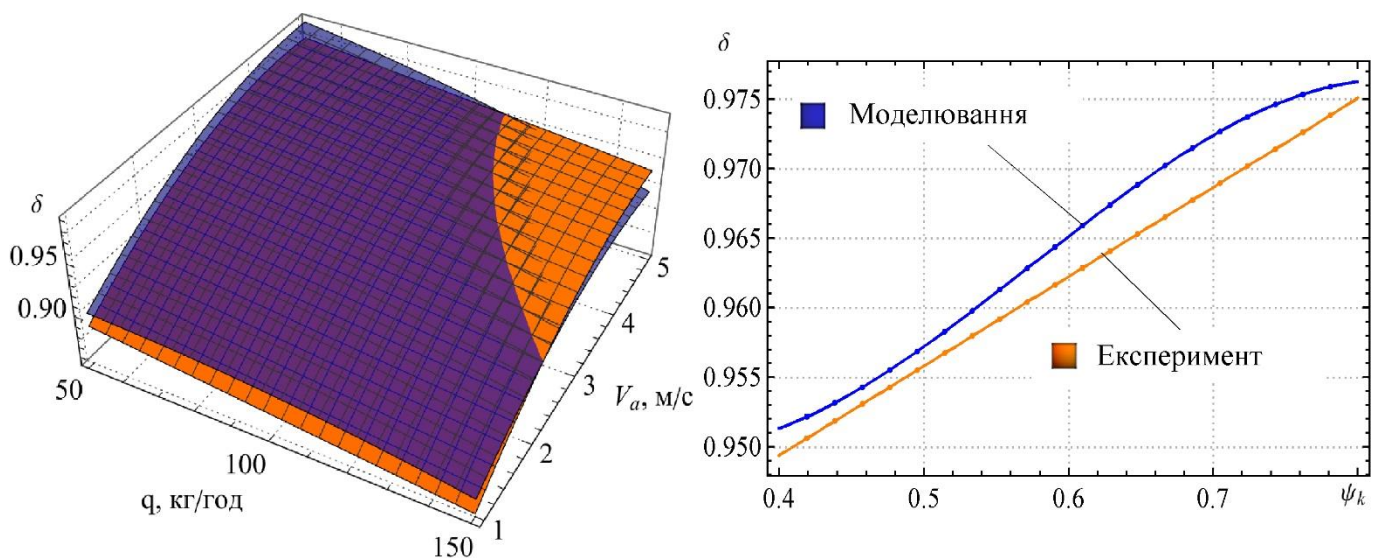


Рисунок 4.11 – Порівняння залежностей (експериментальної і модельної) коефіцієнта розподілу δ від продуктивності віброживильника q , швидкості повітряного потоку V_a і вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k

За допомогою програмного пакета Wolfram Cloud отримано рівняння регресії другого порядку в закодованому вигляді, яке характеризує залежність споживної потужності P від досліджуваних факторів:

$$P = 559,711 + 63,6417 x_9 - 6,02222 x_9^2 + 255,875 x_3 - 10,0667 x_9 x_3 - 10,6722 x_3^2 - 2,05833 x_8 - 8,48333 x_9 x_8 - 2,8 x_3 x_8 + 9,59444 x_8^2. \quad (4.11)$$

де P – споживна потужність аеродинамічного сепаратора, Вт.

Статистичні показники, отримані в результаті розрахунків, наведено в таблиці 4.6. Коефіцієнти регресії, для яких розрахований коефіцієнт Стюдента виявився меншим за табличне значення, виділено сірим кольором. Оскільки ці коефіцієнти є статистично незначущими, їх не враховують у подальшому аналізі. Перевірка за критерієм Кохрена підтвердила однорідність дисперсій. Значення критерію Фішера перевищує табличне, що дає змогу відхилити нульову гіпотезу та підтвердити значущий вплив моделі на залежний критерій.

Таблиця 4.6 – Статистичні показники рівняння регресії (4.11)

b ₀	b ₉	b ₃	b ₈	b ₉₃	b ₉₈	b ₃₈	b ₉₉	b ₃₃	b ₈₈
559,711	63,642	255,875	-2,058	-10,067	-8,483	-2,800	-6,022	-10,672	9,594
Δb ₀	Δb ₉	Δb ₃	Δb ₈	Δb ₉₃	Δb ₉₈	Δb ₃₈	Δb ₉₉	Δb ₃₃	Δb ₈₈
32,426	19,857	19,857	19,857	28,082	28,082	28,082	29,229	29,229	29,229
b ₀	b ₉	b ₃	b ₈	b ₉₃	b ₉₈	b ₃₈	b ₉₉	b ₃₃	b ₈₈
559,711	63,642	255,875	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Критерій Кохрена			G	G(0,05;2;15)		Результат			
			0,27957	0,3346		Дисперсії однорідні			
Критерій Стюдента				t(0,05;30)		S _{вос} ²		S _{ад} ²	
				2,04		154,45		22719,49	
Критерій Фішера			F	F(0,05;8;30)		Результат			
			147,094	2,09		Модель адекватна			

Після розкодування та виключення статистично незначущих коефіцієнтів регресії отримано оновлене рівняння (рис. 4.12):

$$P = 48,6153 + 1,27283 q + 127,938 V_a. \quad (4.12)$$

Аналіз рівняння свідчить, що споживна потужність лінійно залежить як від продуктивності віброживильника, так і від швидкості повітряного потоку. Коефіцієнт при q дорівнює 1,27283, що вказує на прямий позитивний вплив

продуктивності віброживильника на споживану потужність. Це означає, що зі збільшенням продуктивності віброживильника споживана потужність зростає пропорційно. Коефіцієнт при V_a дорівнює 127,938, що вказує на значний вплив швидкості повітряного потоку на споживану потужність. Це означає, що збільшення швидкості потоку повітря істотно підвищує споживану потужність, ймовірно, через необхідність подолання додаткового опору повітря або збільшення енергії для забезпечення більшої швидкості потоку. Загалом, рівняння підтверджує, що для ефективного управління споживаною потужністю необхідно оптимізувати як продуктивність віброживильника, так і швидкість повітряного потоку. Збільшення будь-якого з цих параметрів призводить до пропорційного зростання енергоспоживання, тому для досягнення енергетичної ефективності важливо правильно балансувати ці два фактори. При умові мінімізації $P = 240,2$ Вт отримуємо значення факторів $q = 50$ кг/год, $V_a = 1$ м/с.

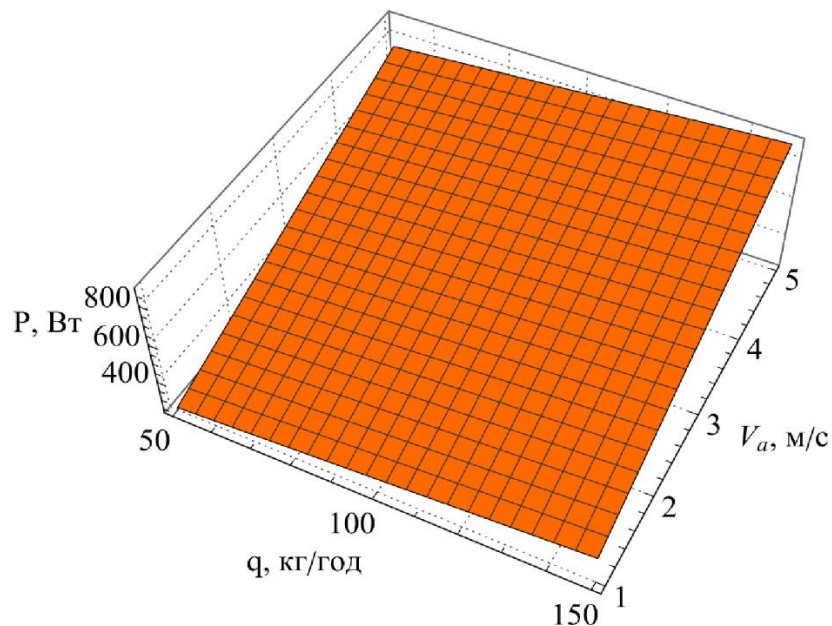


Рисунок 4.12 – Залежність споживної потужності P від продуктивності віброживильника q і швидкості повітряного потоку V_a

Як показав попередній аналіз оптимальні значення факторів досліджень для обраних критеріїв не співпадають, тому потребує вирішення компромісна задача. А

саме ефективна робота розробленого аеродинамічного сепаратора колонного типу можлива за умови максимізації вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності віброживильника q та мінімізації його споживної потужності P :

$$\begin{cases} \eta_{k-k} \rightarrow \max, \\ q \rightarrow \max, \\ P \rightarrow \min. \end{cases} \quad (4.13)$$

Провівши ранжування критеріїв і провівши зведення до єдиного узагальнюючого критерію перетворимо систему (4.13) до наступного вигляду:

$$K_5 = \frac{\eta_{k-k} - \min(\eta_{k-k})}{\max(\eta_{k-k}) - \min(\eta_{k-k})} \frac{q - \min(q)}{\max(q) - \min(q)} \frac{\max(P) - P}{\max(P) - \min(P)} \rightarrow \max. \quad (4.14)$$

Вирішуючи рівняння (4.14) в програмі Wolfram Cloud спільно з (4.8) і (4.12) отримуємо два рівняння, які вказують на зв'язок продуктивності віброживильника q і швидкості повітряного потоку V_a від вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k (рис. 4.13):

$$q = 38,352 \psi_k + 108,89, \quad (4.15)$$

$$V_a = -2,5013 \psi_k + 4,378. \quad (4.16)$$

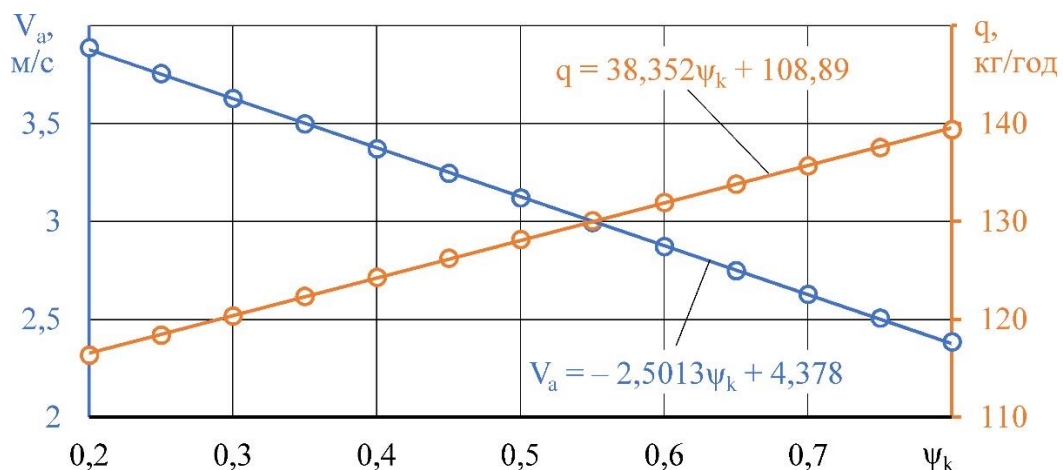


Рисунок 4.13 – Залежність продуктивності віброживильника q і швидкості повітряного потоку V_a від вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k

Аналіз отриманих залежностей продуктивності віброживильника q і швидкості повітряного потоку V_a від вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k дозволяє зробити кілька важливих висновків. Рівняння (4.15) показує, що продуктивність віброживильника зростає лінійно з підвищенням вмісту ядер і насіння соняшнику в суміші. Це означає, що зростання вмісту ядер і насіння в суміші позитивно впливає на продуктивність, оскільки при більшому вмісті матеріалу у суміші, віброживильник потребує більшої потужності для обробки цього обсягу. Коефіцієнт 38,352 вказує на відносно високу чутливість продуктивності до змін вмісту ядер і насіння, що підкреслює важливість правильного налаштування параметрів віброживильника для досягнення оптимальної продуктивності. Рівняння (4.16) вказує на зворотний зв'язок між швидкістю повітряного потоку і вмістом ядер і насіння соняшнику. Зі збільшенням вмісту ядер і насіння в суміші швидкість повітряного потоку зменшується. Це може бути пов'язано з тим, що більша кількість часток у суміші створює більший опір повітрю, що знижує швидкість його руху через сепаратор. Це також може вказувати на необхідність налаштування параметрів вентиляційної системи для досягнення оптимального повітряного потоку при різному складі матеріалу.

Обидві залежності є важливими для оптимізації роботи аеродинамічного сепаратора, оскільки високий вміст ядер і насіння збільшує продуктивність, але знижує швидкість потоку повітря. З отриманих рівнянь можна зробити висновок, що оптимізація роботи сепаратора передбачає контроль вмісту ядер і насіння в суміші, що дасть змогу зберегти високу продуктивність і одночасно підтримувати ефективний повітряний потік для подальшого процесу сепарації. Залежності на рисунку 4.13 використані для налаштування операційних параметрів і досягнення максимальної ефективності роботи аеродинамічного сепаратора колонного типу.

4.4 Висновки з розділу

1. В результаті лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей компонентів відходів насінневої суміші соняшнику були отримані важливі дані, що

дозволяють проводити точне чисельне моделювання для подальшої оптимізації технологічних процесів очищення та сортування. Розподіл компонентів на ядро соняшнику, лущиння та дрібні частинки надав чітке розуміння їх фізичних характеристик, що є необхідним для прогнозування їх поведінки під впливом повітряного потоку. Отримані варіаційні розподіли та статистичні обробки даних показали, що більшість параметрів підпорядковується нормальному розподілу, що дозволяє впевнено використовувати ці результати для подальших досліджень та розробок. Ці дані надають основу для більш ефективного проектування і налаштування технологічного обладнання, що може значно покращити процеси очищення та сортування соняшникового насіння.

2. Згідно з результатами експериментальних досліджень віброживильника, регресійні моделі показують, що його продуктивність q (4.2) і висота шару відходів h_p (4.4) значною мірою залежать від амплітуди вібрації A_v та частоти вібрації ω_v . Оптимальні значення параметрів (A_v і ω_v) необхідно вибирати для досягнення бажаної продуктивності та контролю за висотою шару відходів. Зокрема, для підтримки продуктивності в межах 50–150 кг/год і висоти шару менше 0,036 м, результати чисельного моделювання показують, що оптимальні параметри вібрації мають бути близькими до $A_v \approx 0,0015$ м, а продуктивність визначатиметься залежно від частоти вібрації за рівнянням (4.6).

3. Згідно з результатами експериментальних досліджень, встановлення аеродинамічного стабілізатора (решітка із діаметром отворів 3 мм) в каналі значно покращує рівномірність розподілу швидкості повітряного потоку. Це підтверджується зменшенням середнього коефіцієнта варіації швидкості потоку з 0,201 до 0,078 при використанні стабілізатора, що свідчить про значне зменшення нерівномірності потоку. Однак, наявність стабілізатора призводить до зменшення швидкості потоку на 5,1–7,5% через додатковий опір, що є компромісом між покращенням рівномірності і зниженням швидкості потоку.

4. Результати експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора колонного типу показали, що модель, яка описує залежність вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} (4.8), є значущою та адекватною. Зазначена

модель включає нелінійні залежності від всіма факторами досліджень: продуктивність віброживильника q , швидкість повітряного потоку V_a і вміст ядер у вихідній суміші ψ_k . Додатково були отримані рівняння, які описують залежності коефіцієнта розподілу δ (4.10) і споживної потужності P (4.12) від факторів досліджень.

5. Проведено порівняння результатів експериментальних досліджень (4.10) з результатами чисельного моделювання (2.47) і (2.49). Спостерігається схожість характеру кривих, що вказує на узгодженість отриманих залежностей. Коефіцієнт кореляції між експериментальними та модельними даними становить 0,92, що свідчить про високу ступінь відповідності. Однак при чисельному моделюванні спостерігається дещо завищене значення коефіцієнта розподілу δ , що пов'язано зі спрощенням моделі, ідеалізацією умов або неврахуванням деяких факторів, що впливають на реальний процес розподілу компонентів суміші.

6. Для підвищення ефективності роботи аеродинамічного сепаратора колонного типу необхідним є досягнення умови максимізації вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності віброживильника q та мінімізації його споживної потужності P . Рішенням заявленої компромісної задачі є два рівняння, які вказують на зв'язок продуктивності віброживильника q (4.15) і швидкості повітряного потоку V_a (4.16) від вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k . Отриманні залежності використані для налаштування операційних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу і досягнення максимальної ефективності його роботи.

Ключові наукові результати розділу були опубліковані в роботах автора [21–24].

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Впровадження результатів досліджень

Виробничі випробування аеродинамічного сепаратора колонного типу проводилися на підприємствах (додаток Л): ТОВ НВО «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ» (м. Дніпро); ТОВ «ПОТОКИ» (Дніпропетровська обл, м. Дніпро); ТДВ «УКРОЛІЯПРОДУКТ» (Полтавська обл., м. Зіньків); ПП «ВІКТОР і К» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка); ТОВ «ГІДРОСЕНД» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка); ТОВ «АГРОПРОІНВЕСТ 08» (Дніпропетровська обл, Нікопольський район, с. Першотравневе).

У процесі випробовування аеродинамічного сепаратора колонного типу на ТОВ НВО «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ» (м. Дніпро) виконано модернізацію обладнання згідно до результатів дисертаційного дослідження та корекція програмного забезпечення для інтеграції сепараторів у [215] Автоматичну адаптивну мехатронну багатокритеріальну каскадну лінію сортування відходів соняшнику.

Результати випробовування доповідалися на Загальних зборах директорів Асоціації «Укроліяпром». Виконавча дирекція асоціації «Укроліяпром» зробила висновки про значну економічну доцільність сортування сміття та лушпиння, рекомендувала операторам олійного виробництва ознайомитися з новим напрямком поліпшення технологічного процесу олієдобування та зробити висновки для майбутнього інвестування у обладнання, яке раніше не було наявним на світових ринках.

На ТОВ «Потоки» (м. Дніпро), встановлено сортувальну машину з 18 модулями сортування для сепарації сміття та лушпиння соняшнику. В результаті на виробництві з'явилась можливість прийняття насіння соняшнику з засміченністю до 15 %. Сміття насіння після сепарації використовується як безоплатне «зелене паливо» для одержання пари для електричної турбіни 16 МВт, енергія якої використовується для технологічних потреб виробництва, а використана пара

низьких параметрів із турбіни використовується для технологічних потреб технологічного процесу. Олійна домішка після сортування використовується у основному технологічному процесі для виробництва харчових продуктів (олії соняшникової) та кормових продуктів (шрот соняшниковий). В результаті впровадження виключено рециркуляцію лушпиння, що скоротило виробничі втрати олії та підвищило вміст протеїну у шроті.

Згідно до зауважень та пропозицій ТДВ «УКРОЛІЯПРОДУКТ» (Полтавська обл., м. Зіньків), виконана модернізація обладнання об'єднанням 12 сортувальних каналів та транспортних елементів для завантаження, розвантаження та живлення сировиною у єдину машину, загальний вигляд якої наведено на рис 5.1–5.2.



Рисунок 5.1 – Сортувальна машина СС-012

Сортувальні машини були встановлені для сортування лушпиння соняшнику в кількості 3 одиниць у першому каскаді та 1 машини у 2 каскаді сортування лушпиння. Обладнання дозволило скоротити рециркуляцію лушпиння для його контролю, що дозволило вивільнити потужності, які раніше використовувалися для контролю лушпиння, для підвищення загальної виробничої потужності від 10 % до 15 %. Лушпиння, очищене від олійної домішки, при спалюванні у наявних котлах, значно покращило пило-газовий склад викидів у атмосферу та дозволило досягти діючих нормативів викидів у атмосферу. Олійна домішка у кількості 3,5 % від кількості лушпиння повернута до основного технологічного процесу олієдобування для одержання харчових та кормових продуктів. Кількість твердих відходів скорочена на 3,5 %.



Рисунок 5.2 – Сортувальне обладнання на підприємстві «Укроліяпродукт»

На відміну від діючих підприємств, на ПП «ВІКТОР і К» (Кіровоградська обл., м. Світловодськ, с.м.т. Власівка), обладнання встановлювалось у нове виробництво,

для якого виконана модернізація програмного забезпечення, аспіраційної системи та транспортних комунікацій.

На цьому підприємстві комплект сортувального обладнання окреслився в автоматичну адаптивну мехатронну багатокритеріальну каскадну лінію сортування відходів соняшнику.

Розрахункові техніко-економічні показники вилучення олійної домішки із лушпиння та сміття насіння вищі за показники, які декларуються провідними підприємствами-виробниками сортувального обладнання: вилучення олійної домішки із лушпиння 0,5% на бітер сепараторах компанії ELICA, Allosco, проти 3,5 %.



