

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ВОЛИНЕЦЬ ЄВГЕНІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.929.7 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ
ВІБРАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА

13 Механічна інженерія
133 Галузеве машинобудування

Подається на здобуття ступеня доктора філософії.

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

 Євгеній ВОЛИНЕЦЬ

Науковий керівник:
Полевода Юрій Алікович,
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2025

АНОТАЦІЯ

Волинець Є.О. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 Механічна інженерія). Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, 2025.

У дисертації розв'язано актуальне наукове завдання щодо підвищення якості приготування комбікормів шляхом обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача.

У вступі висвітлено актуальність дослідження, визначено його мету та сформульовано основні завдання для досягнення поставлених цілей. Охарактеризовано наукову новизну роботи, її практичне значення, а також відзначено особистий внесок автора у виконанні дослідження. Наведено інформацію щодо апробації отриманих результатів, їх опублікування, а також представлено структуру та обсяг дисертації.

Вирішення даної мети зведено до розв'язання таких науково-прикладних завдань: на основі аналізу існуючих конструкцій змішувачів, а також результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесу змішування, розробити принципову схему вібраційного змішувача; виконати аналітичні дослідження напружено-деформованого стану лопаті та обґрунтувати її геометричні розміри; розробити математичну модель, провести її аналітичне дослідження та теоретично обґрунтувати режимні параметри вібраційного змішувача; розробити динамічну модель вібраційного змішувача та теоретично встановити його амплітудно-частотні та енергетичні залежності; розробити лабораторну установку та провести експериментальні дослідження для встановлення залежності показників якості суміші, продуктивності та питомої енергоемності процесу від конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача; виконати виробничу перевірку вібраційного змішувача та визначити його економічну ефективність.

Об'єкт дослідження – процес змішування сипких сумішей у вібраційному змішувачі.

Предмет дослідження – закономірності зміни показників якості сипких сумішей, продуктивності та питомої енергоємності процесу змішування від конструктивно-режимних параметрів змішувача.

На основі проведених наукових досліджень зменшено енергетичні витрати при забезпеченні встановлених показників якості змішування сипких сумішей шляхом обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача. Ґрунтуючись на цьому вперше розроблено: розроблено комп'ютерну симуляційну модель напружено-деформованого стану лопаті вібраційного змішувача залежно від конструктивних параметрів, що дозволяє обґрунтувати оптимальні значення для забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції за умови мінімізації її маси; розроблено комп'ютерну модель процесу змішування компонентів у запропонованій конструкції вібраційного обладнання та встановлені рівняння регресії для часу досягнення заданої однорідності від частоти обертання лопатевого вала, частоти обертання контейнера, частоти коливання вібробудувача та амплітуди коливань контейнера; дістали подальший розвиток: динамічна модель вібраційного змішувача з лопатевим валом, яка дозволяє встановити залежності амплітуди коливань контейнера і потужності, що витрачається змішувачем від частоти коливання вібробудувача; методологічні підходи до чисельного моделювання процесу функціонування вібраційного змішувача.

Результати дослідження можуть бути застосовані при проектуванні та вдосконаленні вібраційних змішувачів для використання в сільськогосподарській, харчовій, фармацевтичній, будівельній та інших галузях промисловості, що потребують високоякісного змішування сипких матеріалів.

У першому розділі наведено способи змішування сипких продуктів. В основному це два способи – гравітаційний та примусовий (механічний). Перший здійснюється під дією сил тяжіння в барабанних, лоткових і бункерних змішувачах, другий в шнекових і лопатевих. З'ясовано, що ефективність

використання комбікормів у птахівництві безпосередньо залежить від фізико-хімічних властивостей сировини, рівня її однорідності та поживної збалансованості. Найбільш критичними параметрами, що впливають на якість змішування, є розмір частинок, вологість, насипна щільність і різні напрямки руху компонентів. Використання віброреологічних моделей дозволяє глибше зрозуміти механізми переміщення частинок, псевдозрідження, сегрегації та взаємодії з вібруючими поверхнями, що є важливим для обґрунтування нової конструкції віброзмішувача. Встановлено, що вібраційна в'язкість є ключовим параметром, що впливає на структуру та інтенсивність циркуляційних потоків усередині робочої камери змішувача.

У другому розділі на основі попередніх досліджень і досвіду створення змішувальних пристроїв із вібраційними перетворювачами руху розроблено вдосконалену конструкцію вібраційного змішувача, що забезпечує інтенсифікацію процесу за рахунок поєднання дії коливань, обертального руху лопатевого валу й обертання контейнера на 360° навколо горизонтальної осі. Така конструкція дозволяє ефективно зменшити адгезійні сили між частинками матеріалу шляхом залучення гравітаційного ефекту, що в сукупності забезпечує підвищення ефективності та енергоощадність процесу змішування.

Виконано аналітичне обґрунтування геометричних параметрів лопаті лопатевого валу змішувача дозволило визначити раціональні значення її розмірів та розміщення з урахуванням ефективності захоплення і переміщення частинок суміші (загальна довжина лопаті $L_s = 185$ мм; висота трапецієподібної пластинки $L_b = 62$ мм; більша основа трапецієподібної пластинки $B_b = 75$ мм; менша основа трапецієподібної пластинки $b_b = 45$ мм; кут нахилу трапецієподібної пластинки $\theta_b = 25^\circ$; радіус валу $R_s = 20$ мм; радіус контейнера $R_d = 200$ мм), а також забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції. Використання чисельного моделювання у SolidWorks Simulation дозволило встановити раціональні значення товщини трапецієподібної пластини ($\delta_b = 2$ мм) і радіуса прутка лопаті ($R_b = 8$ мм) за критеріями деформації та маси.

Досліджено вплив конструкції лопатевого валу, варіанти якого

відрізняються кількістю витків спіралі за якою розташовані лопаті, на ефективність процесу змішування сипких компонентів. Встановлено, що за малої кількості витків (1-2,25) забезпечується більш рівномірний розподіл швидкостей і ефективне аксіально-тангенціальне перемішування. Найбільш інтенсивне зростання δ відзначено для конструкції з 2,25 витками, а найвища якість змішування – при одному витку. Надмірне збільшення кількості витків (до 4,5-9) призводить до зниження ефективності через утворення застійних зон і нерівномірності потоків.

Встановлено квадратичну регресійну залежність часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу n_d , частоти обертання контейнера n_k , частоти коливання віброзбуджувача n_b , амплітуди коливань контейнера A_b (або коефіцієнта режиму вібрації k_b). Встановлено наявність нелінійної взаємодії між параметрами, зокрема між частотою та амплітудою коливань. Найменшого значення $t_{0,9} = 81,2$ с досягнуто при оптимальному поєднанні факторів: $n_d = 45,9 \text{ хв}^{-1}$, $n_k = 24,4 \text{ хв}^{-1}$, $n_b = 823,8 \text{ хв}^{-1}$, $A_b = 8,8 \text{ мм}$ (або $k_b = 6,68$).

У третьому розділі наведено програму, опис експериментальної установки і методику проведення експериментальних досліджень.

Завданням досліджень експериментально-дослідного зразка вібраційного змішувача є знаходження: часу досягнення заданої однорідності $0,9 t_{0,9}$ (с); продуктивності Q (кг/хв); потужності, що споживається змішувачем P (Вт); питомих витрат енергії E (Дж/кг).

У якості характеристики вібраційного поля прийняли коефіцієнт режиму вібрації, або коефіцієнт динамічності. Як технологічне завантаження використовували кукурудзу (дєрь грубого помелу, 3-5 мм) та горох (дєрь грубого помелу, 3-5 мм). Щільність суміші становила в межах $700\text{--}800 \text{ кг/м}^3$. Загальна маса завантаження складала 40 кг.

Проби суміші відбиралися точковим способом з використанням спеціального пробовідбірника. Це дозволило отримати репрезентативну вибірку для кількісного аналізу. Маса однієї проби становила 50 г, що забезпечувало

достатню точність і зручність у ручному сортуванні.

Оцінку енергетичних показників роботи змішувача проводили з використанням цифрового ватметра шляхом вимірювання споживаної електричної потужності. На основі отриманих значень розраховували питомі витрати енергії з урахуванням продуктивності.

У четвертому розділі наведено результати реалізації програми експериментальних досліджень.

Визначено діапазони зміни основних конструктивно-режимних параметрів: частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}} = 20-60 \text{ хв}^{-1}$, контейнера $n_{\text{к}} = 0-30 \text{ хв}^{-1}$, коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}} = 0-12$, часу змішування $t = 70-130 \text{ с}$. Як вихідні показники досліджувалися коефіцієнт однорідності суміші δ , продуктивність Q , споживана потужність P , питомі витрати енергії E та тривалість змішування до заданої якості $t_{0,9}$.

Встановлено, що коефіцієнт однорідності суміші δ істотно залежить від тривалості змішування й інтенсивності дії механічних і вібраційних факторів. Максимальне значення $\delta = 0,932$ досягнуто при $n_{\text{л}} = 40,9 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 23,9 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 6,83$, $t = 130 \text{ с}$. Мінімальний рівень $\delta = 0,851$ спостерігається при $n_{\text{л}} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 0 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 0$, $t = 70 \text{ с}$.

Визначено, що для досягнення порогового значення однорідності $\delta = 0,9$ мінімальна тривалість змішування $t_{0,9}$ становить 70 с при раціональних режимах, тоді як при нефективних комбінаціях параметрів цей час збільшується до 130 с.

Порівняння результатів, отриманих за експериментальними регресійними моделями, з теоретичними залежностями показало високу ступінь узгодженості. Зокрема, для залежності тривалості змішування $t_{0,9}$, коефіцієнт кореляції становив 0,87, що відповідає високому рівню зв'язку за шкалою Чеддока.

Продуктивність змінюється в межах від 23,7 до 28,6 кг/хв. Максимум досягається при $n_{\text{л}} = 40 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 6,5$. При мінімальних значеннях параметрів ($n_{\text{л}} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 0 \text{ хв}^{-1}$) спостерігається зменшення продуктивності до $Q = 23,7 \text{ кг/хв}$.

Потужність змішувача залежить від усіх основних режимних параметрів і

змінюється в межах 465-1272 Вт. Мінімальне енергоспоживання зафіксовано при $n_{\text{л}} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 0 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 0,1$, а максимальне – при $n_{\text{л}} = 60 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 11,2$. Найбільший вплив на потужність має частота обертання лопатевого валу.

Аналіз питомих витрат енергії E показав, що їх величина тісно пов'язана як із потужністю, так і з продуктивністю змішувача. Мінімальні витрати $E = 1228 \text{ Дж/кг}$ спостерігаються при $n_{\text{л}} = 23,3 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 10,1 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 2,69$, а максимальні – $E = 3000 \text{ Дж/кг}$ при $n_{\text{л}} = 60 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 11,2$.

Узагальнюючи результати, найкращі показники було досягнуто при частоті обертання лопатевого валу близько $n_{\text{л}} = 23,3 \text{ хв}^{-1}$, контейнера $n_{\text{к}} = 10,1 \text{ хв}^{-1}$ та коефіцієнті режиму вібрації на рівні $k = 2,69$, при цьому $P = 513 \text{ Вт}$, $Q = 25,1 \text{ кг/хв}$, $t_{0,9} = 95,7 \text{ с}$, $E = 1228 \text{ Дж/кг}$.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язані з обґрунтуванням конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача, були впроваджені у навчальний процес освітньо-професійної програми «Агроінженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисципліни «Машини, обладнання та їх використання для переробки сільськогосподарської продукції», а також перевірені в умовах господарства ФГ «Літагор». Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» отримало технічну документацію на виготовлення дослідного зразка для подальшого промислового освоєння.

Здійснена техніко-економічна оцінка експериментального вібраційного змішувача засвідчила його перевагу над базовою моделлю за рівнем експлуатаційних витрат, що досягнуто завдяки зниженню енергоємності процесу змішування. Річний економічний ефект становить 35 951 грн, а термін окупності капіталовкладень – 1,17 року.

Ключові слова: вібрація, амплітуда, змішування, сипке середовище, віброшвидкість, віброприскорення, процес, моделювання, змішувач, об'ємні коливання, вібраційна система, параметри машини, віброзбудувач, чисельне моделювання, математична модель.

ANNOTATION

Volynets Y.O. – Substantiation of the structural-mode parameters of the vibrating mixer. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 Industrial Engineering (13 Mechanical Engineering). Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2025.

The dissertation solves a pressing scientific problem of improving the quality of compound feed through the development and substantiation of the design and operating parameters of a vibratory mixer.

The introduction highlights the relevance of the study, defines its purpose, and formulates the main tasks for achieving the goals. The scientific novelty of the work, its practical significance, and the author's personal contribution to the research are characterized. Information on the testing of the results obtained, their publication is provided, and the structure and scope of the dissertation is presented.

The solution of this goal is reduced to solving the following scientific and applied problems: based on the analysis of existing mixer designs, as well as the results of theoretical and experimental studies of the mixing process, develop a schematic diagram of a vibration mixer; perform analytical studies of the stress-strain state of the blade and substantiate its geometric dimensions; develop a mathematical model, conduct its analytical study and theoretically substantiate the operating parameters of the vibration mixer; develop a dynamic model of the vibration mixer and theoretically establish its amplitude-frequency and energy dependencies; develop a laboratory setup and conduct experimental studies to establish the dependence of the mixture quality indicators, productivity and specific energy intensity of the process on the design and operating parameters of the vibration mixer; perform production testing of the vibration mixer and determine its economic efficiency.

The object of research is the process of mixing loose mixtures in a vibrating mixer.

The subject of the study is the patterns of changes in the quality indicators of

loose mixtures, productivity and specific energy intensity of the mixing process depending on the design and operating parameters of the mixer.

Based on the conducted scientific research, energy consumption was reduced while ensuring the established quality indicators of mixing loose mixtures by substantiating the design and operating parameters of the vibration mixer. Based on this, the following was first developed: a computer simulation model of the stress-strain state of the vibration mixer blade was developed depending on the design parameters, which allows substantiating the optimal values for ensuring the required strength and rigidity of the structure while minimizing its mass; a computer model of the process of mixing components in the proposed design of vibration equipment was developed and regression equations were established for the time to achieve a given homogeneity from the frequency of rotation of the blade shaft, the frequency of rotation of the container, the frequency of oscillation of the vibration exciter and the amplitude of oscillations of the container; received further development: a dynamic model of a vibration mixer with a blade shaft, which allows establishing the dependence of the amplitude of container oscillations and the power consumed by the mixer on the vibration exciter oscillation frequency; methodological approaches to numerical modeling of the vibration mixer functioning process.

The results of the study can be applied in the design and improvement of vibratory mixers for use in agricultural, food, pharmaceutical, construction and other industries requiring high-quality mixing of bulk materials.

In the first section, methods of mixing bulk products were found. Basically, these are two methods - gravity and forced. The first is carried out under the action of tension forces in drum, trough and hopper mixers, the second in screw and paddle mixers. It was found that the efficiency of using compound feed in poultry farming depends on the physicochemical properties of raw materials, the level of its homogeneity and nutritional balance. The most critical parameters that affect the quality of mixing are particle size, moisture, bulk density and different directions of movement of components. The choice of vibration-rheological models allows for a more profound determination of the mechanisms of particle movement, pseudo vacuum, segregation

and interaction with vibrating surfaces, which is important for substantiating a new design. It was found that vibration viscosity is a key parameter that affects the structure and intensity of circulation flows in the middle of the working chambers of the mixer.

In the second section, based on preliminary research and experience in creating mixing devices with vibration motion converters, an improved design of a vibration mixer was developed, providing for process intensification by combining the action of vibrations, rotational movement of the paddle shaft and rotation of the container by 360° around the horizontal axis. This design allows for an effective reduction in the adhesive forces between the material particles by using the gravitational effect, which together ensures increased efficiency and energy saving of the mixing process.

An analytical justification of the geometric parameters of the mixer blade shaft was performed, which allowed determining the rational values of its dimensions and placement, taking into account the efficiency of capturing and moving mixture particles (total blade length $L_s = 185$ mm; trapezoidal plate height $L_b = 62$ mm; large base of the trapezoidal plate $B_b = 75$ mm; smaller base of the trapezoidal plate $b_b = 45$ mm; trapezoidal plate inclination angle $\theta_b = 25^\circ$; shaft radius $R_s = 20$ mm; container radius ($R_d = 200$ mm), as well as ensuring the required strength and rigidity of the structure. The use of modeling in SolidWorks Simulation made it possible to establish the optimal values of the trapezoidal plate thickness ($\delta_b = 2$ mm) and the blade rod radius ($R_b = 8$ mm) according to the deformation and mass criteria.

The influence of the blade shaft design, the variants of which differ in the number of turns of the spiral, behind which the blades are located, on the efficiency of the process of mixing bulk components was studied. It was found that with a small number of turns (1-2.25) a more uniform distribution of speeds and effective axial-tangential mixing is ensured. The most intensive growth was noted for the design with 2.25 turns, and the highest mixing quality - with one turn. Excessive increase in the number of turns (up to 4.5-9) leads to a decrease in efficiency due to the formation of stagnant zones and uneven flows.

A quadratic regression dependence of the time to achieve a given homogeneity has been established $t_{0.9}$ on the blade shaft rotation frequency n_1 , container rotation

frequency n_c , vibration exciter oscillation frequency n_v , container oscillation amplitude A_v (or vibration mode coefficient k_v) was established. The presence of a nonlinear interaction between the parameters, in particular, between the frequency and amplitude of oscillations, was established. The lowest value $t_{0.9} = 81.2$ s was achieved with the optimal combination of factors: $n_l = 45.9 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 24.4 \text{ min}^{-1}$, $n_v = 823.8 \text{ min}^{-1}$, $A_v = 8.8 \text{ mm}$ (or $k_v = 6.68$).

The third chapter presents the program, description of the experimental setup and methodology for conducting experimental studies.

The task of researching an experimental-research sample of a vibrating mixer is to find: the time to achieve the given uniformity $0.9 t_{0.9}$ (s); productivity Q (kg/min); power consumption by the mixer P (W); specific energy expenditure E (J/kg).

The vibration mode coefficient or dynamic coefficient was adopted as a characteristic of the vibration field. Corn (coarsely ground husk, 3-5 mm) and peas (coarsely ground husk, 3-5 mm) were used as the technological load. The bulk density of the mixture was within $700\text{--}800 \text{ kg/m}^3$. The total mass of the load was 40 kg.

Samples of the mixture were selected by a point method using a special sampler. This allowed obtaining a representative sample for quantitative analysis. The mass of one sample was 50 g, which ensured sufficient accuracy and convenience in manual sorting.

The energy performance of the mixer was assessed using a digital wattmeter by measuring the consumed electrical power. Based on the obtained values, the specific energy costs were calculated taking into account the productivity.

The fourth section contains the results of the implementation of the experimental research program.

The ranges of variation of the main design and operating parameters were determined: the rotation frequency of the blade shaft $n_l = 20\text{--}60 \text{ min}^{-1}$, container $n_k = 0\text{--}30 \text{ min}^{-1}$, vibration mode coefficient $k_v = 0\text{--}12$, mixing time $t = 70\text{--}130$ s. The mixture homogeneity coefficient δ , productivity Q , power consumption P , specific energy consumption E and mixing duration to a given quality $t_{0.9}$ were studied as initial indicators.

It was found that the homogeneity coefficient of the mixture significantly depends on the duration of mixing and the intensity of mechanical and vibration factors. The maximum value $\delta=0.932$ was achieved at $n_l = 40.9 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 23.9 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 6.83$, $t = 130 \text{ s}$. The minimum level $\delta = 0.851$ was observed at $n_l = 20 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 0 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 0$, $t = 70 \text{ s}$.

It was determined that in order to achieve the threshold value of homogeneity $\delta = 0.9$, the minimum mixing duration $t_{0.9}$ is approximately 70 s under rational conditions, whereas under ineffective combinations of parameters this time increases to 130 s.

Comparison of the results obtained from the experimental regression models with the theoretical dependencies showed a high degree of consistency. In particular, for the dependence of the duration of mixing $t_{0.9}$, the correlation coefficient was 0.87, which corresponds to a high level of connection according to the Chaddock scale.

Productivity varies within the range from 23.7 to 28.6 kg/min. The maximum is achieved at $n_l = 40 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 30 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 6.5$. At minimum parameter values ($n_l = 20 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 0 \text{ min}^{-1}$), a decrease in productivity to $Q = 23.7 \text{ kg/min}$ is observed.

The mixer power depends on all the main operating parameters and varies within the range of 465-1272 W. The minimum power consumption is recorded at $n_l = 20 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 0 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 0.1$, and the maximum – at $n_l = 60 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 30 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 11.2$. The greatest influence on the power is exerted by the rotation frequency of the blade shaft.

Analysis of specific energy consumption E showed that their value is closely related to both the power and the productivity of the mixer. The minimum consumption $E = 1228 \text{ J/kg}$ is observed at $n_l = 23.3 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 10.1 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 2.69$, and the maximum – $E = 3000 \text{ J/kg}$ at $n_l = 60 \text{ min}^{-1}$, $n_k = 30 \text{ min}^{-1}$, $k_v = 11.2$.

Summarizing the results, the best indicators were achieved at a blade shaft rotation speed of about $n_l = 23.3 \text{ min}^{-1}$, a container rotation speed $n_k = 10.1 \text{ min}^{-1}$ and a vibration mode coefficient $k_v = 2.69$, with $P = 513 \text{ W}$, $Q = 25.1 \text{ kg/min}$, $t_{0.9} = 95.7 \text{ s}$, $E = 1228 \text{ J/kg}$

The results of theoretical and experimental research related to the justification

of the design and operating parameters of the vibration mixer were implemented in the educational process of the educational and professional program «Agroengineering» of the first (bachelor's) level of higher education of the Faculty of Engineering and Technology of Vinnytsia National Agrarian University when teaching the discipline «Machinery, equipment and their use for processing agricultural products», and were also tested in the conditions of the farm of the «Litahor» FG. The enterprise «Agromash-Kalyna» LLC received technical documentation for the manufacture of a prototype for further industrial development.

The conducted feasibility study of the experimental vibratory mixer demonstrated its superiority over the baseline model in terms of operating costs, which was achieved by reducing the energy intensity of the mixing process. The annual economic effect is 35,951 UAH, and the payback period for capital investments is 1.17 years.

Keywords: vibration, amplitude, mixing, bulk medium, vibration speed, vibration acceleration, process, modeling, mixer, volume vibrations, vibration system, machine parameters, vibration exciter, numerical modeling, mathematical model.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Полевода Ю.А., **Волинець Є.О.** Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 4 (111). С. 72–79. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-8 (0,54 друк. арк., особистий внесок: на основі проведеного аналізу конструктивних особливостей існуючих змішувачів запропоновано конструкцію вібраційного змішувача з покращеними технологічними характеристиками, орієнтовану на забезпечення більш високої ефективності змішування та зниження енерговитрат – 0,4 друк. арк.).

2. Полевода Ю.А., **Волинець Є.О.**, Бистрицький О.П. Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (107). С. 20–25. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-3 (0,49 друк. арк., особистий внесок: запропоновано математичну модель руху частинок сипкого матеріалу в поперечному перерізі циліндричного корпусу змішувача – 0,39 друк. арк.).

3. Polievoda Y., **Volynets Y.** Study of the characteristics of vibrorheological models of bulk raw materials in the working area of a vibrocentrifugal mixer. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 35-43. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-4 (0,81 друк. арк., особистий внесок: досліджено характеристики віброреологічних моделей сипких матеріалів у робочій зоні вібраційного змішувача, що дозволить глибше зрозуміти фізико-механічні процеси, що відбуваються в робочій камері змішувача – 0,68 друк. арк.).

4. Спірін А.В., **Волинець Є.О.** Vibratory conveyor for loading food mixture mixer. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 2. № 3 (337). С. 328–333. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-49 (0,5 друк. арк., особистий внесок: розглянуто конструкцію та принцип дії

вібраційного конвеєра, призначеного для завантаження змішувача, що дозволяє підвищити загальну ефективність функціонування обладнання – 0,4 друк. арк.).

Об'єкти права інтелектуальної власності

5. Полевода Ю.А., **Волинець Є.О.** Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема вібровідцентрового змішувача». Свідоцтво № 122109 від 20.12.2023; заяв. № с202306088 від 16.09.2023.

Матеріали конференцій

6. **Volynets Y.** Improvement of the vibrating mixer of food mixes. *Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference «Prospects and achievements in applied and basic sciences»*. Budapest. 2021. С.632–635.

7. **Волинець Є.О.** Дослідження моделі руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування*. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (21-22 лютого 2023 р.). Полтава: ПДАУ. 2023. С. 46–49.

8. **Волинець Є.О.** Використання вібровідцентрового змішувача для приготування високоенергетичних сумішей. *Сучасні проблеми землеробської механіки*. Збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції (17-19 жовтня 2023 р.). Київ: НУБіП. 2023. С. 71–73.

9. **Volynets Y.** Vibratory conveyor for loading food mixture mixer. *Сучасні вектори розвитку аграрної науки*. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (17-18 вересня 2024 р.). Херсон: ХДАЕУ. 2024. С. 225–228.

10. **Волинець Є.О.** Обґрунтування конструкції змішувача харчових сумішей малої продуктивності. *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.). Дніпро: ДДАЕУ. 2024. С. 32–34.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ	23
1.1 Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва комбікорму.....	23
1.2 Характеристика кормів для годівлі птиці та вимоги до їх змішування	28
1.3 Віброреологічні моделі шару сипкого середовища.....	31
1.4 Вплив вібраційної в'язкості на характер руху сипкого матеріалу.....	42
1.5 Висновки, мета та завдання дослідження.....	45
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА.....	49
2.1 Розробка конструкції вібраційного змішувача	49
2.2 Аналітичне обґрунтування геометричних розмірів лопатевого валу.....	51
2.3 Методика чисельного моделювання процесу роботи вібраційного змішувача	55
2.4 Результати чисельного моделювання процесу роботи вібраційного змішувача	66
2.5 Динамічна модель вібраційного змішувача з лопатевим валом. Визначення енергії системи.	78
2.6 Висновки до другого розділу	91
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА...	95
3.1 Об'єкт експериментальних досліджень.....	95
3.2 Обладнання для проведення експерименту	98
3.3 Вибір методик проведення досліджень	102
3.3.1 Методика визначення амплітудно-частотних та енергетичних характеристик віброзмішувача	108
3.3.2 Методика визначення якості змішування	110
3.4 Висновки до третього розділу.	113

	17
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	114
4.1 Постановка експерименту та початкові дані.....	114
4.2 Визначення залежності коефіцієнта однорідності суміші від режимних параметрів	115
4.3 Емпірична модель продуктивності змішувача та її аналіз	122
4.4 Енергетична оцінка роботи вібраційного змішувача	125
4.5 Питомі витрати енергії при роботі вібраційного змішувача	128
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	131
РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	133
5.1 Визначення технічного рівня розробки в порівнянні з існуючими змішувачами	133
5.2 Впровадження результатів досліджень	139
5.3 Місце вібраційного змішувача в технологічній схемі приготування комбікорму та техніко-економічна ефективність впровадження	139
5.3 Висновки до п'ятого розділу	146
ЗАГЛЬНІ ВИСНОВКИ	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	150
ДОДАТКИ.....	169

ВСТУП

Актуальність теми. Виробництво комбікормів безпосередньо на невеликих підприємствах на малогабаритному обладнанні економічно виправдано, оскільки скорочуються витрати на доставку сировини та його зберігання. Окрім того, з'являється можливість більш ефективно використовуватися всі ресурси.