Рисунок 5.3 – Обладнання на підприємстві ПП «ВІКТОР і К»

На підприємствах олійної галузі впроваджуються новітні технології олієдобування, тому для обробки лушпиння та сміття насіння скоплектовані та змонтовані автоматичні адаптивні мехатронні багатокритеріальні каскадні лінії сортування відходів соняшнику, на яких виконуються пуско-налагоджувальні, монтажні та обкаточні роботи:

– ПП «ВІКТОР і К», технологічна лінія у складі 11 одиниць сортувального

обладнання;

– ТОВ «ГІДРОСЕНД»; технологічна лінія у складі 10 одиниць сортувального обладнання;

– ТОВ «АГРОПРОІНВЕСТ 08» – це олійно екстракційне підприємство середньої та невеликої виробничої потужності, тому для потреб сортування лушпиння було задіяно 1 одиницю сортувального обладнання СС-012. На цьому обладнанні виконано локальні модернізації, які дозволили розмістити обладнання на лімітованій виробничій площадці з додержанням вимог щодо безпеки розміщення обладнання.

5.2 Економічне оцінювання техніки на етапі випробовування

За базу для порівняння прийнято показники згідно сортування лушпиння на сепараторі аеродинамічному ІСМ 2,5 [216]. Показники базового обладнання порівнюють з показниками технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «Машини сортувальні для сипучих матеріалів».

Умови випробовування відповідають вимогам технічного завдання та експлуатаційної документації щодо сфери застосування та умов експлуатації техніки, а саме згідно до настанови з експлуатації:

– машина призначена для очищення, сортування, сепарації, фракціонування або калібрування насіння, зерна або сухих бобових культур для застосування в борошномельній промисловості, крім використання в сільськогосподарських фермах, а також для сортування сміття насіння олійних та зернових культур, що надходять на промислову переробку від зернозаготівельних підприємств, елеваторів, а так само в процесах сортування насіння трав від легких, великих і дрібних сміттєвих домішок, які відокремлюються повітряним потоком, з метою кращого збереження насіння та зерна, підготовки їх до сушіння та активного вентилявання, підвищення ефективності подальшого очищення.

– машина також може використовуватися і для вторинного очищення зернових сумішей вище вказаних культур від легкого та дрібного сміття і домішок,

які можливо відокремлювати повітряним потоком, з метою підвищення категорії зерновідходів і вилучення основного насіння і зернової домішки зі сміття.

– машина встановлюється в технологічні лінії первинної та вторинної обробки зерна, у складі спеціальних ліній, або окремим сортувальним обладнанням.

Річний економічний ефект від використання нової машини, з урахуванням кількості та якості продукції (E_p), розраховується за такою формулою:

$$E_p = (\Pi_{\text{б}} - \Pi_{\text{н}}) V_3 + E_{\text{я}}, \quad (5.1)$$

де $\Pi_{\text{б}}$, $\Pi_{\text{н}}$ – загальні витрати на одиницю наробітку для базової та нової машин відповідно, грн./од. наробітку; V_3 – річний обсяг наробітку новою машиною в умовах конкретної природно-кліматичної зони, од. наробітку; $E_{\text{я}}$ – річний економічний ефект, що виникає через зміну кількості та якості продукції, грн.

Економічний ефект від зміни кількості та якості продукції ($E_{\text{я}}$) визначається за формулою:

$$E_{\text{я}} = C_{\text{ян}} - C_{\text{яб}}, \quad (5.2)$$

де $C_{\text{ян}}$, $C_{\text{яб}}$ – вартість продукції, що отримується при використанні нової та базової машин протягом року, грн.

Кількість сировини на одиницю наробітку сортування сировини (на годину): за новою технологією $C_{\text{ян}} = 0,110 \times (0,17 - 0,135) = 3,85$ кг/год, де $C_{\text{яб}} = 0,110 \times 0,170 = 0,0187$, $C_{\text{ян}} = 0,110 \times 0,135 = 0,01485$, $0,110$ т/год – продуктивність обладнання; $0,170$; $0,135$ – кількість лушпиння при сортуванні базовою та новою машиною.

Зниження кількості продукції протягом року:

$$E_{\text{я}} = C_{\text{ян}} \times V_3 = 3,85 \times 7680 = 29,568 \text{ т/рік}, \quad (5.3)$$

де $V_3 = 7680$ год – річний обсяг роботи нової машини в умовах конкретної природно-кліматичної зони.

Річна економія матеріальних ресурсів, т:

$$V_3 = 0,110 \times (0,170 - 0,135) 7680 = 29,568 \text{ т}. \quad (5.4)$$

Річний економічний ефект, досягнутий завдяки зміні обсягу та якості продукції, грн.:

$$E_{\text{я}} = (\Pi_{\text{од}} - \Pi_{\text{л}}) V_3 = (26700 - 1200) \times 29,568 = 753984 \text{ грн/рік}, \quad (5.5)$$

де $\Pi_{\text{од}} = 26700$ грн/т ціна олійної домішки; $\Pi_{\text{л}} = 1200$ грн/т ціна лушпиння.

Кількість обладнання та продуктивність [217].

Продуктивність нового обладнання 110 кг/год.

Продуктивність базового обладнання Π_6 при сортуванні лушпиння соняшника:

$$\Pi_6 = \Pi_n \times K_1 \times K_2 = 2500 \times 0,12 \times 0,4 = 110 \text{ кг/год}; \quad (5.6)$$

де $\Pi_n = 2500$ – продуктивність номінальна при сортуванні пшениці 760 г/л; K_1 – коефіцієнт перерахунку номінальної продуктивності у технічну залежно від сортуємої культури: $K_1 = 88/760 = 0,12$; 88 г/л – насипна щільність лушпиння; 760 г/л – насипна щільність пшениці; K_2 – коефіцієнт перерахунку номінальної продуктивності у технічну залежно від засміченості культури (засміченість лушпиння більше 90 %); $K_2 = 0,4$.

$K_{\text{обб}}$ – кількість обладнання базового: $K_{\text{обб}} = 0,110/0,110 = 1$ од. $K_{\text{обн}}$ – кількість обладнання нового: 1 од.

Знімання лушпиння у технології шеретувально віяльного виробництва 17 %.

Знімання лушпиння у технології шеретувально віяльного виробництва після сепарації $17 - 3,5 = 13,5$ %.

Річний прибуток від експлуатації нової машини:

$$O = (\Pi_6 - \Pi_n) \times V_3 + E_{\text{я}} = (170321 - 157104) \times 1 + 753984 = 767201 \text{ грн/рік}. \quad (5.7)$$

Балансова вартість машини: $\Pi_n \times K_6 = 125000 \times 1,2 = 150000$ грн, де Π_n – вартість нової машини; K_6 – коефіцієнт перерахунку ціни придбання у балансову вартість машини.

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, за нормативом, становить: $E_n = 12 \% / 100 \% = 0,12$, де 12 % — це ставка пільгового кредиту, встановлена Національним банком України.

Термін окупності додаткових капітальних вкладень:

$$T_{\text{окд}} = (K_n + K_6) / O = (150000 + 132500) / 767201 = 0,37 \text{ року} = 118,25 \text{ доби}. \quad (5.8)$$

Економічний вигляд від виготовлення та експлуатації нової машини протягом її строку служби:

$$E_{\text{сс}} = O / (E_n + K_p) = 767201 / (0,12 + 0,1) = 3487277 \text{ грн}. \quad (5.9)$$

Максимальна вартість нової машини:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{л}} &= \Pi_{\text{вп}} \times K_{\text{г}} = \Pi_{\text{вп}} \times 0,80 = [O/(E_{\text{н}} + K_{\text{р}}) + B_{\text{н}}] \times 0,8 = \\ &= (3487277 + 150000) \times 0,8 = 2909821,60 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.10)$$

де $\Pi_{\text{вп}}$ – верхня межа ціни; $K_{\text{г}} = 0,80$ – коефіцієнт гарантії, який забезпечує користувачу економічний ефект від використання нової техніки; $B_{\text{н}}$ – балансова вартість нової машини.

Аналіз таблиць 5.1 і 5.2 показує, що нова машина має суттєві економічні переваги порівняно з базовою.

Таблиця 5.1 – Показники економічної ефективності нової машини

Показник	Значення показника
Річна економія витрат праці, люд.·год	0
Річна економія ресурсів, натуральних одиниць, т	29,568
Щорічний економічний ефект від використання нової машини, грн.	767201,00
Щорічний економічний ефект, отриманий завдяки змінам у кількості та якості продукції, грн.	753984,00
Річний прибуток, грн.	13217,00
Термін окупності, роки	0,37
Лімітна ціна, грн.	2909821,60
Балансова вартість машини, грн.	150000,00

Річна економія затрат праці відсутня, тобто нова машина не впливає на скорочення робочої сили. Проте вона забезпечує річну економію ресурсів у розмірі 29,568 тонн, що є її перевагою. Річний економічний ефект від використання нової машини складає 767201 грн, з яких 753984 грн зумовлені змінами в кількості та якості продукції. Річний прибуток становить 13217 грн, що є додатковим показником ефективності. Термін окупності машини складає 0,37 року (~4,5 місяця), що свідчить про швидке повернення інвестицій. Лімітна ціна машини становить 2909821,60 грн, що значно перевищує її балансову вартість у 150000 грн, підтверджуючи економічну доцільність придбання.

Порівняльний аналіз економічних показників нової та базової машини показує, що склад устаткування майже ідентичний: обидві машини використовуються в одній кількості. Кількість обслуговуючого персоналу та рівень заробітної плати однакові, а

продуктивність не змінюється (110 кг/год). Однак витрати на електроенергію для нової машини вищі (3529 грн/рік проти 2634 грн/рік у базової). Затрати праці також залишаються на рівні 2088 люд.·год/од. наробітку. Балансова вартість нової машини (150000 грн) трохи перевищує базову (132500 грн).

Таблиця 5.2 – Економічні показники нової та базової машини

Розділ	Показник	Нова машина	Базова машина
Склад устаткування	Марка	СС-002	ІСМ-2,5
	Кількість	1	1
Обслуговуючий персонал	Професія – оператор Розряд – базовий 4 р., грн/міс	8000	8000
	Кількість, люд.	4	4
Продуктивність, од. наробітку	Змінна, кг/год	110	110
	Експлуатаційна, кг/год	110	110
Витрати електроенергії, кг(кВт·год)/од. наробітку		3529	2634
Затрати праці, люд.·год/од. наробітку		2088	2088
Балансова вартість машини, грн		150000	132500
Прямі експлуатаційні витрати по елементах, грн/од.наробітку	Заробітна плата:	139200	139200
	Амортизація	12500	26500
	Ремонт і технічне обслуговування	1875	1987
	Електроенергія	3529	2634
	Інші	-	-
	Всього	157104	170321
Інвестиційні вкладення, грн./од.наробітку		150000	-
Сукупні витрати, грн./рік		157104	170321

Щодо прямих експлуатаційних витрат, заробітна плата є однаковою (139200 грн), проте амортизаційні витрати нової машини нижчі на 14000 грн (52,8 %) і становлять 12500 грн проти 26500 грн у базової. Витрати на ремонт та технічне обслуговування для нової машини – 1875 грн, що на 112 грн (5,6 %) менше, ніж у базової (1987 грн). Витрати на електроенергію у нової машини на 895 грн (34 %) вищі, проте це компенсується іншими витратами. Загальні експлуатаційні витрати нової машини становлять 157104 грн, що на 13217 грн (7,8 %) менше, ніж у базової (170321 грн).

Оскільки інвестиційні вкладення для базової машини відсутні, а для нової становлять 150000 грн, ключовим показником є термін окупності. Завдяки економії

витрат та високому річному економічному ефекту нова машина окупається всього за 0,37 року (4,5 місяця), що є вкрай вигідним показником.

5.3 Висновки з розділу

1. Впровадження результатів дослідження аеродинамічного сепаратора колонного типу на підприємствах олійної галузі (ТОВ НВО «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ», ТОВ «ПОТОКИ», ТДВ «УКРОЛІЯПРОДУКТ», ПП «ВІКТОР і К», ТОВ «ГІДРОСЕНД», ТОВ «АГРОПРОІНВЕСТ 08») підтвердило його ефективність, що сприяло оптимізації технологічного процесу, зменшенню втрат олії, підвищенню вмісту протеїну у шроті, покращенню екологічних показників та зниженню витрат на енергоресурси, що робить дане обладнання економічно доцільним.

2. Впровадження розробленого аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насіннєвої суміші соняшнику СС-002 порівняно з аеродинамічним сепаратором ІСМ-2,5 є економічно доцільним, оскільки він забезпечує значний річний економічний ефект (767201 грн), має короткий термін окупності (0,37 року) та знижує сукупні витрати порівняно з базовою машиною, незважаючи на вищі витрати на електроенергію.

Ключові наукові результати розділу були опубліковані в роботах автора [25–30].

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності технологічного процесу тонкого очищення насіння соняшнику з відходів шляхом розробки конструкції аеродинамічного сепаратора колонного типу із раціональними технологічними і конструктивними параметрами, які дозволяють досягти задану якість продукції з мінімальними питомими енерговитратами. На основі проведених досліджень були зроблені такі висновки:

1. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему аеродинамічного сепаратора колонного типу, який призначений для тонкого очищення насіннєвих матеріалів, складається з кількох функціональних блоків. Зокрема, він містить завантажувальний блок, до якого входять завантажувальний бункер та віброживильник. Блок пневмосепарації включає джерело повітряного потоку з можливістю регулювання його інтенсивності в зоні сепарації, а також пневмосепаруючий канал, що має патрубки для подачі відходів, виходу очищеної фракції та видалення відходів. Також у конструкцію входить осадова камера з конусним бункером, через який сміття спрямовується в шнек-пастку, а повітря виводиться через віддушину. Передбачені окремі збірники для очищеного матеріалу та відходів. Відповідно до розробки, віброживильник додатково обладнаний електронним пристроєм керування коливаннями, а у нижній частині пневмосепаруючого каналу розташований повітророзподільник (аеродинамічний стабілізатор). Верхня частина каналу оснащена камерою розрідження, в якій встановлено відбійник, а також передбачено патрубків для виведення повітря і пилу.

2. Розроблений уточнений фізико-математичний апарат взаємодії компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику між собою і стінками аеродинамічного сепаратора колонного типу та їх руху під дією повітряного потоку. Фізико-математичний апарат базується на представленні компонентів відходів насіннєвої суміші соняшнику (ядро соняшнику, лущиння і дрібні частинки) у вигляді моделі скупчення сферичних субчастинок DEM різної кількості і діаметра. Складено систему диференціальних рівнянь руху компонентів відходів насіннєвої суміші з урахуванням сили опору повітряного потоку, підйомної сили Сафмана, підйомної сили Магнуса, виштовхувальної сили

Архімеда, контактної сили Герца. Уточнений фізико-математичний апарат чисельного моделювання DEM-CFD використано в подальшому моделювання в програмі Simcenter Star-CCM+.

3. В результаті першого етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі отримані траєкторії руху її компонентів. Розраховані рівняння регресії другого порядку залежності горизонтальної відстані польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) y_{opt} від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і швидкості повітряного потоку V_a . З урахуванням умови мінімізації y_{opt} і V_a для компонентів, ефективний діаметр яких знаходить в межах 0,009–0,013 м, отримана швидкість формалізованого стрічкового конвеєра складає $V_{p-opt} = 0,073$ м/с і відстань польоту компонентів (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y_{opt} = 0,2195$ м. Прийнято поперечний переріз пневмосепаруючого каналу – квадрат із стороною 220 мм. В результаті другого етапу чисельного моделювання процесу взаємодії потоків відходів насінневої суміші і повітря в пневмосепаруючому каналі отримано їх візуалізацію для різних комбінацій факторів. Розраховано рівняння регресії другого порядку залежності вмісту ядер соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності процесу сепарації q і об'ємних витрат повітря (продуктивність генератора повітряного потоку) Q_a від висоти шару відходів насінневої суміші соняшнику, що подається, h_p і швидкості повітряного потоку V_a . Враховуючи умову максимізації η_{k-k} і q при мінімальному значенні Q_a отримані раціональні значення факторів досліджень: $h_p = 0,036$ м, $V_a = 3,42$ м/с. При цьому $\eta_{k-k} = 0,94$, $q = 122,9$ кг/год, $Q_a = 588$ м³/год.

4. В результаті третього етапу чисельного моделювання процесу сепарації компонентів відходів насінневої суміші соняшнику в камері розрідження отримані траєкторії руху і розподіли її компонентів. Розраховані рівняння регресії другого порядку залежності відстань між піками розподілів лушпиння соняшнику і дрібних частинок $\Delta y'$ в камері розрідження від ефективного діаметра D_p , швидкості подачі компонентів V_p і радіуса кривизни верхньої грані камери розрідження R . Враховуючи умову максимізації $\Delta y'$ отримане раціональне значення для точки перетину розподілів компонентів суміші (лушпиння соняшнику і дрібних частинок) $y'_{int} = 0,43$ м. В результаті четвертого етапу

чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу розраховані рівняння регресії коефіцієнта розподілу δ розробленого аеродинамічного сепаратора від вмісту компонентів в насіннєвій суміші ψ_h , ψ_d , ψ_k і подачі суміші q та швидкості повітряного потоку V_a . Найменше значення коефіцієнта розподілу δ спостерігається для наступного вмісту компонентів: $\psi_d = 0,331$, $\psi_h = 0,335$, $\psi_k = 0,334$. Для забезпечення високої якості сепарації ($\delta \rightarrow \max$) при достатньо високій продуктивності ($q \rightarrow \max$) і зменшених енерговитрат ($V_a \rightarrow \min$) встановлені раціональні значення факторів досліджень: $q = 133$ кг/год, $V_a = 2,46$ м/с. При цьому коефіцієнт розподілу $\delta = 0,92$.

5. Результати експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора колонного типу показали, що модель, яка описує залежність вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} (4.8), є значущою та адекватною. Зазначена модель включає нелінійні залежності від всіма факторами досліджень: продуктивність віброживильника q , швидкість повітряного потоку V_a і вміст ядер у вихідній суміші ψ_k . Додатково були отримані рівняння, які описують залежності коефіцієнта розподілу δ (4.10) і споживної потужності P (4.12) від факторів досліджень. Для підвищення ефективності роботи аеродинамічного сепаратора колонного типу необхідним є досягнення умови максимізації вмісту ядер і насіння соняшнику в області забірника ядер η_{k-k} , продуктивності віброживильника q та мінімізації його споживної потужності P . Рішенням заявленої компромісної задачі є два рівняння, які вказують на зв'язок продуктивності віброживильника q (4.15) і швидкості повітряного потоку V_a (4.16) від вмісту ядер і насіння соняшнику у суміші ψ_k . Отриманні залежності використані для налаштування операційних параметрів аеродинамічного сепаратора колонного типу і досягнення максимальної ефективності його роботи.

6. Впровадження розробленого аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насіннєвої суміші соняшника СС-002 у порівнянні з аеродинамічним сепаратором ІСМ-2,5 є економічно доцільним, оскільки він забезпечує значний річний економічний ефект (767201 грн), має короткий термін окупності (0,37 року) та знижує сукупні витрати в порівнянні з базовою машиною, незважаючи на вищі витрати на електроенергію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Almeida, D. V., Kolinjivadi, V., Ferrando, T., Roy, B., Herrera, H., Gonçalves, M. V., & Van Hecken, G. (2023). The “Greening” of Empire: The European Green Deal as the EU first agenda. *Political Geography*, 105: 102925. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2023.102925>.
2. Pawłowski, K. P., & Sołtysiak, G. (2024). The Potential Impact of the European Green Deal on Farm Production in Poland. *Sustainability*, 16(24), 11080. <https://doi.org/10.3390/su162411080>.
3. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України (2017). Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна». 176 с. <https://me.gov.ua/view/22e86f94-a9dd-421e-adcb-e38748a4b7cb>
4. Буряк, Є. В., Редько, К. Ю., Чорновол, А. О., & Орленко, О. В. (2022). Соціально-економічні аспекти сталого розвитку України в умовах війни (євроінтеграційні аспекти). *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*, 34, 135-143. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7221052>
5. Ревтьо, О.Я., & Набока, В.В. (2023). Соняшник в Україні – стан, проблеми, перспективи (оглядова). *Таврійський науковий вісник*, 128: 170–178. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.128.23>.
6. Гайдаш, Є.В., Кузьменко, О.Р., & Белка, О.В. (2023). Основні олійні культури в реєстрі сортів рослин України. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 35: 115–126. <https://doi.org/10.36710/IOC-2023-35-10>
7. Статистичний щорічник України за 2022 рік. (2023). Державна служба статистики України. За редакцією І. Є. Вернера. 387 с. https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_22_u.pdf
8. Державна служба статистики України. Держстат України, 1998-2025. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
9. Степаненко, С. П. (2020). Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 687 с. <https://imaap.org.ua/info/attach.php?id=564>

10. Кудрявцев, І.М., & Бардадим, О.В. (2024). Патент України на корисну модель №155711. Сортувальний агрегат колонного типу для тонкого очищення насіннєвих матеріалів. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202300562. Заявл. 15.02.2023. Опубл. 03.04.2024, бюл. № 14/2024

11. Бардадим, В.К., Кудрявцев, І.М., Бардадим, О.В., Ярошкін, В.П., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2024). Патент України на корисну модель №155727. Технологічна лінія пресування соняшникової олії повного циклу на базі адаптивних сортувальних машин із програмованими параметрами. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202303069. Заявл. 23.06.2023. Опубл. 03.04.2024, бюл. № 14/2024

12. Бардадим, В.К., Кудрявцев, І.М., Бардадим, О.В., Ярошкін, В.П., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2024). Патент України на корисну модель №156504. Спосіб сепарації сипучої суміші у текучому двостадійному середовищі. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202305759. Заявл. 29.11.2023. Опубл. 03.07.2024, бюл. № 27/2024

13. Чурсінов, Ю.О., Кудрявцев, І.М., & Луценко, М.В. (2022). Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2 (12): 93–99. DOI: 10.20998/2413-4295.2022.02.14.