Виробництво комбікормів – складний багатофакторний процес, в якому важливою операцією є змішування. Однак наявні для цього технічні засоби на невеликих виробництвах не забезпечують якісного однорідного змішування на рівні мікрооб'ємів. Вважається, що для виробництва даних сумішей безпосередньо на виробництві досить їх однорідності на 90...95%.

Вібрація, яка є одним із видів механічної дії на дисперсні системи, до яких відносяться комбікорми, служить найбільш ефективним засобом управління їх динамічним станом. Відмінна особливість вібрації – можливість впливу як на значні обсяги сипкого середовища, так і на найтонші її шари шляхом регулювання параметрів вібрації. Вібраційні змішувачі менш енерго- і металоємкі. Однак процес змішування комбікормів у вібраційних змішувачах вивчений недостатньо.

З огляду на наукові дослідження, нині спостерігається зростання запропонованих нових конструкцій змішувачів різних типів, у тому числі, вібровідцентрової дії. Найбільш з них поширеними є барабанні машини, що мають структурно нескладну конструкцію, низьку енергоємність, основне завдання яких – підвищення показників якості одержаного продукту. Здебільшого рішення цього завдання ускладнюється схильністю суміші до сегрегації її компонентів за фізико-механічними властивостями. Тому створення пристроїв для змішування залишається основним і безумовно актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційне дослідження виконано у Вінницькому національному аграрному університеті. Основні результати було отримано в межах реалізації ініціативних науково-дослідних

проектів, зокрема: «Інтенсифікація процесів механічної обробки сільськогосподарської сировини за умов вібраційного впливу» (реєстраційний номер 0117U004700, термін виконання: 2017-2022 рр.), «Розробка високоефективного обладнання для масо- та теплообмінних процесів у харчовій і переробній промисловості» (реєстраційний номер 0122U002098, термін виконання: 2022-2026 рр.) та «Розробка науково-технологічного забезпечення підвищення родючості ґрунтів та раціонального використання потенціалу біоресурсів» (номер державної реєстрації 0124U000444, термін виконання 2024-2026 рр.) що виконується за рахунок коштів державного бюджету.

Мета дослідження: зменшення енергетичних витрат при забезпеченні встановлених показників якості змішування сипких сумішей шляхом обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача.

Завдання дослідження:

- на основі аналізу існуючих конструкцій змішувачів, а також результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесу змішування, розробити принципову схему вібраційного змішувача;
- виконати аналітичні дослідження напружено-деформованого стану лопаті та обґрунтувати її геометричні розміри;
- розробити математичну модель, провести її аналітичне дослідження та теоретично обґрунтувати режимні параметри вібраційного змішувача;
- розробити лабораторну установку та провести експериментальні дослідження для встановлення залежності показників якості суміші, продуктивності та питомої енергоємності процесу від конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача;
- виконати виробничу перевірку вібраційного змішувача та визначити його економічну ефективність.

Об'єкт дослідження: процес змішування сипких сумішей у вібраційному змішувачі.

Предмет дослідження: закономірності зміни показників якості сипких сумішей, продуктивності та питомої енергоємності процесу змішування від

конструктивно-режимних параметрів змішувача.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі використовували теоретичні й експериментальні методи досліджень. Для теоретичних досліджень використовували програмне забезпечення: Microsoft Excel, Simcenter STAR-CCM+, SolidWorks Simulation. Експериментальні дослідження оцінки характеристик вібраційного впливу проводили в лабораторних умовах на розробленій експериментальній установці з використанням відповідної апаратури. Для перевірки адекватності отриманих експериментальних результатів використовували метод математичної статистики з використанням програми Wolfram Cloud.

Досліджуючи процес змішування використовували такі методи:

- теоретичні (для аналітичного дослідження наявних проблем і розробки математичної моделі);
- експериментально-розрахунковий і чисельний (для аналізу процесів змішування, стану матеріалу);
- математичного моделювання (розробка математичної моделі роботи змішувача, визначення характеристик вібраційного впливу і силових показників);
- лабораторні (у лабораторних умовах на натурних зразках і моделях із застосуванням сучасних приладів, стандартного обладнання й спеціально розроблених пристроїв та оснащення для визначення показників якості готової продукції);
- математичної статистики (для обробки експериментальних даних).

Наукова новизна одержаних результатів.

Уперше:

- розроблено комп'ютерну симуляційну модель напружено-деформованого стану лопаті вібраційного змішувача залежно від конструктивних параметрів, що дозволяє обґрунтувати оптимальні значення для забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції за умови мінімізації її маси;

- розроблено комп'ютерну модель процесу змішування компонентів у запропонованій конструкції вібраційного обладнання та встановлені рівняння регресії для часу досягнення заданої однорідності від частоти обертання лопатевого вала, частоти обертання контейнера, частоти коливання віброзбуджувача та амплітуди коливань контейнера.

Набули подальшого розвитку:

- динамічна модель вібраційного змішувача з лопатевим валом, яка дозволяє встановити залежності амплітуди коливань контейнера і потужності, що витрачається змішувачем від частоти коливання віброзбуджувача;
- методологічні підходи до чисельного моделювання процесу функціонування вібраційного змішувача.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з обґрунтуванням конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача, впроваджені в навчальний процес освітньо-професійної програми «Агроінженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисципліни «Машини, обладнання та їх використання для переробки сільськогосподарської продукції». Розроблений вібраційний змішувач проходив виробничу перевірку на базі ФГ «Літагор» (Вінницька обл., Хмільницький р-н., село Миколаївка). Найвищих показників ефективності змішування було досягнуто за раціонального поєднання частоти обертання лопатевого валу та контейнера, а також відповідного значення коефіцієнта режиму вібрації. У таких умовах забезпечувалася помірна енергоспоживаність, висока продуктивність, достатня швидкість досягнення однорідності суміші та раціональна питома витрата енергії. Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (місто Калинівка, Вінницька область) отримало конструкторську й технічну документацію для виготовлення дослідного зразка вібраційного змішувача для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Особистий внесок здобувача. Результати теоретичних та

експериментальних досліджень, представлених в дисертаційній роботі, автор отримав самостійно. Постановка мети, формулювання завдань й узагальнення результатів здійснювалися за участю наукового керівника, а також частково у співпраці з авторами спільних наукових публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи висвітлювалися й отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи інноваційної діяльності в агропромисловій інженерії» (19-20 листопада 2020 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); IV International Scientific and Practical Conference «Prospects and achievements in applied and basic sciences» (9-12 February 2021, Budapest); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи» (20-21 жовтня 2022 р., ВНАУ, м. Вінниця, Україна); V Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (21-22 лютого 2023 р., м. Полтава, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні вектори розвитку аграрної науки» (17-18 вересня 2024 р., м. Херсон-Кропивницький, Україна)

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 10 наукових працях, у тому числі: 4 статті в наукових фахових виданнях України (категорії Б); 1 авторське свідоцтво; 5 тез у збірниках доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 199 сторінок, у тому числі 10 додатків на 30 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 149 сторінок і містить 49 рисунків 18 таблиць. Список використаних джерел нараховує 190 посилань на 19 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва комбікорму

За останні десятиріччя технологія змішування набула більш широкого використання в різних галузях господарства України, зокрема в агропромисловій. Її застосування дало змогу докорінно вдосконалити традиційні та розробити нові технологічні процеси та засоби для їх реалізації. Так, коливальний режим руху часток технологічного завантаження забезпечує і ефективне змішування, і зменшення внутрішньої в'язкості суміші та, як наслідок, зменшення сили тертя при перемішуванні. Тому в більшості існуючих технологій може використовуватись вібротехніка, оскільки дані машини значно ефективніші від звичайних, як за енерговитратами, так і за часом обробки [1, 2, 3, 4].

Великий внесок у розвиток і розробку вібротехніки та вібротехнологій, теорія та дослідження процесів змішування зробили відомі вітчизняні й іноземні вчені: П.С. Берник, Л.М. Тіщенко, О.В. Цуркан, М.І. Стаднік, О.В. Солона, О.А. Токарчук, І.Я. Стадник, О.С. Ланець, І.П. Паламарчук, І.І. Назаренко, В.П. Надутий та інші [5, 6, 7, 8, 9, 28, 52, 59,].

Вібраційний вплив на змішування матеріалів і робочі органи змішувача значно збільшує продуктивність процесу, знижує енергоємність і покращує якість суміші. При цьому вібрація в одних випадках може лише інтенсифікувати основний процес (наприклад, вібрація шнека в шнековому змішувачі), в інших – викликати специфічні вібраційні ефекти, які використовуються для змішування (наприклад, циркуляційні вібротранспортуючі суміші всередині циліндричної або тороподібної посудини). Процес змішування з накладенням вібрацій супроводжується, крім того, додатковими ефектами руйнування зерен, оголенням додаткових поверхонь, руйнуванням когуляційних структур,

збільшенням диспергування твердих частинок і газу – активізація суміші [10, 75].

Змішування виконується великою кількістю змішувачів, які відрізняються як різноманітним конструктивним виконанням так і різною взаємодією робочих органів із сировиною (рис. 1.1) [1, 12, 24, 25].



Рисунок 1.1 - Класифікація змішувачів

Виробництво комбікормів – складний багатофакторний процес, у якому важливою операцією є змішування. Однак наявні для цього технічні засоби на невеликих виробництвах не забезпечують якісного однорідного змішування на рівні мікрооб’ємів. Вважається, що для виробництва даних сумішей безпосередньо на виробництві досить їх однорідності на 90...95% [11, 25, 26, 27, 88].

Здебільшого в технологічних процесах змішування має місце використання обертових барабанних змішувачів і змішувачів з обертовими робочими органами – лопатевими, шнековими, рамковими та ін.

Обертовий конусний змішувач (рис. 1.2). Ємність для змішування та внутрішній вал з робочими органами обертаються в протилежних напрямках, що забезпечує високу ефективність та однорідність (рис. 1.3). Оснащений цифровим таймером для зручності використання. Даний змішувач підходить для середнього або невеликого обсягу виробництва в біотехнологічній, фармацевтичній і харчовій промисловостях [13, 14].



Рисунок 1.2 - Змішувач обертовий конусний



Рисунок 1.3 - Вал та робочі органи конусного змішувача

Змішування суміші в таких апаратах обумовлюється конвективними (циркуляційними) і дифузійними процесами. Перші виникають внаслідок загального руху всієї маси завантаження (макропроцеси), другі – забезпечуються в результаті відносного руху частинок середовища, що впливає на зміну сил тертя й зчеплення між частинками (мікропроцеси) [1, 14, 17, 18, 19].

Горизонтальний стрічковий змішувач (рис. 1.4) – це коритоподібна посудина, всередині якої обертається вал із двома стрічками конструкції типу «S» (рис. 1.5). Навивки стрічок спрямовані в протилежні сторони для нейтралізації транспортуючих явищ. У результаті чого відбувається інтенсивне й рівномірне змішування. Для підвищення якості змішування передбачений реверс обертання валу. Вивантаження змішаного продукту проводиться, коли змішувач працює, і може здійснюватися як з середини так і з торця змішувача. Усі деталі (корпус змішувача, вал, шнек), що контактують із харчовими продуктами, виготовлено з нержавіючої сталі AISI-304 [1, 15, 20, 21, 28].



Рисунок 1.4 - Змішувач із обертовими робочими органами



Рисунок 1.5 - Вал із двома стрічками конструкції типу «S»

Також використовуються стрічкові вертикальні змішувачі сипких харчових продуктів. Залежно від конструкції вони бувають одновальні (рис. 1.6) двовальні (рис. 1.7) та багатовальні. Змішувач являє собою вертикальний бункер, усередині якого встановлений вал, який ініціює тривимірний потік, створюючи гвинтовий рух вгору по периферії і потік вниз у центрі. Приводиться в рух зверху, використовуючи лише один або два підшипники відповідно [1, 16, 22, 23, 29].



Рисунок 1.6 - Змішувач вертикальний одновальний стрічковий і схема циркуляції продукту



Рисунок 1.7 - Змішувач вертикальний двовальний стрічковий і схема циркуляції продукту

Дані змішувачі можна використовувати для змішування сипких, пастоподібних, рідких сумішей і тіста. Забезпечення ідеальної якості змішування при рівні наповнення від 10 до 100% [30, 31, 32, 33].

1.2 Характеристика кормів для годівлі птиці та вимоги до їх змішування

У птахівництві ефективність годівлі значною мірою залежить від якості та однорідності комбікормів. Основними критеріями ефективного корму є збалансованість за поживними речовинами, відсутність токсинів, однорідність розподілу компонентів і відповідність фізико-механічних властивостей вимогам до процесу змішування. Птахи, особливо бройлери, потребують високоякісного повнораціонного комбікорму, здатного забезпечити швидкий приріст маси, високу конверсію корму та збереження здоров'я поголів'я [34, 35, 51].

Комбікорм складається з різноманітних компонентів (табл. 1.1), які мають різну функціональну цінність. Їх умовно поділяють на енергетичні, білкові, мінеральні та вітамінно-мінеральні добавки [36, 37, 147, 150].

Таблиця 1.1

Групи кормових компонентів для годівлі птиці та їх основна функція

Група компонентів	Приклади	Основна функція
Зернові культури	Кукурудза, пшениця, ячмінь	Джерело енергії (крохмаль)
Білкові добавки	Соевий шрот, горох, ріпаковий шрот	Зростання, розвиток м'язів
Жири	Рослинні олії, тваринні жири	Концентрована енергія
Мінеральні речовини	Вапняк, фосфати, сіль	Формування кісток, баланс
Вітамінно-мінеральні добавки	Премікси	Регуляція обміну речовин

Зернові компоненти є основою комбікормів, вони забезпечують птахів енергією, яку організм використовує для підтримки життєвих процесів і продуктивності. Білкові компоненти є ключовими для росту та формування

м'язової маси, особливо в період активного росту бройлерів. Жири підвищують енергетичну цінність корму, а мінерали та вітаміни – незамінні для фізіологічного балансу й імунітету [38, 39, 148, 149].

Фізико-механічні властивості кормових матеріалів (табл. 1.2), зокрема розмір частинок, насипна щільність і вологість, суттєво впливають на якість змішування. Занадто дрібні або великі частинки можуть призвести до розшарування суміші, а висока вологість спричиняє злипання матеріалів, ускладнюючи рівномірне змішування [40, 52].

Таблиця 1.2

Фізичні властивості окремих кормових компонентів

Компонент	Середній розмір частинок, мм	Насипна щільність, кг/м ³	Вологість, %
Кукурудзяна дерть	3,0-4,0	550-600	12-14
Пшенична дерть	1,5-2,5	600-650	13-15
Горохова дерть	2,5-3,5	580-620	13-15
Шрот соєвий	1,0-2,0	650-700	10-12

Різниця у фізичних параметрах повинна враховуватись при формуванні рецептур і підборі технології змішування. Найефективнішим вважається поєднання компонентів із подібною щільністю та гранулометричним складом.

Рівень поживних речовин у комбікормі (табл. 1.3) є основою для забезпечення продуктивності птиці. Компоненти повинні мати високу енергетичну та протеїнову цінність, а також бути легкозасвоюваними [41, 42, 50].

Таблиця 1.3

Поживна цінність основних компонентів комбікорму

Компонент	Сирий протеїн, %	Крохмаль, %	Жир, %	Клітковина, %	Енергетична цінність, МДж/кг
Кукурудза	8,5	65	3,8	2,2	14,2
Пшениця	12,0	60	2,0	2,5	13,6
Горох	22,0	45	1,6	5,0	12,5
Соєвий шрот	44,0	15	1,5	6,0	11,5

Збалансованість компонентів за вмістом протеїну, крохмалю, клітковини й

енергії є ключовою вимогою до рецептури. Надлишок клітковини може знижувати засвоюваність, тоді як брак протеїну – уповільнювати приріст маси тіла [43, 44, 45, 49].

Якість змішування комбікорму значною мірою визначає ефективність годівлі. Важливо досягнути максимальної однорідності, яка забезпечує рівномірне споживання поживних речовин усіма особинами стада. Основні вимоги до процесу змішування такі:

- однорідність суміші: коефіцієнт однорідності повинен перевищувати 90%; висока однорідність гарантує стабільний приріст і знижує ризик дефіциту поживних речовин у частини поголів'я;
- розмір частинок: компоненти повинні мати порівнянні розміри частинок (різниця не більше ніж у 2 рази), щоб уникнути розшарування під час транспортування та споживання;
- вологість: занадто волога сировина може злипатися, погіршуючи рівномірність змішування; оптимальна вологість – не більше 14%;
- час змішування (табл. 1.4): визначається експериментально залежно від обладнання [46, 47, 48].

Таблиця 1.4

Орієнтовний час змішування для різних типів змішувачів

Тип змішувача	Тип руху змішування	Середній час змішування, хв
Горизонтальний лопатевий	Об'ємне перемішування з лопатями	5-10
Вертикальний шнековий	Шнекова циркуляція вгору-вниз	10-15
Барабанний	Обертання барабана	8-12
Вібраційний	Коливальні рухи з вібрацією	1-5
Планетарний	Комбіноване обертання й оберт навколо осі	3-6

Для вібраційних змішувачів зазвичай становить 1-5 хв, чого достатньо для досягнення необхідної однорідності при правильному підборі режиму роботи [53, 54].

1.3 Віброреологічні моделі шару сипкого середовища

Визначення руху сипких середовищ, обладнання реалізації вібраційних технологій (зокрема вібраційного об'ємного оброблення, помелу, сепарації) є доволі складним завданням динаміки, яке на сьогодні не виконано. Причини останнього – громіздкість математичного апарата описання динаміки сипкого середовища, спрощувальні гіпотези та припущення, лінійність моделей, що не завжди адекватно відображають реальну фізику досліджуваного вібраційного процесу [55].

Проаналізувавши дослідження відомих вчених, можна стверджувати, що лише окремі з них вивчали ефективність вібраційної дії при розділенні або змішуванні рідких неоднорідних систем у харчових чи переробних технологіях. Водночас їхні роботи не мали системного і комплексного характеру, що викликає труднощі при проектуванні перспективних технологічних і конструктивних схем вібраційної переробної техніки, а розроблені конструкції машин часто відзначаються високими динамічними навантаженнями на опорні механізми та недосконалою системою нівелювання паразитних коливань. Принципові переваги вібраційної дії як основного технологічного впливу дозволяє вирішувати ряд технологічних задач при перемішуванні рідких неоднорідних систем [56].

Серед високопродуктивних технологій з порівняно малими енерго- і матеріалозатратами значну частку становлять ті, які використовують різноманітні вібраційні процеси, що сприяє підвищенню якості обробки, рівня механізації й автоматизації багатьох трудомістких операцій, економічної ефективності й продуктивності праці тощо. Вібраційні процеси залежно від галузей їх застосування можна розділити на багато узагальнених технологічних напрямів [57]:

- вібровплив на середовище, сипкі та дисперсні системи;
- деформування й руйнування;
- подрібнення матеріалів;

- введення вібраційних елементів в середовища різної густини;
- розділення гранульованого середовища за його геометричними та іншими параметрами.

Для вібраційних процесів характерні хвильові явища, а останнім незалежно від їх характеру й властивостей притаманні загальнохвильові закономірності. Кожна вібраційна система характеризується приводом (джерелом коливань); робочим простором, у межах якого реалізується енергія коливань і здійснюється вібраційний вплив на об'єкт оброблення (середовище деталі, конструкції тощо) [58].

Вперше «рідиноподібна» поведінка сипкого середовища під дією вібрацій була експериментально встановлена в межах фундаментальних досліджень, що заклали підґрунтя для подальшого розвитку віброреологічного підходу. Доведено, що за допомогою вібрацій сипке середовище можна ущільнювати й розпушувати, переміщувати й бункерувати, розділяти й змішувати, а також досягати багато інших корисних ефектів. Ці операції є основними в технологічних процесах кормоцехів, що й обумовлює отримання позитивного ефекту від використання вібраційних кормоприготувальних машин (рис. 1.8) [55, 59].

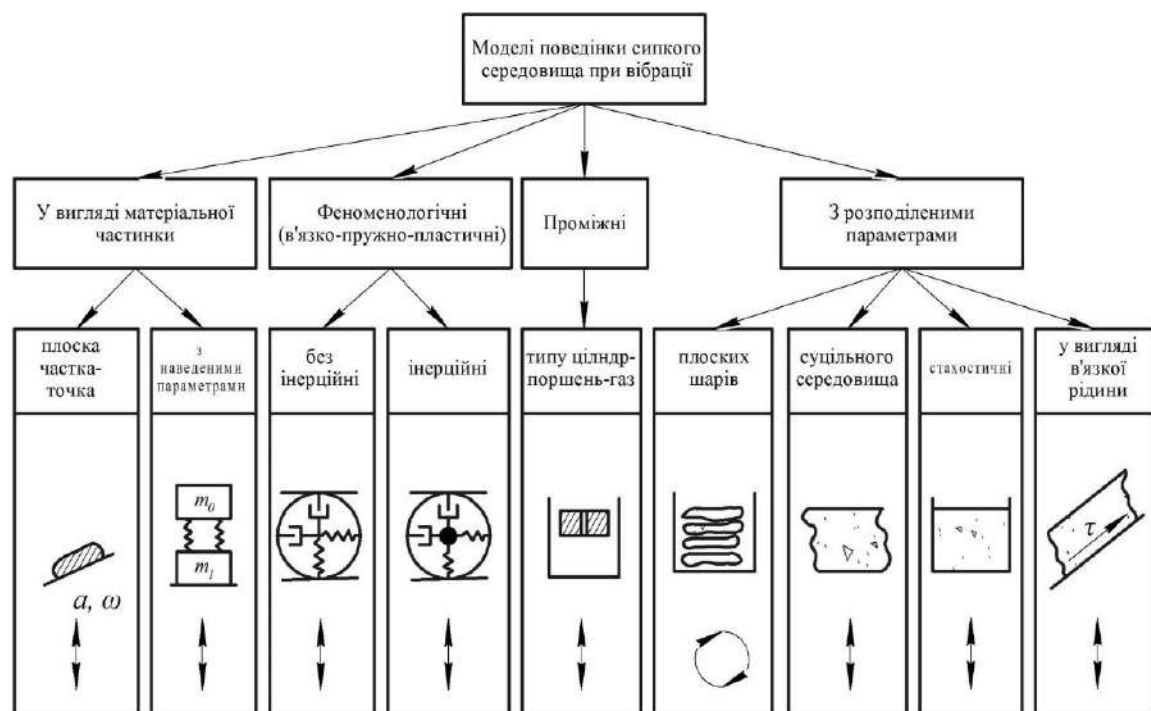


Рисунок 1.8 - Класифікація існуючих моделей поведінки сипкого середовища

Дослідження течії високодисперсних порошків під дією вібрацій здійснювали із застосуванням спеціально сконструйованого капілярного віброзиметра. У якості критерію здатності тонкодисперсного порошку до витікання за різних параметрів вібраційного поля (частоти та амплітуди) використовували показник вібраційної в'язкості.

Через складність процесу та відсутність узагальненої теорії змішування сипких матеріалів, для опису фізичної сутності цього явища доцільно розглядати дві моделі в сукупності: модель окремої матеріальної частинки та модель в'язкого середовища [60, 93, 94].

Зупинимося спочатку на описі деяких основних закономірностей поведінки сипкого середовища у вібруючих посудинах. Певний розподіл вібрації в сипкому середовищі в таких посудинах встановлюється досить швидко – після закінчення декількох періодів коливань. Це – «швидкий» процес, на тлі якого і відбуваються процеси, що повільно протікають, тобто виникають певні потоки й відбуваються процеси сегрегації (самосортування). Для вивчення цих повільних і, як правило, найбільш цікавих процесів, знання швидкого процесу, тобто усталеного вібраційного поля, представляє першорядне значення. Тому зупинимося на деяких якісних закономірностях і міркуваннях. Нехай A – амплітуда, а ω – частота гармонійної вібрації посудини із сипким середовищем. При прискореннях $A\omega^2 < g$ для вертикальних $A\omega^2 < f_1g$ для горизонтальних коливань (f_1 – коефіцієнт тертя спокою, g – прискорення вільного падіння) матеріал рухається в основному разом з посудиною. При прискореннях $A\omega^2 \approx g$ частинки матеріалу набувають деяку взаємну рухливість – починається псевдозрідження, що призводить спочатку до ущільнення, а потім – при подальшому збільшенні $A\omega^2$ – до розпушення й перемішування. Процеси поділу (сегрегації, самосортування) відбуваються в стадіях псевдозрідження та розпушення [61, 62].

За товщини шару h , що не перевищує деякого значення h^* , і за параметрів вібрації, що лежать у певних межах, рух сипкого середовища по вібруючій плоскій поверхні можна розглядати як рух твердого тіла (частинки). При цьому

віброреологічною моделлю є таке тіло, на яке, водночас із іншими повільними силами, діє вібраційна сила V . Назвемо таку модель моделлю **A** (рис. 1.9).

$$\mathbf{A} \quad h < h_*$$

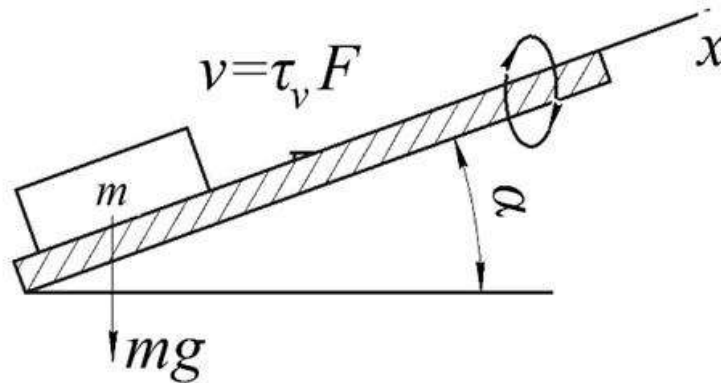


Рисунок 1.9 - Модель руху твердого тіла (частинки) при $h \leq h_*$

Вібраційна сила V може бути знайдена в результаті рішення відповідної задачі про вібротранспортування або з використанням експериментальних даних. Так, зокрема, в режимах із достатньо інтенсивним підкиданням матеріалу над плоскою поверхнею, що здійснює поступальні коливання по еліптичних траєкторіях, величина вібраційної сили може бути визначена з використанням наближеного аналітичного підходу [63]. Маючи на увазі подальший розгляд, зазначимо, що перейшовши від сили V до дотичних напружень $\tau_v = V / F$ де F – площа поверхні тіла, що зіштовхується з вібруючою поверхнею, можна записати зазначену формулу таким чином:

$$\tau_v = \tau_v(v_\tau) = \tau_{v0} \left[1 - \left(\frac{v_\tau}{v_{\tau 0}} \right) \right]. \quad (1.1)$$

У разі, коли товщина шару сипкого середовища h перевищує вказане вище значення h_* , можна використовувати більш складну модель (модель **Б**), представлену на рис. 1.10.