14. Кудрявцев, І.М., & Мельник, С.М. (2022). Проблеми визначення технологічної ефективності сортувального обладнання. Веб-сайт «Elevatorist» [https://elevatorist.com/blog/read/822-problemi-viznachennya-tehnologichnoyi-efektivnosti - sortuvalnogo-obladnannya](https://elevatorist.com/blog/read/822-problemi-viznachennya-tehnologichnoyi-efektivnosti-sortuvalnogo-obladnannya).

15. Кудрявцев, І.М., Чурсінов, Ю.О., & Луценко, М.В. (2022). Innovative sorting equipment for the food industry. Матеріали І міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» присвячена 100-річчю Дніпровського державного аграрно-економічного університету (20 травня 2022 р.). Дніпро, “Середняк Т.К.”: 116–118.

16. Кудрявцев, І.М., & Чурсінов, Ю.О. (2022). Перспективи сортування відходів пшениці. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та практичні питання аграрної науки» (18 травня 2022 р.). Дніпро, ДДАЕУ. Ч. 1: 293–295.

17. Кудрявцев, І.М., Луценко, М.В., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2023). Аспекти сталого розвитку підприємства в умовах «циркулярної економіки». Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи» (20-21 березня 2023 р.). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»: 736–738.

18. Кудрявцев, І.М. (2024). Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження аеродинамічного сепаратора. Вібрації в техніці та технологіях, 2 (113): 132–142. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-15

19. Kudriavtsev, I. (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (125): 47–55. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-5

20. Кудрявцев, І.М., Кошулько, В.С., & Мельник, М.М. (2024). Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику і експериментальних результатів. Матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 р.). Запоріжжя, ТДАТУ: 27–32.

21. Koshulko, V., & Kudriavtsev, I. (2024). Justification of the design of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 10 (41), II: 113-122. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.113-122

22. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Бардадим, В.К., Кудрявцев, І.М., Мельник, М.М., Ярошкін, & В.П. (2024). Авторське право на службовий твір №7286. Брошура «Машини сортувальні для сипучих матеріалів. Програма та методики випробувань». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 23.10.2024. Опубл. 29.11.2024, бюл. №84.

23. Кудрявцев, І.М., Кошулько, В.С., & Мельник, М.М. (2024). Порівняльний аналіз даних чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику та експериментальних результатів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (26–27 листопада 2024 р.). Харків, ДБУ: 417–419.

24. Kudriavtsev, I., Koshulko, V., Sova, N., & Leusenko, O. (2025). Results of experimental studies of a column-type aerodynamic separator. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 1 (128): 45–54. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-5.

25. Кудрявцев, І.М. (2023). Авторське право на службовий твір №121609. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів СС-012. Настанови з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 06.12.2023. Опубл. 29.12.2023, бюл. № 78.

26. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Бардадим, В.К., Кудрявцев, І.М., Мельник, М.М., & Ярошкін, В.П. (2024). Авторське право на службовий твір № 7242. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів лабораторна СС-002-05. Настанова з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 12.09.2024. Опубл. 29.11.2024, бюл. №84.

27. Чурсінов, Ю.О., Луценко, М.В., & Кудрявцев, І.М. (2022). Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. *Наука технології інновації*, 2 (22): 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08.

28. Чурсінов, Ю.О., Кудрявцев, І.М., Луценко, М.В., & Мельник, М.М. (2023). Innovations of the sorting process in the technology of oil extraction production. *Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи*. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (20-21 березня 2023 р.). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»: 467–468.

29. Кудрявцев, І.М., Бардадим, О.В., & Мельник, С.М. (2023). Концепція «NO HUSKS» (без лушпиння) та перспективи її впровадження у шеретувально-віяльних відділеннях олійно-екстракційних підприємств. Тези доповідей II Всеукраїнської

науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молодь – науці і виробництву: Актуальні питання харчової промисловості» (10 травня 2023 р.). Херсон: ХДАЕУ: 78–79.

30. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Кудрявцев, І.М., & Мельник, М.М. (2024). Аспекти функціонування олійножирового підприємства в умовах кризи та інженерія пост кризового періоду. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Особливості функціонування економіки в умовах кризи». (31 січня 2024 р). Черкаси, Східноєвропейський центр наукових досліджень: 188–192.

31. Кириченко, В.В. (2016). Основи управління продукційним процесом польових культур. Харків. 711 с.

32. Камінський, В.Д., Бабіч, М.Д. (2000). Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції: навч. посібник для вузів. Одеса: Аспект. 460 с.

33. Кюрчев, С.В. (2018). Методика дослідження впливу вологості насіння соняшника на раціональну швидкість повітряного потоку у пневмогравітаційному сепараторі. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Київ: НУБІП, 296: 139–141.

34. Кюрчев, С.В., & Колодій, О.С. (2012). Аналіз методів збільшення врожайності сільськогосподарських культур та вимоги до сепаруємого матеріалу. Збірник наукових праць. Серія: Технічні науки. Вінниця: ВНАУ, 11, 2 (66): 322–327.

35. Кюрчева, Л.М., Григоренко, О.В., & Кюрчев, С.В. (2013). Технологія переробки та зберігання сільськогосподарської продукції: навч. посібник. Мелітополь: ТОВ «Видавничий будинок ММД». 26 с.

36. Михайлов, Є.В., Дудка, В.С., Білокопитов, О.О., & Бойко, С.С. (2010). Визначення факторів і параметрів процесу попередньої очистки зерна. Праці таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ, 10 (2): 120–125.

37. Михайлов, Є.В. (2014). Методологія обґрунтування складу і функціональних параметрів технічних засобів післязбиральної обробки зерна (на прикладі півдня України): автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.05.11. Мелітополь. 36 с.

38. Адамчук, В.В., Прилуцький, А.Н., Заришняк, А.С., & Степаненко, С.П. (2014). Концепція комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання зерна в сільськогосподарських підприємствах України. В зб.: *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 99: 40–56.

39. Ольшанський, В.П., Бредихін, В.В., Лук'яненко, В.М., Півень, М.В., Сліпченко, М. В., & Харченко, С. О. (2017). *Теорія сепарування зерна: монографія*. Харків: Планета Прінт. 803 с.

40. Бредихін, В.В. (2003). Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвих сумішей за густиною насіння. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків. 20 с.

41. Shevchenko, I.A., & Aliev, E.B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1): 129–138.

42. Шевченко, І.А., & Алієв, Е.Б. (2018). Дослідження фотоелектронного процесу визначення забарвлення насіння олійних культур. *Техніка і технології АПК. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*, 4 (103): 40–43.

43. Алієв, Е.Б., & Яропуд, В.М. (2019). Техніко-технологічне забезпечення прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшника. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях»*. Вінниця, 1 (92): 40–47.

44. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF*, 50: 12–22.

45. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., & Kaminski, J.R. (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators. *MECHANIKA*, 27(4): 311–320. DOI: 10.5755/j02.mech.27647

46. Bredykhin, V., Gurskyi, P., Alfeyorov, O., Bredykhina, K., & Pak, A. (2021). Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. *European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1, 111: 79–86.

47. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S., & Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal

fractionation of grain materials based on their density. *Based on Their Density*, 4/1, 112: 54–61.

48. Bredykhin, V., Tikunov, S., Slipchenko, M., Aifyorov, O., Bogomolov, A., Shchur, T., Kocira, S., Kiczorowski, P., & Paslavsky, R. (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. *Sciencdo. Agricultural Engineering*, 27 (1): 241–253. DOI: 10.2478/agriceng-2023-0018

49. Лук'яненко, В.М., Никифоров, А.О., Лук'яненко, О.В., & Никифорова, А.П. (2019). Конструктивні заходи, щодо інтенсифікації процесу сепарування насіннєвих сумішей на вібраційних насіннеочисних машинах. *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка*. Харків, 198: 277–283.

50. Степаненко, С.П., & Никифоров, А.О. (2024). Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасіннєвих матеріалів. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. Харків, 24: 52–68.

51. Никифоров, А.О. (2020). Дослідження ефективності застосування аеродинамічних екранів при обробці на вібраційних машинах насіння з вираженими аеродинамічними властивостями. *The 7 th International scientific and practical conference “Science, society, education: topical issues and development prospects”* (June 7-9) SPC “Sci-conf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine: 31–38.

52. Rosaboev, A.T., & Shaimova, S.P. (2020). Neoretical studies of sorting rice seeds in the electric field. *E3S Web of Conferences* 216, 01144. DOI: 10.1051/e3sconf/20202160114

53. Abdel-Salam, M., Ahmed, A., & El-Kishky, H. (2004). Seeds sorting by electrostatic separation: an experimental study. *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*. Boulder, CO, USA: 377–380. DOI: 10.1109/CEIDP.2004.1364266.

54. Михайлов, А.Д. (2012). *Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна і насіння*. Харків, ХНТУСГ ім. П. Василенка. 78 с.

55. Uhlarik, A., Popov, S., Karagić, Đ., Ponjićan, O., & Turan, J. (2018). Alfalfa seed cleaning using a magnetic separator. *Journal on Processing and Energy in Agriculture* 22 (4): 192–195.

56. Алієв, Е.Б. (2022). Автоматичне фенотипування насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Київ: Аграрна наука. 104 с.

57. Aliiev, E. (2019). Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. [Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника]. *Scientific Horizons*, 5 (78): 23-30. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30

58. Алієв, Е.Б. (2018). Патент на корисну модель України № 136829, МПК (2006) B07B 13/18, (2006.01) B07B 4/00. Фотоелектронний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № u201902091. Заявл. 01.03.2019. Опубл. 10.09.2019, бюл. № 17.

59. Sinha, J.P., Kumar, A., & Weissmann, E. (2023). Seed Processing for Quality Upgradation. In: Dadlani, M., Yadava, D.K. (eds) *Seed Science and Technology*. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-5888-5_10

60. ДСТУ 4694:2006. (2007). Соняшник. Олійна сировина. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України. 16 с.

61. ДСТУ 7011:2009. (2010). Соняшник. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України. 13 с.

62. Алієв, Е.Б. (2019). Вимоги до приймання і заготівлі насіння соняшнику. Журнал «Пропозиція», № 07. Фастів: ТОВ «Юнівест Медіа», 176–179.

63. Алієв, Е.Б. (2019). Переробка олійної сировини – сучасні технології та перспективи. Журнал «Пропозиція», № 03. Фастів: ТОВ «Юнівест Медіа», 204–209.

64. Алієв, Е.Б. (2019). Технологія і технічні засоби комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива. Журнал «Пропозиція», № 05. Фастів: ТОВ «Юнівест Медіа», 187–193.

65. Ushkalov, V., Yakubchak, O.M., Taran, T.V., Midyk, S.V., & Dudchenko, N.YA. (2020). Selected quality indicators of sunflower seed and oil sold in Ukraine. *Ukrainian Journal of Veterinary Sciences*, 11(2): 53–62. DOI: 10.31548/ujvs2020.02.005
66. Mikhailov, E., Postnikova, M., Zadosnaia, N., & Afanasyev, O. (2019). Methodological Aspects of Determining Parameters of a Scalper-Type Air-Sieved Separator Airflow. In: Nadykto, V. (eds). *Modern Development Paths of Agricultural Production*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-14918-5_14
67. Михайлов, Є.В., Задосна, Н.О. (2015). Аеродинамічні властивості складових олійної сировини соняшнику. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 15 (4): 28–38.
68. Алієв, Е.Б., & Шевченко, І.А. (2017). Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*, 3 (769): 63–65.
69. Алієв, Е.Б. (2024). Дослідження фрикційних властивостей поверхні насіння соняшника. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 37: 127–138. DOI: 10.36710/IOC-2024-37-12
70. Задосна, Н.О. (2015). Аеродинамічні властивості складових олійної сировини соняшнику. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК»*. Технічні науки. Мелітополь: ТДАТУ, 4 (2): 53–55.
71. Поляков, О.І., & Щербак, А.Д. (2022). Продуктивність соняшнику під впливом мінеральних добрив і регуляторів росту. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 33: 111–122. DOI: 10.36710/IOC-2022-33-11
72. Тивончук, Я.А., & Дубініна, М.В. (2024). Оцінка виробництва насіння соняшнику в Україні. *Міжнародний форум «Продовольча безпека України в умовах війни і післявоєнного відновлення: глобальні та національні виміри»* (м. Миколаїв, 30-31 травня 2024 р.). Миколаїв: МНАУ, 292–294. DOI: 10.31521/978-617-7149-78-0-95
73. Орлов, О. (2020). Топ чинників, які лімітують врожайність соняшнику. *Журнал «Агроном»*. <https://www.agronom.com.ua/top-chynnykiv-yaki-limituyut-vrozhajnist-sonyashnyku/>

74. Богомоллов, О.В., Іващенко, С.Г., Ільїна, Н.О., Бойко, Є.В., Бочарніков І.О., Трепілець, О.Ю., & Бурченко, Д.А. (2024). Виділення домішок олійної сировини з відходів виробництва олієекстрактних підприємств. Матеріали XX міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті» (4–5 квітня 2024). 60 с.
75. Михайлов, Є.В., Кюрчев, С.В., Колодій, О.С., Задосна, Н.О., Верхованцева, В.О., Чернишова, Л.М., & Паляничка Н.О. (2019). Технічні засоби післязбиральної бробки насіння соняшнику: монографія. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр FORWARD PRESS. 203 с.
76. Shevchenko, I., & Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*. 12 (4): 135–142.
77. Ольховський, В.О., & Дударєв, І.М. (2021). Способи сепарування та сепаратори зернової маси. *Сільськогосподарські машини*, 47: 103–112. DOI: 10.36910/acm.vi47.655
78. Seifi, M. R., & Alimardani, R.. (2010). Moisture-Dependent Physical Properties of Sunflower Seed (SHF8190). *Modern Applied Science*, 4 (7): 135–143.
79. Gupta, R. K., & Das, S. K. (1997). Physical properties of sunflower seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66: 1–8.
80. Ghodsevali, A., & Vafaei, A. (2008). Studying of physical properties of sunflower in Golestan province. *The fifth conference of agricultural machinery and mechanization, Mashad, Iran*, 306 p.
81. Jafari, S., Khazaei, J., Arabhosseini, A., Massah, J., & Khoshtaghaza, M.H. (2011). Study on mechanical properties of sunflower seeds. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 14 (1): 1–11.
82. Chavoshgoli, Es., Abdollahpour, Sh., Abdi, R., & Babaie, A. (2014). Aerodynamic and some physical properties of sunflower seeds as affected by moisture content. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 16 (2): 136–142.
83. Jafari, S. (2008). Design and construction a laboratory sunflower seed dehuller machine. A thesis submitted to Graduate Studies Office in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanic of Agricultural Machinery. Tehran, Iran, (in farsi).

84. Khodabakhshian, R., B. Emadi, M. H. Abbaspour Fard. (2009). Aerodynamic properties of sunflower seed, kernel and its hull affected by moisture content and size, azargol variety as a case study. International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand.

85. Алієв, Е.Б., Ведмедєва, К.В., Махова, Т.В. (2024). Дослідження міцності насіння соняшнику при стиску. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 36: 6–15. DOI: 10.36710/IOC-2024-36-01

86. Алієв, Е.Б. (2017). Результати чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією вібруючого решета. Механізація та електрифікація сільського господарства, 6 (105): 97–103.

87. Харченко, С.О. (2018). Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків. 40 с.

88. Balogh, L. (2008). Sunflower species (*Helianthus* spp.). The most important invasive plants in Hungary. Edited by Zoltán Botta-Dukát and Lajos Balogh, 227–255.

89. Алієв, Е.Б., Пацула, О.М., Гриценко, В.Т. (2017). Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: науково-методичні рекомендації. Запоріжжя: СТАТУС. 96 с.

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

91. Степаненко, С.П. (2020). Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 687 с.

92. Кюрчев, С.В. (2019). Механіко-технологічне обґрунтування післязбиральної обробки та зберігання насіння зернових і олійних культур: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Глеваха. 372 с.

93. Задосна, Н.О. (2020). Обґрунтування параметрів та режимів роботи жалюзійного повітророзподільника пневморешітного сепаратора олійної сировини соняшника: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь. 260 с.

94. Харченко, С.О. (2018). Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків, 516 с.
95. Богомолів, А.В. (2006). Наукове обґрунтування енергозберігаючих процесів та обладнання для сепарації харчової сипкої сировини: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Харків, 277 с.
96. Колодій, О.С. (2015). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 23 с.
97. Богатирьов, Д.В. (2005). Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 176 с.
98. Васильковський, О.М. (2001). Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрово решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кіровоград, 21 с.
99. Дадак, В.О. (2015). Обґрунтування параметрів та режимів роботи пневмосепаратора дрібнонасінневих сумішей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 20 с.
100. Лещенко, С.М. (2010). Обґрунтування параметрів пневмосепаруючої системи інерційного прямоточного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 20 с.
101. Петренко, Д.І. (2011). Обґрунтування параметрів відцентрово – пневматичного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кіровоград, 25 с.
102. Степаненко, С.П. (2008). Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 183 с.
103. Дерев'янка, Д.А. (2018). Механіко-технологічне обґрунтування процесів зниження травмування насіння зернових культур технічними засобами: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Тернопіль, 47 с.
104. Єрмак, В.П. (2003). Обґрунтування способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11. Луганськ, 17 с.

105. Цуркан, О.В. (2020). Вібромеханічна інтенсифікація сушіння насіння баштанних культур у процесі післязбиральної обробки: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.11. Вінниця – Глеваха, 449 с.

106. Лупко, К.О. (2023). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів селекційно-насінницького трієра для сепарації насіння дрібнонасінневих культур. дис. ... д-ра. філософії: 133 Галузеве машинобудування. Дніпро, 240 с.

107. Сало, В.М., Лузан, П.Г., & Богатирьов, Д.В. (2013). Наукові основи сепарації зерна на решетах з клиноподібною формою отворів: монографія. Кіровоград: СПД ФО Лисенко В.Ф., 148 с.

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

109. Кобець, А.С., Чурсінов, Ю.О., Черних, С.А., Сабадаш, М.П., Грекова, Н.В., & Канунніков, В.П. (2013). Машини і обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна. Дніпропетровськ: ДДАУ, 766 с.

110. Михайлов, Є.В. (2012). Післязбиральна обробка зерна у господарствах півдня України. Мелітополь: ВПЦ Люкс, 258 с.

111. Анеляк, М.М., Кузьмич, А.Я., Грицака, О.М., Степаненко, С.П., & Недовесов В.І. (2023). Науково-технічні основи процесів та технічні засоби для збирання врожаю зернових, олійних культур та незернової частини врожаю: монографія. Ніжин: Лисенко М.М., 176 с.

112. Днесь, В.І., Кудринський, Р.Б., Скібчик, В.І., & Степаненко, С.П. (2023). Системне обґрунтування структури та використання технологічних комплексів машин для збирання й післязбиральної обробки врожаю зернових культур: монографія. Ніжин: Лисенко М. М., 200 с.

113. Адамчук, В.В., Савченко, І.Ф., Тарасенко, В.В., Борис, А.М., Грицишин, М.І., Лисанюк, В.Г., Ящук, А.І., & Рихлівський, П.А. (2023). Розвиток технологій і техніки для виробництва продукції овочівництва: монографія. Ніжин: Лисенко М.М., 192 с.

114. Capitani, M., Scilingo, A., Calandri, E., Giménez, M.A., Martínez, M.L., Ixtaína, V., Silva, N.C., Pérez Camino, M.C., Bassett, N., Delgado-Soriano, V., Ann-Mari,

R., Repo-Carrasco-Valencia, Haros, C. M., & Tomas, M. (2023). Fractionation of Seeds or Grains. *Latin-American Seeds*. 54 p.

115. Aliev, E.B., Yaropud, V.M., Dudin, V.Yr., Pryshliak, V.M., Pryshliak, N.V., & Ivlev, V.V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 56 (3): 119–128.

116. Алієв, Е.Б. (2018). Патент на корисну модель України 136828, МПК В07В 4/02 (2006.01). Адаптивний аеродинамічний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № u201902090. Заявл. 01.03.2019. Опубл. 10.09.2019, бюл. № 17.

117. Алієв, Е.Б., & Гаврильченко, О.С. (2019). Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насіннєвого матеріалу. *Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві»*, 201: 132–140.

118. Алієв, Е.Б., Бабин, І.А. & Сокол, С.П. (2023). Чисельне моделювання процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1 (120): 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1

119. Степаненко, С.П., Прилуцький, А.Н., & Попадюк, І.С. (2017). Механіко-технологічне обґрунтування операцій технологічного процесу пневмовихрового сепарувального пристрою. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, 258: 70–82.

120. Котов, Б.І., Спірін, А.В., Твердохліб, І.В., Степаненко, С.П., Швидя, В.О. (2017). До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів. *Процеси та обладнання переробних та харчових виробництв*, 4(99): 51–55.

121. Степаненко, С.П., & Котов, Б.І. (2018). Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник*, 7 (106): 82–89.

122. Aliiev E., & Lupko K. (2021). Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. *Scientific Horizons*. 24(3): 75–86. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.75-86

123. Aliiev E., Lupko K., Kobets O. (2023). Development of adaptive seed separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 6 (65), 1: 103–126. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8

124. Алієв, Е. Б., Лупко, К. О. (2023). Патент України на корисну модель №152573. МПК В07В 1/08 (2006.01). Адаптивний селекційно-насінницький трієр. Заявник: Інститут олійних культур національної академії аграрних наук України, № u202201745. Заявл. 26.05.2022. Опубл. 15.03.2023, бюл. № 11.

125. Аеродинамічні зернові сепаратори ІСМ. ФОП Тарасевич В.А. <https://ism-separator.com/>

126. Сепаратори САД. ТОВ НВП Аеромех. <https://aeromehcad.com.ua/category/separatori-sad/>

127. Indented Cylinder Separator HSR 1010–16010 R. Cimbria https://www.cimbria.com/content/dam/public/grain-and-protein/cimbria/data-sheets/indented-cylinder-separator/Indented_Cylinder_HSR_1010_16010_R_Datasheet_EN.pdf

128. Трієри БТХМ. ТОВ «НВО «АГРО-СИМО-МАШБУД». <https://simo.com.ua/ua/obladnannya/trieryi/trier-bthm>

129. Зерновий сепаратор ГОРИЗОНТ-К-130. ТОВ «ОЛИС». <https://olis.com.ua/oborudovanie/ochischennya-zerna/gorizont/130-3/>

130. Очисна-калібруюча машина Фадєєва. ТОВ «СК+К». <https://fadeevagro.com/products/ochysna-kalibruyucha-mashyna-fadyeyeva-okmf/>

131. Пневмосортувальний стіл СПС-3.5. ТОВ «ОЛИС». <https://olis.com.ua/oborudovanie/ochischennya-zerna/pnevmosortirovochnyj-stil/sps3-5/>

132. Вібропневмостіл ВПС. ТОВ «ФОРУМАГРОПРОМ». <https://agrosort.com/vibropnevmostol/>

133. Алієв, Е. Б. (2019). Патент України на винахід 120235, МПК (2006) В07В 1/00, В07В 1/40 (2006.01), В07В 1/42 (2006.01), G05В 13/00, G05В 15/00. Адаптивний

віброрешітний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № а201811084. Заявл. 09.11.2018. Опубл. 25.10.2019, бюл. № 20.

134. Kharchenko, S., Samborski, S., Paśnik, J., & Kharchenko, F. (2025). The natural oscillations of perforated sift-ing surfaces with epicycloidal holes. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(1): 256–268.

135. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., Korzec-Strzałka, I., & Andrii, S. (2024). Dynamics of Loose Materials and Oscillations of Cylin-drical Perforated Sifting Surfaces with Volumetric Riffles. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(8): 238–255.

136. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., & Kotliarevskyi, I. (2024). Determination of Hole Blocking Conditions for Perforated Sifting Surfaces. *Advances in Sci-ence and Technology Research Jour-nal* 2024, 18(5): 342–360.

137. Kharchenko, S., Samborski, S., Kharchenko, F., & Paśnik, J. (2023). Numerical Study of the Natural Os-cillations of Perforated Vibrating Surfaces with Holes of Complex Ge-ometry. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2023, 17(6), 73–87.

138. Харченко, С.О., Біловод, О.І., Абдуєв, М.М., Литвиненко, В.В., & Вольвач, Т.С. (2024). Дослідження рівномірності повітряного потоку в робочих зонах пневмосепарувальних каналів. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та ав-томатизація виробничих процесів*, (2 (56): 90–100.

139. Шевченко, І. А., & Алієв, Е. Б. (2021). Патент України на винахід 122809, МПК (2006), В03В 4/02 (2006.01), В07В 4/00, В07В 13/18 (2006.01). Адаптивний вібропневматичний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № а201807029. Заявл. 22.06.2018. Опубл. 06.01.2021, бюл. № 1.

140. Кошулько, В.С., Чурсінов, Ю.О., & Сова, Н.А. (2023). Результати дослідження процесу віброударної сепарації вівса на кормові цілі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 7(38), II: 75–83. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.75-83

141. Кошулько, В.С., Чурсінов, Ю.О., & Сова, Н.А. (2023) Вплив динамічної нерівномірності коливань робочого столу падді-машини на сепарування зернових сумішей. Сільськогосподарські машин, 49: 90-98. DOI: 10.36910/acm.vi49.1024
142. Nykyforov, A., Antoshchenkov, R., Halych, I., Kis-Korkishchenko, L., Kis, V., Dombrovska, A., & Kilimnik, I. (2023). Regression models for assessing the efficiency of vibratory separation of parsnip seeds taking into account air dynamics based on numerical simulation and field experiment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies [this link is disabled](#), 2 (1-122): 40–51. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.275592
143. Nykyforov, A., Antoshchenkov, R., Halych, I., Kis, V., Polyansky, P., Koshulko, V., Tymchak, D, Dombrovska, A., & Kilimnik, I. (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(1 (116): 24–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253657
144. Nykyforov, A., Nykyforova, A., Antoshchenkov, R., Antoshchenkova, V., Diundik, S., & Mazanov, V. (2021). Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account the aerodynamic forces and moments. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (111): 70–78. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232508
145. Bredykhin, V., Gurskyi, P., Alforyov, O., Bredykhina, K., & Pak, A. (2021). Improving the Mechanical-Mathematical Model of Grain Mass Separation in a Fluidized Bed. Euro-pean Journal of Enterprise Technolo-gies, 3(1 (111): 79–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232017
146. Slipchenko, M., Bredykhin, V., Kis-Korkishchenko, L., Pak, A., Alforyov, O. (2023). Construction of a physi-cal-mathematical model of oscilla-tions of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7 (124): 89–97. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.281425
147. Slipchenko, M., Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Alforyov, O., Pak, A. (2023). Constructing a physical-mathematical model of grain mass self-heating by a rod

site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(8 (125): 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.287391

148. Bredykhin, V., Tikunov, S., Slipchenko, M., Aifyorov, O., Bogomolov, A., Shchur, T., Kocira, S., Kiczorowski, P., Paslavskyy, R. (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering, 27 (1): 241–253. DOI: 10.2478/agriceng-2023-0018

149. Нестеренко, О.В. (2017). Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.11.Кропивницький, 21 с.

150. Повітряний зерновий сепаратор ПС-60. 3СМ ВІМ. <https://bim-agritech.com/uk/povitryanyu-separator-zerna-ps-60>

151. Сепаратор зерна і круп АСХ-10. Хорольський механічний завод. <https://smart.mehzavod.com.ua/catalog/separatory-vozdushnye/askh-10/>

152. Повітряний сепаратор СВО-1. ТОВ «ОЛІС». <https://olis.com.ua/oborudovanie/ochischennya-zerna/povitryany-separator-svo-1/>

153. Машина для очищення зерна ІСМ ЦОК. ХЗЗО Харківський завод зерноочисного обладнання. <https://ismgrain.com.ua/goods/ekologichni-mashini-dlya-ochishchennya-zerna-ism-tsok/>

154. Принцип роботи аеродинамічних сепараторів. Компанія «Агросепмаш». <https://agrosepmash.ua/uk/princip-roboti-aerodinamichnix-separatoriv/>

155. Алієв, Е.Б. (2017). Результати чисельного моделювання механіко-технологічного процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією повітряного потоку. Вісник Житомирського національного агроекологічного університету, 1 (58), 1: 173–180.

156. Алієв, Е.Б., & Гаврильченко, О.С. (2019). Обґрунтування автоматизованої системи керування потоком повітря в аеродинамічному сепараторі насіннєвого матеріалу. Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві», 201: 132–140.

157. Степаненко, С.П., & Котов, Б.І. (2018). Теоретичні дослідження руху повітряного потоку при введенні в нього зернових сумішей. Вісник Львівського Національного аграрного університету. Серія: Агроінженерні дослідження, 22: 47–52.

158. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Shvydia, V., Kalinichenko, R., Kharchenko, S., Shchur, T., Kocira, S., Kwaśniewski, D., Dzik, D. (2022). To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. *Processes*, 10, 1929. DOI: 10.3390/pr10101929

159 Котов, Б.І., Степаненко, С.П. (2019). Дослідження руху частинок зернового матеріалу у вертикальному каналі пневмогравітаційного класифікатора. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 49: 116–125. DOI: 10.32515/2414-3820.2019.49.116-125

160 Алієв, Е.Б., Пацула, О.М., & Кутіщев, В.Л. (2017). Методика чисельного моделювання процесу переміщення насіннєвого матеріалу олійних культур під дією вібруючого решета. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції. «Сучасні напрями селекції, технології вирощування та переробки олійних культур» (16 листопада 2017 р.). Запоріжжя: ІОК НААН, 170–171.

161 Aliiev, E.B. (2018). Results of the experimental study of separation process seeds in aerodromic separator. Інноваційні технології та сучасні селекційні досягнення у виробництві олійної сировини. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (26 жовтня 2018 р.). Запоріжжя: ІОК НААН, 70–71.

162 Aliev, E.B. (2017). Modeling of the mechanical and technological processes for the separation of oilseeds. International research and practice conference «Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences»: Conference Proceedings. December 27-28, 2017. Radom, Republic of Poland. Vol. 19. No 3. P. 107-110.

163 Алієв, Е.Б., Бабин, І. А. Сокол, С.П. (2023). Чисельне моделювання процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1 (120): 5-13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1.

164. Zhao, H., & Zhao, Y. (2020). CFD-DEM simulation of pneumatic conveying in a horizontal pipe. *Powder Technol.* 373: 58–72. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.054>
165. Wiącek, J. (2016). Geometrical parameters of binary granular mixtures with size ratio and volume fraction: experiments and DEM simulations. *Granular Matter.* 18: 42 <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0642-0>.
166. Matsushima, T., & Saomoto, H. (2002). Discrete element modeling for irregularly shaped sand grains, *Proc. NUMGE2002: numerical methods in geotechnical engineering*, Mestat (ed.), 239–246.
167. Matsushima, T., Saomoto, H., Matsumoto, M., Toda, K., & Yamada, Y. (2003). Discrete element simulation of an assembly of irregularly-shaped grains: quantitative comparison with experiments CD-ROM, 16th Engineering Mechanics Conf., Seattle.
168. Munjiza, A., Latham, J.P., & John, N.W.M. (2003). 3D dynamics of discrete element systems comprising irregular discrete elements, integration solution for finite rotations in 3D, *International Journal For Numerical Methods In Engineering.* 56: 35–55. <https://doi.org/10.1002/nme.552>.
169. Kruggel-Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2008). A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method, *Powder Technology* 188(2): 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>.
170. Walton, O. R., & Braun, R. L. (1993). Simulation of rotary-drum and repose tests for frictional spheres and rigid sphere clusters, *DOE/NSF Workshop on Flow of Particulates*, Ithaca, NY, 29 Sep.–1 Oct., 29.
171. Wang, Y., & Alonso-Marroquin, F. (2009). A finite deformation method for discrete modeling: particle rotation and parameter calibration. *Granular Matter.* 11: 331–343. <https://doi.org/10.1007/s10035-009-0146-2>.
172. Li, H., Wang, J.S., Yuan, J.B., Yin, W.Q., Wang, Z.M., & Qian, Y.Z. (2017). Analysis of threshed rice mixture separation through vibration screen using discrete element method. *Int J Agric & Biol Eng.* 10 (6): 231–239..
173. Ma, X.D., Zhao, L., Guo, B.J., & Dang, H. (2020). Simulation and experiment of rice cleaning in air-separation device based on DEM-CFD coupling method. *Int J Agric & Biol Eng.* 13(5): 226–233. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201305.5225>.

174. Fonte, C.B., Oliveira, J.A.Jr., & de Almeida, L.C. (2015). Dem-cfd coupling: Mathematical modelling and case studies using rocky-dem® and ansys fluent. In Proceedings of the 11th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 7 December. 7–9.
175. Almeida, E., Spogis, N., & Silva, M. A. (2016). Computational Study of the Pneumatic Separation of Sugarcane Bagasse. In Proceedings of the 6th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Albi, France, 26 May.
176. Felice, R.D. (1994). The voidage function for fluid-particle interaction systems. *Int. J. Multiph. Flow.* 20: 153–159.
177. Saffman, P.G. (1965). The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear. *J. Fluid Mech.* 22: 385–400.
178. Mei, R. (1992). An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite reynolds number. *Int. J. Multiph. Flow.* 18: 145–147.
179. Marcus, R.D. (1967). *Pneumatic Conveying of Solids*; Springer Science & Business Media: Dordrecht, The Netherlands. 11: 4216–4226.
180. Oesterle, B., & Dinh, T.B. (1998). Experiments on the lift of a spinning sphere in a range of intermediate Reynolds numbers. *Exp. Fluids.* 25: 16–22.
181. Rubinow, S.I., & Keller, J.B. (1961). The transverse force on a spinning sphere moving in a viscous fluid. *J. Fluid Mech.* 11: 447.
182. Dennis, S.C., Singh, S.N., & Ingham, D.B. (1980). The steady flow due to a rotating sphere at low and moderate Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 101: 257–279.
183. Алієв, Е.Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>.
184. 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.
185. Simcenter STAR-CCM+ 2021.3. Verification Suite. (2021). 333 p.
186. Simcenter STAR-CCM+. Help. User guide, tutorials, knowledge base, and tech support. (2022).

187. Алієв, Е.Б., Бабин, І.А., & Сокол С. П. (2023). Чисельне моделювання процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 1 (120): 5-13. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-1-1>.
188. Алієв, Е.Б., Миколенко, С.Ю., Сова, Н.А., Алієва, О.Ю., Малегін, Р.Д., Лупко, К.О., Лінко, М.О., Гезь, Я.В., & Безугла, Л.С. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛПРА. 192 с.
189. Malik, M.A., Saini, C.S., & Yildiz, F. (2016). Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content. *Cogent Food & Agriculture*. 2(1): 1145783. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1145783>.
190. Ali, K.A.M., Zong, W.Y., Yang, L., & El-Ghany, H.M.A. (2021). Effect of Moisture Content on Sunflower Seed Physical and Mechanical Properties. In *International Journal of Engineering Research in Africa*. 57: 169–179. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jera.57.169>.
191. Li, Z., Xiang, F., Huang, X., Liang, M., Ma, S., Gafurov, K., Gu, F., Guo, Q., & Wang, Q. (2024). Properties and Characterization of Sunflower Seeds from Different Varieties of Edible and Oil Sunflower Seeds. *Foods*, 13: 1188. <https://doi.org/10.3390/foods13081188>.
192. Babić, Lj., Radojčin, M., Pavkov, I., & Babić, M. (2012). The Physical and Compressive Load Properties of Sunflower (*Helianthus Annuus* L.) Fruit. *HELIA*. 35 (57): 95–112. <https://doi.org/10.2298/hel1257095b>.
193. Жуковський, С.С. (2003). Аеродинаміка вентиляції: Навч. Посібник. Львів: Вид-во нац. ун-ту «Львівська політехніка». 370 с.
194. Довгалюк, В.Б. (2015). Аеродинаміка вентиляції: Навч. посібник. Київ: Укреліотех. 366 с
195. ДСТУ 4811:2007. Насіння олійних культур. Методи визначення вологості.
196. ДСТУ 4601:2006. Насіння олійних культур. Методи відбирання проб.
197. ГОСТ 29027-91 Влагомеры твердых и сыпучих веществ. Общие технические требования и методы испытаний (Вологоміри твердих і сипких речовин. Загальні технічні вимоги та методи випробовування)..

198. ДСТУ 2708:2006 Національний стандарт України. Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення.
199. Кисельов, О.В., Комарова, І.Б., Мілько, Д.О., & Бакарджієв, 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.
200. Shumway, R.H., Stoffer, D.S. (2011). Time series analyses and its applications: With R examples. 3-rd ed. New York : Springer. 596 p.
201. Everitt, B., & Hothorn, T. (2009). A handbook of statistical analyses using R. 2-nd ed. Chapman and HALL/CRC. 376 p.
202. Вашків, П.Г., Пастер, П.І., Сторожук, В.П., & Ткач, Є.І. (2001). Теорія статистики: навч. посіб. Київ: Либідь. 320 с.
203. ДСТУ 8837:2019 Насіння олійних культур. Методи визначення сміттєвої та олійної домішок.
204. ГОСТ 29329-92 Ваги для статичного зважування. Загальні технічні вимоги.
205. ART-1 Angle of Repose Tester. LFA Capsule Fillers. <https://www.lfacapsulefillers.com/videos/art-1-angle-of-repose-tester>.
206. Алієв, Е.Б., & Ведмедєва, К.В. (2024). Кількісне фенотипування генотипів соняшнику: монографія. Дніпро: ЛІРА. 204 с. ISBN 978-966-981-993-2
207. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., & Дудін В.Ю. Патент України на корисну модель 151728, МПК (2006) G01N 3/44 (2006.01), G01N 19/00, G01B 3/00. Пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових мас. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u202106596. Заявл. 08.09.2022. Опубл. 07.09.2022, бюл. № 36.
208. Ланець, О.С. (2018). Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонійним рухом робочого органа. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 612 с.

209. Chandravanshi, M.L., & Mukhopadhyay, A.K. (2017). Dynamic analysis of vibratory feeder and their effect on feed particle speed on conveying surface. *Measurement*, 101: 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.01.031>.
210. Van Nguyen, X. & Golikov, N.S. (2018). Analysis of material particle motion and optimizing parameters of vibration of two-mass GZS vibratory feeder. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1015: 052020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/5/052020>
211. Ткач, Є.І., & Сторожук, В.П. (2009). Загальна теорія статистики: підручник. К.: Центр учбової літератури, 442 с.
212. 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.
213. 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.
214. Ушкаренко, Е.О., Вожегова, Р.А., Голобородько, С.П., & Коковіхін, С.В. (2013). Статистичний аналіз результатів польових дослідів у землеробстві: монографія. Херсон: Айлант. 378 с.
215. Дідух, В.Ф., & Шолудько, П.В. (2014). Формування технологічних систем в агропромисловому комплексі. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. № 2: 38–42.
216. ДСТУ 4397:2005. (2005). Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Київ, Україна: Держспоживстандарт України.
217. СОУ 74.3-37-141:2004. (2006). Випробовування сільськогосподарської техніки. Машини сортувальні. Методи випробовувань. К. Мінагрополітики.

ДОДАТКИ

Додаток А



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ
№ 155727

ТЕХНОЛОГІЧНА ЛІНІЯ ПРЕСУВАННЯ СОНЯШНИКОВОЇ
ОЛІЇ ПОВНОГО ЦИКЛУ НА БАЗІ АДАПТИВНИХ
СОРТУВАЛЬНИХ МАШИН ІЗ ПРОГРАМОВАНИМИ
ПАРАМЕТРАМИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
03.04.2024.

Директор
Державної організації «Український
національний офіс інтелектуальної
власності та інновацій»

О.П. Орлюк



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 156504

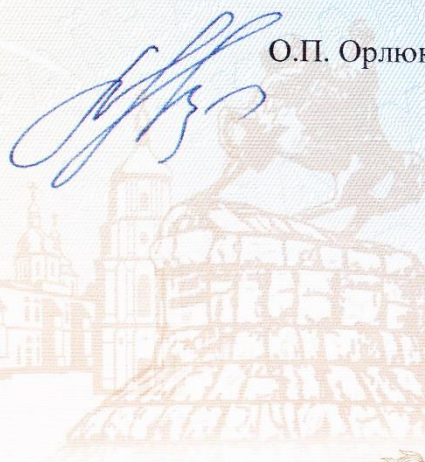
СПОСІБ СЕПАРАЦІЇ СИПУЧОЇ СУМІШІ У ТЕКУЧОМУ
ДВОСТАДІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
03.07.2024.

Директор
Державної організації «Український
національний офіс інтелектуальної
власності та інновацій»

О.П. Орлюк



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 121609

Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів СС-012. Настанови з експлуатації» («СМСС.635536.012 РЕ»)

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) **Кудрявцев Ігор Миколайович**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать повністю **Товариство з обмеженою відповідальністю Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», вул. Качалова, 1, офіс 101, м. Дніпро, 49000**

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 6 грудня 2023 р.

Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»

Олена ОРЛЮК



УКРАЇНА



РІШЕННЯ

про реєстрацію договору, який стосується права автора на твір

№ 7286

договір від 15 березня 2024 р. № 150324 про передачу (відчуження) майнових прав на твір, відповідно до якого майнові права на твір

Брошура «Машини сортувальні для сиуних матеріалів. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ВИПРОБУВАНЬ» («СМСС.635536.000 ПМ»); Мельник Станіслав Михайлович, Бардадим Олександр Володимирович, Бардадим Володимир Кирилович, Кудрявцев Ігор Миколайович, Мельник Михайло Митрофанович, Ярошкін Вячеслав Павлович

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності) автора(ів))

передаються

Мельник Станіслав Михайлович, житловий масив Покровський, 5, блок Л, кв. 72, м. Дніпро, 49128; Бардадим Олександр Володимирович, вул. Іртишська, 40, м. Запоріжжя, 69061; Бардадим Володимир Кирилович, вул. Сотника Семенова, 14, с. Китайгород, Царичанський р-н, Дніпропетровська обл., 51030; Кудрявцев Ігор Миколайович, вул. Доблесна, 208, кв. 3, м. Дніпро, 49053; Мельник Михайло Митрофанович, житловий масив Покровський, 5, блок Л, кв. 72, м. Дніпро, 49128; Ярошкін Вячеслав Павлович, вул. Адупкінська, 1, м. Дніпро, 49010

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної(их) або найменування юридичної(их) особи(осіб), яка(ї) передає(ють)(відчужує(ють)) право на твір, адреса)

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ», вул. Качалова, 1, оф. 101, м. Дніпро, 49000

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної(их) або найменування юридичної(их) особи(осіб), якій(им) передається (відчужується) право на твір, адреса)

Обсяг прав: повністю

Дата реєстрації 23 жовтня 2024 р.

Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»



Олена ОРЛЮК

УКРАЇНА



РІШЕННЯ

про реєстрацію договору, який стосується права автора на твір

№ 7242

договір від 12 січня 2024 р. № 140124 про передачу (відчуження) майнових прав на твір, відповідно до якого майнові права на твір

Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів лабораторна СС-002-05. Настанова з експлуатації» («СМСС.635536.002-05 НЕ»); Мельник Станіслав Михайлович, Бардадим Олександр Володимирович, Бардадим Володимир Кирилович, Кудрявцев Ігор Миколайович, Мельник Михайло Митрофанович, Ярошкін Вячеслав Павлович

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності) автора(ів))

передаються

Мельник Станіслав Михайлович, житловий масив Покровський, 5, блок Л, кв. 72, м. Дніпро, 49128; Бардадим Олександр Володимирович, вул. Іртишська, 40, м. Запоріжжя, 69061; Бардадим Володимир Кирилович, вул. Сотника, Семенова, 14, с. Китайгород, Паричанський р-н, Дніпропетровська обл., 51030; Кудрявцев Ігор Миколайович, вул. Доблесна, 208, кв. 3, м. Дніпро, 49053; Мельник Михайло Митрофанович, житловий масив Покровський, 5, блок Л, кв. 72, м. Дніпро, 49128; Ярошкін Вячеслав Павлович, вул. Алушкінська, 1, м. Дніпро, 49010

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної(их) або найменування юридичної(их) особи(осіб), яка(і) передає(ють)(відчужує(ють)) право на твір, адреса)

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ «СОРТУВАЛЬНІ МАШИНИ», вул. Качалова, 1, оф. 101, м. Дніпро, 49000

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної(их) або найменування юридичної(их) особи(осіб), який(ним) передається (відчужується) право на твір, адреса)

Обсяг прав: повністю

Дата реєстрації 12 вересня 2024 р.

Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»



Олена ОРЛЮК

Додаток Б

Перший етап чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі

Таблиця Б.1 – Результати чисельного моделювання

№	x_1	x_2	x_3	D_p , м	V_p , м/с	V_a , м/с	y_{opt} , м
1	-1	-1	-1	0,005	0,05	1	0,375
2	-1	-1	0	0,005	0,05	3	0,222
3	-1	-1	1	0,005	0,05	5	0,261
4	-1	0	-1	0,005	0,15	1	0,512
5	-1	0	0	0,005	0,15	3	0,284
6	-1	0	1	0,005	0,15	5	0,353
7	-1	1	-1	0,005	0,25	1	0,727
8	-1	1	0	0,005	0,25	3	0,384
9	-1	1	1	0,005	0,25	5	0,311
10	0	-1	-1	0,015	0,05	1	0,296
11	0	-1	0	0,015	0,05	3	0,272
12	0	-1	1	0,015	0,05	5	0,269
13	0	0	-1	0,015	0,15	1	0,482
14	0	0	0	0,015	0,15	3	0,296
15	0	0	1	0,015	0,15	5	0,276
16	0	1	-1	0,015	0,25	1	0,574
17	0	1	0	0,015	0,25	3	0,295
18	0	1	1	0,015	0,25	5	0,343
19	1	-1	-1	0,025	0,05	1	0,311
20	1	-1	0	0,025	0,05	3	0,349
21	1	-1	1	0,025	0,05	5	0,314
22	1	0	-1	0,025	0,15	1	0,403
23	1	0	0	0,025	0,15	3	0,339
24	1	0	1	0,025	0,15	5	0,421
25	1	1	-1	0,025	0,25	1	0,648
26	1	1	0	0,025	0,25	3	0,470
27	1	1	1	0,025	0,25	5	0,419

Таблиця Б.2 – Обчислення рівняння регресії за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud

$M = \{ \{-1, -1, -1, 0.375\}, \{-1, -1, 0, 0.222\}, \{-1, -1, 1, 0.261\}, \{-1, 0, -1, 0.512\}, \{-1, 0, 0, 0.284\}, \{-1, 0, 1, 0.353\}, \{-1, 1, -1, 0.727\}, \{-1, 1, 0, 0.384\}, \{-1, 1, 1, 0.311\}, \{0, -1, -1, 0.296\}, \{0, -1, 0, 0.272\}, \{0, -1, 1, 0.269\}, \{0, 0, -1, 0.482\}, \{0, 0, 0, 0.296\}, \{0, 0, 1, 0.276\}, \{0, 1, -$

```

1,0.574},{0,1,0,0.295},{0,1,1,0.343},{1,-1,-1,0.311},{1,-1,0,0.349},{1,-1,1,0.314},{1,0,-
1,0.403},{1,0,0,0.339},{1,0,1,0.421},{1,1,-1,0.648},{1,1,0,0.47},{1,1,1,0.419}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23
*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,
x2,x3}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
dy[x1_,x2_,x3_] := 0.28622222222222227` + 0.049833333333333318`
x1^2 + 0.083444444444444442` x2 - 0.075611111111111106` x3 + 0.0400833333333333256` x1
x3 - 0.061500000000000006` x2 x3 + 0.081833333333333336` x3^2
x10=0.01;
dx1=0.005;
x20=0.15;
dx2=0.1;
x30=3;
dx3=2;
ddy [ x1_,x2_,x3_ ] := dy [ (x1-x10)/ dx1 , (x2-x20)/ dx2 , (x3-x30)/ dx3 ] ;
Expand[ ddy[Dp,Vp,Va] ]
OptddyMin=Find_Minimum[{ ddy[x1,x2,x3],x10-dx1<= x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-0
dx3}];
ddyMin=First[OptddyMin];
OptddyMax=Find_Maximum[{ ddy[x1,x2,x3],x10-dx1<= x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-0
dx3}];
ddyMax=First[OptddyMax];
OptVaddyMin=Find_Minimum[{(x3 ddy[x1,x2,x3]) ^ 2,x10-dx1<= x1<=x10+dx1,x20-
dx2<= x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2},{
x3,x30-0 dx3}];
VaddyMin=First[OptVaddyMin];
OptVaddyMax=Find_Maximum[{ (x3 ddy[x1,x2,x3])^2,x10-dx1<= x1<=x10+dx1,x20-
dx2<= x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2},{
x3,x30-0 dx3}];
VaddyMax=First[OptVaddyMax];
Opt=Find_Minimum[ {(( ddy[x1,x2,x3] -ddyMin)/(ddyMax -ddyMin)) ((x3-(x30-
dx3))/(x30+dx3-(x30-dx3)))(x20+dx2-x2)/(x20+dx2-(x20-dx2)), x10-dx1<=
x1<=x10+dx1,x20-dx2<= x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10-0 dx1},{
x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-0 dx3} ]
x1opt=x1/.Last[Opt];
x2opt=x2/.Last[Opt];
x3opt=x3/.Last[Opt];
"Dp, M"
x1opt
"Vp, M/c"
x2opt

```

```

"Va, M/c"
x3opt
"Δy, M"
ddy[x1opt,x2opt,x3opt]
Plot_3D[{ ddy[ x10-dx1,x2,x3], ddy[ x10-0dx1,x2,x3], ddy[ x10+dx1,x2,x3]},{x2,x20-
dx2,x20+dx2},{ x3,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Orange,Magenta, Cyan}, AxesLabel-
>{"Vp, M/c","Va, M/c","Δy, M "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot_3D[{ ddy[ x1,x20-dx2,x3], ddy[ x1,x20-0dx2,x3], ddy[ x1,x20+dx2,x3]},{x1,x10-
dx1,x10+dx1},{ x3,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Orange,Magenta, Cyan}, AxesLabel-
>{"Dp, M","Va, M/c","Δy, M "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot_3D[{ ddy[ x1,x2,x30-dx3], ddy[ x1,x2,x30-0dx3], ddy[ x1,x2,x30+dx3]},{x1,x10-
dx1,x10+dx1},{ x2,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Orange,Magenta, Cyan}, AxesLabel-
>{"Dp, M","Vp, M/c","Δy, M "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Додаток В

Другий етап чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в пневмосепаруючому каналі

Таблиця В.1 – Результати чисельного моделювання

№	x_4	x_3	h_p , м	V_a , м/с	η_{k-k} , %	q , кг/год	Q_a , м ³ /год
1	-1	-1	0,02	1	0,840	67,2	165
2	-1	-0,5	0,02	2	0,910	65,5	333
3	-1	0	0,02	3	0,950	67,4	513
4	-1	0,5	0,02	4	0,980	67,9	685
5	-1	1	0,02	5	0,990	66,2	866
6	-0,5	-1	0,03	1	0,840	100,9	162
7	-0,5	-0,5	0,03	2	0,900	101,4	338
8	-0,5	0	0,03	3	0,940	101,6	519
9	-0,5	0,5	0,03	4	0,970	102,2	689
10	-0,5	1	0,03	5	0,970	101,9	857
11	0	-1	0,04	1	0,830	136,4	166
12	0	-0,5	0,04	2	0,880	136,8	338
13	0	0	0,04	3	0,930	135,3	513
14	0	0,5	0,04	4	0,950	135,9	690
15	0	1	0,04	5	0,940	137,6	865
16	0,5	-1	0,05	1	0,800	170,6	159
17	0,5	-0,5	0,05	2	0,860	169,8	341
18	0,5	0	0,05	3	0,890	171,9	514
19	0,5	0,5	0,05	4	0,910	171,3	693
20	0,5	1	0,05	5	0,910	170,8	868
21	1	-1	0,06	1	0,760	206,8	170
22	1	-0,5	0,06	2	0,810	207,6	346
23	1	0	0,06	3	0,850	205,6	516
24	1	0,5	0,06	4	0,860	205,8	685
25	1	1	0,06	5	0,860	205,3	863

Таблиця В.2 – Обчислення рівняння регресії за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud

$M = \{ \{-1, -1, 0.84\}, \{-1, -0.5, 0.91\}, \{-1, 0, 0.95\}, \{-1, 0.5, 0.98\}, \{-1, 1, 0.99\}, \{-0.5, -1, 0.84\}, \{-0.5, -0.5, 0.9\}, \{-0.5, 0, 0.94\}, \{-0.5, 0.5, 0.97\}, \{-0.5, 1, 0.97\}, \{0, -1, 0.83\}, \{0, -0.5, 0.88\}, \{0, 0, 0.93\}, \{0, 0.5, 0.95\}, \{0, 1, 0.94\}, \{0.5, -1, 0.8\}, \{0.5, -0.5, 0.86\}, \{0.5, 0, 0.89\}, \{0.5, 0.5, 0.91\}, \{0.5, 1, 0.91\}, \{1, -1, 0.76\}, \{1, -0.5, 0.81\}, \{1, 0, 0.85\}, \{1, 0.5, 0.86\}, \{1, 1, 0.86\} \};$

```

nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a12*x1*x2+a11*x1^2+a22*x2^2,{a0
0,a10,a20,a12,a11,a22},{x1,x2}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
η[x1_,x2_] := 0.9246285714285712` - 0.05239999999999999` x1 - 0.02457142857142858`
x1^2 + 0.0604000000000000044` x2 - 0.0120000000000000116` x1 x2 - 0.03828571428571425`
x2^2
x10=0.04;
dx1=0.02;
x20=3;
dx2=2;
ηη[x1_,x2_] := η[(x1-x10)/dx1, (x2-x20)/dx2];
Expand[ηη[hp,Va]]
Opt=Find_Maximum[{ηη[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0.01}, {x2,x20-0.01}]
x1opt=x1/.Last[Opt];
x2opt=x2/.Last[Opt];
Plot_3D[{ηη[x1,x2]},{x1,x10-dx1,x10+dx1},{x2,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Orange}, AxesLabel->{"hp, m", "Va, m/c", "ηk-k"}, LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]
M={{-1,-1,67.2},{-1,-0.5,65.5},{-1,0,67.4},{-1,0.5,67.9},{-1,1,66.2},{-0.5,-1,100.9},{-
0.5,-0.5,101.4},{-0.5,0,101.6},{-0.5,0.5,102.2},{-0.5,1,101.9},{0,-1,136.4},{0,-
0.5,136.8},{0,0,135.3},{0,0.5,135.9},{0,1,137.6},{0.5,-1,170.6},{0.5,-
0.5,169.8},{0.5,0,171.9},{0.5,0.5,171.3},{0.5,1,170.8},{1,-1,206.8},{1,-
0.5,207.6},{1,0,205.6},{1,0.5,205.8},{1,1,205.3}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a12*x1*x2+a11*x1^2+a22*x2^2,{a0
0,a10,a20,a12,a11,a22},{x1,x2}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
q[x1_,x2_] := 136.2794285714285` + 69.608` x1
x10=0.04;
dx1=0.02;
x20=3;
dx2=2;
qq[x1_,x2_] := q[(x1-x10)/dx1, (x2-x20)/dx2];
Expand[qq[hp,Va]]
M={{-1,-1,165},{-1,-0.5,333},{-1,0,513},{-1,0.5,685},{-1,1,866},{-0.5,-1,162},{-0.5,-
0.5,338},{-0.5,0,519},{-0.5,0.5,689},{-0.5,1,857},{0,-1,166},{0,-
0.5,338},{0,0,513},{0,0.5,690},{0,1,865},{0.5,-1,159},{0.5,-
0.5,341},{0.5,0,514},{0.5,0.5,693},{0.5,1,868},{1,-1,170},{1,-
0.5,346},{1,0,516},{1,0.5,685},{1,1,863}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a12*x1*x2+a11*x1^2+a22*x2^2,{a0
0,a10,a20,a12,a11,a22},{x1,x2}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]

```

```

Qa[x1_,x2_] := 514.3314285714283` + 349.5999999999999` x2
x10=0.04;
dx1=0.02;
x20=3;
dx2=2;
QQa [ x1_ ,x2_ ] := Qa [ (x1-x10)/ dx1 , (x2-x20)/ dx2 ] ;
Expand[ QQa[hp,Va] ]
ηη[hp_,Va_] := 0.7183999999999993` + 0.5 6.388571428571452` hp-0.25
245.7142857142858` hp^2+0.09962857142857151` Va- 0.5 0.60000000000000059` hp Va-
0.009571428571428562` Va^2;
qq[hp_,Va_] := -2.9365714285715114` + 3480.4` hp;
QQa[hp_,Va_] := -10.068571428571545` + 174.79999999999995` Va;
x10=0.02;
dx1=0.01;
x20=3;
dx2=2;
OptηηMin=Find_Minimum[ { ηη[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2}];
ηηMin=First[OptηηMin];
OptηηMax=Find_Maximum[ { ηη[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2}];
ηηMax=First[OptηηMax];
OptqqMin=Find_Minimum[ { qq[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2}];
qqMin=First[OptqqMin];
OptqqMax=Find_Maximum[ { qq[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2}];
qqMax=First[OptqqMax];
Opt QQaMin=Find_Minimum[ { QQa[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2}];
QQaMin=First[Opt QQaMin];
Opt QQaMax=Find_Maximum[ { QQa[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{ x2,x20-0 dx2}];
QQaMax=First[Opt QQaMax];
Opt=Find_Maximum[ {(( ηη[x1,x2] -ηηMin)/(ηηMax-ηηMin))^5*(( qq[x1,x2] -
qqMin)/(qqMax-qqMin))*((QQaMax- QQa[x1,x2])/(QQaMax-QQaMin)),
x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<= x2<=x20+dx2},{x1,x10+1dx1},{ x2,x20+1dx2}]
x1opt=x1/.Last[Opt];
x2opt= x2/.Last[Opt];
"ηk-k"
ηη [x1opt , x2opt ]
"q, кг/год"
qq [x1opt , x2opt ]
"Qa, м3/год"
QQa [x1opt , x2opt ]

```

Додаток Г

Третій етап чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші
соняшнику в камері розрідження

Таблиця Г.1 – Результати чисельного моделювання

№	x_1	x_3	x_5	D_p , м	V_a , м/с	R , м	$\Delta y'$, м
1	-1	-1	-1	0,005	1	0,4	0,247
2	-1	-1	0	0,005	1	0,5	0,329
3	-1	-1	1	0,005	1	0,6	0,331
4	-1	0	-1	0,005	3	0,4	0,297
5	-1	0	0	0,005	3	0,5	0,4
6	-1	0	1	0,005	3	0,6	0,385
7	-1	1	-1	0,005	5	0,4	0,265
8	-1	1	0	0,005	5	0,5	0,364
9	-1	1	1	0,005	5	0,6	0,353
10	0	-1	-1	0,01	1	0,4	0,294
11	0	-1	0	0,01	1	0,5	0,393
12	0	-1	1	0,01	1	0,6	0,372
13	0	0	-1	0,01	3	0,4	0,339
14	0	0	0	0,01	3	0,5	0,438
15	0	0	1	0,01	3	0,6	0,453
16	0	1	-1	0,01	5	0,4	0,316
17	0	1	0	0,01	5	0,5	0,415
18	0	1	1	0,01	5	0,6	0,404
19	1	-1	-1	0,015	1	0,4	0,29
20	1	-1	0	0,015	1	0,5	0,369
21	1	-1	1	0,015	1	0,6	0,401
22	1	0	-1	0,015	3	0,4	0,365
23	1	0	0	0,015	3	0,5	0,454
24	1	0	1	0,015	3	0,6	0,473
25	1	1	-1	0,015	5	0,4	0,35
26	1	1	0	0,015	5	0,5	0,435
27	1	1	1	0,015	5	0,6	0,428

Таблиця Г.2 – Обчислення рівняння регресії за допомогою програмного забезпечення

Wolfram Cloud

$M = \{ \{-1, -1, -1, 0.247\}, \{-1, -1, 0, 0.329\}, \{-1, -1, 1, 0.331\}, \{-1, 0, -1, 0.297\}, \{-1, 0, 0, 0.4\}, \{-1, 0, 1, 0.385\}, \{-1, 1, -1, 0.265\}, \{-1, 1, 0, 0.364\}, \{-1, 1, 1, 0.353\}, \{0, -1, -1, 0.294\}, \{0, -1, 0, 0.393\}, \{0, -1, 1, 0.372\}, \{0, 0, -1, 0.339\}, \{0, 0, 0, 0.438\}, \{0, 0, 1, 0.453\}, \{0, 1, -1, 0.316\}, \{0, 1, 0, 0.415\}, \{0, 1, 1, 0.404\}, \{1, -1, -1, 0.29\}, \{1, -1, 0, 0.369\}, \{1, -1, 1, 0.401\}, \{1, 0, -1, 0.365\}, \{1, 0, 0, 0.454\}, \{1, 0, 1, 0.473\}, \{1, 1, -1, 0.35\}, \{1, 1, 0, 0.435\}, \{1, 1, 1, 0.428\} \}$

```

1,0.316},{0,1,0,0.415},{0,1,1,0.404},{1,-1,-1,0.29},{1,-1,0,0.369},{1,-1,1,0.401},{1,0,-
1,0.365},{1,0,0,0.454},{1,0,1,0.473},{1,1,-1,0.35},{1,1,0,0.435},{1,1,1,0.428}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23
*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,
x2,x3}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
dy[x1_,x2_,x3_] := 0.44277777777777777` + 0.0330000000000000015` x1 -
0.017333333333333335` x1^2 + 0.016888888888888891` x2 + 0.006499999999999975` x1
x2 - 0.047333333333333334` x2^2 + 0.046500000000000001` x3 - 0.04616666666666665` x3^2
x10=0.01;
dx1=0.005;
x20=3;
dx2=2;
x30=0.5;
dx3=0.1;
ddy [ x1_,x2_,x3_ ] := dy [ (x1-x10)/ dx1 , (x2-x20)/ dx2 , (x3-x30)/ dx3 ] ;
Expand[ ddy[Dp,Va,R] ]
Opt1=Find_Maximum[ { ddy[0.005,x2,x3],x20-dx2<= x2<=x20+dx2,x30-dx3<=
x3<=x30+dx3},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-0 dx3} ]
dy1=First[Opt1];
R1=x3/.Last[Opt1];
Opt2=Find_Maximum[ { ddy[0.010,x2,x3],x20-dx2<= x2<=x20+dx2,x30-dx3<=
x3<=x30+dx3},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-0 dx3} ]
dy2=First[Opt2];
R2=x3/.Last[Opt2];
Opt3=Find_Maximum[ { ddy[0.015,x2,x3],x20-dx2<= x2<=x20+dx2,x30-dx3<=
x3<=x30+dx3},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-0 dx3} ]
dy3=First[Opt3];
R3=x3/.Last[Opt3];
dym=(dy1+dy2+dy3)/3
Rm=(R1+R2+R3)/3
yint=2Rm-dym-0.22
Plot_3D[{ ddy[ x10-dx1,x2,x3], ddy[ x10-0dx1,x2,x3], ddy[ x10+dx1,x2,x3]},{x2,x20-
dx2,x20+dx2},{ x3,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Orange,Magenta, Cyan}, AxesLabel-
>{"Va, m/c","R, m","Δy, m "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot_3D[{ ddy[ x1,x20-dx2,x3], ddy[ x1,x20-0dx2,x3], ddy[ x1,x20+dx2,x3]},{x1,x10-
dx1,x10+dx1},{ x3,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Orange,Magenta, Cyan}, AxesLabel-
>{"Dp, m","R, m","Δy, m "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot_3D[{ ddy[ x1,x2,x30-dx3], ddy[ x1,x2,x30-0dx3], ddy[ x1,x2,x30+dx3]-
0.01},{x1,x10-dx1,x10+dx1},{ x2,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Orange,Magenta,
Cyan}, AxesLabel->{"Dp, m","Va, m/c","Δy, m "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Додаток Д