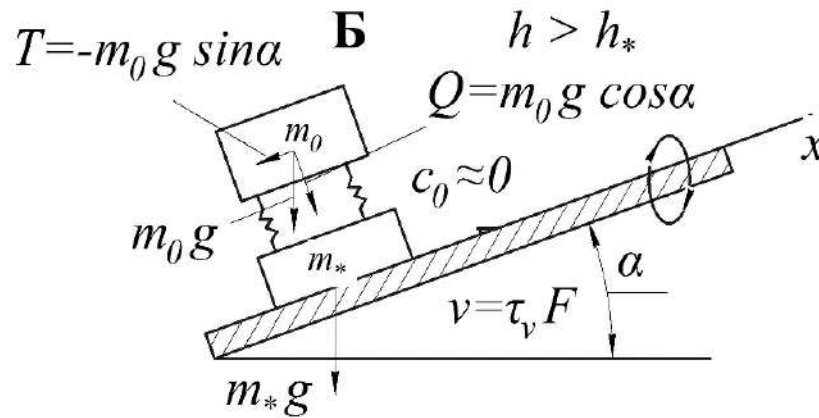


Рисунок 1.10 - Модель руху твердого тіла (частинки) при $h > h_*$

Тіло з масою m_* , безпосередньо контактує з вібруючою плоскою поверхнею, пов'язана в даному випадку з тілом масою m_0 за допомогою пружних елементів з дуже малою жорсткістю c_0 ; при цьому $m_* + m_0 = m$, де m – маса всього шару. Отже, на тіло m_* , діє додаткова постійна сила $Q = m_0 \cdot g \cdot \cos \alpha$, при цьому для вібраційної сили V і дотичного напруження τ_v справедливі ті ж формули, що і в попередньому випадку, але при $Q = m_0 \cdot g \cdot \cos \alpha \neq 0$. У першому наближенні можна прийняти [64]:

$$m_* = \rho \cdot F \cdot h_*, m_0 = \rho \cdot F(h - h_*), (m = m_* + m_0 = \rho \cdot F \cdot h), \quad (1.2)$$

де ρ – насипна щільність сипкого середовища;

h_* – гранична товщина шару, при якій рух шару по вібруючій поверхні ще може розглядати як рух твердого тіла (частинки), $h > h_*$ – загальна товщина шару;

F – площа плоскої поверхні, яку займає сипке середовище.

Для визначеності будемо вважати, що значення величин ρ , h і h_* віднесені до стану середовища в разі відсутності вібрації.

Описана модель, незважаючи на крайню простоту, дозволяє пояснити спадання середньої швидкості руху шару, а в багатьох випадках і питомої продуктивності, у міру збільшення товщини шару h . Це спадання пояснюється зменшенням у міру зростання h параметру перевантаження w_1 , якому пропорційна сила Q . Модель пояснює також збільшення «фази відриву матеріалу» $\delta_0 = \arcsin 1 / w_1$ зі збільшенням h . У певних випадках розглянуту

модель доцільно уточнити введенням амортизованого елемента між масами m^* і m_0 .

Одним з таких випадків є рух шару сипкого середовища по неоднорідній вібруючій неплоскій поверхні, коли товщина шару різна в різних точках цієї поверхні. Відповідне завдання становить інтерес для ряду додатків. Вивчаючи одномірний рух середовища в лотку прямокутного поперечного перерізу, припускаємо, що точки лотка здійснюють періодичні коливання, параметри яких можуть залежати від дугової координати s точки поверхні.

Розглянемо випадок, коли товщина шару h повсюди менша введеної вище величини h_* (рис. 1.11) [65, 82, 83].

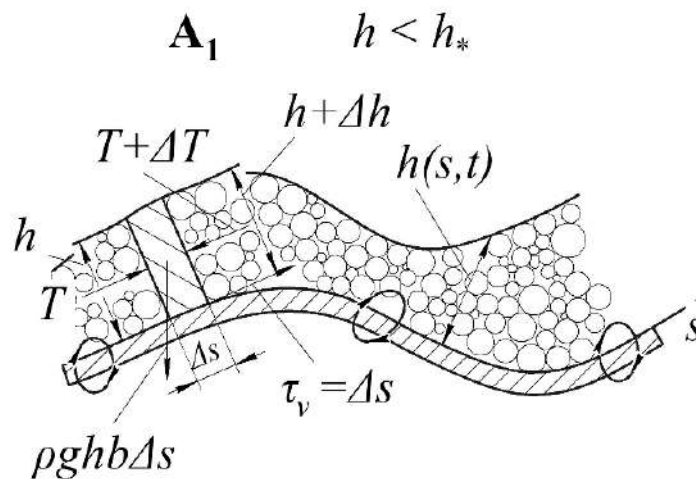


Рисунок 1.11 - Модель руху твердого тіла (частинки), коли h повсюди менша h_*

Склавши рівняння руху елемента шару Δs , маємо таке віброреологічне рівняння, що описує повільний («повзучий») рух шару середовища (назвемо відповідну модель моделлю **A1**):

$$\rho h \frac{\partial v_\tau}{\partial t} = -\rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha - \frac{\partial T}{\partial s} + \tau_v, \quad (1.3)$$

де $v_\tau = v_\tau(s, t)$ – повільна складова швидкості середовища, а $T = T(s, t; h)$ – сила взаємодії між елементами середовища, віднесена до одиниці «ширини» шару.

Силу T вважатимемо подібною гідростатичній силі, що діє на бічну поверхню елемента, і визначається за формулою:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h^2}{\cos \alpha}. \quad (1.4)$$

Також, передбачається, що зміна кута нахилу α й параметрів вібрації поверхні за проміжок часу порядку періоду коливань $T = 2\pi / \omega$ незначна, і тому при обчисленні вібраційної напруги τ_v зазначені величини можуть розглядатися як «заморожені». Для визначеності будемо відносити насипну щільність середовища ρ і висоту шару h до стану середовища за відсутності вібрації. Вібраційна напруга τ_v залежить від швидкості v_τ , від товщини шару h і від координати s [66].

До рівняння (1.3) необхідно під'єднати відношення:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial(v_\tau \cdot h)}{\partial s}, \quad (1.5)$$

У разі коливань точок по еліптичних траєкторіях для режимів з інтенсивним підкиданням, коли:

$$w_1 = \frac{B \cdot \omega^2}{g \cdot \sin \alpha} > \frac{3,5(1+R)}{(1+R)^2}, \quad (1.6)$$

згідно з (1.1), (1.2) маємо наступне вираження для вібраційної напруги (враховуємо, що при $h < h_*$ повинна бути $Q = 0$):

$$\tau_v = \rho \cdot g \cdot h \cdot q_1 \cdot \cos \alpha \left(1 - \frac{v_\tau}{v_{\tau 0}} \right), \quad (1.7)$$

де

$$q_1 = \frac{\lambda}{2 - \lambda} \cdot \frac{1 - R}{1 + R} \cdot \frac{A}{B} \cos \delta, \quad v_{\tau 0} = A \omega \cdot \cos \delta \quad (1.8)$$

Враховуючи вирази (1.4), і (1.7) система диференціальних рівнянь (1.3), (1.5) можуть бути представлені у наступній формулі [55, 56, 73]:

$$\begin{aligned} \frac{h}{g} \cdot \frac{\partial v_\tau}{\partial t} &= -h \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{h^2}{\cos \delta} \right) + h \cdot q_1 \cdot \cos \alpha - \left(\frac{v_\tau}{v_{\tau 0}} \right), \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial(v_\tau \cdot h)}{\partial s}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Зауважимо, що тут величини α , q_1 і $v_{\tau 0}$ то, взагалі кажучи, є функціями дугової координати s . У якості початкових умов може бути заданий початковий розподіл товщини шару $h(s, 0)$ і швидкості $v_\tau(s, 0)$.

У більшості практичних застосувань основну увагу приділяють стаціонарному руху шару сипкого середовища, зумовленому дією вібрації. У цьому випадку, прирівнюючи в рівнянні (1.9) $\partial v_\tau / \partial t = 0$ і $\partial h / \partial t = 0$, отримуємо для висоти шару h наступне звичайне диференціальне рівняння [67, 90, 97]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{2} \sin 2\alpha - \frac{1}{2} h \cdot \cos \alpha \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{1}{\cos \alpha} \right) + q_1 \cdot \cos^2 \alpha \left(1 - \frac{c}{b \cdot h \cdot v_{\tau 0}} \right). \quad (1.10)$$

де через $c = v_\tau h b = \text{const}$ позначені об'ємні витрата середовища через переріз лотка (b – ширина лотка).

Розглянемо тепер випадок, коли на всій ширині шару $h > h_*$. Як і в моделі Б, будемо вважати, що інерційність зосереджена в нижній частині шару, товщини h_* , безпосередньо контактує з вібруючою поверхнею, а частина яка розміщена вище, діє на нижню за допомогою сил, подібних гідростатичному тиску; відповідна модель (модель Б₁) представлена на рис. 1.12.

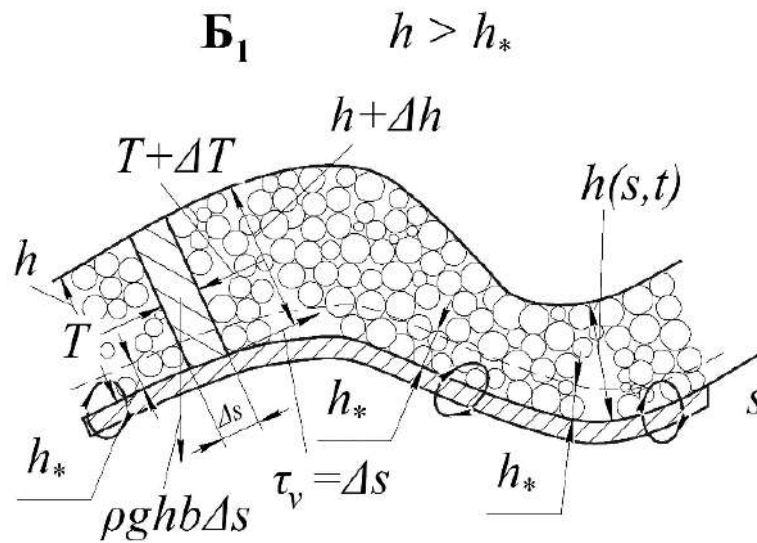


Рисунок 1.12 - Модель руху твердого тіла (частинки), коли h повсюди більша h_*

Унаслідок того, що товщина «інерційної частини» шару в даному випадку фіксована, замість рівняння руху (1.3) будемо мати співвідношення [56, 68, 81]:

$$p h_* \cdot \frac{\partial v_\tau}{\partial t} = -\rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha - \frac{\partial T}{\partial s} + \tau_v, \quad (1.11)$$

наближене вираження для сили T , як і раніше, визначається формулою (1.4).

Моделі **Б** (рис. 1.10) і **Б₁** (рис. 1.12) виявилися найбільш придатними для вивчення саме стаціонарних рухів шару сипкого середовища, а також у випадках, коли кут α й параметри вібрації змінюються з координатою s досить повільно.

Зазначимо, що моделі **А₁** і **Б₁** легко узагальнюються на двовимірний випадок, коли сипке середовища рухається по нециліндричній вібруючій поверхні. Рівняння (1.10) і (1.11) у цьому випадку замінюються відповідно векторним співвідношенням:

$$\rho h = \frac{\partial v_\tau}{\partial t} = -\rho \cdot g \cdot h - \text{grad}T + \tau_v, \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\text{div}(v_\tau \cdot h). \quad (1.13)$$

Для отримання виразів для вібраційної напруги τ_v необхідно вирішити двовимірну задачу про вібротранспортування та розділення. Процеси розділення під дією гравітаційних і відцентрових сил реалізуються тільки за наявності різниці щільності або густини елементів дисперсної та дисперсійної фаз [55, 56, 59, 60].

Окрім випадків $h < h_*$ і $h > h_*$ можуть становити інтерес ситуації, коли вздовж довжини лотка на окремих ділянках виконується перша, а на інших – друга нерівність. У таких умовах виникає необхідність у поєднанні парних розв'язків відповідних диференціальних рівнянь.

Описані вище моделі не дозволяють вивчати внутрішньосферний рух в порівняно товстих шарах середовища. Такі процеси можуть бути досліджені на основі найбільш універсальної з розглянутих моделей (модель **В**, рис. 1.13).

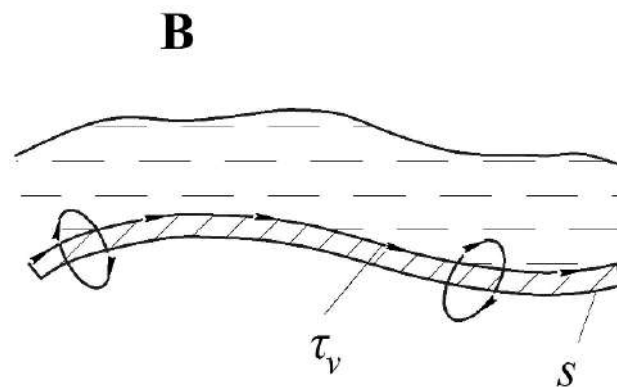


Рисунок 1.13 - Рух сипкого середовища, як рух в'язкої рідини

Відповідно до цієї моделі повільний рух сипкого середовища при досить інтенсивній вібрації її частинок розглядається як рух в'язкої (не обов'язково ньютонівської) рідини, реологічні характеристики якої, а також щільність залежать від характеру вібрації. При цьому в областях, де вібрація недостатньо інтенсивна й псевдозрідження не виникає, сипке середовище можна розглядати як тверде тіло; при уточненому аналізі можливий і розгляд перехідної зони, в якій має місце не псевдозрідження середовища, а лише зниження ефективних коефіцієнтів сухого тертя. Що ж стосується умов на межі S , то, замість звичайних для в'язкої рідини умов прилипання $v|_S = 0$, як і в раніше розглянутих моделях, на ділянках зіткнення середовища зі стінками, задається вираз для дотичного напруження $v|_S = \tau_v(v_\tau)$ [56, 58, 61].

Як зазначалося, вираз для $\tau_v(v_\tau)$ може бути знайдено або аналітично, або на основі досить простих експериментів; у ряді випадків вираз (1.8), отриманий для режимів певного характеру, можна розглядати як апроксимацію, придатну при вивченні також і інших режимів. Утім, як зрозуміло з раніше викладеного, величина $m^* / \rho F = h^*$ (товщина шару, що контактує з вібруючими стінками), по суті, може розглядатися як певний емпірично визначаючий коефіцієнт. Зазначимо, що в ряді випадків залежність $\tau_v(v_\tau)$ від величини m^* є відносно слабкою, а іноді нею і взагалі можна знехтувати [52, 66].

Як уже неодноразово зазначалося, на аналогію в поведінці рідини й сипкого середовища при вібрації давно звертали увагу дослідники. Цю аналогію було обґрунтовано й теоретично доведено для досить розрідженого середовища з «майже пружними» частинками у низці наукових праць. Водночас акцентувалася увага на обмеженості аналогії, насамперед через необхідність урахування вібраційних сил при повільному русі, що має вирішальне значення для формулювання граничних умов у межах моделі **В**. У ряді випадків може виявитися необхідним урахування не тільки поверхневих але і об'ємних вібраційних сил у рідині, що моделює сипке середовище при вібрації. Зокрема, це необхідно при вивченні «повільних» процесів вібраційного поділу (сегрегації) компонентів сипких сумішей [58, 68, 70].

Урахування об'ємних вібраційних сил дозволило дослідникам пояснити й описати повільні «конвективні» потоки, що виникають у симетричній та симетрично вібруючій посудині (рис. 1.14) [70].

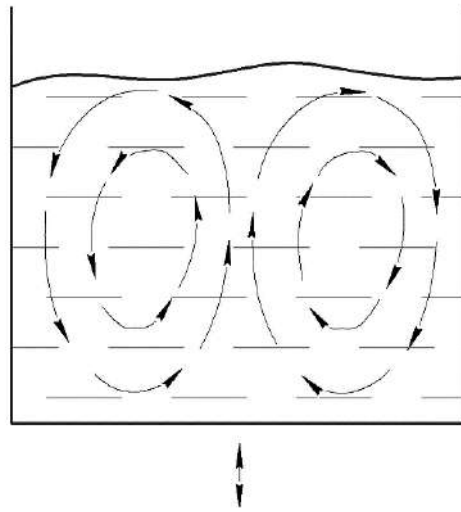


Рисунок 1.14 - Рух сипкого середовища, як ньютонівської рідини

Моделювання сипкого середовища здійснювалося як ньютонівської рідини, фізичні параметри якої (щільність та інші) залежать від характеристик вібрації в конкретній точці. При цьому вважається, що вібраційне поле в середовищі може бути охарактеризоване єдиним скалярним параметром – гранулярною температурою. Згідно з теорією вібропровідності, вона описується рівнянням теплопровідності з урахуванням джерела тепла. За таких припущень об'ємні вібраційні сили формуються внаслідок залежності щільності від гранулярної вібротемператури й мають характер, подібний до архімедових сил [61, 70].

Для оцінки параметрів запропонованої моделі розглянуто ланцюжок N однакових частинок, які рухаються в полі сили тяжіння над вібруючою площиною та непружно відбиваються одна від одної. (рис. 1.15). Рух такого ланцюжка було підтверджено за допомогою чисельного моделювання на ЕОМ.

Чисельні експерименти з ланцюжком відбивання частинок стали основою для створення фізичної моделі поведінки сипкого середовища під дією вібрації (модель С), яка певною мірою також належить до віброреологічних моделей.

Один з основних фактів, виявлених при чисельному моделюванні, полягав у тому, що частота зіткнення між частинками виявилася значно більшою за частоту вібрації. Це дозволило провести статистичне усереднення рівнянь перенесення енергії та імпульсу з використанням центральної граничної теорії ймовірностей. Побудована на цій основі одномірна континуальна модель призводить до досить складної нелінійної системи диференціальних рівнянь у часткових похідних, яку вдається аналітично вирішити в деяких найпростіших окремих випадках [69, 77].

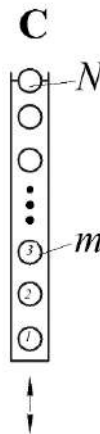


Рисунок 1.15 - Рух в полі сили тяжіння над вібруючою площиною

Варто зазначити, що певні труднощі виникають під час узагальнення моделі С на тривимірний випадок, а також при формулюванні відповідних їй граничних умов. [70, 76].

1.4 Вплив вібраційної в'язкості на характер руху сипкого матеріалу

Гіпотеза сталості турбулентної в'язкості призводить до безрозмірних рівнянь Нав'є-Стокса [71, 72], справедливих для всіх режимів турбулентного потоку, який буде автомодельним, тобто при зміні витрати і розмірів системи зі збереженням геометричної подібності відносні поля швидкостей і тисків не змінюються. Ці важливі властивості дійсно мають усі розвинені турбулентні потоки, різко відрізняючись в цьому відношенні від потоків ламінарних і наближаючись до нев'язких. Сюди відносяться не тільки вільно-турбулентні

потоки, але й інші турбулентні потоки, які характеризуються наявністю інтенсивних макроскопічних вихорів [73, 74, 75, 76].

Записавши систему рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням в'язкості ν_r : у перших трьох рівняннях системи $\omega = 0$ (згідно з дослідними даними по циркуляційному руху сипкого корму в циліндричному вібровідцентровому змішувачі радіальна складова вектора швидкості набагато менша осьової $\omega \ll v$ і тангенціальної $\omega \ll u$); у четвертому рівнянні не можна прийняти $\omega = 0$, оскільки через чутливість рівняння в цьому випадку порушується баланс маси. Відкинемо члени з $\partial^2/\partial Z$, оскільки відповідно з дослідними даними похідні по z істотно менші похідних по r . Використовуючи рішення Озена, замінимо оператор $\nu \partial/\partial Z$ на $\bar{\nu} \partial/\partial \bar{Z}$, де $\bar{\nu}$ – середнє значення осьової швидкості на виході. Тоді отримаємо систему рівнянь [77, 78, 79, 80,]:

$$\begin{cases} \frac{u^2}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}; \\ \bar{\nu} \frac{\partial u}{\partial Z} = \nu_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right); \\ \bar{\nu} \frac{\partial v}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial t} + \nu_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial t} \right); \\ \frac{\partial}{\partial r} (r\omega r + \frac{\partial}{\partial Z} (rv)) = 0. \end{cases} \quad (1.14)$$

У даній постановці друге рівняння може бути вирішено незалежно від інших. Введемо функцію осьового компоненту вихору $\omega_{zb} = \frac{\partial}{r \partial r} (ru)$, при цьому можна легко показати, що друге рівняння системи (1.14) буде таким [81]:

$$\frac{\partial \omega_{zb}}{\partial Z} = \eta_r \left(\frac{\partial^2 \omega_{zb}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega_{zb}}{\partial r} \right), \quad (1.15)$$

де $\eta_r = \nu_r = R \bar{\nu} \text{Re}_T^{-1}$ – кінематична в'язкість;

R – радіус корпусу;

Re_T – турбулентне число Рейнольдса [82, 85].

Дійсно, якщо:

$$\omega_{zb} = \frac{\partial}{r \partial r} (ru) = \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r}, \quad (1.16)$$

тоді

$$\frac{\partial \omega_{zb}}{\partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1.17)$$

або

$$\bar{v} \frac{\omega_{zb}}{\partial v} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{v} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \left(\bar{v} \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1.18)$$

проте

$$\frac{\partial \omega_{zb}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} \right) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2}. \quad (1.19)$$

Отже, маємо таке друге рівняння в системі (1.14) [83, 84, 86]:

$$\bar{v} \frac{\partial v}{\partial z} = v_r \frac{\partial \omega_{zb}}{\partial r}. \quad (1.20)$$

Підставляємо у вираз (1.20) для $\bar{v} \frac{\partial \omega_{zb}}{\partial z}$ замість $\bar{v} \frac{\partial u}{\partial z}$ оператор $v_r \frac{\partial \omega_{zb}}{\partial r}$,

отримаємо:

$$\bar{v} \frac{\omega_{zb}}{\partial z} = v_r \left(\frac{\partial^2 \omega_{zb}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega_{zb}}{\partial r} \right), \quad (1.21)$$

поділивши яке на $\bar{v}$, отримаємо рівняння:

$$\frac{\omega_{zb}}{\partial z} = \frac{v_r}{\bar{v}} \left(\frac{\partial^2 \omega_{zb}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega_{zb}}{\partial r} \right). \quad (1.22)$$

З математичної точки зору ця задача поширення (або дифузії) завихрення в закрученому потоці при його русі в трубі ідентична двовимірній задачі поширення теплоти в однорідному твердому тілі від лінії, на якій спочатку було сконцентровано кінцеву кількість теплоти. За аналогією тут поширенням теплоти є циркуляція сипучого матеріалу на вході з циліндричного корпусу вібровідцентрового змішувача [87, 88, 89]:

$$\Gamma_n(r) = u_n(r), \quad (1.23)$$

де $u_n(r)$ – окружна складова швидкості на вході, збільшена в 2π рази.

Коефіцієнтом термодифузії в даному випадку є параметр η_T – кінематична в'язкість, що дозволяє скористатися вже встановленими для рівняння теплопровідності математичними результатами, наведеними в [90, 91, 93, 94]. Звідси безпосередньо випливає:

$$\omega_{zb} = \frac{\Gamma_H(r)}{2\eta_T z_1} \exp\left(-\frac{r}{4\eta_T z_1}\right), \quad (1.24)$$

відповідно розподіл колової швидкості сипкого корму:

$$u = \frac{\Gamma_H(r)}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r}{4\eta_T z_1}\right) \right], \quad (1.25)$$

і циркуляції сипкого корму в циліндричному корпусі:

$$\Gamma_{\text{ц}} = \Gamma_H(r) \left[1 - \exp\left(-\frac{r}{4\eta_T z_1}\right) \right], \quad (1.26)$$

де z_1 – час руху сипкого корму по осі корпусу за одне його коливання, с.

Аналіз рівняння (1.26) для u показує, що при різних початкових умовах, що задаються функцією $\Gamma_H(r)$, можна отримати різні функції зміни колових швидкостей по довжині циліндричного корпусу. Наприклад, при потенційному вільному вихорі на вході $\Gamma_H(r) = \text{const} = \Gamma_H$ [95, 96, 97].

Тоді

$$u = \frac{\Gamma_H}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4\eta_T z_1}\right) \right]. \quad (1.27)$$

При $r \ll \sqrt{4\eta_T z_1}$ – у приосьовій зоні кормова суміш обертається як тверде тіло з кутовою швидкістю $\Gamma_H(r)/4\eta_T z_1$. При $r \gg \sqrt{4\eta_T z_1}$ ближче до стінок циліндричного корпусу вихровий рух сипкого корму інтенсивніший, ніж в приосьовій зоні, за рахунок передачі імпульсів (ударів) від внутрішньої поверхні корпусу ($z_1 = 0,01 \dots 0,02$ с) [98, 99].

Отже, потенційний обертово-поступальний потік сипкого корму під час руху по довжині циліндричного корпусу в силу дії в'язкості трансформується в складний вільно-вимушений вихор, який сприяє інтенсивному змішуванню компонентів суміші [100, 101, 102].

1.5 Висновки, мета та завдання дослідження

1. У результаті виконаного аналітичного огляду встановлено, що процес змішування сипких матеріалів є складним і багатофакторним, а ефективність

змішування значною мірою залежить від конструкції змішувального обладнання, його геометричних параметрів, режимів роботи та фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів. Існуючі конструкції змішувачів умовно поділяються на групи за принципом дії, серед яких вібраційні змішувачі мають низку переваг: інтенсивність впливу на частинки, можливість керування процесом шляхом зміни параметрів збудження коливань, а також компактність і відносна простота конструкції.

З огляду на літературні джерела, можна стверджувати, що вібраційні змішувачі здатні забезпечити високу однорідність сумішей навіть за короткого часу обробки, завдяки поєднанню вертикальних і горизонтальних коливань, які створюють інтенсивні зсувні й ударні навантаження на частинки матеріалу. Водночас ефективність таких змішувачів суттєво залежить від вибору оптимальних конструктивно-режимних параметрів, серед яких частота і амплітуда коливань, маса робочих органів, геометрія камери змішування тощо.

2. З'ясовано, що ефективність використання комбікормів у птахівництві безпосередньо залежить від фізико-хімічних властивостей сировини, рівня її однорідності та поживної збалансованості. Найбільш критичними параметрами, що впливають на якість змішування, є розмір частинок, вологість, насипна щільність і різні напрямки руху компонентів. Встановлено, що вібраційне змішування забезпечує високу однорідність за відносно короткий час у порівнянні з традиційними методами.

3. Проаналізовано основні підходи до опису поведінки сипких матеріалів під дією вібрацій, зокрема моделі руху у вигляді твердого тіла, в'язкої рідини та багатошарових систем. Показано, що використання віброреологічних моделей дозволяє глибше зрозуміти механізми переміщення частинок, псевдозрідження, сегрегації та взаємодії з вібруючими поверхнями, що є важливим для обґрунтування конструкції нової конструкції віброзмішувача.

4. Встановлено, що вібраційна в'язкість є ключовим параметром, що впливає на структуру та інтенсивність циркуляційних потоків всередині робочої камери змішувача. У результаті дослідження математичних моделей на основі

рівнянь Нав'є–Стокса встановлено, що коливальний вплив сприяє формуванню турбулентного режиму з переважанням макровихорів, які інтенсифікують процес змішування та підвищують його ефективність.