Четвертий етап чисельного моделювання процесу сепарації відходів насінневої суміші соняшнику в аеродинамічному сепараторі колонного типу

Таблиця Д.1 – Результати чисельного моделювання впливу вмісту компонентів

№	x_6	x_7	x_8	ψ_k	ψ_h	ψ_d	η_{k-k}	η_{h-h}	η_{d-d}	δ
1	-1,00	0,00	0,00	0,0	0,5	0,5	0,000	0,993	0,996	0,994
2	0,00	-1,00	0,00	0,5	0,0	0,5	0,993	0,000	0,990	0,992
3	0,00	0,00	-1,00	0,5	0,5	0,0	0,994	0,993	0,000	0,994
4	0,20	-0,60	-0,60	0,6	0,2	0,2	0,995	0,886	0,884	0,922
5	-0,60	0,20	-0,60	0,2	0,6	0,2	0,883	1,001	0,883	0,922
6	-0,60	-0,60	0,20	0,2	0,2	0,6	0,886	0,888	0,994	0,923
7	-0,60	-0,40	0,00	0,2	0,3	0,5	0,888	0,970	0,995	0,951
8	-0,60	0,00	-0,40	0,2	0,5	0,3	0,884	0,997	0,969	0,950
9	-0,40	-0,60	0,00	0,3	0,2	0,5	0,964	0,885	0,997	0,948
10	-0,40	0,00	-0,60	0,3	0,5	0,2	0,962	0,998	0,886	0,949
11	0,00	-0,40	-0,60	0,5	0,3	0,2	0,994	0,965	0,893	0,951
12	0,00	-0,60	-0,40	0,5	0,2	0,3	1,000	0,883	0,971	0,951
13	-0,33	-0,33	-0,34	0,3	0,3	0,3	0,974	0,978	0,982	0,978
14	-0,40	0,40	-1,00	0,3	0,7	0,0	0,969	0,992	0,000	0,980
15	0,40	-0,40	-1,00	0,7	0,3	0,0	0,998	0,970	0,000	0,984
16	-1,00	0,40	-0,40	0,0	0,7	0,3	0,000	0,994	0,971	0,982
17	-1,00	-0,40	0,40	0,0	0,3	0,7	0,000	0,962	0,999	0,981
18	0,40	-1,00	-0,40	0,7	0,0	0,3	0,994	0,000	0,971	0,982
19	-0,40	-1,00	0,40	0,3	0,0	0,7	0,970	0,000	0,998	0,984
20	1	-1	-1	1,0	0,0	0,0	0,991	0,000	0,000	0,991
21	-1	1	-1	0,0	1,0	0,0	0,000	0,997	0,000	0,997
22	-1	-1	1	0,0	0,0	1,0	0,000	0,000	0,996	0,996

Таблиця Д.2 – Обчислення рівняння регресії за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud

```

M={{-1,0,0,0.994},{0,-1,0,0.992},{0,0,-1,0.994},{0.2,-0.6,-0.6,0.922},{-0.6,0.2,-0.6,0.922},{-0.6,-0.6,0.2,0.923},{-0.6,-0.4,0,0.951},{-0.6,0,-0.4,0.95},{-0.4,-0.6,0,0.948},{-0.4,0,-0.6,0.949},{0,-0.4,-0.6,0.951},{0,-0.6,-0.4,0.951},{-0.33,-0.33,-0.34,0.978},{-0.4,0.4,-1,0.98},{0.4,-0.4,-1,0.984},{-1,0.4,-0.4,0.982},{-1,-0.4,0.4,0.981},{0.4,-1,-0.4,0.982},{-0.4,-1,0.4,0.984},{1,-1,-1,0.991},{-1,1,-1,0.997},{-1,-1,1,0.996}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23*x2*x3+a123*x1*x2*x3+

```

```

a112*x1*x1*x2+a113*x1*x1*x3+a221*x2*x2*x1+a223*x2*x2*x3+a331*x3*x3*x1+a3
32*x3*x3*x2+
a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a123,a112,a113,a223,a221,
a331,a332,a11,a22,a33},{x1,x2,x3}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
dy[x1_,x2_,x3_] := 0.4214621992557084` -0.36110004021241204`
x1+0.200243318623323` x1^2-0.36175677539782736` x2+0.22040912223595957` x1
x2+0.19969179104895246` x2^2-0.36146357387619993` x3+0.2191884334680701` x1
x3+0.22152704779581617` x2 x3-0.22170598757650012` x1 x2
x3+0.2003362129773965` x3^2
x10=0.5;
dx1=0.5;
x20=0.5;
dx2=0.5;
x30=0.5;
dx3=0.5;
ddy [ x1_,x2_,x3_ ] := dy [ (x1-x10)/ dx1 , (x2-x20)/ dx2 , (x3-x30)/ dx3 ] ;
Expand[ ddy[ψk,ψh,ψd] ]
Find_Minimum[{ ddy[x1,x2,x3],x1+x2+x3==1,x10-dx1<= x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10- 0dx1},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-
0dx3}]
Find_Maximum[{ ddy[x1,x2,x3],x1+x2+x3==1,x10-dx1<= x1<=x10+dx1,x20-dx2<=
x2<=x20+dx2,x30-dx3<= x3<=x30+dx3},{ x1,x10- 0dx1},{ x2,x20-0 dx2},{ x3,x30-
0dx3}]

```

Таблиця Д.3 – Результати чисельного моделювання впливу подачі суміші і швидкості повітряного потоку

№	x ₉	x ₃	q, кг/год	V _a , м/с	η _{k-k}	η _{h-h}	η _{d-d}	δ
1	-1	-1	50	1	0,849	0,911	0,948	0,903
2	-1	-0,5	50	2	0,909	0,944	0,971	0,941
3	-1	0	50	3	0,949	0,979	0,975	0,968
4	-1	0,5	50	4	0,980	0,987	0,999	0,989
5	-1	1	50	5	0,987	0,980	0,998	0,988
6	-0,5	-1	75	1	0,842	0,909	0,935	0,895
7	-0,5	-0,5	75	2	0,918	0,943	0,944	0,935
8	-0,5	0	75	3	0,950	0,966	0,961	0,959
9	-0,5	0,5	75	4	0,990	0,969	0,966	0,975
10	-0,5	1	75	5	0,990	0,961	0,981	0,977
11	0	-1	100	1	0,846	0,904	0,921	0,890
12	0	-0,5	100	2	0,913	0,944	0,936	0,931
13	0	0	100	3	0,954	0,954	0,947	0,952

№	x_9	x_3	q , кг/год	V_a , м/с	η_{k-k}	η_{h-h}	η_{d-d}	δ
14	0	0,5	100	4	0,974	0,951	0,947	0,957
15	0	1	100	5	0,978	0,942	0,964	0,961
16	0,5	-1	125	1	0,833	0,904	0,912	0,883
17	0,5	-0,5	125	2	0,900	0,929	0,914	0,914
18	0,5	0	125	3	0,932	0,931	0,938	0,934
19	0,5	0,5	125	4	0,959	0,943	0,934	0,945
20	0,5	1	125	5	0,967	0,925	0,943	0,945
21	1	-1	150	1	0,815	0,894	0,893	0,867
22	1	-0,5	150	2	0,876	0,919	0,913	0,903
23	1	0	150	3	0,913	0,918	0,911	0,914
24	1	0,5	150	4	0,943	0,925	0,911	0,926
25	1	1	150	5	0,934	0,899	0,917	0,917

Таблиця В.4 – Розрахунок рівняння регресії впливу подачі суміші і швидкості повітряного потоку в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M={{-1,-1,0.903},{-1,-0.5,0.941},{-1,0,0.968},{-1,0.5,0.989},{-1,1,0.988},{-0.5,-1,0.895},{-0.5,-0.5,0.935},{-0.5,0,0.959},{-0.5,0.5,0.975},{-0.5,1,0.977},{0,-1,0.89},{0,-0.5,0.931},{0,0,0.952},{0,0.5,0.957},{0,1,0.961},{0.5,-1,0.883},{0.5,-0.5,0.914},{0.5,0,0.934},{0.5,0.5,0.945},{0.5,1,0.945},{1,-1,0.867},{1,-0.5,0.903},{1,0,0.914},{1,0.5,0.926},{1,1,0.917}};
nlm=Nonlinear_Model_Fit[M,a00+a10*x1+a20*x2+a12*x1*x2+a11*x1^2+a22*x2^2,{a00,a10,a20,a12,a11,a22},{x1,x2}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]

η[x1_,x2_] := 0.9499028571428566` - 0.025759999999999988` x1 - 0.0064000000000000075` x1^2 + 0.034720000000000009` x2 - 0.009560000000000021` x1 x2 - 0.023885714285714357` x2^2
x10=100;
dx1=50;
x20=3;
dx2=2;
ηη[x1_,x2_] := η[(x1-x10)/dx1,(x2-x20)/dx2];
Expand[ηη[q,Va]]
Optmin=Find_Minimum[{ηη[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{x2,x20-0 dx2}]
ηηmin=First[Optmin];
Optmax=Find_Maximum[{ηη[x1,x2],x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=x2<=x20+dx2},{x1,x10-0 dx1},{x2,x20-0 dx2}]
ηηmax=First[Optmax];
Opt=Find_Maximum[(((ηη[x1,x2]-ηηmin)/(ηηmax-ηηmin))^1

```

```

((x1-(x10-dx1))/((x10+dx1)-(x10-dx1)))
((x20+dx2)-x2)/((x20+dx2)-(x20-dx2))),
x10-dx1<=x1<=x10+dx1,x20-dx2<=x2<=x20+dx2},{x1,x10-dx1},{x2,x20-dx2}]
x1opt=x1/.Last[Opt];
x2opt=x2/.Last[Opt];
ηη[x1opt,x2opt]

Plot_3D[(((ηη[x1,x2]-ηηmin)/(ηηmax-ηηmin))
((x1-(x10-dx1))/((x10+dx1)-(x10-dx1)))
((x20+dx2)-x2)/((x20+dx2)-(x20-dx2)))
},{x1,x10-dx1,x10+dx1},{x2,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Orange}, AxesLabel->{"q,
кг/год","Va, м/с","δ "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot_3D[{ηη[x1,x2]},{x1,x10-dx1,x10+dx1},{x2,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Orange}, AxesLabel->{"q, кг/год","Va, м/с","δ "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Додаток Е

Процес експериментальних досліджень аеродинамічного сепаратора колонного типу



Додаток Ж

Статистична обробка результатів лабораторних досліджень

Характеристика	ρ_t , кг/м ³			ρ_b , кг/м ³		
Компонент	Я	Л	Д	Я	Л	Д
Середнє	988,78	511,6	188,3	678,32	472,1	160,3
Дисперсія	776,07	2446,1	5794,7	1790,53	2419,0	870,4
Стандартне відхилення	27,86	49,5	76,1	42,31	49,2	29,5
Середньоквадратичне відхилення	28,14	50,0	76,9	42,74	49,7	29,8
Рівень значущості	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Критерій Стюдента	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
Довірчий інтервал	23,8	42,2	64,9	36,1	41,9	25,2
Мінімальне значення	920,3	365,5	35,6	582,9	373,2	84,5
Максимальне значення	1063,9	613,4	374,3	766,2	582,1	218,9
Інтервал	13,1	22,5	30,8	16,7	19,0	12,2
Розраховане χ^2	12,9	10,0	10,6	15,1	5,6	12,0
Табличне χ^2	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Кореляція R	0,888	0,915	0,799	0,810	0,899	0,837

Я – ядро соняшника, Л – лушпиння, Д – дрібні частинки

Характеристика	E_p , МПа			V_v , м/с		
Компонент	Я	Л	Д	Я	Л	Д
Середнє	1,10	1,22	0,53	6,71	3,3	1,2
Дисперсія	0,01	0,02	0,01	0,37	0,1	0,1
Стандартне відхилення	0,10	0,15	0,10	0,61	0,4	0,3
Середньоквадратичне відхилення	0,10	0,15	0,10	0,62	0,4	0,3
Рівень значущості	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Критерій Стюдента	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
Довірчий інтервал	0,1	0,13	0,09	0,5	0,3	0,3
Мінімальне значення	0,9	0,89	0,34	5,4	2,5	0,4
Максимальне значення	1,3	1,51	0,75	8,4	4,3	2,0
Інтервал	0,04	0,06	0,04	0,3	0,2	0,1
Розраховане χ^2	11,4	13,8	11,8	14,0	13,7	7,9
Табличне χ^2	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Кореляція R	0,646	0,754	0,764	0,908	0,847	0,920

Я – ядро соняшника, Л – лушпиння, Д – дрібні частинки

Характеристика	$\varphi, ^\circ$			μ_{p-p}		
Компонент	Я	Л	Д	Я	Л	Д
Середнє	26,9	35,3	30,8	0,513	0,627	0,600
Дисперсія	26,5	48,0	18,6	0,013	0,012	0,010
Стандартне відхилення	5,1	6,9	4,3	0,116	0,108	0,101
Середньоквадратичне відхилення	5,2	7,0	4,4	0,117	0,109	0,102
Рівень значущості	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Критерій Стюдента	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
Довірчий інтервал	4,4	5,9	3,7	0,099	0,092	0,086
Мінімальне значення	16,7	20,3	18,7	0,300	0,371	0,338
Максимальне значення	38,2	51,0	38,4	0,786	0,814	0,792
Інтервал	2,0	2,8	1,8	0,044	0,040	0,041
Розраховане χ^2	12,5	12,4	8,6	12,3	12,3	10,0
Табличне χ^2	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9
Кореляція R	0,711	0,719	0,855	0,845	0,666	0,779

Я – ядро соняшника, Л – лушпиння, Д – дрібні частинки

Характеристика	μ_{p-s}			μ'_{p-s}		
Компонент	Я	Л	Д	Я	Л	Д
Середнє	0,383	0,344	0,252	0,315	0,272	0,208
Дисперсія	0,013	0,013	0,005	0,008	0,008	0,005
Стандартне відхилення	0,113	0,113	0,073	0,088	0,089	0,071
Середньоквадратичне відхилення	0,114	0,114	0,074	0,089	0,089	0,071
Рівень значущості	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Критерій Стюдента	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01	2,01
Довірчий інтервал	0,096	0,096	0,062	0,075	0,076	0,060
Мінімальне значення	0,111	0,132	0,088	0,120	0,072	0,026
Максимальне значення	0,588	0,634	0,392	0,527	0,483	0,349
Інтервал	0,043	0,046	0,028	0,037	0,037	0,029
Розраховане χ^2	5,051	10,937	9,828	6,7	9,9	11,1
Табличне χ^2	16,919	16,919	16,919	16,9	16,9	16,9
Кореляція R	0,920	0,800	0,679	0,853	0,835	0,825

Я – ядро соняшника, Л – лушпиння, Д – дрібні частинки

Додаток 3

Перший етап експериментальних досліджень допоміжних елементів сепаратора
колонного типу (віброживильника)

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень віброживильника

№	x ₁₀	x ₁₁	ω_v , Гц	A _v , мм	q, кг/год				h _p , м			
					1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	20	0,001	43,0	41,9	41,7	42,2	0,022	0,016	0,022	0,020
2	-1	0	20	0,002	59,0	56,9	58,4	58,1	0,034	0,023	0,027	0,028
3	-1	1	20	0,003	75,8	73,1	71,9	73,6	0,044	0,037	0,034	0,039
4	0	-1	60	0,001	78,9	76,6	76,7	77,4	0,028	0,023	0,023	0,025
5	0	0	60	0,002	132,8	127,0	125,1	128,3	0,041	0,025	0,037	0,034
6	0	1	60	0,003	185,3	174,8	176,9	179,0	0,052	0,034	0,056	0,047
7	1	-1	100	0,001	111,2	106,8	109,0	109,0	0,032	0,022	0,037	0,030
8	1	0	100	0,002	194,7	189,2	191,5	191,8	0,046	0,032	0,047	0,042
9	1	1	100	0,003	277,0	268,8	277,1	274,3	0,060	0,051	0,062	0,058

Таблиця 3.2 – Обчислення рівняння регресії за допомогою програмного
забезпечення Wolfram Cloud

```

M = {{-1, -1, 42.2}, {-1, 0, 58.1}, {-1, 1, 73.6}, {0, -1, 77.4}, {0,
  0, 128.3}, {0, 1, 179}, {1, -1, 109}, {1, 0, 191.8}, {1, 1,
  274.3}};
nlm = Nonlinear_Model_Fit[M,
  a00 + a10*x1 + a20*x2 + a12*x1*x2 + a11*x1^2 + a22*x2^2, {a00, a10,
  a20, a12, a11, a22}, {x1, x2}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
nlm["ANOVA_Table"]
q[x1_, x2_] :=
128.33333333333337` + 66.86666666666667` x1 -
3.4000000000000029` x1^2 + 49.71666666666667` x2 +
33.474999999999999` x1 x2
x10 = 60;
dx1 = 40;
x20 = 0.002;
dx2 = 0.001;
qq[x1_, x2_] := q[(x1 - x10)/dx1, (x2 - x20)/dx2];
Expand[qq[\[Omega]v, Av]]
Expand[qq[G7, H7]]

```

```

Opt = Find_Maximum[{qq[x1, x2], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
  x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2}, {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
Plot_3D[{qq[x1, x2]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x2, x20 - dx2,
  x20 + dx2}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\(\*
StyleBox[SubscriptBox["\[Omega]", "\v"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\,","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\ \","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\Gamma","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]"), "\!\(\*
StyleBox[SubscriptBox["A", "\v"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\,","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\ \","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\m","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]"), "\!\(\*
StyleBox["\q","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\,","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\ \","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\kr","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\^","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\год","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["\ \","\,","\nFontFamily->"TimesNewRoman","\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal","\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]

M = {{-1, -1, 0.0202}, {-1, 0, 0.0279}, {-1, 1, 0.0386}, {0, -1,
  0.0246}, {0, 0, 0.0341}, {0, 1, 0.0471}, {1, -1, 0.0301}, {1, 0,
  0.0416}, {1, 1, 0.0575}};
nlm = Nonlinear_Model_Fit[M,

```

```

a00 + a10*x1 + a20*x2 + a12*x1*x2 + a11*x1^2 + a22*x2^2, {a00, a10,
a20, a12, a11, a22}, {x1, x2}];
Normal[nlm]
nlm["Parameter_Table"]
nlm["ANOVA_Table"]
h[x1_, x2_] :=
0.03405555555555556` + 0.0070833333333333329` x1 +
0.00071666666666666591` x1^2 + 0.011383333333333339` x2 +
0.00224999999999999972` x1 x2 + 0.00181666666666666702` x2^2
x10 = 60;
dx1 = 40;
x20 = 0.002;
dx2 = 0.001;
hh[x1_, x2_] := h[(x1 - x10)/dx1, (x2 - x20)/dx2];
Expand[hh[ $\Omega$ v, Av]]
Expand[hh[G7, H7]]
Opt = Find_Maximum[{hh[x1, x2], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2}, {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
Plot_3D[{hh[x1, x2]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x2, x20 - dx2,
x20 + dx2}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"! $\Omega$ 
StyleBox[SubscriptBox[" $\Omega$ ", "v"], nFontFamily->"Times New \
Roman", nFontSize->14, nFontWeight->"Normal", n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox["", " ", nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox[" "], nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox["Г", nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]), "!"!(*
StyleBox[SubscriptBox["A", "v"], nFontFamily->"Times New \
Roman", nFontSize->14, nFontWeight->"Normal", n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox["", " ", nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox[" "], nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox["M", nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]), "!"!(*
StyleBox[SubscriptBox["h", "p"], nFontFamily->"Times New \
Roman", nFontSize->14, nFontWeight->"Normal", n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*
StyleBox["", " ", nFontFamily->"TimesNewRoman", nFontSize->14, n\
FontWeight->"Normal", nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]!)!(*