Метою досліджень є зменшення енергетичних витрат при забезпеченні встановлених показників якості змішування сипких сумішей шляхом обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдань**:

- на основі аналізу існуючих конструкцій змішувачів, а також результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесу змішування, розробити принципову схему вібраційного змішувача;
- виконати аналітичні дослідження напружено-деформованого стану лопаті та обґрунтувати її геометричні розміри;
- розробити математичну модель, провести її аналітичне дослідження та теоретично обґрунтувати режимні параметри вібраційного змішувача;
- розробити лабораторну установку та провести експериментальні дослідження для встановлення залежності показників якості суміші, продуктивності та питомої енергоємності процесу від конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача;
- виконати виробничу перевірку вібраційного змішувача та визначити його економічну ефективність.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [1, 23, 24, 25, 55, 75].

1. Полевода Ю.А., Волинець Є.О. Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 4 (111). С. 72–79. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-8.

2. Polievoda Y., Volynets Y. Study of the characteristics of vibrorheological models of bulk raw materials in the working area of a vibrocentrifugal mixer. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 35-43. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-4.

3. Volynets Y. Improvement of the vibrating mixer of food mixes. *Abstracts of*

IV International Scientific and Practical Conference «Prospects and achievements in applied and basic sciences». Budapest. 2021. С.632–635.

4 Volynets Y. Vibratory conveyor for loading food mixture mixer. *Сучасні вектори розвитку аграрної науки*. Міжнародної науково-практичної конференції (17-18 вересня 2024 р.). Херсон. Кропивницький: ХДАЕУ. 2024. С. 225–228.

5. Волинець Є.О. Обґрунтування конструкції змішувача харчових сумішей малої продуктивності. *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.). Дніпро: ДДАЕУ. 2024. С. 32–34.

6. Спірін А.В., Волинець Є.О. Vibratory conveyor for loading food mixture mixer. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 2. № 3 (337). С. 328–333. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-49

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА

2.1 Розробка конструкції вібраційного змішувача

Проведені попередні дослідження [103] енергетичних характеристик вібраційного змішувача із лопатевим валом дозволили встановити режим роботи установки, при якому сумарні витрати енергії на виконання процесу змішування є мінімальними. На основі отриманих результатів, досвіду створення й дослідження змішувачів із вібраційними перетворювачами руху [104, 105, 107] та з метою подальшого зменшення енерговитрат було розроблено вібраційний змішувач із лопатевим валом, який показано на рис. 2.1 (додаток А).

В основу розробленої машини (змішувача) поставлена задача інтенсифікації процесу змішування матеріалів шляхом зменшення адгезійних сил між частинками матеріалу за рахунок використання гравітаційного ефекту. Це досягається тим, що вібраційний змішувач закріплено до корпусу на стійках контейнера з можливістю його обертання на 360° навколо горизонтальної осі, при цьому лопатевий вал всередині контейнера, з можливістю обертання навколо горизонтальної осі, а приводи контейнера й лопатевого валу виконані окремо.

Вібраційний змішувач (рис. 2.1) містить пружні елементи 2, на яких встановлено платформу 1 з контейнером 5 на стійках 4. До платформи 1 закріплено віброзбуджувач 3. Всередині контейнера 5 розміщено лопатевий вал 6 у підшипникових вузлах 7. Приводом лопатевого валу 6 є електродвигун 8, який з'єднано з ним муфтою 9. Привод контейнера 5 є окремим і містить електродвигун 10, муфту 11 і відкриту зубчасту передачу 12. Контейнер 5 має люк 13, призначений для його завантаження та розвантаження. Люк 13 оснащено засувкою з механізмом її закриття та відкриття.

Під час роботи в контейнер 5 через люк 13 завантажують матеріал для приготування однієї порції суміші й закривають засувку. Віброзбуджувач 3 приводить в коливально-вібраційний рух корпус 1.

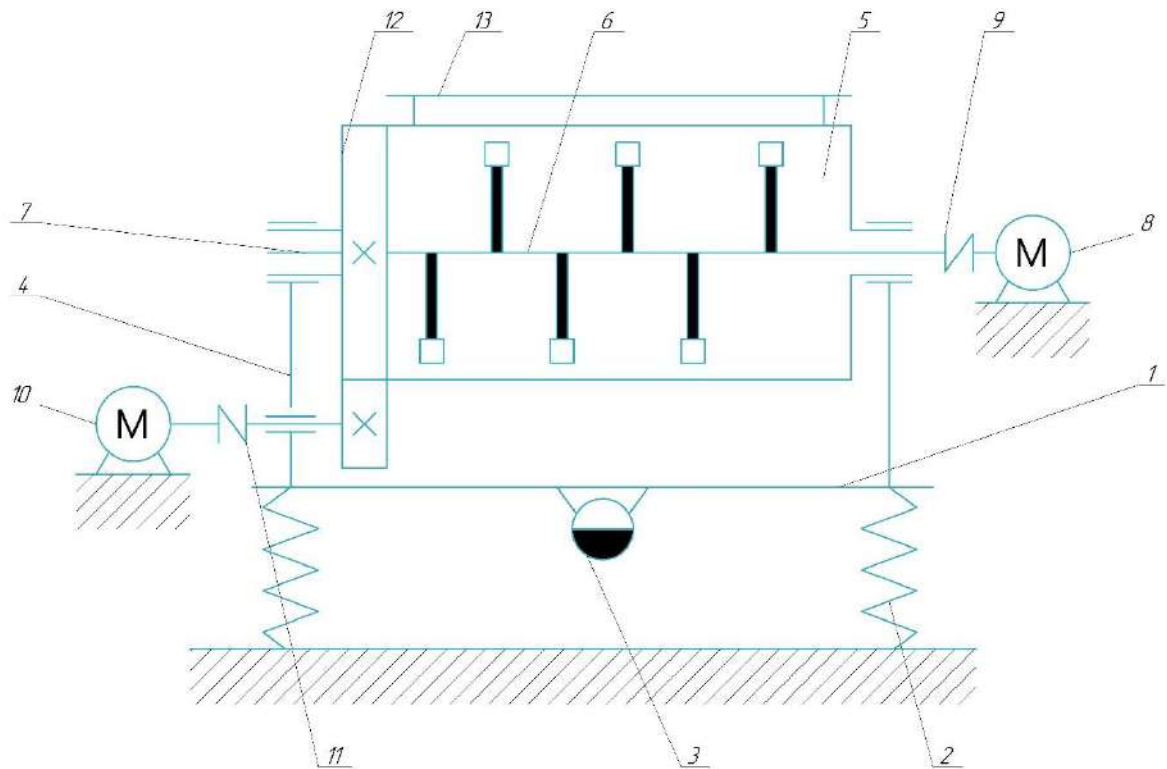


Рисунок 2.1 - Кінематична схема вібраційного змішувача: 1 – платформа; 2 – елементи пружні; 3 – вібробуджувач; 4 – стійки; 5 – контейнер; 6 – вал лопатевий; 7 – вузол підшипниковий; 8, 10 – електродвигун; 9, 11 – муфта; 12 – передача зубчаста; 13 – люк

Одночасно з корпусом 1 у коливально-вібраційний рух приходить контейнер 5, разом із завантаженим у нього матеріалом. Електродвигун 8 приводить в обертний рух лопатевий вал 6. Електродвигун 10 через муфту 11 і відкриту зубчасту передачу 12 приводить в обертний рух на 360° навколо горизонтальної осі контейнер 5, разом із завантаженим у нього матеріалом. У результаті одночасної дії на частки матеріалу коливань, що утворює вібробуджувач 3, турбулізації, що утворює обертання лопатевого валу 6 та обертального руху контейнера 5 на 360° навколо його горизонтальної осі, процес змішування матеріалу інтенсифікується, при цьому послаблюється дія адгезійних сил поміж частинками матеріалу за рахунок гравітаційного ефекту.

2.2 Аналітичне обґрунтування геометричних розмірів лопатевого валу

Першим етапом теоретичних досліджень є аналітичне обґрунтування геометричних розмірів лопаті лопатевого валу змішувача, схема якої наведена на рис. 2.2. Лопать змішувача представляє собою пруток, один край якого закріплено на валу, а інший до трапецієподібної рівнобічної пластинки. Пластика розміщена під кутом, для забезпечення не тільки обертального руху компонентів, а й їх осевого переміщення в центр змішувача.

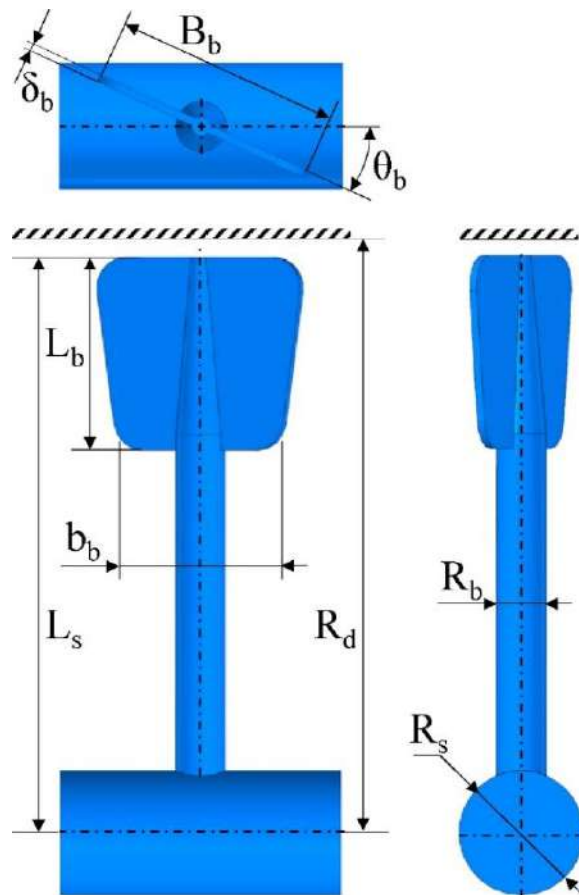


Рисунок 2.2 - Конструктивна схема лопаті лопатевого валу змішувача:

L_s – загальна довжина лопаті, м; L_b – висота трапецієподібної пластинки, м; B_b – більша основа трапецієподібної пластинки, м; b_b – менша основа трапецієподібної пластинки, м; δ_b – товщина трапецієподібної пластинки, м; θ_b – кут нахилу трапецієподібної пластинки, °; R_b – радіус прутка лопаті, м; R_s – радіус валу, м; R_d – радіус контейнера, м

Правильно підібрані геометричні розміри лопатей дозволять забезпечити найкраще захоплення частинок компонентів.

Розміри лопаті залежать від радіуса контейнера, який прийнято для подальших досліджень $R_d = 200$ мм, та ефективного діаметра частинок компонентів суміші (для зерна – $d_p = 5-10$ мм, середнє – $7,5$ мм). Тоді, за умови вільного проходження частинки компонента між лопаттю і контейнером, матимемо таку загальну довжину лопаті: $L_s \approx R_d - 2d_p \approx 185$ мм. Що підтверджується результатами численних досліджень у сфері механіки змішування. Наприклад, у дослідженнях щодо механіки перемішування в бочках з обертальними лопатями [108], оптимальна довжина лопаті L_s має бути в межах $0,85-0,95$ від радіусу контейнера R_d . Це дозволяє створити достатній обертальний момент для переміщення суміші, одночасно забезпечуючи, щоб лопатка не була надто довгою, що могло б призвести до додаткових механічних навантажень. Радіус валу R_s згідно рекомендацій в [109] повинен складати $0,1 R_d = 20$ мм.

Оскільки частинки компонентів суміші мають розмір $d_p = 5-10$ мм, ширина трапецієподібної пластини B_b , b_b повинна бути достатньою для того, щоб захопити ці частинки та сприяти їх переміщенню. З огляду на дослідження, що описують ефективність лопаток для змішування матеріалів різних розмірів [110], пластина повинна мати ширину в $6-10$ разів більшу за розмір частинок. Отже, ширина пластини коливається в межах $45-75$ мм, тобто для подальших досліджень приймаємо $B_b \approx 75$ мм, $b_b \approx 45$ мм.

Для ефективного переміщення частинок суміші, пластина повинна мати певну висоту L_b , яка визначається потребою в обертальному русі компонентів. Згідно з дослідженнями [111] рекомендована висота пластини L_b повинна складати третину від довжини лопаті L_s , тобто $L_b \approx 62$ мм.

Кут нахилу пластини θ_b є важливим параметром, оскільки він визначає швидкість осьового руху частинок компонентів суміші. Численні дослідження у процесу змішування сипких матеріалів указують на оптимальний кут нахилу від 15° до 35° , який дозволяє забезпечити спрямування потоку частинок компонентів до центру контейнера. Тому приймаємо середнє значення кута $\theta_b = 25^\circ$.

Приймаючи розмір контейнера $L_b = 900$ мм та умову необхідності забезпечення рівномірного змішування суміші, лопаті мають бути розміщені таким чином, щоб максимізувати ефективність руху часток. За умови, що відстань між пластинами повинна дорівнювати діаметру частинок компонентів суміші d_p [112], отримуємо відстань між лопатями $B_b + 2d_p = 90$ мм. Тоді загальна кількість лопатей складає – 10 шт.

Для визначення раціонального значення товщини трапецієподібної пластинки δ_b і радіуса прутка лопаті R_b скористаємося простим чисельним моделюванням в програмі SolidWorks Simulation (додатка Б). Для цього складемо схему моделювання (рис. 2.3) і виконаємо параметризацію зазначених розмірів у відповідних діапазонах: $\delta_b = 0,5-4,0$ мм (крок – 0,5 мм); $R_b = 4,0-16,0$ мм (крок – 2 мм). Приймаємо, що на пластину діє тиск 1000 Па. У ході моделювання буде визначено вплив цих параметрів на напружено-деформований стан пластини, що дозволить обґрунтувати раціональні значення для забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції за умови мінімізації її маси.

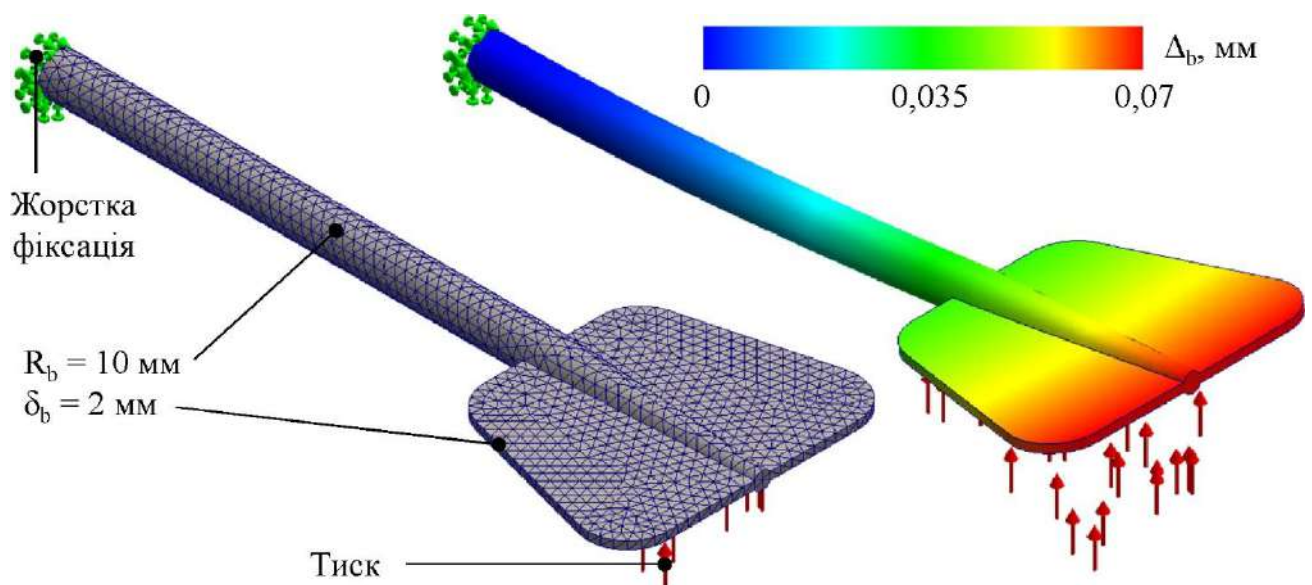


Рисунок 2.3 - Схема чисельного моделювання лопаті в програмному пакеті SolidWorks Simulation

Критеріями моделювання є деформація Δ_b і маса лопаті M_b . Раціональні значення розмірів δ_b і R_b встановлювались за умовою:

$$\begin{cases} \Delta_b \rightarrow \min, \\ M_b \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2.1)$$

У результаті параметричного моделювання отримано закономірності зміни деформації Δ_b і маси лопаті M_b від розмірів δ_b і R_b , які представлено у вигляді тривимірних діаграма розсіву даних з використанням програми Wolfram Cloud (рис. 2.4).

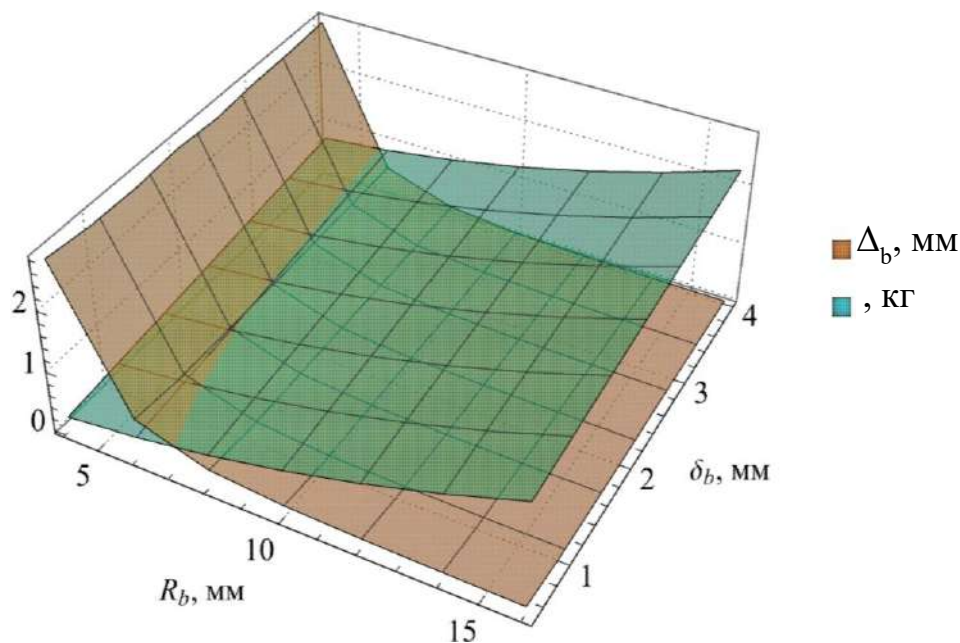


Рисунок 2.4 - Тривимірна діаграма зміни деформації Δ_b і маси лопаті M_b від товщини трапецієподібної пластинки δ_b і радіуса прутка лопаті R_b

Виконання умови (2.1) для отриманих даних (рис. 2.4) дає змогу визначити раціональне значення товщини трапецієподібної пластинки $\delta_b = 2$ мм і радіуса прутка лопаті $R_b = 8$ мм.

У результаті наведених обчислень й аналізу можна зробити висновок, що запропоновані геометричні розміри лопаток і їх розміщення є обґрунтованими й раціональними.

2.3 Методика чисельного моделювання процесу роботи вібраційного змішувача

Для перевірки розробленої конструкції вібраційного змішувача харчових сумішей (рис. 2.1), отримання основних закономірностей технологічного процесу й обґрунтування його раціональних параметрів використано системний інжиніринг на основі цифрових моделей, реалізований за допомогою чисельного моделювання в САЕ-системі Simcenter Star-CCM+ [113, 114, 115].

Чисельне моделювання в Simcenter Star-CCM+ є потужним інструментом для аналізу процесів змішування, оскільки дозволяє отримати глибоке розуміння перебігу фізичних явищ без необхідності проведення тривалих експериментів. Ще однією перевагою є гнучкість моделювання, що дозволяє досліджувати різні конструкції й режими роботи змішувача без необхідності фізичної зміни експериментальної установки. Чисельне моделювання також забезпечує можливість візуалізації складних процесів, дозволяючи отримати наочне зображення динаміки руху частинок у змішувачі, що полегшує аналіз механізмів їх взаємодії та ідентифікацію можливих проблем, таких як мертві зони чи нерівномірний розподіл компонентів [116].

Схема чисельного моделювання наведена на рис. 2.5 (а) (додатка В). Змішування компонентів здійснюється в циліндричному контейнері, в середині якого встановлений лопатевий вал. Контейнер і лопатевий вал обертаються в протилежних напрямках із різною частотою n_k і n_d відповідно. При цьому має місце вібрація всієї системи з заданою частотою n_b і амплітудою A_b , яка здійснюється за еліптичною траєкторією:

$$\begin{cases} x = A_b \cos\left(\frac{2\pi n_b}{60} t + \varphi_b\right), \\ y = A_b \cos\left(\frac{2\pi n_b}{60} t + \varphi_b\right), \\ z = A_b \cos\left(\frac{2\pi n_b}{60} t + \varphi_b\right). \end{cases} \quad (2.2)$$

де x, y, z – декартові координати зміни положення системи в просторі, м;

t – час, с;

A_B – амплітуда коливань (вібрації) системи, м;

n_B – частота коливань (вібрації) системи, об/хв; φ_B – початкова фаза коливань (вібрації) системи.

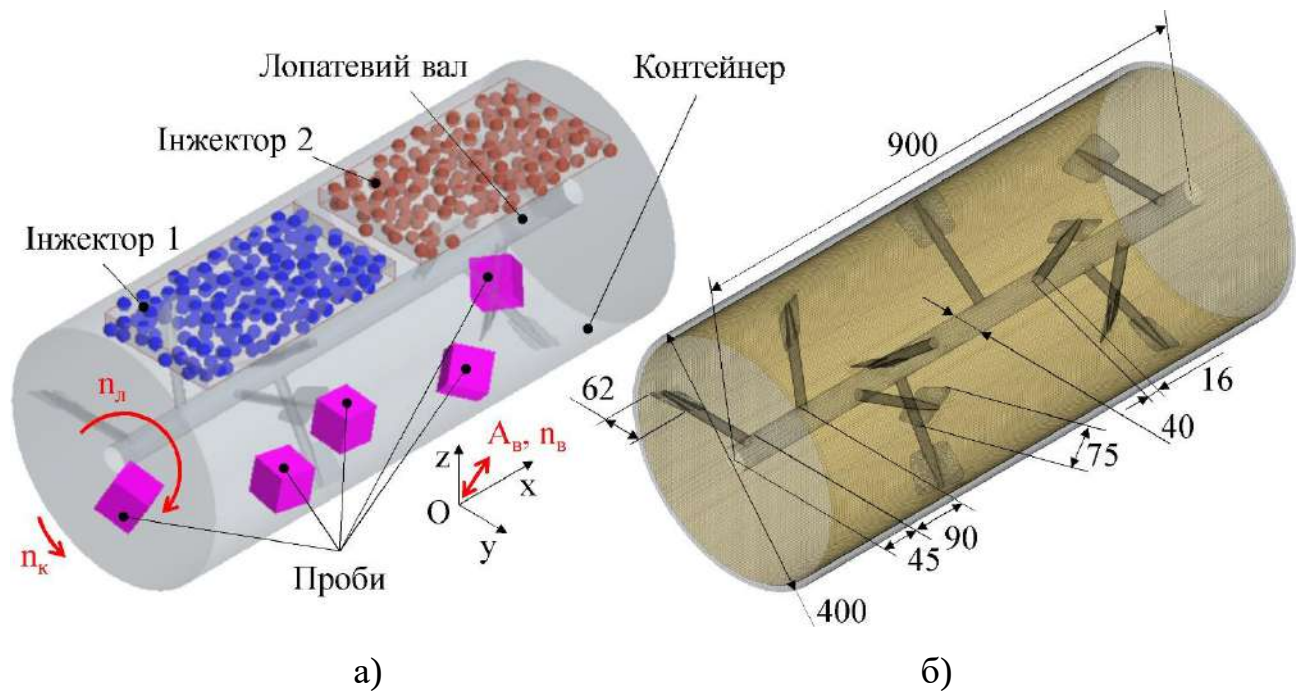


Рисунок 2.5 - Схема чисельного моделювання (а), геометричні розміри й сітка змішувача (б)

Як вихідні компоненти кормової суміші використовуються два однакових інгредієнти (І і ІІ), що є сферичними (прийнято для спрощення моделі) мають такі фізико-механічні характеристики: коефіцієнт Пуассона становить 0,35, модуль Юнга дорівнює 200 МПа, а дійсна щільність складала 600 кг/м^3 , діаметр складає 7,5 мм. Введення цих компонентів у змішувач відбувається через спеціальні блоки подачі – інжектор 1 та інжектор 2, які забезпечують рівномірне завантаження матеріалу в робочу зону. Кожен із них має тип випадкового інжектора і розташований на відповідній граничній частині (рис. 2.5, а). Формування початкового розподілу частинок здійснюється на основі параметра

умова встановлення упаковки частинок, який визначається через лічильник частинок. Геометричні характеристики частинок включають: діаметр частинок – 0,01 м; число затравок – 100. Загальна кількість частинок кожного компонента – 5000 шт, що відповідає заповненню контейнера на рівні $\frac{3}{4}$ від загального об'єму.

Для проведення обчислень важливим етапом є створення обчислювальної сітки, яка розбиває домен на контрольні об'єми. У даному випадку використовуються такі сіткові моделі: тример і генератор поверхневої сітки. Тример є об'ємним генератором сітки, що створює ортогональну структуру з локальним згущенням поблизу границь, базується на гексагональних елементах, що мінімізує дисперсійні похибки, підтримує локальне згущення для детального опрацювання важливих зон й оптимізований для моделювання зовнішньої аеродинаміки та течій у складних геометріях. Генератор поверхневої сітки використовується для поліпшення якості поверхневої сітки перед побудовою об'ємної сітки, виправляє спотворені трикутні елементи на поверхні, сприяє кращому переходу від поверхневої сітки до об'ємної та забезпечує узгодженість геометрії, що особливо важливо для складних поверхонь. Базовий розмір сітки встановлений на рівні 0,01 м, що означає, що глобальний розмір контрольного об'єму в середньому становить 0,01 м, а локальні уточнення залежать від адаптації та критеріїв зміни розміру (прийнятий – 10 % від базового розміру). Геометричні розміри й сітка змішувача наведено на рис. 2.5 (б).

Фізико-математичний апарат чисельного моделювання процесу змішування компонентів на розробленому обладнанні базується на обраному комплексі фізичних моделей, що враховують динаміку середовища, взаємодію фаз і силові фактори, які впливають на поведінку частинок у потоці.

Моделювання виконано в тривимірній постановці, що дозволяє детально аналізувати рух частинок у всіх напрямках. Процес є нестационарним, а його розрахунок здійснюється за неявною схемою, що забезпечує стійкість чисельного інтегрування.