```

```

StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\!\(\*
StyleBox["m",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\!\(\*
StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\),
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]

h[\[Omega]v_, Av_] :=
0.016293055555555543` + 0.74166666666666614` Av +
1816.66666666666702` Av^2 + 0.0000108333333333333947` \[Omega]v +
0.05624999999999993` Av \[Omega]v +
4.4791666666666619`*^-7 \[Omega]v^2;
q[\[Omega]v_, Av_] :=
21.3749999999999858` - 495.83333333327755` Av +
0.25291666666666698` \[Omega]v + 836.8749999999997` Av \[Omega]v -
0.00212500000000000184` \[Omega]v^2;
x10 = 60;
dx1 = 40;
x20 = 0.002;
dx2 = 0.001;
L = 0.0015
h[20, L]
h[100, L]
q[20, L]
q[100, L]
q[\[Omega]v, L]
Plot[{q[\[Omega]v, L]}, {\[Omega]v, x10 - dx1, x10 + dx1},
PlotStyle -> {Blue}, AxesLabel -> {\!\(\*
StyleBox["\[Omega]v",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\n
FontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]]\)\!\(\*
StyleBox["",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["Γ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\), "q!\(\*
StyleBox["",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*

```

```

StyleBox["κΓ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\*
StyleBox["^",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\*
StyleBox["род",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\},
LabelStyle ->
Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
  FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]
Reduce[{h[\[Omega]v1, Av] <= 0.036 && h[\[Omega]v2, Av] <= 0.036 &&
  q[\[Omega]v1, Av] == 50 && q[\[Omega]v2, Av] == 150 &&
  x10 - dx1 <= \[Omega]v1 < x10 + dx1 &&
  x10 - dx1 <= \[Omega]v2 < x10 + dx1 &&
  x20 - dx2 <= Av < x20 + dx2}, {\[Omega]v1, \[Omega]v2, Av}]

```

Додаток И

Другий етап експериментальних досліджень допоміжних елементів сепаратора
колонного типу (аеродинамічного стабілізатора)

Таблиця И.1 – Результати експериментальних досліджень аеродинамічного
стабілізатора

$Q_a = 100 \text{ м}^3/\text{год}$	Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі без стабілізатора					Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі із стабілізатором				
$x(y)$, мм	20	65	110	155	200	20	65	110	155	200
20	0,52	0,50	0,49	0,48	0,48	0,52	0,50	0,49	0,49	0,48
65	0,53	0,70	0,67	0,66	0,47	0,53	0,52	0,49	0,52	0,48
110	0,55	0,72	0,58	0,66	0,46	0,54	0,55	0,52	0,55	0,48
155	0,50	0,66	0,59	0,62	0,44	0,51	0,50	0,44	0,50	0,46
200	0,46	0,42	0,37	0,40	0,42	0,47	0,44	0,41	0,43	0,44

$Q_a = 250 \text{ м}^3/\text{год}$	Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі без стабілізатора					Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі із стабілізатором				
$x(y)$, мм	20	65	110	155	200	20	65	110	155	200
20	1,12	1,07	1,02	1,01	1,00	1,11	1,09	1,06	1,07	1,07
65	1,17	1,50	1,49	1,52	1,00	1,14	1,20	1,12	1,20	1,08
110	1,23	1,51	1,46	1,55	0,99	1,16	1,28	1,24	1,28	1,08
155	1,14	1,47	1,43	1,49	0,97	1,12	1,18	1,07	1,18	1,06
200	1,06	0,98	0,90	0,92	0,95	1,08	1,03	0,99	1,01	1,04

$Q_a = 400 \text{ м}^3/\text{год}$	Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі без стабілізатора					Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі із стабілізатором				
$x(y)$, мм	20	65	110	155	200	20	65	110	155	200
20	1,64	1,59	1,54	1,53	1,53	1,67	1,64	1,62	1,62	1,63
65	1,70	2,28	2,27	2,30	1,52	1,69	1,86	1,74	1,86	1,63
110	1,75	2,30	2,33	2,33	1,51	1,72	1,97	1,93	1,97	1,63
155	1,67	2,26	2,21	2,27	1,49	1,68	1,83	1,69	1,83	1,61
200	1,59	1,50	1,42	1,45	1,47	1,63	1,59	1,55	1,57	1,59

$Q_a = 550 \text{ м}^3/\text{год}$	Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі без стабілізатора					Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі із стабілізатором				
x (y), мм	20	65	110	155	200	20	65	110	155	200
20	2,03	1,99	1,95	1,95	1,94	2,14	2,11	2,08	2,08	2,09
65	2,07	3,00	2,94	2,97	1,94	2,17	2,45	2,29	2,45	2,09
110	2,11	3,06	3,18	3,00	1,94	2,20	2,62	2,56	2,62	2,10
155	2,09	3,00	2,93	2,96	1,96	2,18	2,46	2,31	2,46	2,10
200	2,07	2,05	2,03	2,01	1,99	2,15	2,13	2,11	2,11	2,10

$Q_a = 700 \text{ м}^3/\text{год}$	Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі без стабілізатора					Швидкість повітряного потоку V_a (м/с) у каналі із стабілізатором				
x (y), мм	20	65	110	155	200	20	65	110	155	200
20	2,58	2,54	2,50	2,49	2,49	2,71	2,68	2,66	2,66	2,66
65	2,63	3,79	3,75	3,77	2,49	2,73	3,11	2,91	3,11	2,67
110	2,67	3,83	4,03	3,79	2,48	2,76	3,30	3,26	3,30	2,67
155	2,62	3,77	3,71	3,75	2,48	2,73	3,10	2,89	3,10	2,66
200	2,57	2,52	2,47	2,47	2,48	2,69	2,66	2,63	2,64	2,65

Додаток К

Третій етап експериментальних досліджень сепаратора колонного типу

Таблиця К.1 – Результати експериментальних досліджень сепаратора колонного типу

№	x ₉	x ₃	x ₈	q, кг/год	V _а , м/с	ψ _k	δ			η _{кк}			P, кВт		
							1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	1	0	150	5	0,6	0,913	0,904	0,908	0,933	0,927	0,932	844,4	862,3	844,4
2	1	-1	0	150	1	0,6	0,848	0,851	0,853	0,876	0,867	0,866	375,7	395,3	377,5
3	-1	1	0	50	5	0,6	0,965	0,954	0,945	0,959	0,960	0,964	725,2	722,3	722,5
4	-1	-1	0	50	1	0,6	0,862	0,855	0,855	0,868	0,865	0,867	213,2	221,1	212,3
5	0	0	0	100	3	0,6	0,950	0,930	0,937	0,962	0,940	0,949	548,7	583,5	547,8
6	1	0	1	150	3	0,8	0,931	0,908	0,893	0,915	0,925	0,939	596,1	582,8	591,6
7	1	0	-1	150	3	0,4	0,906	0,916	0,883	0,921	0,929	0,912	658,4	618,2	654,8
8	-1	0	1	50	3	0,8	0,974	0,952	0,960	0,959	0,951	0,968	487,7	523,8	487,7
9	-1	0	-1	50	3	0,4	0,937	0,950	0,915	0,941	0,954	0,941	536,3	488,4	533,6
10	0	0	0	100	3	0,6	0,942	0,947	0,922	0,95	0,964	0,95	586,4	569,6	640,6
11	0	1	1	100	5	0,8	0,978	0,980	0,966	0,976	0,973	0,967	838,7	837,4	837,8
12	0	1	-1	100	5	0,4	0,948	0,951	0,911	0,947	0,967	0,962	836,1	777,7	831,6
13	0	-1	1	100	1	0,8	0,880	0,883	0,866	0,881	0,888	0,887	314,3	295,5	313,4
14	0	-1	-1	100	1	0,4	0,870	0,845	0,831	0,861	0,862	0,865	278,1	271,2	271,8
15	0	0	0	100	3	0,6	0,884	0,924	0,917	0,934	0,938	0,942	519,3	520,4	521,1

Таблиця К.2 – Обчислення рівняння регресії за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud

```

M = {{1, 1, 0, 0.9306666666666667}, {1, -1, 0, 0.8696666666666667}, {-1,
  1, 0, 0.961}, {-1, -1, 0, 0.8666666666666667}, {0, 0, 0,
  0.9503333333333333}, {1, 0, 1, 0.9263333333333333}, {1, 0, -1,
  0.9206666666666667}, {-1, 0, 1, 0.9593333333333333}, {-1, 0, -1,
  0.9453333333333333}, {0, 0, 0, 0.9546666666666667}, {0, 1, 1,
  0.972}, {0, 1, -1, 0.9586666666666667}, {0, -1, 1,
  0.8853333333333333}, {0, -1, -1, 0.8626666666666667}, {0, 0, 0,
  0.938}};
x10 = 100;
dx1 = 50;
x20 = 3;
dx2 = 2;
x30 = 0.6;
dx3 = 0.2;
y1[x1_, x2_, x3_] =

```

```

0.947666666666667 + -0.010625 x1 + 0.04225 x2 +
0.006958333333333336 x3 + -0.00833333333333333 x1 x2 + \
-0.002083333333333335 x1 x3 + -0.002333333333333335 x2 x3 + \
-0.01120833333333335 x1 x1 + -0.0294583333333334 x2 x2 +
0.001458333333333334 x3 x3;
y2[x1_, x2_, x3_] =
0.947666666666667 + -0.010625 x1 + 0.04225 x2 +
0.006958333333333336 x3 + -0.00833333333333333 x1 x2 + 0 x1 x3 +
0 x2 x3 + -0.01120833333333335 x1 x1 + -0.0294583333333334 x2 x2 +
0 x3 x3;
y3[x1_, x2_, x3_] = y2[(x1 - 100)/50, (x2 - 3)/2, (x3 - 0.6)/0.2];
X = {1, x1, x2, x3, x1*x2, x1*x3, x2*x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0[x1_, x2_, x3_] = Fit[M, X, {x1, x2, x3}];
y0[x1, x2, x3]
y1[x1, x2, x3]
y2[x1, x2, x3]
Simplify[y3[q, Va, \[Psi]k]]
Opt = Find_Maximum[{y3[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
x10 - dx1}, {x2, x20 - dx2}, {x3, x30 - dx3}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
x3opt = x3 /. Last[Opt];
yt1[hp_, Va_] :=
0.7184 + 0.5 6.38857 hp - 0.25 245.714 hp^2 + 0.0996286 Va -
0.5 0.6 hp Va - 0.00957143 Va^2;
Plot_3D[{y3[x1, x2, x3opt]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x2,
x20 - dx2, x20 + dx2}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\( \*
StyleBox["q", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox["kr", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox["год", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox[SubscriptBox["V", "a"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \*

```

```

StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["m",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["^",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["c",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]), "\!\(\*
StyleBox[SubscriptBox["\[Eta]",
RowBox[{\'k\', \'-\' , \'k\'}]],\nFontFamily->"TimesNewRoman",\n
FontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]]\)\!\(\*
StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]),
LabelStyle ->
Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]
Plot_3D[{y3[x1, x2opt, x3]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x3,
x30 - dx3, x30 + dx3}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\(\*
StyleBox["q",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["kr",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["^",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox["род",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]), "\!\(\*
StyleBox[SubscriptBox["\[Psi]", \'k\'],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\*
StyleBox[SubscriptBox["\[Eta]",
RowBox[{\'k\', \'-\' , \'k\'}]],\nFontFamily->"TimesNewRoman",\n
FontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]]\)\!\(\*
StyleBox[" ",\nFontFamily->"TimesNewRoman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\),
LabelStyle ->
Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]

```

```

Plot_3D[{y3[x1opt, x2, x3]}, {x2, x20 - dx2, x20 + dx2}, {x3,
  x30 - dx3, x30 + dx3}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\( \*
StyleBox[SubscriptBox["V", "a"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["", "", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["m", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["c", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox[SubscriptBox["[Psi]", "k"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox[SubscriptBox["[Eta]", "k"], \nFontFamily->"TimesNewRoman", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]] \) \) \*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
LabelStyle ->
  Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
    FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
  PlotLegends -> Automatic]
Plot[{y3[x1opt, x2, x3opt], yt1[0.036, x2]}, {x2, x20 - dx2,
  x20 + dx2}, PlotStyle -> {Orange, Blue}, AxesLabel -> {"!\( \*
StyleBox[SubscriptBox["V", "a"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["", "", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["m", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox["c", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
StyleBox[SubscriptBox["[Eta]", "k"], \nFontFamily->"TimesNewRoman", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*
RowBox[{ "k", "-", "k" }], \nFontFamily->"TimesNewRoman", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]] \) \) \*

```

```

FontSize->14,\nFontWeight->\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]]\)\!\(\*
StyleBox[\" \"\", \nFontFamily->\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\",
LabelStyle ->
Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]

M = {{1, 1, 0, 0.9083333333333333}, {1, -1, 0, 0.8506666666666667}, {-1,
1, 0, 0.9546666666666667}, {-1, -1, 0, 0.8573333333333333}, {0, 0,
0, 0.939}, {1, 0, 1, 0.9106666666666667}, {1, 0, -1,
0.9016666666666667}, {-1, 0, 1, 0.962}, {-1, 0, -1, 0.934}, {0, 0,
0, 0.937}, {0, 1, 1, 0.9746666666666667}, {0, 1, -1,
0.9366666666666667}, {0, -1, 1, 0.8763333333333333}, {0, -1, -1,
0.8486666666666667}, {0, 0, 0, 0.9083333333333333}};
x10 = 100;
dx1 = 50;
x20 = 3;
dx2 = 2;
x30 = 0.6;
dx3 = 0.2;
y1[x1_, x2_, x3_] =
0.9281111111111111 + -0.01708333333333334 x1 +
0.04266666666666667 x2 +
0.01283333333333333 x3 + -0.009916666666666663 x1 x2 + -0.00475 x1 \
x3 + 0.002583333333333333 x2 x3 + -0.008680555555555541 x1 x1 + \
-0.02668055555555557 x2 x2 + 0.00765277777777779 x3 x3;
y2[x1_, x2_, x3_] =
0.9281111111111111 + -0.01708333333333334 x1 +
0.04266666666666667 x2 + 0.01283333333333333 x3 + 0 x1 x2 +
0 x1 x3 + 0 x2 x3 + 0 x1 x1 + -0.02668055555555557 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3[x1_, x2_, x3_] = y2[(x1 - 100)/50, (x2 - 3)/2, (x3 - 0.6)/0.2];
X = {1, x1, x2, x3, x1*x2, x1*x3, x2*x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0[x1_, x2_, x3_] = Fit[M, X, {x1, x2, x3}];
y0[x1, x2, x3]
y1[x1, x2, x3]
y2[x1, x2, x3]
Simplify[y3[q, Va, \[Psi]k]]
Opt = Find_Maximum[{y3[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
x10 - dx1}, {x2, x20 - dx2}, {x3, x30 - dx3}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
x3opt = x3 /. Last[Opt];

```

```

yt1[q_, Va_, \[Psi]k_] :=
  0.84132 + 0.0002836 q - 2.56 10^(-6) q^2 + 0.0627486 Va -
  0.0000956 q Va - 0.00597143 Va^2;
yt2[\[Psi]k_, \[Psi]d_, \[Psi]h_] :=
  2.9888845024681654` - 2.8491149373427587` \[Psi]d +
  0.801344851909586` \[Psi]d^2 - 2.849565030208016` \[Psi]h +
  1.7729321414892651` \[Psi]d \[Psi]h +
  0.7987671641958098` \[Psi]h^2 - 2.8457804414791754` \[Psi]k +
  1.7635776841782809` \[Psi]d \[Psi]k +
  1.7684604392498389` \[Psi]h \[Psi]k -
  1.773647900612001` \[Psi]d \[Psi]h \[Psi]k +
  0.800973274493292` \[Psi]k^2;
Plot_3D[{y3[x1, x2, x3opt]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x2,
  x20 - dx2, x20 + dx2}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\(\(*
StyleBox["q", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["kr", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["род", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"), "!\(\(*
StyleBox[SubscriptBox["V", "a"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["m", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(\(*
StyleBox["c", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"), "!\(\(*
StyleBox["\[Delta]", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]]\)!\(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"),
LabelStyle ->

```

```

Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
  FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]
Plot_3D[{y3[x1, x2opt, x3]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x3,
  x30 - dx3, x30 + dx3}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\(
StyleBox["q", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["kr", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["год", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"), "!\(
StyleBox[SubscriptBox["[Psi]", "k"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"), "!\(
StyleBox["[Delta]", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \n
FontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]]\)!\(
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"),
LabelStyle ->
  Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
    FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]
Plot_3D[{y3[x1opt, x2, x3]}, {x2, x20 - dx2, x20 + dx2}, {x3,
  x30 - dx3, x30 + dx3}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"!\(
StyleBox[SubscriptBox["V", "a"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["m", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)!\(
StyleBox["c", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)"), "!\(
StyleBox[SubscriptBox["[Psi]", "k"], \nFontFamily->"Times New \

```

```

Roman\", \nFontSize->14, \nFontWeight->\\"Normal\", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\", \"!\(\\*
StyleBox[\"[Delta]\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.])\\)\(\\*
StyleBox[\" \", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\"},
LabelStyle ->
  Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
    FontFamily -> \"Times\"], Mesh -> 20, PlotTheme -> \"Detailed\",
    PlotLegends -> Automatic]
Plot_3D[{y3[x1, x2, x3opt], yt1[x1, x2, x3opt]}, {x1, x10 - dx1,
  x10 + dx1}, {x2, x20 - dx2, x20 + dx2},
  PlotStyle -> {Orange, {Opacity[0.6], Blue}}, AxesLabel -> {\"!\(\\*
StyleBox[\"q\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\",\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\" \", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\"kr\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\"^\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\"род\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\", \"!\(\\*
StyleBox[SubscriptBox[\"V\", \"a\"], \nFontFamily->\\"Times New \
Roman\", \nFontSize->14, \nFontWeight->\\"Normal\", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\",\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\" \", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\"m\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\"^\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\\)\(\\*
StyleBox[\"c\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\", \"!\(\\*
StyleBox[\"[Delta]\", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.])\\)\(\\*
StyleBox[\" \", \nFontFamily->\\"TimesNewRoman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\"},
LabelStyle ->

```

```

Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
  FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]
Plot[{y3[x1opt, x2opt, x3],
  1.02 y2[x3, (1 - x3)/2, (1 - x3)/2]}, {x3, x30 - dx3, x30 + dx3},
PlotStyle -> {Orange, Blue}, AxesLabel -> {"\!\(\*
StyleBox[SubscriptBox["\[Psi]", "k"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]])", "\!\(\*
StyleBox["\[Delta]", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \n\
FontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]])\!\(\*
StyleBox[" " \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]])"},
LabelStyle ->
Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
  FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]

M = {{1, 1, 0, 850.3666666666667}, {1, -1, 0, 382.8333333333333}, {-1,
  1, 0, 723.3333333333333}, {-1, -1, 0, 215.5333333333333}, {0, 0, 0,
  560}, {1, 0, 1, 590.1666666666667}, {1, 0, -1, 643.8}, {-1, 0, 1,
  499.7333333333333}, {-1, 0, -1, 519.4333333333333}, {0, 0, 0,
  598.8666666666667}, {0, 1, 1, 837.9666666666667}, {0, 1, -1,
  815.1333333333333}, {0, -1, 1, 307.7333333333333}, {0, -1, -1,
  273.7}, {0, 0, 0, 520.2666666666667}};
x10 = 100;
dx1 = 50;
x20 = 3;
dx2 = 2;
x30 = 0.6;
dx3 = 0.2;
y1[x1_, x2_, x3_] =
  559.7111111111111 + 63.64166666666667 x1 +
  255.875 x2 + -2.058333333333334 x3 + -10.06666666666667 x1 x2 + \
-8.483333333333335 x1 x3 + -2.800000000000001 x2 x3 + -6.022222222222235 \
x1 x1 + -10.67222222222224 x2 x2 + 9.594444444444421 x3 x3;
y2[x1_, x2_, x3_] =
  559.7111111111111 + 63.64166666666667 x1 + 255.875 x2 + 0 x3 +
  0 x1 x2 + 0 x1 x3 + 0 x2 x3 + 0 x1 x1 + 0 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3[x1_, x2_, x3_] = y2[(x1 - 100)/50, (x2 - 3)/2, (x3 - 0.6)/0.2];
X = {1, x1, x2, x3, x1*x2, x1*x3, x2*x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0[x1_, x2_, x3_] = Fit[M, X, {x1, x2, x3}];
y0[x1, x2, x3]
y1[x1, x2, x3]

```

```

y2[x1, x2, x3]
Simplify[y3[q, Va, \[Psi]k]]
Opt = Find_Minimum[{y3[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
  x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
  x10 - dx1}, {x2, x20 - dx2}, {x3, x30 - dx3}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
x3opt = x3 /. Last[Opt];
Plot_3D[{y3[x1, x2, x3opt]}, {x1, x10 - dx1, x10 + dx1}, {x2,
  x20 - dx2, x20 + dx2}, PlotStyle -> {Orange}, AxesLabel -> {"\!(\(*
StyleBox["q", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["kr", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["род", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)", "\!(\(*
StyleBox[SubscriptBox["V", "a"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["m", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["^", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["c", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)", "\!(\(*
StyleBox["P", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox["Br", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!(\(*
StyleBox[" ", \nFontFamily->"TimesNewRoman", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->"Normal", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)",

```

```

LabelStyle ->
Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black,
FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed",
PlotLegends -> Automatic]

nn[q_, Va_, \[Psi]k_] :=
0.7485520833333328` - 4.48333333333334`*^-6 q^2 +
q (0.0009341666666666791` - 0.0000833333333333333` Va) +
0.07364583333333341` Va - 0.007364583333333335` Va^2 +
0.03479166666666668` \[Psi]k;
PP[q_, Va_, \[Psi]k_] :=
48.615277777777758` + 1.2728333333333341` q + 127.9375` Va;
\[Delta]\[Delta][q_, Va_, \[Psi]k_] :=
0.7997465277777775` - 0.000341666666666668` q +
0.06135416666666669` Va - 0.0066701388888888925` Va^2 +
0.06416666666666651` \[Psi]k;
x10 = 100;
dx1 = 50;
x20 = 3;
dx2 = 2;
x30 = 0.6;
dx3 = 0.2;
OptnnMin =
Find_Minimum[{nn[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}];
nnMin = First[OptnnMin];
OptnnMax =
Find_Maximum[{nn[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}];
nnMax = First[OptnnMax];
OptPPMin =
Find_Minimum[{PP[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}];
PPMin = First[OptPPMin];
OptPPMax =
Find_Maximum[{PP[x1, x2, x3], x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1,
x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2, x30 - dx3 <= x3 <= x30 + dx3}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}];
PPMax = First[OptPPMax];
"\[Psi]k"
x30 - dx3
Opt = Find_Maximum[(((nn[x1, x2, x30 - dx3] - nnMin)/(nnMax -

```

```

nnMin))^2*((PPMax - PP[x1, x2, x30 - dx3])/(PPMax -
PPMin))*((x1 -(x10 - dx1))/((x10 + dx1) - (x10 - dx1))),
x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
"\[Eta]k-k"
nn[x1opt, x2opt, x30 - dx3]
"P, κBτ"
PP[x1opt, x2opt, x30 - dx3]
"\[Delta]"
\[Delta]\[Delta][x1opt, x2opt, x30 - dx3]
"\[Psi]k"
x30 - 0 dx3
Opt = Find_Maximum[{{{(nn[x1, x2, x30 - 0 dx3] - nnMin)/(nnMax -
nnMin))^2*((PPMax - PP[x1, x2, x30 - 0 dx3])/(PPMax -
PPMin))*((x1 -(x10 - dx1))/((x10 + dx1) - (x10 - dx1))),
x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
"\[Eta]k-k"
nn[x1opt, x2opt, x30 - 0 dx3]
"P, κBτ"
PP[x1opt, x2opt, x30 - 0 dx3]
"\[Delta]"
\[Delta]\[Delta][x1opt, x2opt, x30 - 0 dx3]
"\[Psi]k"
x30 + dx3
Opt = Find_Maximum[{{{(nn[x1, x2, x30 + dx3] - nnMin)/(nnMax -
nnMin))^2*((PPMax - PP[x1, x2, x30 + dx3])/(PPMax -
PPMin))*((x1 -(x10 - dx1))/((x10 + dx1) - (x10 - dx1))),
x10 - dx1 <= x1 <= x10 + dx1, x20 - dx2 <= x2 <= x20 + dx2}, {x1,
x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
x2opt = x2 /. Last[Opt];
"\[Eta]k-k"
nn[x1opt, x2opt, x30 + dx3]
"P, κBτ"
PP[x1opt, x2opt, x30 + dx3]
"\[Delta]"
\[Delta]\[Delta][x1opt, x2opt, x30 + dx3]

```

Додаток Л

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ, д-р с.-г. наук, проф.



Юрій ТКАЛІЧ
«10» жовтня 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор



ТОВ НВО «Сортувальні машини»
Станіслав МЕЛЬНИК
«06» жовтня 2023 р.

АКТ

дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння та сміття насіння соняшника

В період з 03.04.2023р. по 12.04.2023р. у ТОВ НВО «Сортувальні машини» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння та сміття насіння соняшника.

Розробка технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння та сміття насіння соняшника проводилась при участі директора ТОВ НВО «Сортувальні машини» Мельника Станіслава Михайловича, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) Кудрявцева Ігоря Миколайовича та завідувача кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцента Кошульки Віталія Сергійовича.

Одержані наступні результати: перероблено насіння соняшника – 10 тон, вилучено олійної домішки із лушпиння 3,4%, вилучено олійної домішки із сміття насіння соняшника - 37%

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки та обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння та сміття насіння соняшника придатною до застосування у агропромисловому комплексі, зокрема харчовій промисловості. Одержані продукти (олійна домішка) відповідають вимогам технологічного регламенту, а дослідно-промислова сортувальна машина СС-012 відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «Машини сортувальні для сипучих матеріалів».

Здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» ДДАЕУ



Ігор КУДРЯВЦЕВ

Завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ, доцент, канд. техн. наук



Віталій КОШУЛЬКО



ТОВ «Потоки»
ЄДРПОУ: 40832205
ІНН: 408322004645
р/р UA313204780000026007924858689
Банк: UKRGAZBANK, JSB
Адрес: вул. Байкальська, 9, м.
Дніпро,
Дніпропетровська обл
Tel.: +38 098 860 23 43
info@mez.com.ua

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор ТОВ «ПОТОКИ»

Тубольцев Д.О.

«05» 10 2



АКТ

дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння соняшнику та обладнання для сортування зернових сумішей

В період з 01.10.2021 по 01.02.2022 у ТОВ «ПОТОКИ» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття соняшника.

Промислову апробацію розробленої технології та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття соняшника проводили під керівництвом директора ТОВ «ПОТОКИ», а здобувач кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції І.М.Кудрявцев особисто приймав участь у пуско-налагоджувальних роботах, тестуванні нового обладнання, корегування його роботи, оцінці якості отриманих продуктів та оптимізації отриманих результатів.

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки насіння соняшнику з використанням обладнання для сортування зернових сумішей придатною до застосування у харчовій промисловості. Одержані продукти (олійна домішка із сміття соняшника) відповідають вимогам технологічного регламенту, дослідно-промислова сортувальна машина відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «МАШИНИ СОРТУВАЛЬНІ ДЛЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ».

Здобувач кафедри технології
зберігання і переробки
сільськогосподарської продукції _____ Кудрявцев І.М.

Науковий керівник _____ Чурсінов Ю.О
доктор технічних наук,
професор



ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор ТДВ «УКРОЛІЯПРОДУКТ»

О.Г. Григоренко

2022р.

АКТ

дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника.

В період з 01.12.2021 по 01.04.2022 у ТДВ «Укроліяпродукт» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника.

Розробка технології проводилась під керівництвом директора ТДВ «УКРОЛІЯПРОДУКТ» О.Г.Григоренко та здобувачем інженерно-технологічного факультету І.М.Кудрявцевим, розробка сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника проводилась здобувачем кафедри харчових технологій І.М.Кудрявцевим.

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки та обладнання для сортування зернових сумішей придатною до застосування у харчовій промисловості. Одержані продукти (олійна домішка із лушпиння соняшника) відповідають вимогам технологічного регламенту, дослідно-промислова сортувальна машина СС-003 відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «МАШИНИ СОРТУВАЛЬНІ ДЛЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ».

Здобувач кафедри

харчових технологій

І.М.Кудрявцев

Науковий керівник

доктор технічних наук,

професор

Ю.О.Чурсінов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ, д-р с.-г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ
_____ 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ПП «Віктор і К»Віктор КОРОЛЬ
_____ 2023 р.

АКТ

**дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння
соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із
лушпиння соняшника**

В період з 03.04.2023р. по 12.04.2023р. у ПП «Віктор і К» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника.

Розробка технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння проводилась при участі генерального директора ПП «Віктор і К» Короля Віктора Михайловича, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) Кудрявцева Ігоря Миколайовича та завідувача кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцента Кошульки Віталія Сергійовича.

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки та обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння придатною до застосування у агропромисловому комплексі, зокрема харчовій промисловості. Одержані продукти (олійна домішка) відповідають вимогам технологічного регламенту, а дослідно-промислова сортувальна машина СС-012 відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «Машини сортувальні для сипучих матеріалів».

Здобувач третього (освітньо-наукового)
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування» ДДАЕУ

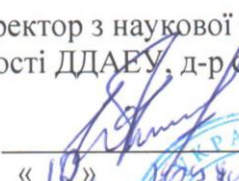
_____ Ігор КУДРЯВЦЕВ

Завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ,
доцент, канд. техн. наук

_____ Віталій КОШУЛЬКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ, д-р с.-г. наук, проф.

 Юрій ТКАЛІЧ
« 10 » 2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Гідросенд»

 Олександр ФОЦІЙ
« 10 » 2024 р.



АКТ

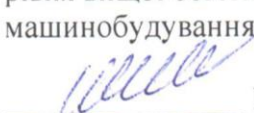
дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника

В період з 10.12.2024р. по 12.12.2024р. у ТОВ «ГІДРОСЕНД» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника.

Розробка технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника проводилась при участі директора ТОВ «ГІДРОСЕНД» Фоція Олександра Миколайовича, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) Кудрявцева Ігоря Миколайовича та завідувача кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцента Кошульки Віталія Сергійовича.

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки та обладнання для вилучення олійної домішки із лушпиння соняшника придатною до застосування у агропромисловому комплексі, зокрема харчовій промисловості. Одержані продукти (олійна домішка) відповідають вимогам технологічного регламенту, а дослідно-промислова сортувальна машина СС-012 відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «Машини сортувальні для сипучих матеріалів».

Здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» ДДАЕУ

 Ігор КУДРЯВЦЕВ

Завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ, доцент, канд. техн. наук

 Віталій КОШУЛЬКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ, д-р.о.-г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ

2023 р.

«20»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Гідросенд»

Олександр ФОЦІЙ

2023 р.



АКТ

дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника

В період з 10.11.2023р. по 20.11.2023р. у ТОВ «ГІДРОСЕНД» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника.

Розробка технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника проводилась при участі директора ТОВ «ГІДРОСЕНД» Фоція Олександра Миколайовича, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) Кудрявцева Ігоря Миколайовича та завідувача кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцента Кошульки Віталія Сергійовича.

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки та обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника придатною до застосування у агропромисловому комплексі, зокрема харчовій, промисловості. Одержані продукти (олійна домішка) відповідають вимогам технологічного регламенту, а дослідно-промислова сортувальна машина СС-012 відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «Машини сортувальні для сипучих матеріалів».

Здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» ДДАЕУ

Ігор КУДРЯВЦЕВ

Завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ, доцент, канд. техн. наук

Віталій КОШУЛЬКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАЕУ, д-р с.-г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ
2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «Агропроінвест08»Костянтин КАЦЮБА
2024 р.

АКТ

дослідно-промислових випробовувань технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника

В період з 09.09.2024р. по 28.10.2024р. у ТОВ «Агропроінвест08» проведено випробовування технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника.

Розробка технології комплексної переробки насіння соняшника та сортувального обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника проводилась при участі директора ТОВ «Агропроінвест08» Кацюби Костянтина Володимировича, здобувача третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ) Кудрявцева Ігоря Миколайовича та завідувача кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцента Кошульки Віталія Сергійовича.

Одержані результати дають підстави вважати технологію комплексної переробки та обладнання для вилучення олійної домішки із сміття насіння соняшника придатною до застосування у агропромисловому комплексі, зокрема харчовій промисловості. Одержані продукти (олійна домішка) відповідають вимогам технологічного регламенту, а дослідно-промислова сортувальна машина СС-012 відповідає вимогам технічних умов ТУ У 28.9-43928874-001:2020 «Машини сортувальні для сипучих матеріалів».

Здобувач третього (освітньо-наукового)
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування» ДДАЕУ

 Ігор КУДРЯВЦЕВ

Завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ,
доцент, канд. техн. наук

 Віталій КОШУЛЬКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор – проректор з
навчальної роботи Дніпровського

державного аграрно-економічного
університету (ДДАЕУ),

канд. с.-г. наук, проф.

Дмитро ОНОПРИЄНКО



«12» вересня 2024 р.

А К Т

про використання результатів дисертації

на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

Кудрявцева Ігора Миколайовича

**«Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів аеродинамічного
сепаратора для очищення відходів насіннєвої суміші соняшника»**

у навчальному процесі кафедри харчових технологій ДДАЕУ

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А. М. та членів – завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Кошулько В. С., доцента кафедри харчових технологій ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Тertiшного О. О. підтверджує впровадження науково-практичних результатів за дисертаційною роботою на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії аспіранта Кудрявцева Ігора Миколайовича «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насіннєвої суміші соняшника» у навчальному процесі кафедри харчових технологій ДДАЕУ і констатує

– аспірантом Кудрявцевим І. М. впроваджено в курс дисципліни «Машини і обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія наступне:

матеріали до лекційного заняття на тему: «Машини та обладнання для очищення зерна від домішок». Приведено принципи роботи та будову аеродинамічного сепаратора на прикладі дослідної установки представленої у дисертаційній роботі Кудрявцева І. М.

– аспірантом Кудрявцевим І. М. впроваджено в курс дисципліни «Експлуатація і обслуговування обладнання харчових виробництв» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 181 – Харчові технології наступне: завдання до виконання практичної роботи на тему: «Розробка технології монтажу обладнання переробних виробництв». Мета роботи – отримати знання по методиці, призначення і правилам складання технологічних карт на монтаж та введення в експлуатацію обладнання.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного
факультету ДДАЕУ,
д-р наук з держ. управ., проф.

Андрій ПУГАЧ

Члени комісії:

завідувач кафедри харчових технологій ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц.

Віталій КОШУЛЬКО

доцент кафедри харчових технологій ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц.

О. Тертишний / Олег ТЕРТИШНИЙ

Додаток М

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування:

1. **Кудрявцев, І.М.** (2024). Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження аеродинамічного сепаратора. Вібрації в техніці та технологіях, 2 (113): 132–142. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-2-15
2. **Kudriavtsev, I.** (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (125): 47–55. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-2-5
3. Koshulko, V., & **Kudriavtsev, I.** (2024). Justification of the design of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 10 (41), II: 113-122. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.113-122 *(Здобувачу належать результати чисельного моделювання процесу сепарації відходів соняшнику)*
4. **Kudriavtsev, I.**, Koshulko, V., Sova, N., & Leusenko, O. (2025). Results of experimental studies of a column-type aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, № 1 (128): 45–54. DOI: 10.37128/2520-6168-2025-1-5 *(Здобувачу належать результати експериментальних досліджень процесу сепарації відходів соняшнику)*

Патенти України:

5. **Кудрявцев, І.М., & Бардадим, О.В.** (2024). Патент України на корисну модель №155711. Сортувальний агрегат колонного типу для тонкого очищення насіннєвих матеріалів. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202300562. Заявл. 15.02.2023. Опубл. 03.04.2024, бюл. № 14/2024 *(Здобувачу належать обґрунтування форми і геометричних розмірів сортувальний агрегат).*

6. Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Бардадим, О.В., Ярошкін, В.П., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2024). Патент України на корисну модель №155727. Технологічна лінія пресування соняшникової олії повного циклу на базі адаптивних сортувальних машин із програмованими параметрами. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202303069. Заявл. 23.06.2023. Опубл. 03.04.2024, бюл. № 14/2024 *(Здобувачу належать ідея оснащати технологічну лінію адаптивними сортувальними машинами з програмованими параметрами)*.

7. Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Бардадим, О.В., Ярошкін, В.П., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2024). Патент України на корисну модель №156504. Спосіб сепарації сипучої суміші у текучому двостадійному середовищі. Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини», № u202305759. Заявл. 29.11.2023. Опубл. 03.07.2024, бюл. № 27/2024 *(Здобувачу належать ідея додатково включити другу стадію, при якій здійснюють сепарацію у текучому двостадійному середовищі з послідовним використанням віброінерційного та пневматичного способів генерації псевдорозріджених середовищ)*

Авторське право на твір:

8. **Кудрявцев, І.М.** (2023). Авторське право на службовий твір №121609. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів СС-012. Настанови з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 06.12.2023. Опубл. 29.12.2023, бюл. № 78.

9. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Мельник, М.М., Ярошкін, & В.П. (2024). Авторське право на службовий твір №7286. Брошура «Машини сортувальні для сипучих матеріалів. Програма та методики випробувань». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 23.10.2024. Опубл. 29.11.2024, бюл. №84. *(Здобувачу належать опис методики випробування сортувальних машин)*

10. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., Бардадим, В.К., **Кудрявцев, І.М.**, Мельник, М.М., & Ярошкін, В.П. (2024). Авторське право на службовий твір № 7242. Брошура «Машина сортувальна для сипучих матеріалів лабораторна СС-002-05. Настанова з експлуатації». Заявник: Товариство з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче об'єднання «Сортувальні машини». Заявл. 12.09.2024. Опубл. 29.11.2024, бюл. №84. *(Здобувачу належать опис методики випробування сортувальних машин)*

Статті у наукових фахових виданнях України інших спеціальностей:

11. Чурсінов, Ю.О., Луценко, М.В., & **Кудрявцев, І.М.** (2022). Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. Наука технології інновації, 2 (22): 61–67. DOI: 10.35668/2520-6524-2022-2-08 *(Здобувачу належать розрахунок техніко-економічної ефективності доцільності сортування відходів).*

12. Чурсінов, Ю.О., **Кудрявцев, І.М.**, & Луценко, М.В. (2022). Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2 (12): 93–99. DOI: 10.20998/2413-4295.2022.02.14. *(Здобувачу належать розробка конструктивно-технологічної схеми мобільної установки для сортування зернових відходів).*

Статті у інших виданнях України:

13. **Кудрявцев, І.М.**, & Мельник, С.М. (2022). Проблеми визначення технологічної ефективності сортувального обладнання. Веб-сайт «Elevatorist» <https://elevatorist.com/blog/read/822-problemi-viznachennya-tehnologichnoyi-efektivnosti-sortuvalnogo-obladnannya> *(Здобувачу належать опис сепаратора колонного типу для очищення засмічених насіннєвих матеріалів).*

Тези і матеріали конференцій:

14. **Кудрявцев, І.М.,** Чурсінов, Ю.О., & Луценко, М.В. (2022). Innovative sorting equipment for the food industry. Матеріали I міжнародної наукової конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів» присвячена 100-річчю Дніпровського державного аграрно-економічного університету (20 травня 2022 р.). Дніпро, “Середняк Т.К.”: 116–118. *(Здобувачу належить аналіз сортувального обладнання для харчової промисловості).*

15. **Кудрявцев, І.М.,** & Чурсінов, Ю.О. (2022). Перспективи сортування відходів пшениці. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Теоретичні та практичні питання аграрної науки» (18 травня 2022 р.). Дніпро, ДДАЕУ. Ч. 1: 293–295. *(Здобувачу належить аналіз сортувального обладнання для сортування насіння).*

16. **Кудрявцев, І.М.,** Луценко, М.В., Мельник, С.М., & Мельник, М.М. (2023). Аспекти сталого розвитку підприємства в умовах «циркулярної економіки». Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи» (20-21 березня 2023 р.). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»: 736–738. *(Здобувачу належить аналіз процесу очищення відходів в умовах сталого розвитку підприємства).*

17. Чурсінов, Ю.О., **Кудрявцев, І.М.,** Луценко, М.В., & Мельник, М.М. (2023). Innovations of the sorting process in the technology of oil extraction production. Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (20-21 березня 2023 р.). Полтава: ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»: 467–468. *(Здобувачу належить аналіз процесу сортування в технології олійно-екстракційного виробництва).*

18. **Кудрявцев, І.М.,** Бардадим, О.В., & Мельник, С.М. (2023). Концепція «NO HUSKS» (без лушпиння) та перспективи її впровадження у шеретувально віяльних відділеннях олійно екстракційних підприємств. Тези доповідей II Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Молодь – науці і виробництву: Актуальні питання харчової промисловості» (10 травня 2023

р.). Херсон: ХДАЕУ: 78–79. *(Здобувачу належить опис перспектив впровадження нової технології у олійно-екстракційні підприємства).*

19. Мельник, С.М., Бардадим, О.В., **Кудрявцев, І.М.**, & Мельник, М.М. (2024). Аспекти функціонування олійножирового підприємства в умовах кризи та інженерія пост кризового періоду. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Особливості функціонування економіки в умовах кризи». (31 січня 2024 р.). Черкаси, Східноєвропейський центр наукових досліджень: 188–192. *(Здобувачу належать опис перспектив впровадження аеродинамічного сепаратора колонного типу)*

20. **Кудрявцев, І.М.**, Кошулько, В.С., & Мельник, М.М. (2024). Порівняльний аналіз результатів чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику і експериментальних результатів. Матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (01–25 листопада 2024 р.). Запоріжжя, ТДАТУ: 27–32. *(Здобувачу належать результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику)*

21. **Кудрявцев, І.М.**, Кошулько, В.С., & Мельник, М.М. (2024). Порівняльний аналіз даних чисельного моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику та експериментальних результатів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ» (26–27 листопада 2024 р.). Харків, ДБУ: 417–419. *(Здобувачу належать результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику)*