Основним середовищем є газ (повітря), який задає граничні умови для руху

частинок у потоці. Використано підхід роздільної течії, який дозволяє окремо розглядати вплив кожного компонента, а також градієнти фізичних параметрів, які формують структуру потоку. Густина середовища приймається сталою, а сам потік розглядається у ламінарному режимі, що дозволяє зосередитися на аналізі взаємодії частинок без урахування турбулентних ефектів.

Для опису руху та взаємодії твердих частинок використовується Лагранжева багатофазна модель, яка дозволяє відстежувати кожен частинку окремо в просторі та часі. Додатково застосовується метод дискретних елементів (DEM), що дозволяє детально враховувати сили контакту між частинками. Багатофазна взаємодія забезпечує врахування впливу фаз одна на одну, а сила тяжіння моделює дію гравітації на частинки.

Лагранжеві фази представлено двома компонентами: I та II, кожен із яких моделюється у вигляді дискретних твердих частинок DEM із сферичною формою та сталою густиною. На рух частинок впливає сила градієнта тиску, а також враховується їхній час перебування в системі, що дозволяє аналізувати ефективність змішування.

Для точного опису процесу змішування розглядаються всі можливі взаємодії між частинками та стінками області. Передбачено взаємодію між частинками одного типу (I – I, II – II), між різними компонентами (I – II), а також взаємодію частинок зі стінками (I – стінка, II – стінка). Взаємодії моделюються через фазову взаємодію DEM, яка описує контакт між дискретними частинками. Контактні сили визначаються моделлю Герца-Міндліна, що враховує пружні властивості матеріалу частинок. Додатково застосовується модель опору коченню, яка описує сили, що перешкоджають обертанню частинок при контакті.

Цей набір фізичних моделей дозволяє комплексно дослідити процес змішування, відстежуючи траєкторії окремих частинок, аналізуючи їхні взаємодії та враховуючи вплив фізичних параметрів на динаміку потоку. Фізико-математичний апарат зазначених моделей має наступний вигляд.

1. Основні рівняння руху середовища (газу). Газовий потік описується рівняннями Нав'є-Стокса для нестисливого середовища. Рівняння збереження маси (неперервності) [117]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.3)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор швидкості потоку у трьох напрямках, м/с.

Рівняння збереження імпульсу (руху) у диференціальній формі [118]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (2.4)$$

де ρ – густина газу, кг/м³,

p – тиск, Па;

μ – динамічна в'язкість, Па·с;

$\mathbf{F}$ – вектор зовнішніх сил, що включає силу тяжіння та сили взаємодії з частинками.

Гравітація діє у напрямку осі z і визначається як:

$$\mathbf{F}_g = \rho \mathbf{g} \quad (2.5)$$

де $\mathbf{g}$ – прискорення вільного падіння, м/с².

Неявна схема інтегрування використовується для розв'язку рівнянь у часовій області з покроковою зміною швидкості потоку та тиску.

2. Рух твердих частинок описується другим законом Ньютона у Лагранжевій постановці [119]:

$$\frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \sum \mathbf{F}_p \quad (2.6)$$

де m_p – маса частинки, кг;

$\mathbf{v}_p$ – швидкість частинки, м/с;

$\mathbf{F}_p$ – сума всіх сил, що діють на частинку, Н.

Основні сили, що враховуються в моделі, наступні.

Сила градієнта тиску [120]:

$$\mathbf{F}_{pg} = -V_p \nabla p \quad (2.7)$$

де $V_p = \frac{4}{3} \pi R_p^3$ – об'єм частинки, м³;

R_p – радіус частинки, м.

Сила тяжіння:

$$\mathbf{F}_g = m_p \mathbf{g}. \quad (2.8)$$

Сила опору середовища (для ламінарного потоку) [121]:

$$\mathbf{F}_d = -6\pi\mu R_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}_p). \quad (2.9)$$

При переході до турбулентного режиму використовують наближену формулу Куна-Клагетта для коефіцієнта опору C_d [122]:

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_p |\mathbf{u} - \mathbf{v}_p| (\mathbf{u} - \mathbf{v}_p). \quad (2.10)$$

де $A_p = \pi R_p^2$ – площа поперечного перерізу частинки, м².

3. Взаємодія між частинками (DEM-модель) описується за допомогою моделі Герца-Міндліна.

Нормальна контактна сила між частинками [123]:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2}, \quad (2.11)$$

де E^* – приведений модуль пружності, Па;

R^* – приведений радіус контакту, м;

δ_n – нормальна деформація, м.

Тангенціальна сила тертя [124]:

$$F_t = k_t \delta_t - \eta_t v_t, \quad (2.12)$$

де k_t – коефіцієнт жорсткості у тангенціальному напрямку, Н/м;

δ_t – тангенціальна деформація, м;

η_t – коефіцієнт демпфування, кг/с;

v_t – відносна швидкість ковзання.

4. Для опису ефекту кочення застосовується модель, яка враховує момент сил тертя при обертанні [125]:

$$M_r = \mu_r R_p F_n, \quad (2.13)$$

де μ_r – коефіцієнт опору коченню.

5. Частинки можуть взаємодіяти не тільки між собою, але й зі стінками, використовуючи аналогічні контактні моделі Герца-Міндліна. Сила контакту зі стінкою розраховується аналогічно до взаємодії частинка-частинка, але із врахуванням жорсткості стінки [123]:

$$F_n^{\text{wall}} = \frac{4}{3} E_w^* \sqrt{R_p} \delta_n^{3/2}, \quad (2.14)$$

де E_w^* – приведений модуль пружності для контакту зі стінкою, Н/м².

Запропонований фізико-математичний апарат дозволяє детально моделювати процес змішування, враховуючи рух частинок у газовому середовищі, їхню взаємодію між собою та зі стінками, вплив сил гравітації, градієнтів тиску та контактних сил. Комплексне використання рівнянь руху, моделі DEM та контактних сил забезпечує високу точність розрахунків і дозволяє отримати реалістичний розподіл фаз у системі моделювання Simcenter Star-CCM+.

Чисельне моделювання здійснюється за допомогою спеціалізованого вирішувача за такими параметрами:

- часовий крок розрахунку – 0,01 с, що забезпечує точність розрахунків;
- критерії зупинки моделювання (максимальний час моделювання 240 с);
- обмеження кількості кроків відключено, що дозволяє симуляції тривати до досягнення максимального часу.

Такий підхід дозволяє забезпечити коректне формування початкової упаковки частинок, контрольовану динаміку змішувача та стабільний чисельний розрахунок процесу змішування.

Чисельне моделювання проводилось у два етапи. Перший етап передбачав дослідження раціональної конструкції лопатевого валу, варіанти якого відрізняються кількістю витків спіралі, за якою розташовані лопаті (рис. 2.6). Загальна кількість дослідів – 6. При цьому частота обертання лопатевого валу $n_{\text{л}} = 40 \text{ хв}^{-1}$, частота обертання контейнера $n_{\text{к}} = 15 \text{ хв}^{-1}$, частота обертання електродвигуна привода валу вібробуджувача $n_{\text{в}} = 600 \text{ хв}^{-1}$, амплітуда коливань контейнера $A_{\text{в}} = 5 \text{ мм}$.

Другий етап передбачав обґрунтування режимних параметрів роботи

лопатевого валу змішувача. В якості факторів дослідження обрано

- частоту обертання лопатевого валу n_d (20 хв^{-1} , 40 хв^{-1} , 60 хв^{-1});
- частоту обертання контейнера n_k (0 хв^{-1} , 15 хв^{-1} , 30 хв^{-1});
- частоту обертання електродвигуна привода валу віброзбуджувача n_b (200 хв^{-1} , 600 хв^{-1} , 1000 хв^{-1});
- амплітуду коливань контейнера A_b (0 мм; 5 мм; 10 мм).

Дослідження виконані за повнофакторним планом, при цьому загальна кількість дослідів – 81.

У результаті чисельного моделювання для кожного досліді необхідно отримати дві візуалізації розрахункових даних, а також два графіки: один для аналізу розподілу компонентів суміші у робочій області, а інший – для відстеження динаміки зміни коефіцієнта однорідності суміші.

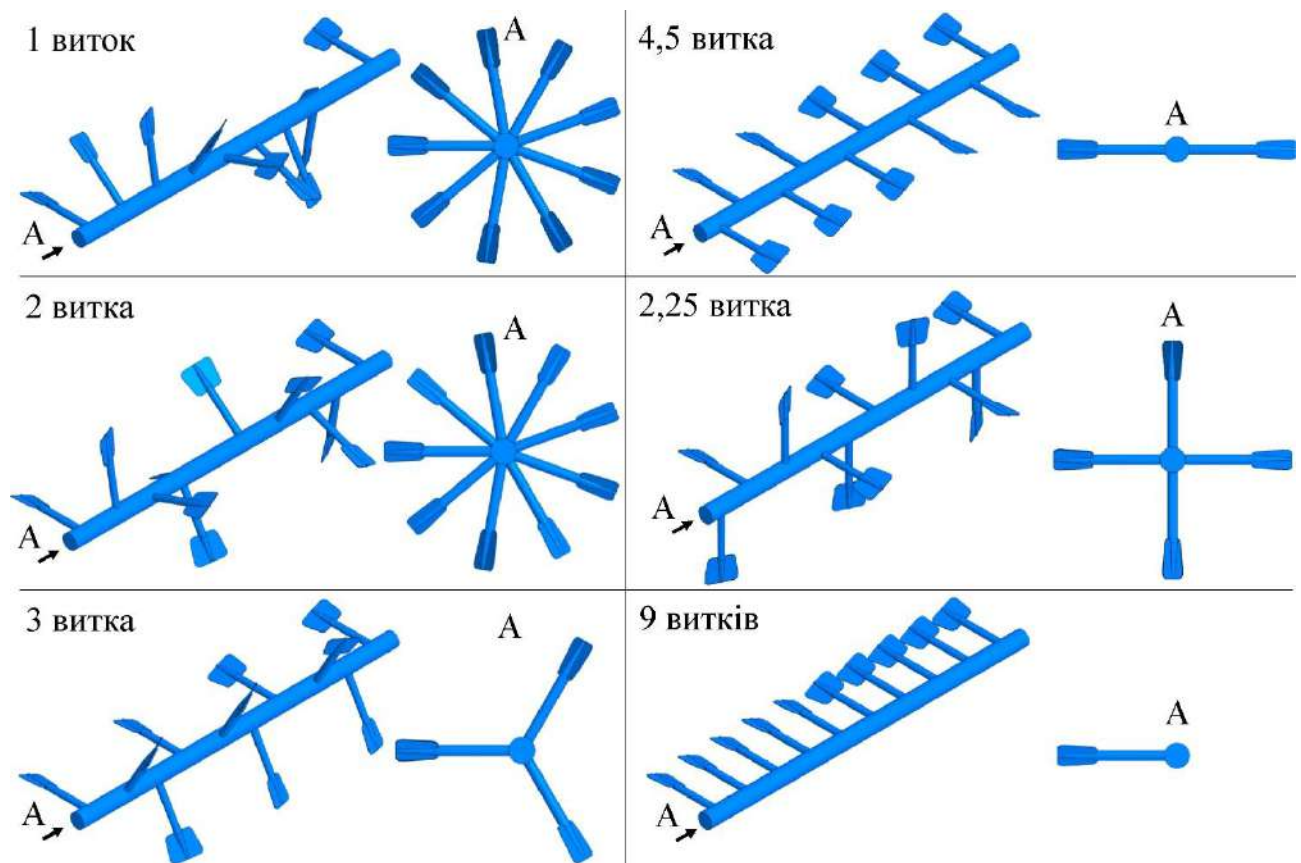


Рисунок 2.6 - Конструктивна схема лопатевого валу залежно від кількості витків спіралі, за якою розташовані лопаті

Перша візуалізація відображає розподіл швидкості частинок і має векторний формат. Вона формується на основі функції «Velocity» та виглядає відповідно до рис. 2.7 (а). Друга візуалізація ілюструє розподіл маси частинок компонентів у робочій області. Вона представлена у скалярному форматі, побудована за функцією «Particle Mass» і відповідає зображенню на рис. 2.7 (б).

Для оцінки рівномірності розподілу компонентів у робочій області змішувача використовується коефіцієнт однорідності. В області обрані пробні об'єми однакового розміру, які розташовані випадковим чином. Для кожного пробного об'єму визначається об'єм, маса або кількість частинок компонента I – V_1 , а також об'єм, маса або кількість частинок компонента II – V_2 . Коефіцієнт однорідності обчислюється за формулою [126]:

$$\delta = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{1i} - V_{2i}|}{V_{1i} + V_{2i}}, \quad (2.15)$$

де V_{1i} – значення параметра для компонента I у i-й пробі,

V_{2i} – значення параметра для компонента II у i-й пробі,

N – загальна кількість проб.

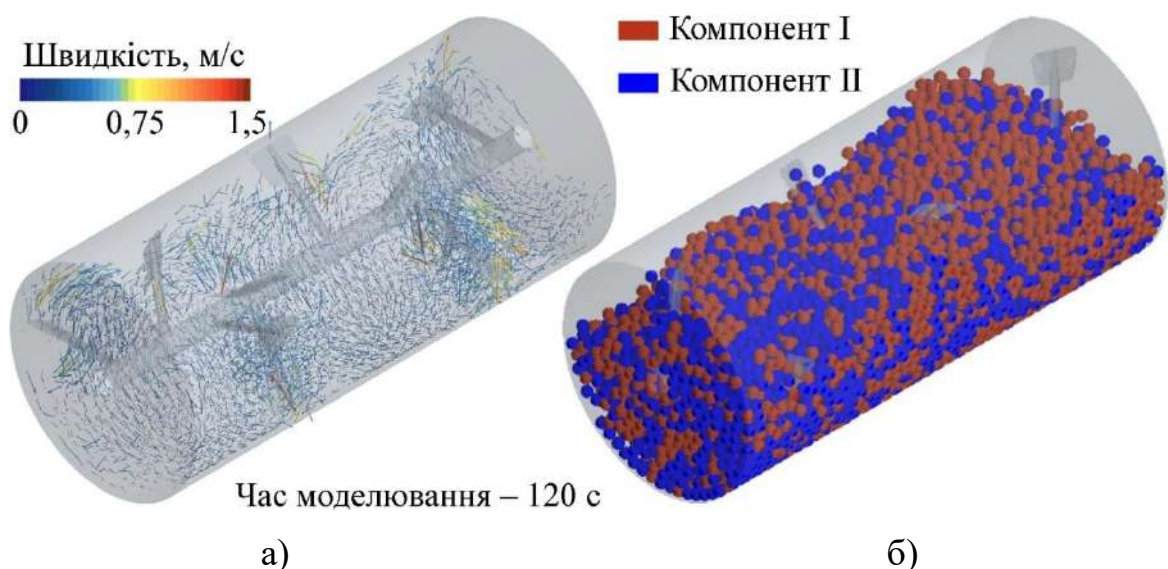


Рисунок 2.7 - Векторна (а) і скалярна візуалізація (б) відображення розподілу швидкостей і розташування компонентів у змішувачі відповідно

Для реалізації розрахунку створені 5 проб відбору, розмір яких: $0,05 \text{ м} \times 0,05 \text{ м} \times 0,05 \text{ м}$. Розташування проб вибиралось таким чином, щоб вони знаходилися у робочій області відповідно до рис. 2.5 (а).

З отриманого звіту даних з програми Simcenter Star-CCM+ по однорідності створено монітор і графік. Графік налаштований так, щоб відповідати вигляду рис. 2.8.

На рис. 2.8 відображена динаміка зміни коефіцієнта однорідності під час змішування. Згідно прийнятих зоотехнічних норм (розділ 1) коефіцієнт однорідності кормової суміш повинен знаходитись у межах від 0,90–0,95, що і відображено на графіку у вигляді червоної зони.

Для оцінки залежності зміни коефіцієнта однорідності, який має флуктуацію, проведена апроксимація даних у вигляді експоненційної залежності:

$$\delta(t) = \delta_{\max} (1 - e^{-kt}), \quad (2.16)$$

де $\delta_{\max}$ – максимально можливе значення коефіцієнта однорідності для даного змішувача;

k – показник зростання експоненти для даного змішувача, с^{-1} .

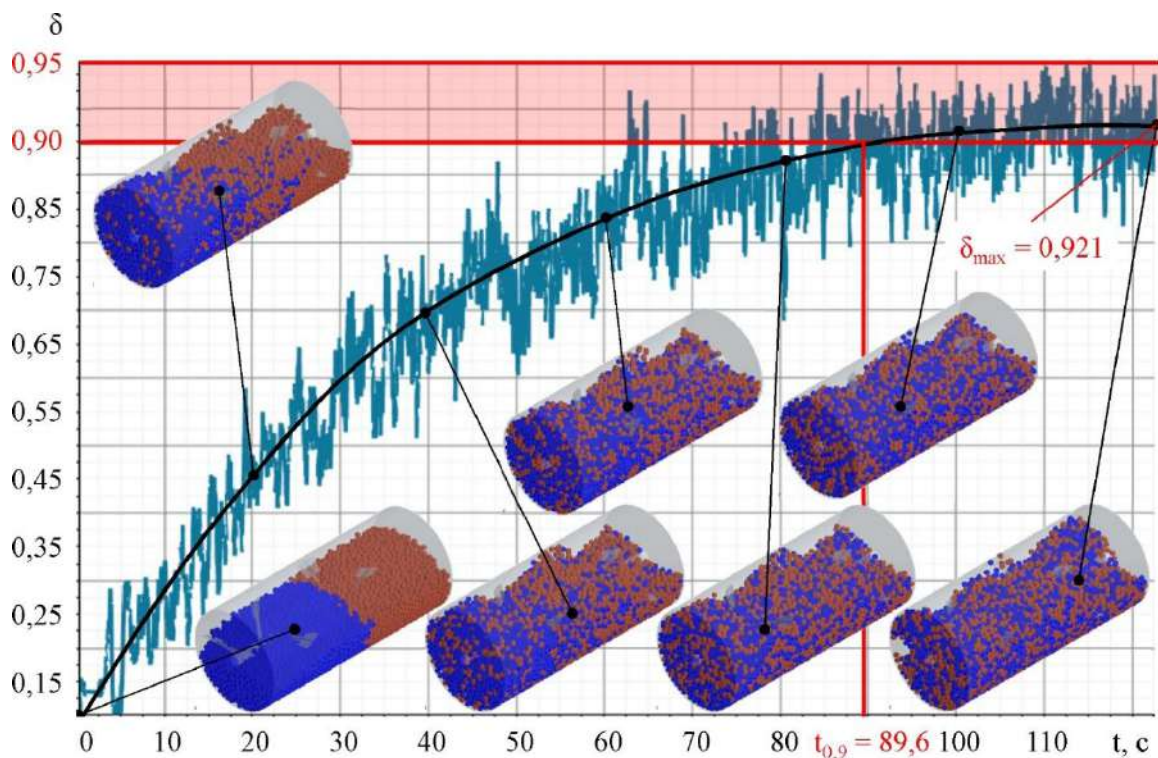


Рисунок 2.8 - Графік динаміки зміни коефіцієнта однорідності δ суміші в робочій області змішувача

Перетином функції (2.16) із прямою $\delta = 0,9$ визначається як час досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$. Враховуючи виразимо з рівняння (2.16) показник зростання k :

$$k = -\frac{1}{t_{0,9}} \ln \left(1 - \frac{0,9}{\delta_{\max}} \right). \quad (2.17)$$

Визначення показника зростання k дозволяє не лише виявити момент досягнення нормативної межі коефіцієнта однорідності, а й оцінити загальну тенденцію зміни цього показника в динаміці та прогнозувати однорідність суміші в будь-який момент часу.

Тому критеріями чисельного моделювання є час досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ і максимально можливе значення коефіцієнта однорідності $\delta_{\max}$.

Для візуалізації розподілу частинок у програмі Simcenter Star-CCM+ створена гістограма. Налаштування графіка відповідають зовнішньому вигляду рис. 2.9.

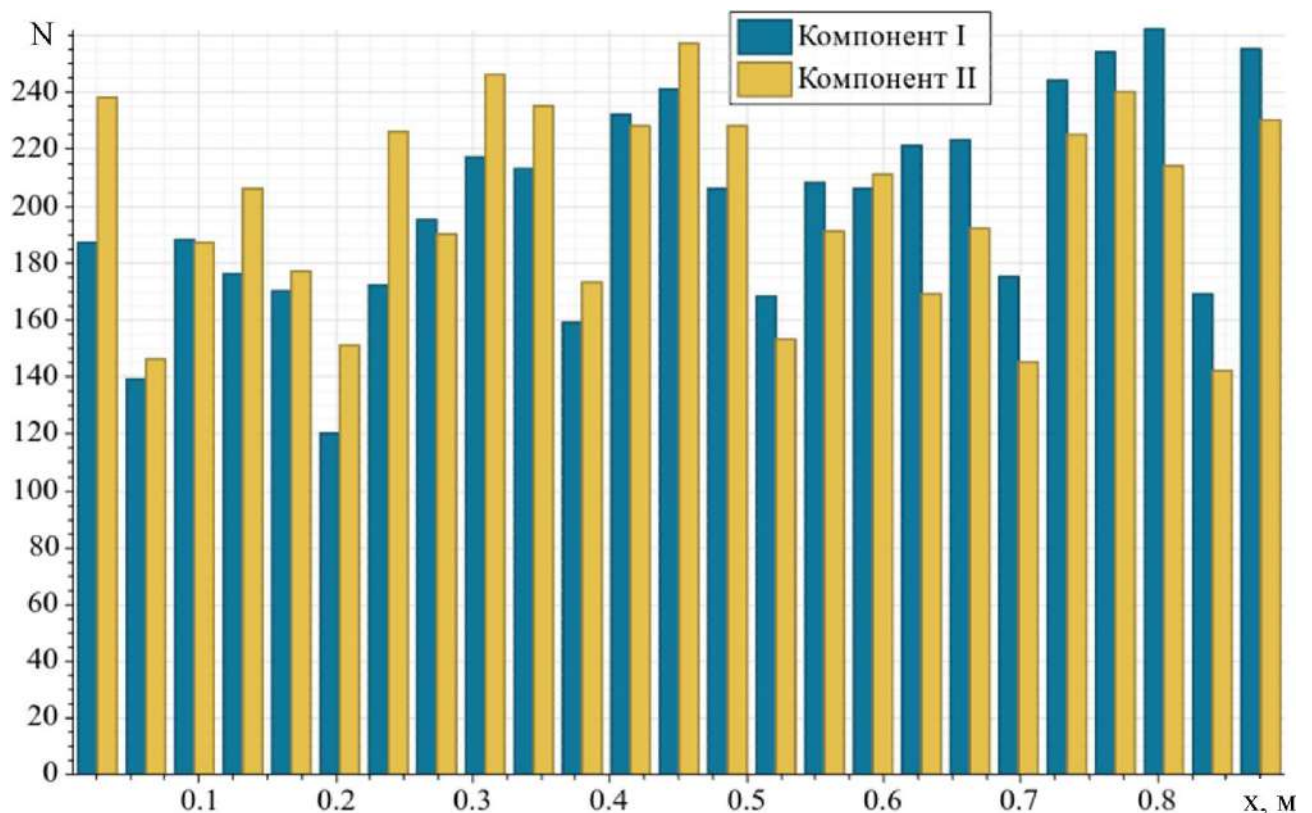


Рисунок 2.9 - Графік розподілу компонентів суміші в робочій області змішувача вздовж його осі обертання

Запропоновані методи візуалізації та обчислення дозволяють не лише оцінити загальну динаміку процесу змішування, а й проаналізувати розподіл швидкостей і масових часток компонентів, а також визначити рівень їх однорідності.

Методика обробки результатів чисельного моделювання шляхом побудови рівнянь регресії другого порядку по чотирьох факторах передбачала кілька основних етапів: отримання даних, розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії, оцінка їх значущості за критерієм Стюдента, перевірка адекватності побудованої моделі за критерієм Фішера, тобто порівнюється дисперсія відтворюваності експерименту з дисперсією адекватності моделі [127]. Завершальним етапом є аналіз отриманого рівняння, визначення оптимальних значень факторів і проведення верифікації моделі для підтвердження її точності. Дана обробка проводилась у програмі Wolfram Cloud [128].

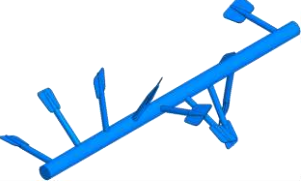
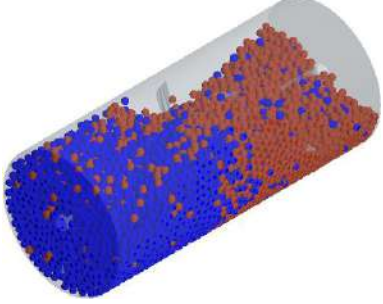
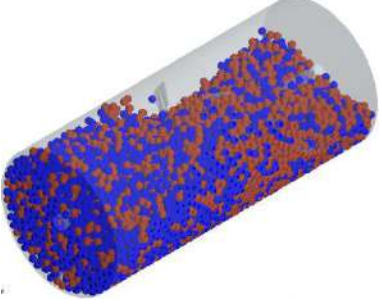
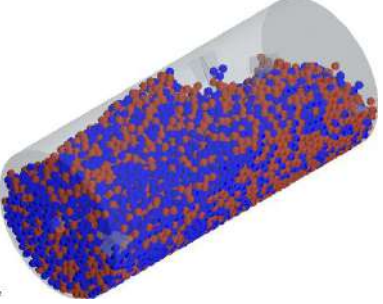
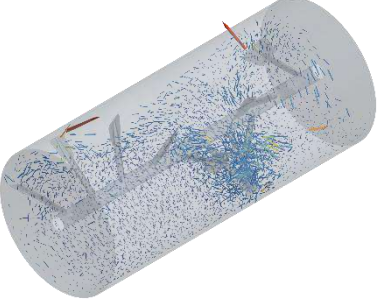
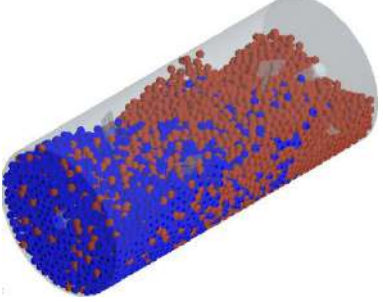
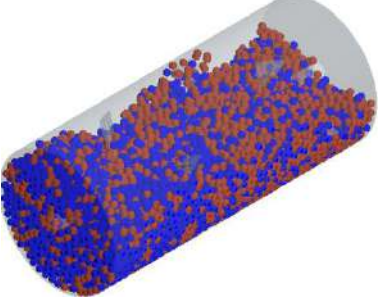
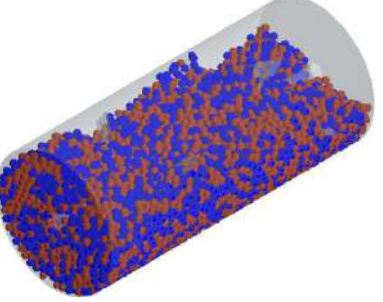
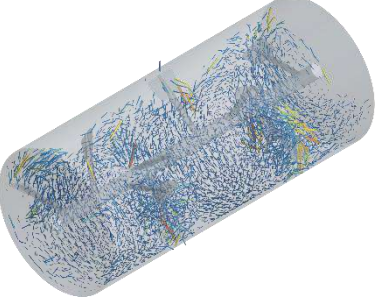
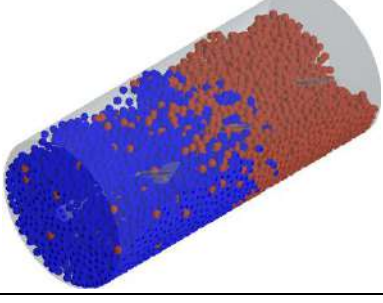
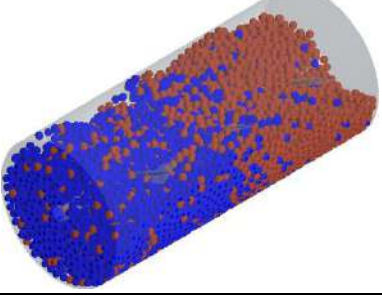
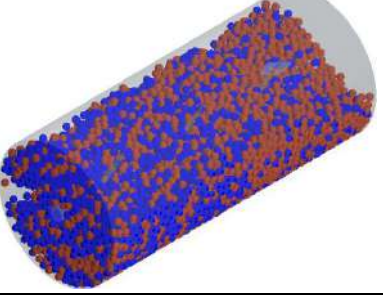
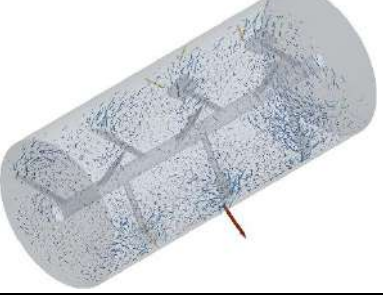
2.4 Результати чисельного моделювання процесу роботи вібраційного змішувача

У результаті першого етапу чисельного моделювання отримано скалярні й векторні візуалізації відображення розподілу швидкостей і розташування компонентів у змішувачі відповідно, які представлено в таблиці 2.1.

На рис. 2.10 наведено графіки динаміки зміни коефіцієнта однорідності δ суміші в змішувачі із різними робочими органами у відповідності до рис. 2.6.

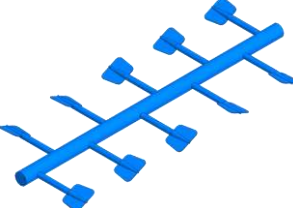
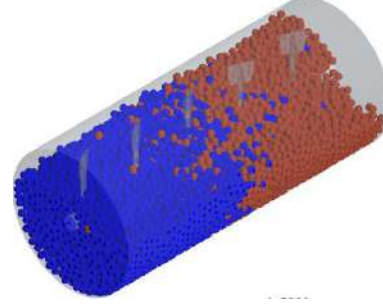
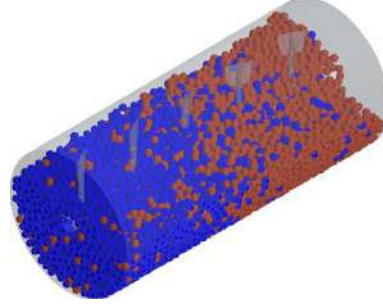
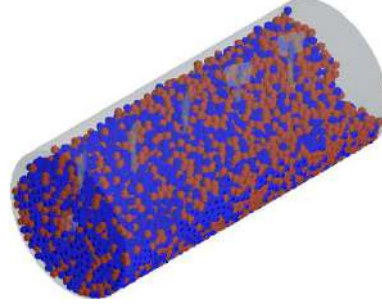
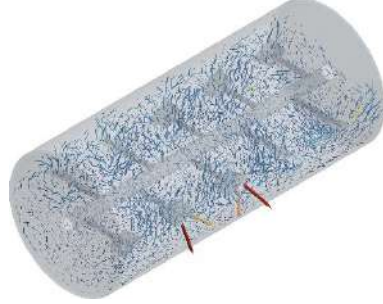
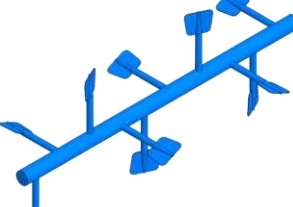
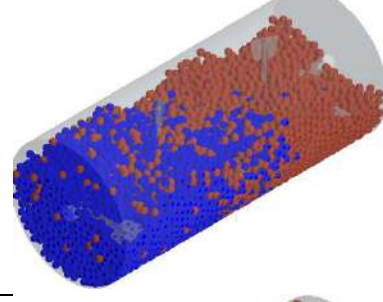
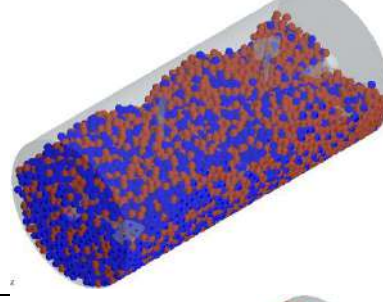
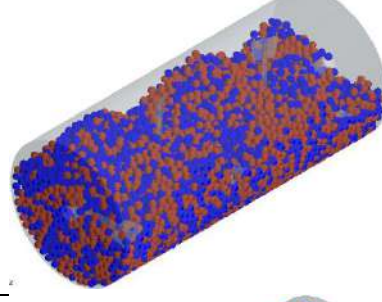
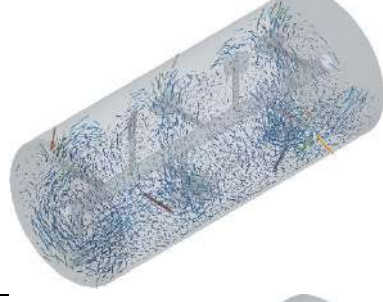
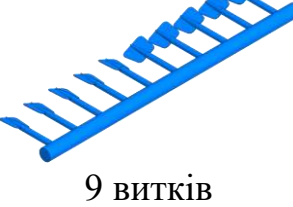
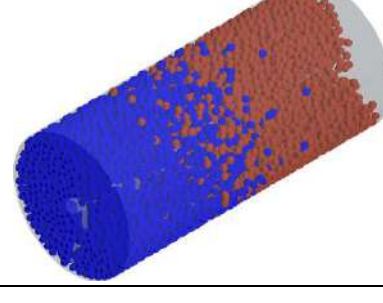
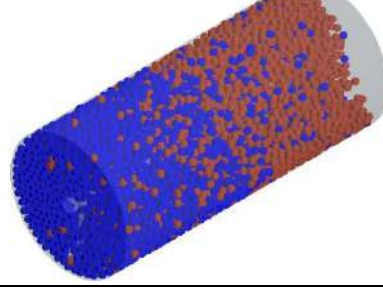
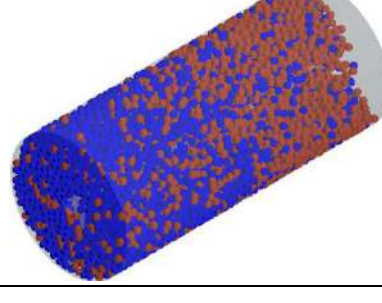
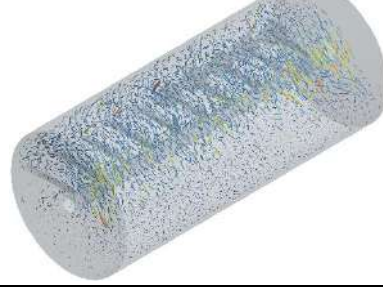
Аналіз наведених графіків дозволяє простежити характер зміни однорідності в часі залежно від геометрії лопатевого валу. У більшості варіантів чітко простежується експоненціальний характер зростання коефіцієнта однорідності на початкових етапах змішування, що підтверджується відповідними значеннями показника зростання k . Найбільш стрімке підвищення δ спостерігається для конструкцій з 2 та 2,25 витками, що свідчить про ефективне перемішування за рахунок оптимального поєднання аксіального й тангенціального перенесення маси.

Таблиця 2.1 – Скалярні й векторні візуалізації відображення розподілу швидкостей і розташування компонентів у змішувачі з різними робочими органами

Робочий орган	t = 20 с	t = 60 с	t = 120 с	Швидкість
 1 виток				
 2 витка				
 3 витка				

Продовження таблиці 2.1

Скалярні й векторні візуалізації відображення розподілу швидкостей і розташування компонентів у змішувачі з різними робочими органами

Робочий орган	t = 20 с	t = 60 с	t = 120 с	Швидкість
 4,5 витка				
 2,25 витка				
 9 витків				

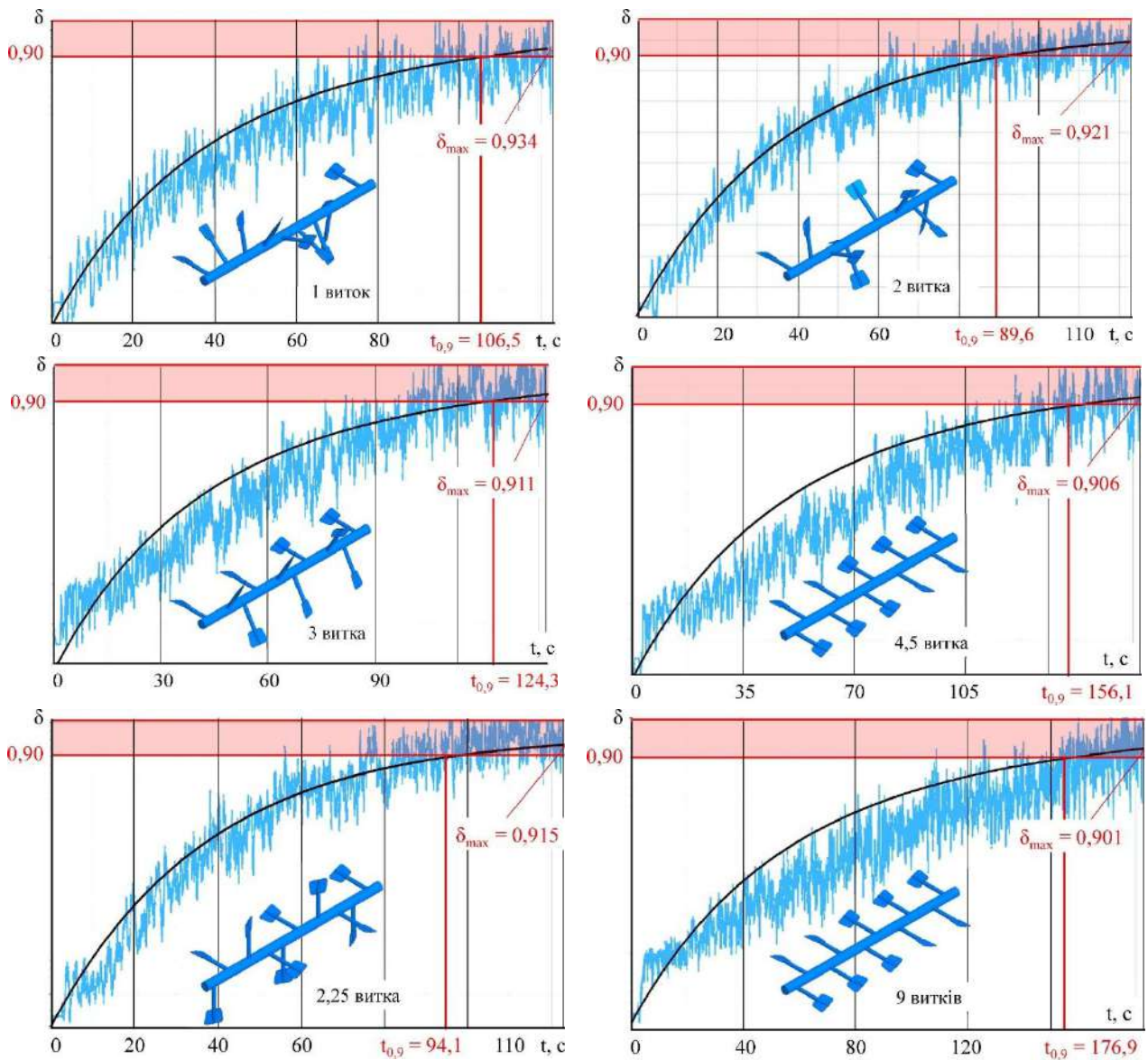


Рисунок 2.10 - Графік динаміки зміни коефіцієнта однорідності δ суміші змішувачів із різними робочими органами

Проте при збільшенні кількості витків до 4,5 та 9 динаміка однорідності суттєво сповільнюється, що обумовлено надлишковою кривизною траєкторій переміщення частинок і утворенням застійних зон.

На підставі візуалізації потоку також встановлено, що при меншій кількості витків (1-2,25) у камері спостерігається більш рівномірний розподіл швидкостей по всьому об'єму робочої зони, тоді як при великій кількості витків (4,5-9) зони інтенсивного змішування локалізуються переважно поблизу осі валу, а в периферійних зонах виникає нерівномірність потоків, що негативно

позначається на загальній ефективності. Такий розподіл зумовлює неоднорідність концентраційного поля й пояснює зменшення максимального значення коефіцієнта однорідності.

Отже, чисельні експерименти підтверджують, що ефективність змішування залежить не лише від геометрії робочого органу, а й від характеру формування структури потоку, яка визначає кінетику процесу вирівнювання концентрації суміші в об'ємі змішувача.

Під час першого етапу чисельного моделювання було досліджено вплив конструкції лопатевого валу на ефективність процесу змішування. Зведені дані представлено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Зведені дані чисельного моделювання процесу змішування для різних конструкцій робочих органів

Лопатевий вал	$\delta_{\max}$	$t_{0,9}$, с	k , с^{-1}
1 виток	0,934	106,5	0,0311
2 витки	0,921	89,6	0,0422
3 витки	0,911	124,3	0,0355
4,5 витки	0,906	156,1	0,0321
2,25 витки	0,915	94,1	0,0437
9 витків	0,901	176,9	0,0385

Результати показали, що найбільше значення коефіцієнта однорідності $\delta_{\max} = 0,934$ спостерігається при одному витку спіралі, що свідчить про найкращу якість змішування серед усіх варіантів. Проте при цьому час досягнення заданої однорідності складає 106,5 с, а коефіцієнт зростання $k = 0,0311$, що є найменшим серед усіх досліджуваних варіантів. Це свідчить про повільний, але стабільний характер процесу змішування.

Конструкція з 2 витками показала кращу динаміку змішування – час досягнення $t_{0,9} = 89,6$ с, а $k = 0,0422$, що значно вище, ніж у випадку з одним витком. Дещо гірші, але подібні результати спостерігаються у варіанті з 2,25 витків: час – 94,1 с, а $k = 0,0437$, що є максимальним серед усіх варіантів. Це вказує на найінтенсивніше зростання рівня однорідності на початкових етапах

процесу. Значення $\delta_{\max}$ при цьому становить 0,915, що є компромісом між максимальною якістю й швидкістю змішування.

Подальше збільшення кількості витків до 3, 4, 5 та 9 призводить до поступового зниження ефективності: зменшуються як $\delta_{\max}$, так і k , а час досягнення 0,9 однорідності значно збільшується – до 176,9 с у варіанті з 9 витками. Це свідчить про те, що така геометрія лопатевого валу уповільнює перемішування і не забезпечує достатньої якості однорідності.

Отже, найефективнішою з погляду швидкості та інтенсивності змішування, є конструкція з 2 витками. Вона забезпечує найшвидше досягнення однорідності з найвищим темпом її зростання, при прийнятному рівні максимального коефіцієнта однорідності. Тому подальші дослідження будуть проведені саме з такою конструкцією лопатевого валу.

У якості основного критерію чисельного експерименту обрано час досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$. Такий вибір зумовлений тим, що розроблений змішувач при достатньо тривалій роботі гарантовано забезпечує однорідність суміші δ у межах 0,9-0,95. З метою зменшення енерговитрат на процес змішування та підвищення продуктивності час досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ повинен бути мінімальним. Крім того, саме час досягнення однорідності 90% є технічно доцільною характеристикою, що дозволяє порівнювати ефективність різних режимів роботи змішувача. Він враховує не лише кінцевий результат, але й динаміку процесу, що особливо важливо для оптимізації промислового обладнання в умовах обмеженого часу циклу змішування. Таким чином, вибір $t_{0,9}$ як основного критерію є обґрунтованим з точки зору як енергетичної ефективності, так і технологічної доцільності.

Результати моделювання зведено в таблицю додатка Г. З використанням програми Wolfram Cloud проведено розрахунок квадратичних рівнянь регресії у закодованому вигляді для часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$:

$$\begin{aligned} t_{0,9} = & 87,363 - 7,23519 x_1 + 8,50926 x_1^2 - 6,27963 x_2 + 3,425 x_1 x_2 + \\ & + 4,17593 x_2^2 + 2,63519 x_3 - 0,927778 x_1 x_3 + 1,375 x_2 x_3 + \\ & + 3,16481 x_3^2 - 9,49259 x_4 - 1,40833 x_1 x_4 + 0,905556 x_2 x_4 - \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$- 1,96944 x_3 x_4 + 7,87037 x_4^2,$$

де x_1 – заковане значення частоти обертання лопатевого валу n_L ;

x_2 – заковане значення частоти обертання контейнера n_K ;

x_3 – заковане значення частоти коливання вібробудувача n_B ;

x_4 – заковане значення амплітуди коливань контейнера A_B .

Обробка даних на основі регресійного аналізу дозволяє отримати таблицю 2.3 значимості коефіцієнтів регресії рівняння (2.18).

Таблиця 2.3

Статистичний аналіз коефіцієнтів регресії рівняння (2.18)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стюдента	Асимптотична значимість
a_{00}	87,363	1,87787	46,5224	$3,51216 \cdot 10^{-52}$
a_{10}	- 7,23519	0,766636	- 9,43757	$7,31215 \cdot 10^{-14}$
a_{20}	- 6,27963	0,766636	- 8,19115	$1,2045 \cdot 10^{-11}$
a_{30}	2,63519	0,766636	3,43734	0,0010215
a_{40}	- 9,49259	0,766636	- 12,3821	$7,16309 \cdot 10^{-19}$
a_{12}	3,425	0,938934	3,64776	0,000523084
a_{13}	- 0,927778	0,938934	- 0,988119	0,326703
a_{14}	- 1,40833	0,938934	- 1,49993	0,138402
a_{23}	1,375	0,938934	1,46443	0,147824
a_{24}	0,905556	0,938934	0,964451	0,33834
a_{34}	- 1,96944	0,938934	- 2,09753	0,0397801
a_{11}	8,50926	1,32785	6,40829	$1,80013 \cdot 10^{-8}$
a_{22}	4,17593	1,32785	3,14487	0,0024912
a_{33}	3,16481	1,32785	2,38341	0,0200389
a_{44}	7,87037	1,32785	5,92714	$1,23766 \cdot 10^{-7}$

Для оцінювання адекватності отриманого рівняння регресії та перевірки статистичної значущості впливу досліджуваних факторів було проведено дисперсійний аналіз (ANOVA). Згідно з результатами розрахунків, сума квадратів відхилень, зумовлених регресійною моделлю, становить 876149,0 при числі ступенів свободи 15. Сума квадратів залишкової помилки дорівнює 2094,67 при 66 ступенях свободи. Середній квадрат від моделі дорівнює 58409,9, а середній квадрат залишкової помилки — 31,7375. На основі цих даних було

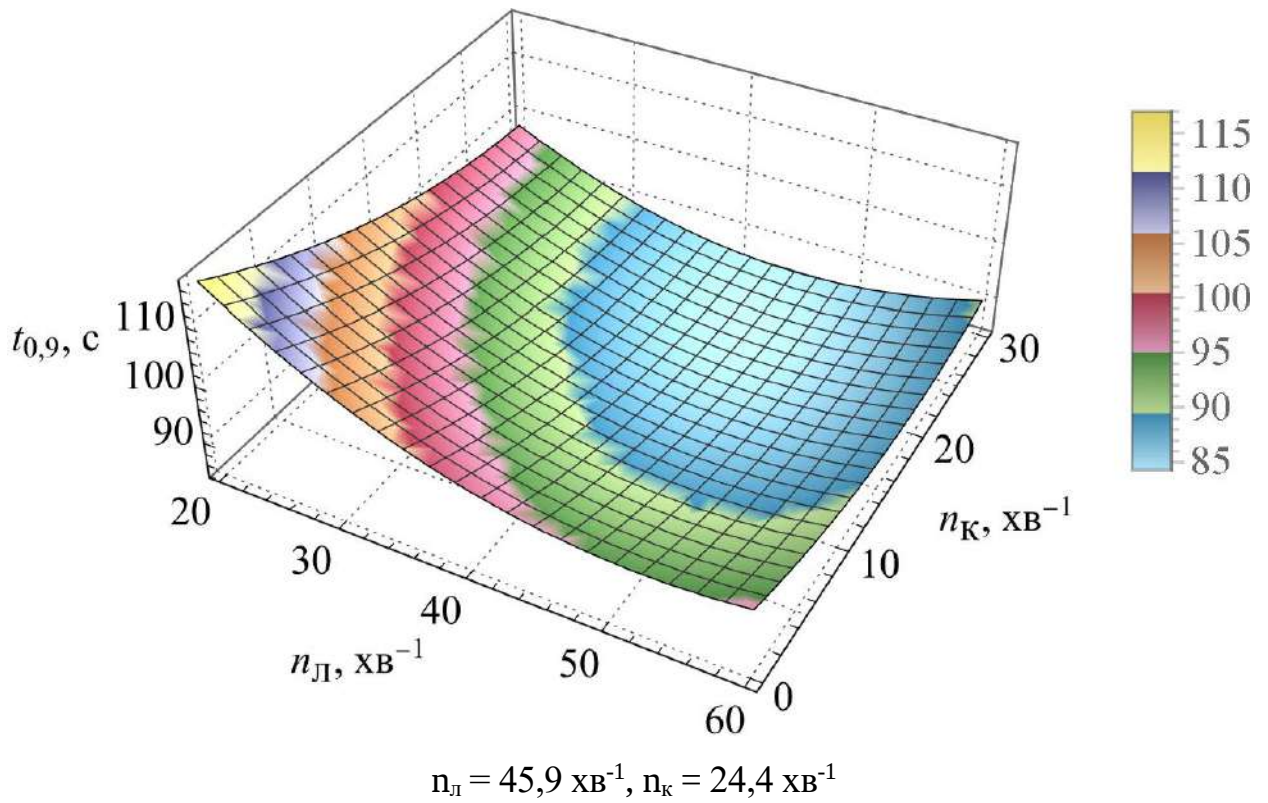
розраховано критерій Фішера, який становить: $F \approx 1839,74$. Критичне значення критерію Фішера для відповідного рівня значущості $\alpha = 0,05$, чисел ступенів свободи моделі (15) і залишкової помилки (66), становить 1,93. Оскільки розраховане значення F значно перевищує табличне, можна зробити висновок про статистичну значущість побудованої регресійної моделі. Це свідчить про те, що включені до моделі фактори мають суттєвий вплив на досліджувану вихідну величину, а сама модель адекватно описує експериментальні дані.

Відкидаючи незначущі коефіцієнти регресії рівняння (2.18) на основі порівняння їхніх модулів із табличним значенням критерію Стюдента $t_{\text{табл}} = 2,01$, отримуємо уточнену залежність часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від досліджуваних факторів. Побудовану модель подано у вигляді спрощеного рівняння на рис. 2.11, яке враховує лише статистично значущі коефіцієнти:

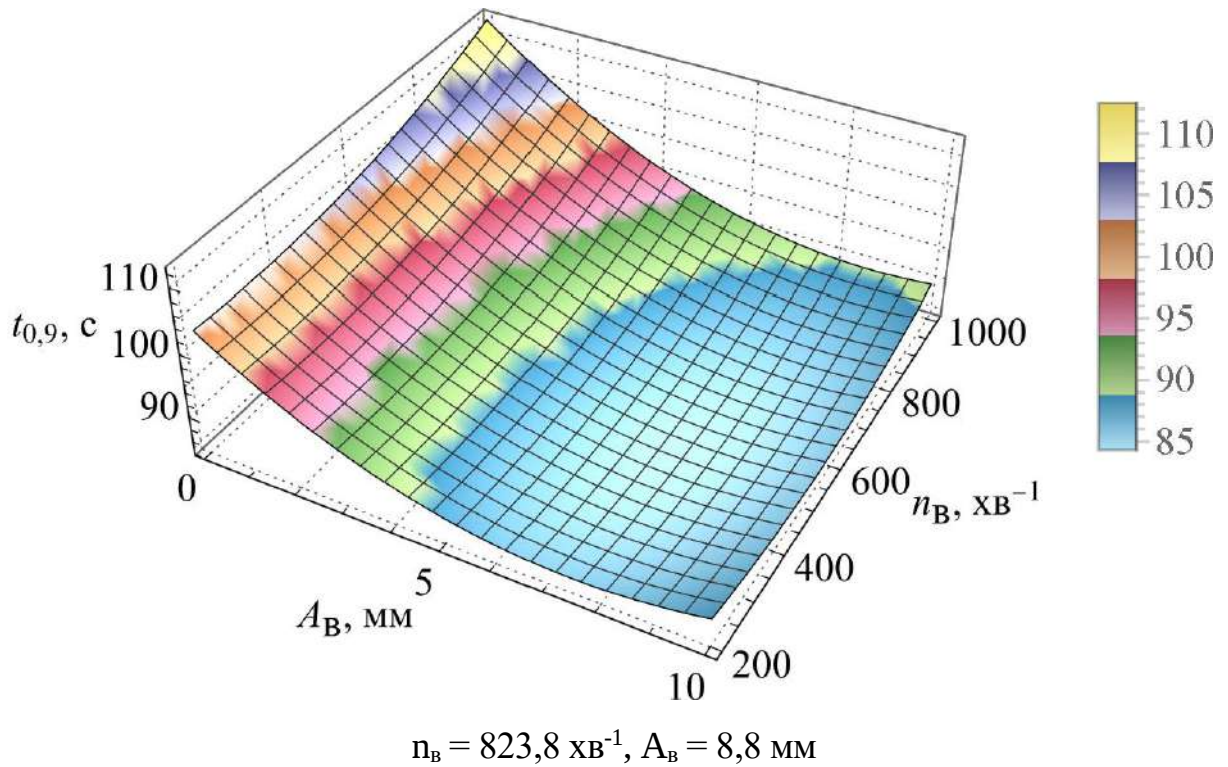
$$\begin{aligned} t_{0,9} = & 170,753 - 4,4558 A_B + 0,314815 A_B^2 - 1,4321 n_K + 0,018559 n_K^2 - \\ & - 2,23486 n_L + 0,0114167 n_K n_L + 0,021273 n_L^2 - 0,012225 n_B - \\ & - 0,00098472 A_B n_B + 0,00001978 n_B^2. \end{aligned} \quad (2.19)$$

З аналізу цього рівняння випливає фізичне пояснення впливу кожного з факторів на час змішування. Частота обертання лопатевого валу має найвиразніший вплив: її збільшення призводить до зменшення $t_{0,9}$, тобто прискорює процес змішування завдяки інтенсивнішому переміщенню частинок. Проте квадратичний доданок свідчить про наявність оптимуму: надмірне зростання частоти може викликати ефекти аерації чи утворення мертвих зон, що знижує ефективність.

Частота обертання контейнера також сприяє зменшенню часу змішування за рахунок покращення циркуляції матеріалу в об'ємі. Водночас надмірне обертання може викликати центрифугування частинок до стінок і зниження ефективного перемішування, що відображається позитивним коефіцієнтом при квадратичному члені. Взаємодія між частотою обертання контейнера й валу показує, що одночасне збільшення обох може навіть знижувати ефективність змішування через зменшення відносного зсуву між частинками.



а)



б)

Рисунок 2.11 - Залежність часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу n_L , частоти обертання контейнера n_K (а), частоти коливання вібробудувача n_B , амплітуди коливань контейнера A_B (б)

Вплив вібрацій платформи проявляється через частоту й амплітуду коливань. Збільшення амплітуди істотно знижує $t_{0,9}$, оскільки викликає активне пересипання шарів суміші. Проте надто великі амплітуди можуть порушувати рівномірність руху, що пояснює наявність квадратичного доданку. Частота вібрацій також позитивно впливає на змішування, але лише до певного рівня, після чого ефективність зменшується через втрату контакту між частинками або надто швидке коливання, яке не встигає впливати на переміщення матеріалу. Перехресний доданок між амплітудою й частотою коливань указує на те, що за умови їх одночасного підвищення ефект може бути сильнішим, ніж при дії кожного окремо.

Як характеристику вібраційного поля розглядаємо коефіцієнт режиму вібрації або коефіцієнт динамічності [129], який обчислюється за наступною формулою:

$$k_b = \frac{A_b \omega_b^2}{1000g} = \frac{A_b}{1000g} \left(\frac{2\pi n_b}{60} \right)^2, \quad (2.20)$$

де A_b – амплітуда коливань контейнера, мм;

n_b – частота коливання вібробуджувача, хв^{-1} ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Тому, зменшуючи кількість факторів із чотирьох до трьох із використанням програми Wolfram Cloud проведено розрахунок квадратичних рівнянь регресії в закодованому вигляді для часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$:

$$t_{0,9} = 85,3509 - 7,66542 x_1 + 8,50926 x_1^2 - 5,32757 x_2 + 3,425 x_1 x_2 + \\ + 4,17593 x_2^2 - 4,02061 x_5 - 0,806698 x_1 x_5 + 1,78511 x_2 x_5 + 10,3933 x_5^2, \quad (2.21)$$

де x_1 – закодоване значення частоти обертання лопатевого валу n_l ;

x_2 – закодоване значення частоти обертання контейнера n_k ;

x_5 – закодоване значення коефіцієнта режиму вібрації k_b .

Обробка даних на основі регресійного аналізу дозволяє отримати таблицю 2.3 значимості коефіцієнтів регресії рівняння (2.21).

Статистичний аналіз коефіцієнтів регресії рівняння (2.21)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Асимптотична значимість
a_{00}	85,3509	3,06432	27,8531	$5,98066 \cdot 10^{-40}$
a_{10}	- 7,66542	1,69864	- 4,51268	0,0000247792
a_{20}	- 5,32757	1,69864	- 3,13637	0,00248922
a_{50}	- 4,02061	1,72742	- 2,32753	0,0227926
a_{12}	3,425	1,59906	2,14188	0,0356346
a_{15}	- 0,806698	2,03739	- 0,395946	0,693332
a_{25}	1,78511	2,03739	0,876176	0,383889
a_{11}	8,50926	2,26141	3,76281	0,000342715
a_{22}	4,17593	2,26141	1,8466	0,0689728
a_{55}	10,3933	2,81574	3,69115	0,000434539

Відкидаючи незначущі коефіцієнти регресії рівняння (2.21) на основі порівняння їхніх модулів із табличним значенням критерію Стьюдента $t_{\text{табл}} = 2,01$, отримуємо уточнену залежність часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від досліджуваних факторів. Побудовану модель подано у вигляді спрощеного рівняння на рис. 2.12, яке враховує лише статистично значущі коефіцієнти:

$$t_{0,9} = 165,486 - 4,42987 k_b + 0,33142 k_b^2 - 1,36863 n_k + 0,0185597 n_k^2 - 2,25637 n_d + 0,0114167 n_k n_d + 0,0212731 n_d^2. \quad (2.22)$$

Для перевірки адекватності рівняння регресії використовують F-критерій Фішера, який порівнює дисперсію, обумовлену регресією (модель), з дисперсією залишків (помилка). Середньоквадратичне відхилення моделі становить 87170,8, а середньоквадратичне відхилення помилки – 92,0518. Отримуємо значення критерію Фішера $F_{\text{розр}} = 947,14$.

Для оцінки адекватності моделі розраховане значення порівнюють із табличним значенням критерію Фішера при рівні значущості $\alpha = 0,05$ та відповідних степенях свободи: для чисельника 10, для знаменника 71. Відповідно до статистичних таблиць, табличне значення становить $F_{\text{табл}}(0,05; 10; 71) = 2,03$.

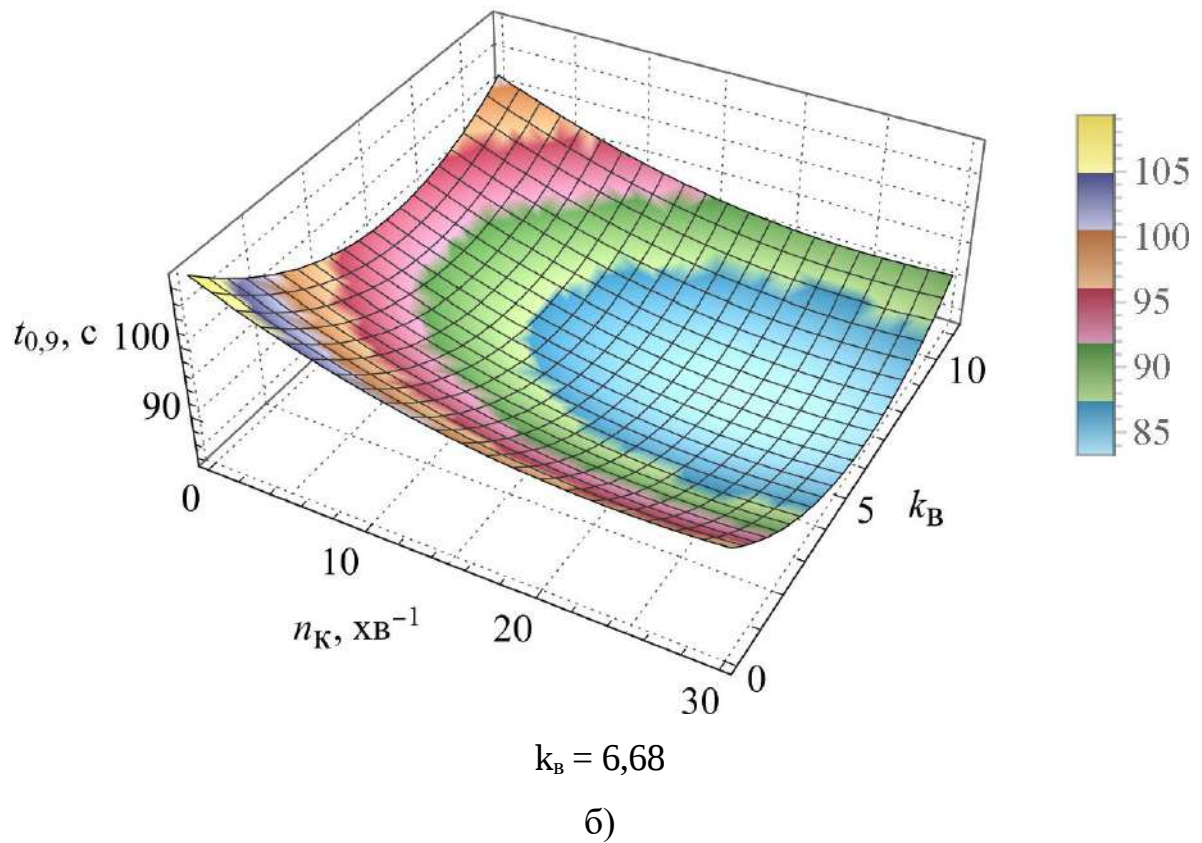
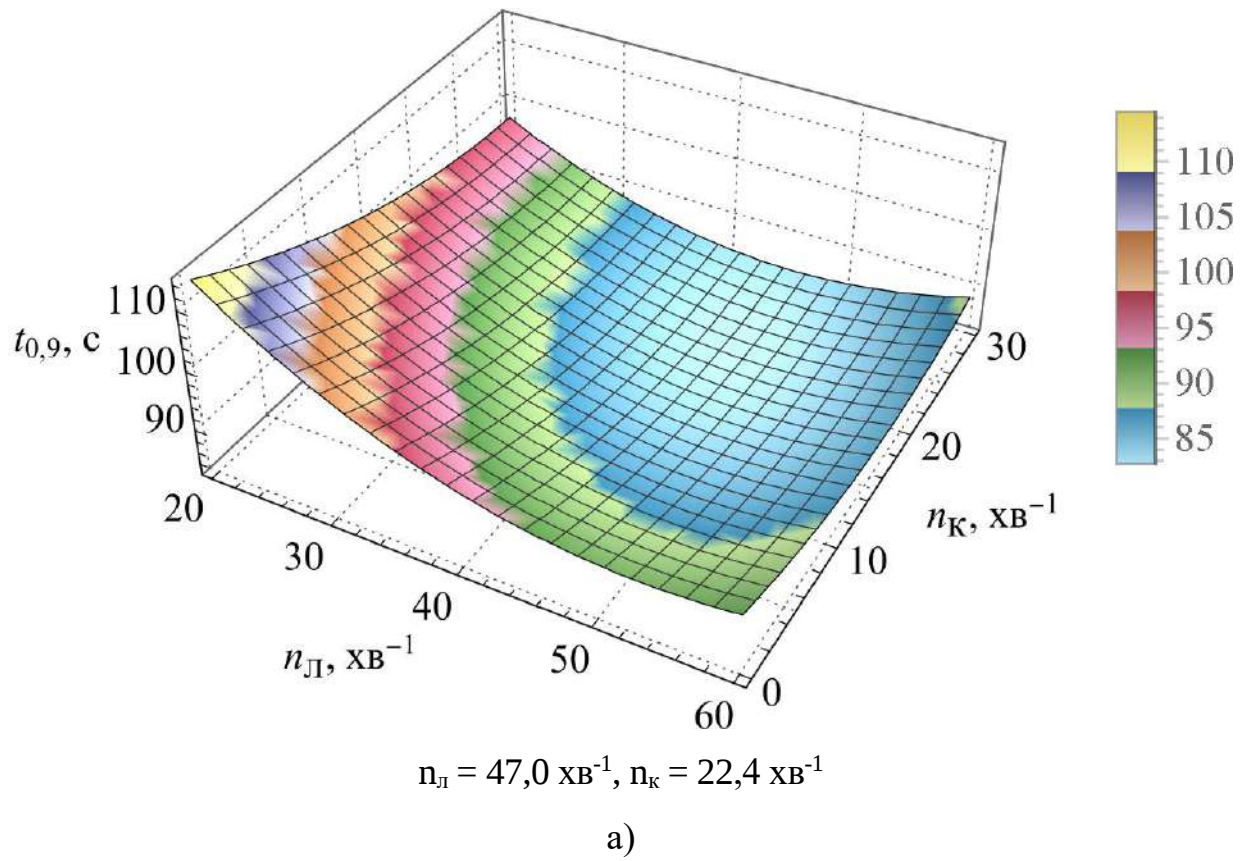


Рисунок 2.12 - Залежність часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу $n_{ш}$, частоти обертання контейнера $n_{к}$ (а), коефіцієнта режиму вібрації $k_{в}$, частоти обертання контейнера $n_{к}$ (б)

Оскільки розраховане значення $F_{\text{розр}} = 947,14$ значно перевищує табличне, можна зробити висновок, що рівняння регресії є адекватним експериментальним даним на рівні значущості 0,05.

Отже, найменшого значення часу досягнення однорідності можна досягти при раціональному поєднанні всіх чотирьох (трьох) факторів: $n_d = 45,9 \text{ хв}^{-1}$, $n_k = 24,4 \text{ хв}^{-1}$, $n_b = 823,8 \text{ хв}^{-1}$, $A_b = 8,8 \text{ мм}$ (або $k_b = 6,68$). При цьому значення часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9} = 81,2 \text{ с}$.

2.5 Динамічна модель вібраційного змішувача з лопатевим валом. Визначення енергії системи.

Модель динаміки руху вібраційного змішувача з лопатевим валом показана на рис. 2.13. Робочий орган змішувача – контейнер 4 встановлений на рамі 2 через пружні опори 1. Коливний рух контейнера у вертикальній площині забезпечує дебалансний віброзбуджувач 3.

Головною метою побудови, розв’язання та подальшого аналізу диференціальних рівнянь є встановлення рівнянь руху окремих точок механічної системи у вибраній системі незалежних координат, а також отримання необхідної інформації для керування крутним моментом на лопатевому валу і визначення ключових параметрів, що використовуються в інженерних розрахунках, включно з оптимізацією його конструктивних характеристик та режимів роботи [130, 131, 132].

При складанні рівнянь робимо такі припущення:

- робочий контейнер є жорстким, твердим, недеформівним тілом;
- кутова швидкість обертання дебаланса стала;
- зважаючи на масу завантаження, її вплив у моделі відображається через застосування коефіцієнта приєднаної маси k_d .

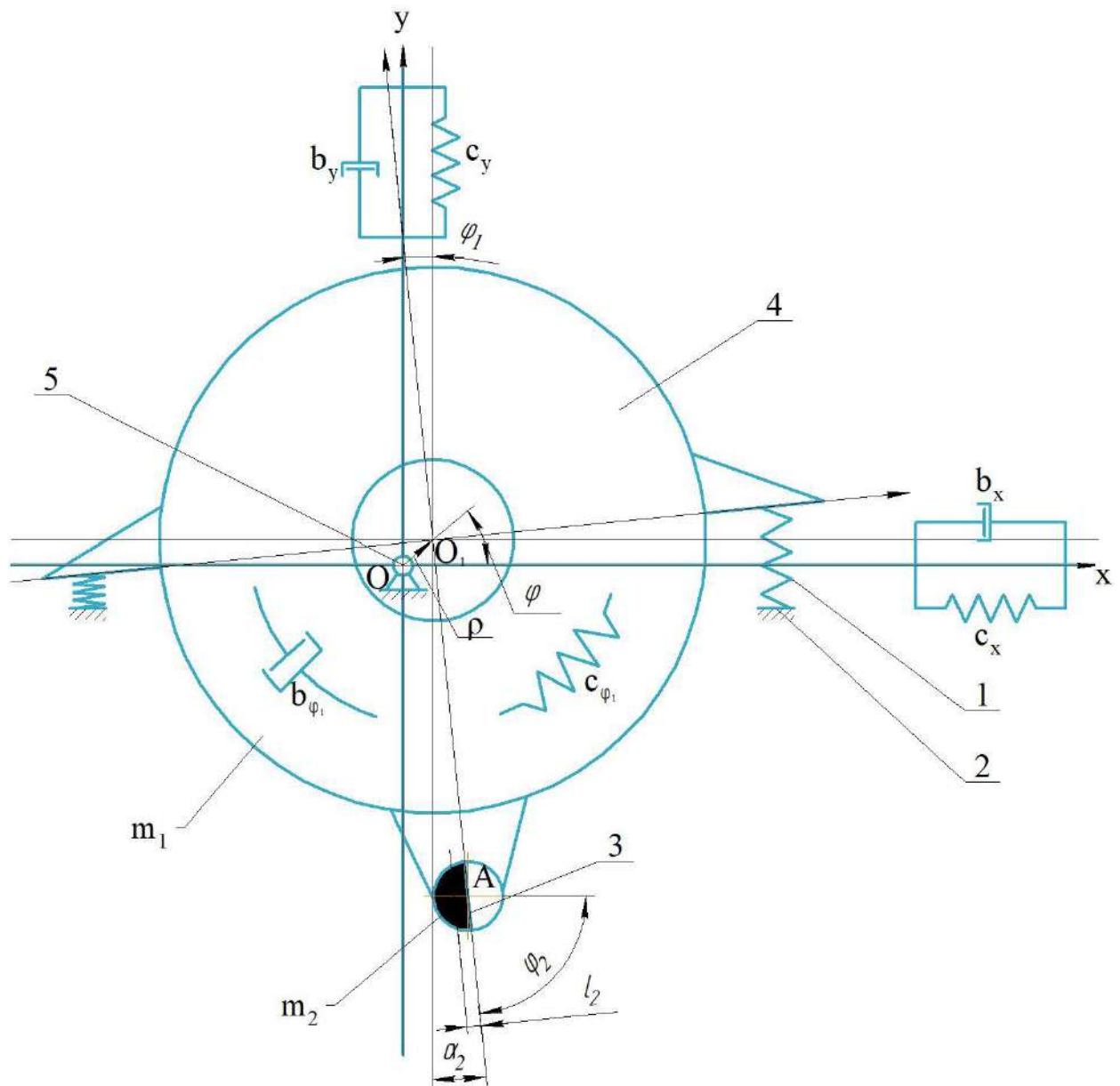


Рисунок 2.13 - Розрахункова схема вібраційного змішувача з лопатевим валом: 1 – пружні опори; 2 – рама; 3 – дебалансний вібробудувач; 4 – контейнер; 5 – лопатевий вал

Рівняння розв'язуємо за умови, що $\omega_{\text{BK}} \ll \omega_3$, оскільки віброзмішувач працює в зарезонансному режимі.

Уведемо такі позначення:

– ρ, φ – полярні координати, які характеризують положення центра мас контейнера відносно нерухомої системи координат Oxy , м, рад відповідно;

- φ_1 – кутове зміщення контейнера відносно осі Ox , рад;
- m_1 – загальна маса контейнера із завантаженими компонентами суміші:

$$m_1 = m_k + m_c \quad (2.23)$$

- m_k – маса контейнера, кг;
- m_c – маса компонентів суміші, кг;
- I_1 – момент інерції контейнера із завантаженням компонентами суміші відносно його центра мас, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

- φ_2 – кут повороту дебаланса відносно контейнера, рад;
- m_2 – маса дебаланса, кг;
- I_2 – момент інерції дебаланса відносно його центра мас, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;
- α_2 – кут, який задає положення дебалансного віброзбуджувача щодо контейнера, рад;

- $C_{x1}, C_{y1}, C_{\varphi1}$ – коефіцієнти пружного опору поступального й обертового руху контейнера, кг/с ;

- $b_{x1}, b_{y1}, b_{\varphi1}$ – коефіцієнти в'язкого (демпфувального) опору для поступального та кутового руху в середовищі, кг/с^2 ;

- $O_1A = l_1$ – відстань між віссю обертання лопатевого валу та віссю обертання дебаланса, м;

- l_2 – ексцентриситет дебаланса, м;

- $\omega_{\text{вк}}$ – власна частота коливань контейнера, с^{-1} .

Побудову диференціальних рівнянь руху розпочнемо з визначення кінетичної енергії контейнера. Оскільки його рух відбувається в площині, він характеризується як плоский. Центр мас контейнера – точка O_1 , координати якої в системі Oxy задаються в полярному вигляді: (ρ, φ) . Нерухома точка O знаходиться на осі обертання лопатевого валу, що відіграє роль базової точки відліку. Кут φ_1 описує орієнтацію контейнера відносно осі Ox . Усі кутові

координати відраховуються від горизонтальної прямої, паралельної осі Ox , у додатному напрямі – проти ходу годинникової стрілки.

Кінетична енергія контейнера включає поступальну складову, пов'язану з рухом центра мас, а також обертальну складову – відносно власного центра мас. Ці енергетичні характеристики є основою для подальшого застосування лагранжевого формалізму при виведенні рівнянь руху механічної системи.

Кінетична енергія контейнера визначається за формулою [133]:

$$T_1 = \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{I_1 \omega_1^2}{2}, \quad (2.24)$$

де m_1 – маса контейнера із завантаженням, кг;

I_1 – момент інерції контейнера із завантаженням відносно осі, яка проходить через точку O_1 і перпендикулярна до площини рисунка, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Швидкість центра мас контейнера:

$$V_1^2 = \dot{\rho}^2 + (\rho \dot{\phi})^2, \quad (2.25)$$

Кутова швидкість контейнера $\omega_1 = \dot{\phi}_1$.

Отже, кінетична енергія контейнера дорівнює [134]:

$$T_1 = \frac{m_1(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\phi}^2)}{2} + \frac{I_1 \dot{\phi}_1^2}{2}. \quad (2.26)$$

Далі визначимо кінетичну енергію дебаланса. Дебаланс O_2 здійснює плоский рух. Його кінетична енергія [134]:

$$T_2 = \frac{m_2 V_C^2}{2} + \frac{I_2 (\dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_1)^2}{2}, \quad (2.27)$$

де m_2 – маса дебаланса, кг;

I_2 – момент інерції дебаланса відносно осі, яка проходить через центр мас дебаланса паралельно до осі обертання дебаланса, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

V_C – швидкість центра мас дебаланса і $V_C = V_{O_2}$.

Абсолютну швидкість точки O_2 центра мас дебаланса визначаємо за допомогою схеми, наведеної на рис. 2.14.

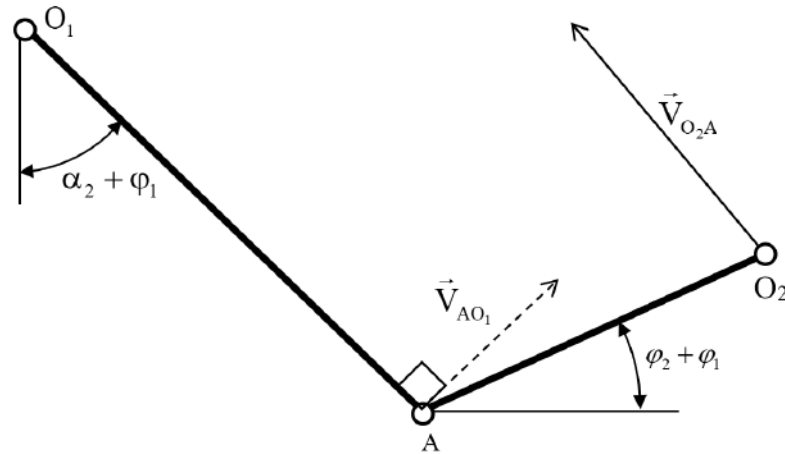


Рисунок 2.14 - Схема для розрахунку кінетичної енергії дебаланса

Проекції швидкості точки O_2 на осі координат:

$$V_{O_2X} = \dot{\rho} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) - (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_1) l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.28)$$

$$V_{O_2Y} = \dot{\rho} \sin \varphi + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi + \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} V_{O_2}^2 &= \dot{\rho}^2 \cos^2 \varphi + \rho^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \varphi + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 \cos^2(\alpha_2 + \varphi_1) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 l_2^2 \sin^2(\varphi_1 + \varphi_2) - \\ &- 2\dot{\rho} \cos \varphi \cdot \rho \dot{\varphi} \sin \varphi + 2\dot{\rho} \cos \varphi \dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) - 2\dot{\rho} \cos \varphi (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \\ &- 2\rho \dot{\varphi} \sin \varphi \dot{\varphi}_1 l_1 \cdot \cos(\alpha_2 + \varphi_1) + 2\rho \dot{\varphi} \sin \varphi (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - \\ &- 2\dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ &+ \dot{\rho}^2 \sin^2 \varphi + \rho^2 \dot{\varphi}^2 \cos^2 \varphi + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 \sin^2(\alpha_2 + \varphi_1) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 l_2^2 \cos^2(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ &+ 2\dot{\rho} \sin \varphi \rho \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi + 2\dot{\rho} \sin \varphi \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + 2\dot{\rho} \sin \varphi (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho \dot{\varphi} \cos \varphi \dot{\varphi}_1 l_1 \cdot \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + 2\rho \dot{\varphi} \cos \varphi (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ &+ 2\dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) = \\ &= \dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 l_2^2 + 2\dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ &+ 2\dot{\rho} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - 2\rho \dot{\varphi} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ &+ 2\rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + 2\dot{\varphi}_1 l_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2). \end{aligned} \quad (2.30)$$

Отже, кінетична енергія дебаланса дорівнює:

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{m_2}{2} [\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 l_2^2 + 2\dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ &+ 2\dot{\rho} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - 2\rho \dot{\varphi} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ &+ 2\rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\ &+ 2\dot{\varphi}_1 l_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2)] + \frac{I_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Кінетична енергія механічної системи включає кінетичні енергії:

контейнера із завантаженням; дебалансів; і визначається за формулою:

$$T = T_1 + T_2. \text{ або} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} T = & \frac{m_1(\dot{\rho}^2 + \rho^2\dot{\varphi}^2)}{2} + \frac{I_1\dot{\varphi}_1^2}{2} + \frac{m_2}{2}[\dot{\rho}^2 + \rho^2\dot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}_1^2 l_1^2 + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 l_2^2 + \\ & + 2\dot{\rho}\dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + 2\dot{\rho}(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\ & - 2\rho\dot{\varphi}\dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + 2\rho\dot{\varphi}(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + 2\dot{\varphi}_1(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2)] + \frac{I_2(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2}{2}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Для вирішення поставлених задач застосовуємо рівняння Лагранжа II-го роду, яке в загальному вигляді записується таким чином [135, 136]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_{q_i}, \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2.34)$$

Для механічної системи, що розглядається, визначаємо узагальнені координати:

– ρ, φ – координати переміщень центра мас контейнера відносно осей Ox і Oy відповідно, кг, рад;

– φ_1 – кутове переміщення контейнера, рад;

– φ_2 – кутове переміщення дебаланса, рад;

Запишемо ліві частини рівняння Лагранжа:

$$\frac{\partial T}{\partial \rho} = 0; \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0. \quad (2.36)$$

Шукаємо часткові похідні:

$$\frac{\partial T}{\partial \rho} = m_1 \rho \dot{\varphi}^2 + \quad (2.37)$$

$$+ m_2 [\rho \dot{\varphi}^2 - \dot{\varphi} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\varphi}(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = m_1 \dot{\rho} + m_2 [\dot{\rho} + \dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)], \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \rho} &= (m_1 + m_2) \ddot{\rho} + m_2 [\ddot{\phi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \\
&- \dot{\phi}_1 (\dot{\phi} - \dot{\phi}_1) l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
&+ (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) (\dot{\phi} - \dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)] - m_1 \rho \dot{\phi}^2 - \\
&- m_2 [\rho \dot{\phi}^2 - \dot{\phi} \dot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\phi} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_3 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)] = \\
&= (m_1 + m_2) \ddot{\rho} - (m_1 + m_2) \rho \dot{\phi}^2 + m_2 [\ddot{\phi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\
&+ \dot{\phi}_1^2 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\
&- (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.39}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \rho} &= (m_1 + m_2) \ddot{\rho} - (m_1 + m_2) \rho \dot{\phi}^2 + \\
&+ m_2 [\ddot{\phi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
&+ \dot{\phi}_1^2 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.40}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \varphi} &= m_2 [-\dot{\rho} \dot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\rho} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
&+ \rho \dot{\phi} \dot{\phi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \rho \dot{\phi} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} &= m_1 \rho^2 \dot{\phi} + \\
&+ m_2 [\rho^2 \dot{\phi} - \rho \dot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) + \rho (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.42}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= (m_1 + m_2) \rho^2 \ddot{\phi} + (m_1 + m_2) 2 \rho \dot{\rho} \dot{\phi} + \\
&+ m_2 [-\dot{\rho} \dot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) - \rho \ddot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) - \\
&- \rho \dot{\phi}_1 (\dot{\phi} - \dot{\phi}_2) l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) + \dot{\rho} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
&+ \rho (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\
&- \rho (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) (\dot{\phi} - \dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)] - \\
&- m_2 [-\dot{\rho} \dot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\rho} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\
&- \rho \dot{\phi} \dot{\phi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \rho \dot{\phi} (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.43}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= (m_1 + m_2) \rho^2 \ddot{\phi} + 2(m_1 + m_2) \rho \dot{\rho} \dot{\phi} + \\
&+ m_2 [-\rho \ddot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) + \rho (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
&+ \rho \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) + \\
&+ \rho (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)].
\end{aligned} \tag{2.44}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = & I_1 \dot{\varphi}_1 + I_2 \dot{\varphi}_1 + m_2 [\dot{\varphi}_1 l_1^2 + (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2^2 + \dot{\rho} l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\
& + \dot{\rho} l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \rho \dot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + (2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2)] \cdot
\end{aligned} \tag{2.45}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = & I_1 \ddot{\varphi}_1 + I_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + m_2 [\ddot{\varphi}_1 l_1^2 + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_2^2 + \\
& + \ddot{\rho} l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \dot{\rho} (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_1) l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\
& + \ddot{\rho} l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\rho} (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\
& - \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \rho \ddot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \\
& - \rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_1) l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \rho \ddot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + (2\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_2 l_1 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) - (2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 l_1 \dot{\varphi}_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)] - \\
& - m_2 [\dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \dot{\rho} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cdot \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \rho \dot{\varphi} \dot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\
& + \rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.46}$$

Підставляючи в (2.34) вирази (2.37)–(2.46) отримуємо

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = & I_1 \ddot{\varphi}_1 + I_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + m_2 [\ddot{\varphi}_1 l_1^2 + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_2^2 + \\
& + \ddot{\rho} l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \ddot{\rho} l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \ddot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\
& + \rho \ddot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + (2\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) - \\
& - \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \\
& - \rho \dot{\varphi}^2 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \dot{\rho} \dot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \dot{\varphi}^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) \\
& - (2\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \dot{\varphi}_2 l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.47}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = & m_2 [-\dot{\rho} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\
& - \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.48}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = & I_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) + m_2 [(\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2^2 + \dot{\rho} l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \rho \dot{\varphi}_1 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_1 l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2)],
\end{aligned} \tag{2.49}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = & I_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + m_2 [(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_2^2 + \ddot{\rho} l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \dot{\rho} (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\rho} \dot{\varphi} l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \rho \ddot{\varphi} l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) l_2 \cdot \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \ddot{\varphi}_1 l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) - \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)] - \\
& - m_2 [-\dot{\rho} (\dot{\varphi}_2 + \dot{\varphi}_2) l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \rho \dot{\varphi} (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\
& - \dot{\varphi}_1 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)].
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Звідки отримуємо

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = & I_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) + m_2 [(\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_2^2 + \ddot{\rho} l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \rho \ddot{\varphi} l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \ddot{\varphi}_1 l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) + \dot{\rho} \dot{\varphi} l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\
& + \dot{\rho} \dot{\varphi} l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \dot{\varphi}^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_1^2 l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)].
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Для даної механічної системи узагальнюючі сили дорівнюють:

$$\delta A_p = -(P_1 + P_2) \delta \rho \sin \varphi - c_y (\rho \sin \varphi - \delta_{CT}) \delta \rho \sin \varphi - c_x \rho \cos \varphi \delta \rho \cos \varphi, \tag{2.52}$$

$$Q_p = -(P_1 + P_2) + c_y \delta_{CT} \sin \varphi - c_y \rho \sin^2 \varphi - c_x \rho \cos^2 \varphi - F_{onY} \sin \varphi - F_{onX} \cos \varphi. \tag{2.53}$$

Припустимо, що початок координат, точка О, вибрана в точці статичної рівноваги, отримаємо:

$$\begin{aligned}
Q_p = & -(c_y \sin^2 \varphi + c_x \cos^2 \varphi) \rho - b_y (\dot{\rho} \sin \varphi + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi) \sin \varphi - \\
& - b_x (\dot{\rho} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi} \sin \varphi) \cos \varphi,
\end{aligned} \tag{2.54}$$

$$\begin{aligned}
Q_p = & -(c_y \sin^2 \varphi + c_x \cos^2 \varphi) \rho - (b_x \cos^2 \varphi + b_y \sin^2 \varphi) \dot{\rho} + \\
& + (b_x - b_y) \rho \dot{\varphi} \sin \varphi \cos \varphi.
\end{aligned} \tag{2.55}$$

Зазначимо сили, що діють на механічну систему:

- $\vec{P}_1, \vec{P}_2$ – сили ваги тіл механічної системи, Н;
- $F_{npY} = c_y (\rho \sin \varphi - \delta_{CT})$ – сила пружності опор кріплення контейнера, Н;
- $F_{npX} = c_x \rho \cos \varphi$ – сила пружності бокових опор кріплення контейнера, Н;
- $F_{onY} = b_y (\dot{\rho} \sin \varphi + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi)$ – опір, пропорційний швидкості вздовж Оу, Н;
- $F_{onX} = b_x (\dot{\rho} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi} \sin \varphi)$ – опір, пропорційний швидкості вздовж Ох, Н.

$$Q_p = -(c_y \sin^2 \varphi + c_x \cos^2 \varphi) \rho - (b_x \cos^2 \varphi + b_y \sin^2 \varphi) \dot{\rho} + (b_x - b_y) \rho \dot{\varphi} \sin \varphi \cos \varphi, \quad (2.56)$$

$$\delta A = -(P_1 + P_2) \rho \delta \varphi \cos \varphi - c_y (\rho \sin \varphi - \delta_{CT}) \rho \delta \varphi \cos \varphi + c_x \rho \cos \varphi \rho \delta \varphi \sin \varphi - b_y (\dot{\rho} \sin \varphi + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi) \rho \delta \varphi \cos \varphi - b_x (\dot{\rho} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi} \sin \varphi) \rho \delta \varphi \sin \varphi, \quad (2.57)$$

$$Q_\varphi = (c_x - c_y) \rho^2 \sin \varphi \cos \varphi - (b_x + b_y) \dot{\rho} + (b_x \sin^2 \varphi - b_y \cos^2 \varphi) \rho \dot{\varphi}. \quad (2.58)$$

$$Q_\varphi = (c_x - c_y) \rho^2 \sin \varphi \cos \varphi - (b_x + b_y) \dot{\rho} \rho \sin \varphi \cos \varphi + (b_x \sin^2 \varphi - b_y \cos^2 \varphi) \rho^2 \dot{\varphi}. \quad (2.59)$$

$$\delta A = -c_{\varphi_1} (\varphi_1 - \varphi_{CT}) \delta \varphi_1 - b_{\varphi_1} \dot{\varphi}_1 - P_2 (l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)) \delta \varphi_1. \quad (2.60)$$

$$Q_{\varphi_1} = c_{\varphi_1} \varphi_{CT} - P_2 (l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)). \quad (2.61)$$

$$M_{\text{оплоп}} = b_{2\text{лоп}} \dot{\varphi}_2. \quad (2.62)$$

$$\delta A = -P_2 l_2 \cos(\alpha_2 + \varphi_2) \delta \varphi_2 + F_{BL} \sin(\Theta - \alpha_2 - \varphi_2) h_2 \delta \varphi_2 - b_{2\text{лоп}} \dot{\varphi}_2 \delta \varphi_2. \quad (2.63)$$

$$Q_{\varphi_2} = -P_2 l_2 \cos(\alpha_2 + \varphi_2) + F_{BL} \sin(\Theta - \alpha_2 - \varphi_2) h_2 - b_{2\text{лоп}} \dot{\varphi}_2. \quad (2.64)$$

$M_{\text{ем}}$ – обертальний момент дебаланса, кг; $M_{\text{он}}$ – гальмуючий момент дебаланса.

$$Q_{\varphi_2} = M_{\text{ем}} - M_{\text{он}} - P_2 l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.65)$$

$$M_{\text{ем}} = \frac{2M_{\text{кр}} (\omega_0 - \omega_{\text{кр}})(\omega_0 - \omega)}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\omega_0 - \omega_{\text{кр}})^2}, \quad M_{\text{кр}} = \text{const}, \quad (2.66)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість обертання магнітного поля, с^{-1} ;

$\omega_{\text{кр}}$ – критичне значення кутової швидкості обертання магнітного поля, с^{-1} ;

ω – поточна кутова швидкість, с^{-1} .

$$M_{\text{он}} = fN\mathbf{r} \quad (2.67)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання;

N – нормальна реакція, Н;

$\mathbf{r}$ – радіус валу в точці А, м.

Визначаємо прискорення центра мас дебаланса. Координати центра мас дебаланса O_2 :

$$x_2 = \rho \cos \varphi + l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.68)$$

$$y_2 = \rho \sin \varphi - l_1 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (2.69)$$

Проекції швидкості центра мас:

$$\dot{x}_2 = \dot{\rho} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi} \sin \varphi + l_1 \dot{\varphi}_1 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) - l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \sin(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.70)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{\rho} \sin \varphi + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi + l_1 \dot{\varphi}_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.71)$$

$$\ddot{x}_2 = \ddot{\rho} \cos \varphi - 2\dot{\rho} \dot{\varphi} \sin \varphi - \rho \ddot{\varphi} \sin \varphi - \rho \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + l_1 \ddot{\varphi}_1 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) - \\ - l_1 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) - l_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \quad (2.72)$$

$$\ddot{y}_2 = \ddot{\rho} \sin \varphi + 2\dot{\rho} \dot{\varphi} \cos \varphi + \rho \ddot{\varphi} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi}^2 \sin \varphi + l_1 \ddot{\varphi}_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + \\ + l_1 \dot{\varphi}_1^2 \cos(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (2.73)$$

Проектуємо на вісь AO_2 $a_n = \ddot{x}_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \ddot{y}_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$

$$a_n = \ddot{\rho} \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - 2\dot{\rho} \dot{\varphi} \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho \ddot{\varphi} \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\ - \rho \dot{\varphi}^2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + l_1 \ddot{\varphi}_1 \cos(\alpha_2 - \varphi_2) - l_1 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) - \\ - l_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (2.74)$$

Сила інерції дорівнює

$$\Phi_n = m_2 a_n. \quad (2.75)$$

Нормальна реакція дорівнює $N = \Phi$, але направлена в протилежний бік:

$$N = m_2 (-\ddot{\rho} \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + 2\dot{\rho} \dot{\varphi} \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \rho \ddot{\varphi} \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\ + \rho \dot{\varphi}^2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - l_1 \ddot{\varphi}_1 \cos(\alpha_2 - \varphi_2) + l_1 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) + l_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ + l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)). \quad (2.76)$$

$$M_{on} = \text{fr} m_2 ((\rho \dot{\varphi}^2 - \ddot{\rho}) \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + (2\dot{\rho} \dot{\varphi} + \rho \ddot{\varphi}) \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \\ - l_1 \ddot{\varphi}_1 \cos(\alpha_2 - \varphi_2) + l_1 \dot{\varphi}_1^2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) + l_2 (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ + l_2 (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)). \quad (2.77)$$

На основі отриманих співвідношень рівняння Лагранжа II-го роду (2.51) матимуть вигляд:

$$I \left\{ \begin{aligned} & (m_1 + m_2) \ddot{\rho} - (m_1 + m_2) \rho \dot{\varphi}^2 + m_2 [\ddot{\varphi}_1 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ & + (\ddot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_2) l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\varphi}_1^2 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \\ & - (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)^2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)] = \\ & = -(c_y \sin^2 \varphi + c_x \cos^2 \varphi) \rho - (b_x \cos^2 \varphi + b_y \sin^2 \varphi) \dot{\rho} + \\ & + (b_x - b_y) \rho \dot{\varphi} \sin \varphi \cos \varphi, \end{aligned} \right. \quad (2.78)$$

$$\text{II} \left\{ \begin{aligned} & (m_1 + m_2)\rho\ddot{\phi} + 2(m_1 + m_2)\dot{\rho}\dot{\phi} + m_2[-\ddot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) + \\ & + (\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2)l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \dot{\phi}_1 \dot{\phi}_2 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_2) + \\ & + (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2)] = \\ & = (c_x - c_y)\rho \sin \varphi \cos \varphi - (b_x + b_y)\dot{\rho} \sin \varphi \cos \varphi + \\ & + (b_x \sin^2 \varphi - b_y \cos^2 \varphi)\rho\dot{\phi}, \end{aligned} \right. \quad (2.79)$$

$$\text{III} \left\{ \begin{aligned} & (I_1 + I_2 + m_2 l_1^2)\ddot{\phi}_1 + I_2 \ddot{\phi}_2 + m_2[(\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2)l_2^2 + \ddot{\rho}l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ & + \ddot{\rho}l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho\ddot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \rho\ddot{\phi}_2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + (2\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) - 2\dot{\rho}\dot{\phi}_1 l_1 \sin(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) + \\ & + 2\dot{\rho}\dot{\phi}_2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho\dot{\phi}_1^2 l_1 \cos(\varphi - \alpha_2 - \varphi_1) - \\ & - \rho\dot{\phi}_2^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - (2\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)\dot{\phi}_2 l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)] = \\ & = -c_{\varphi_1} \varphi_1 - b_{\varphi_1} \dot{\varphi}_1 + c_{\varphi_1} \varphi_{CT} - P_2(l_1 \sin(\alpha_2 + \varphi_1) + l_2 \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2)), \end{aligned} \right. \quad (2.80)$$

$$\text{IV} \left\{ \begin{aligned} & (I_2 + m_2 l_2^2)(\ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2) + m_2[\ddot{\rho}l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \rho\ddot{\phi}_2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + \dot{\phi}_1 l_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) + 2\dot{\rho}\dot{\phi}_2 l_2 \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \rho\dot{\phi}_2^2 l_2 \sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + \\ & + \dot{\phi}_1^2 l_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \varphi_2)] = \frac{2M_{kp}(\omega_0 - \omega_{kp})(\omega_0 - \omega)}{(\omega_0 - \omega)^2 + (\omega_0 - \omega_{kp})^2} - f m_2[(\rho\dot{\phi}^2 - \ddot{\rho}) \cdot \\ & \cdot \cos(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) + (2\dot{\rho}\dot{\phi} + \rho\ddot{\phi})\sin(\varphi - \varphi_1 - \varphi_2) - \ddot{\phi}_1 l_1 \cos(\alpha_2 - \varphi_2) + \\ & + \dot{\phi}_1^2 l_1 \sin(\alpha_2 - \varphi_2) + (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2)^2 l_2] - P_2 l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2). \end{aligned} \right. \quad (2.81)$$

Дані рівняння руху (2.78)-(2.79) механічної системи є нелінійними. Для їх розв'язку здійснимо лінеаризацію з урахуванням порядку малості величин, які є в правій частині цих рівнянь.

Розглянемо процес розв'язання диференціальних рівнянь руху (2.78)-(2.79). У ході аналізу цієї системи рівнянь, з метою її спрощення та подальшого інтегрування, було виконано оцінку впливу членів вищих порядків малості. Це дало змогу обґрунтовано ввести низку допущень і спрощень, які не впливають суттєво на точність отриманих результатів у рамках поставленої задачі.

У програмі Wolfram Cloud на основі часткового розв'язку лінійної системи диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами були виведені наближені аналітичні залежності, зокрема для визначення амплітуди коливань A_B контейнера:

$$A_B = 2m_2 l_2 \frac{\omega_2^2}{m_1} \left(\left(\frac{c_{y1}}{m_1} \right)^2 + \omega_2^2 - \frac{b_{y1}}{m_1} \right)^{-1}, \quad (2.82)$$

де

$$\omega_2 = \frac{2\pi n_B}{60} = \frac{\pi n_B}{30}, \quad (2.83)$$

n_B – частота коливання віброзбуджувача, об/хв.

Крім того, у програмі Wolfram Cloud було встановлено вираз для потужності P_B , необхідної для забезпечення функціонування процесу змішування у вібраційному змішувачі, оснащеному лопатевим валом:

$$P_B = m_2 l_2^2 \omega_2^4 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 \times \left[\left(\left(\frac{c_{x1}}{m_1} - \omega_2 \right)^2 + \left(\frac{b_{x1} \omega_2}{m_1} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} + \left(\left(\frac{c_{y1}}{m_1} - \omega_2 \right)^2 + \left(\frac{b_{y1} \omega_2}{m_1} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (2.84)$$

Отримані результати мають прикладне значення при розрахунку енергетичних характеристик обладнання й можуть бути використані для оптимізації конструкції та режимів роботи вібраційного змішувача.

Приймаючи конструктивні параметри змішувача¹ отримуємо графічні інтерпретації залежностей (2.82) і (2.84) з урахуванням (2.83), які наведені на рис. 2.15.

Амплітуда A_B зростає зі збільшенням частоти, швидко наближаючись до насичення. Це означає, що навіть за відносно невеликих частот (близько 500-700 об/хв) досягається майже максимальне значення амплітуди, після чого подальше зростання n майже не змінює результату. Потужність P_B , навпаки, зростає із збільшенням частоти коливання віброзбуджувача n_B . Така монотонна поведінка потужності свідчить про те, що зі зростанням частоти зростає й енергоспоживання системи, а отже, доцільність підвищення частоти слід оцінювати, виходячи з досягнутої амплітуди та необхідного енергетичного балансу.

¹ $m_2 = 3 \text{ кг}$; $l_2 = 0,1 \text{ м}$; $m_1 = 40 \text{ кг}$; $c_{x1} = c_{y1} = b_{x1} = b_{y1} = 500 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; $\alpha_2 = 15^\circ$.

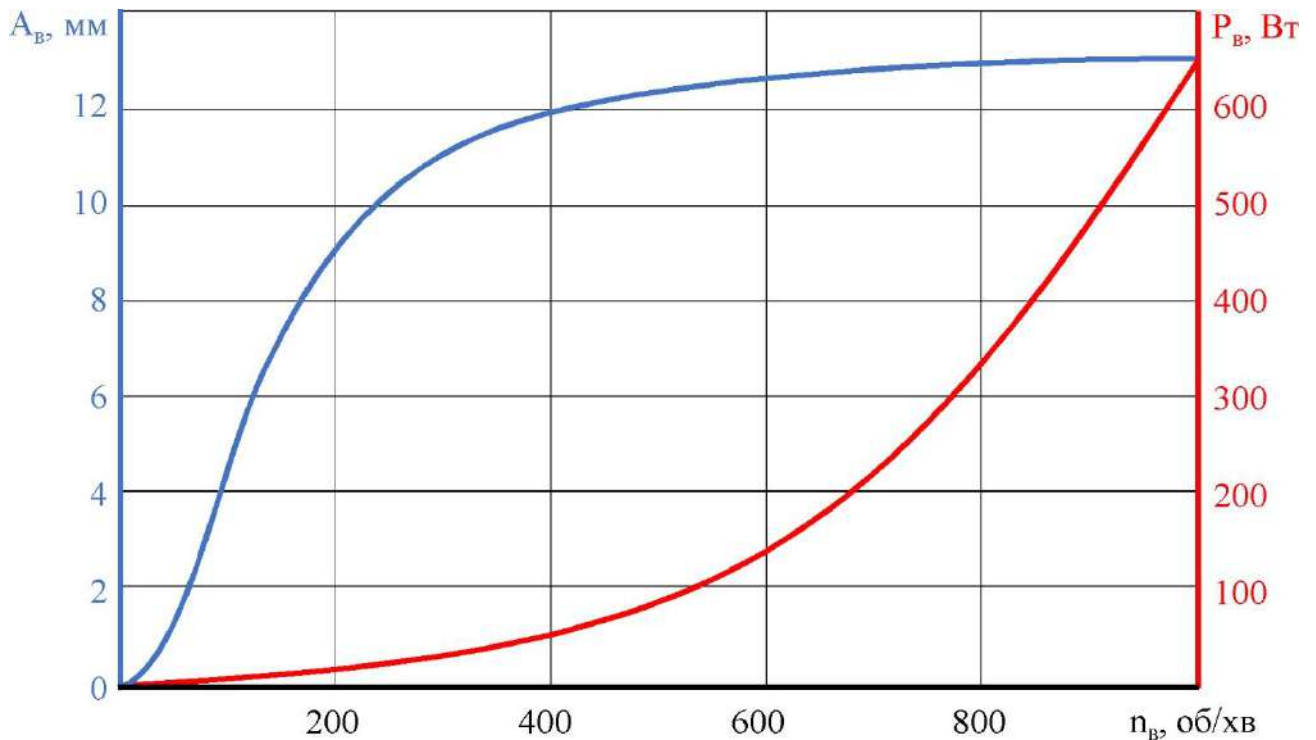


Рис. 2.15 - Залежності амплітуди коливань A_B контейнера і потужності P_B , що витрачається змішувачем від частоти коливання віброзбуджувача n_B

2.6 Висновки до другого розділу

1. На основі попередніх досліджень і досвіду створення змішувальних пристроїв із вібраційними перетворювачами руху було розроблено вдосконалену конструкцію вібраційного змішувача, що забезпечує інтенсифікацію процесу за рахунок поєднання дії коливань, обертального руху лопатевого валу й обертання контейнера на 360° навколо горизонтальної осі. Така конструкція дозволяє ефективно зменшити адгезійні сили між частинками матеріалу шляхом залучення гравітаційного ефекту, що в сукупності забезпечує підвищення ефективності та енергоощадність процесу змішування.

2. Проведене аналітичне обґрунтування геометричних параметрів лопаті лопатевого валу змішувача дозволило визначити раціональні значення її розмірів та розміщення з урахуванням ефективності захоплення і переміщення частинок

суміші (загальна довжина лопаті $L_s = 185$ мм; висота трапецієподібної пластинки $L_b = 62$ мм; більша основа трапецієподібної пластинки $B_b = 75$ мм; менша основа трапецієподібної пластинки $b_b = 45$ мм; кут нахилу трапецієподібної пластинки $\theta_b = 25^\circ$; радіус валу $R_s = 20$ мм; радіус контейнера $R_d = 200$ мм), а також забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції. Використання чисельного моделювання у SolidWorks Simulation дозволило встановити раціональні значення товщини трапецієподібної пластини ($\delta_b = 2$ мм) і радіуса прутка лопаті ($R_b = 8$ мм) за критеріями деформації та маси. Отримані результати свідчать про обґрунтованість прийнятих геометричних параметрів і забезпечують надійну основу для подальших теоретичних і експериментальних досліджень процесу змішування.

3. Чисельне моделювання в середовищі Simcenter Star-CCM+ показало свою ефективність як інструмент для дослідження процесу змішування у вібраційному змішувачі з лопатевим валом. Розроблена фізико-математична модель, що включає багатофазну Лагранжеву постановку та метод дискретних елементів (DEM), дозволила детально відтворити рух і взаємодію частинок у потоці, а також виявити вплив конструктивних і режимних параметрів на якість змішування. Проведене моделювання дозволило встановити динаміку зміни коефіцієнта однорідності під час змішування (рис. 2.8). Для оцінки залежності зміни коефіцієнта однорідності, який має флуктуацію, проведена апроксимація даних у вигляді експоненційної залежності (2.16). Перетином функції (2.16) із прямою $\delta = 0,9$ визначається як час досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$. Критеріями чисельного моделювання є час досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ і максимально можливе значення коефіцієнта однорідності $\delta_{\max}$.

4. На першому етапі чисельного моделювання досліджено вплив конструкції лопатевого валу, варіанти якого відрізняються кількістю витків спіралі за якою розташовані лопаті, на ефективність процесу змішування сипких компонентів. Отримані скалярні та векторні візуалізації розподілу швидкостей і компонентів (табл. 2.1), а також графіки динаміки зміни коефіцієнта однорідності δ (рис. 2.10) показали, що геометрія валу суттєво впливає на

кінетику процесу. Встановлено, що при малій кількості витків (1-2,25) забезпечується більш рівномірний розподіл швидкостей і ефективне аксіально-тангенціальне перемішування, що сприяє швидшому досягненню високої однорідності. Найбільш інтенсивне зростання δ відзначено для конструкції з 2,25 витками, а найвища якість змішування – при одному витку. Проте оптимальним за швидкістю, інтенсивністю та якістю змішування виявився лопатевий вал із двома витками, який забезпечує найкращий баланс між цими параметрами. Надмірне збільшення кількості витків (до 4,5-9) призводить до зниження ефективності через утворення застійних зон і нерівномірність потоків. Отримані результати дозволяють обґрунтовано обрати конструкцію робочого органу у вигляді лопатевого валу з двома спіралями для подальших досліджень.

5. На другому етапі чисельного моделювання встановлено квадратична регресійна залежність (2.19) часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$, частоти коливання віброзбуджувача $n_{\text{в}}$, амплітуди коливань контейнера $A_{\text{в}}$ (або коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$). Рівняння (2.19) і (2.22) пройшло перевірку на статистичну значущість за критерієм Стюдента, а також на адекватність за критерієм Фішера ($F(2.19) = 1839,74 \gg F_{\text{кр}} = 1,93$, $F(2.22) = 947,14 \gg F_{\text{кр}} = 1,93$), що підтверджує високу достовірність отриманої моделі. Аналіз отриманої моделі свідчить, що найбільший вплив на ефективність змішування має частота обертання лопатевого валу, яка при зростанні забезпечує зменшення часу досягнення однорідності $t_{0,9}$, але водночас демонструє наявність оптимуму. Подібну залежність виявлено й для частоти обертання контейнера, амплітуди та частоти коливань віброзбуджувача. Встановлено наявність нелінійної взаємодії між параметрами, зокрема між частотою та амплітудою коливань. Найменшого значення $t_{0,9} = 81,2$ с досягнуто при оптимальному поєднанні факторів: $n_{\text{л}} = 45,9 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 24,4 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{в}} = 823,8 \text{ хв}^{-1}$, $A_{\text{в}} = 8,8 \text{ мм}$ (або $k_{\text{в}} = 6,68$).

6. Побудована математична модель динаміки руху вібраційного змішувача з лопатевим валом дозволяє адекватно описати поведінку механічної системи під дією дебалансного віброзбуджувача. Розв'язання лінеаризованих

диференціальних рівнянь Лагранжа II роду (2.78)-(2.79) дало змогу отримати аналітичні залежності, зокрема для амплітуди коливань контейнера A_v та необхідної потужності привода P_v від частоти коливання віброзбуджувача n_v . Проведений аналіз показав, що амплітуда коливань A_v швидко насичується при збільшенні частоти збудження, тоді як енергоспоживання P_v зростає монотонно. Це забезпечує підґрунтя для оптимізації конструктивних і режимних параметрів змішувача з урахуванням енергоефективності роботи системи.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [124, 135].

1. Полевода Ю.А., Волинець Є.О., Бистрицький О.П. Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (107). С. 20–25. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-3

2. Волинець Є.О. Дослідження моделі руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування*. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (21-22 лютого 2023 р.). Полтава: ПДАУ. 2023. С. 46–49.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ЗМІШУВАЧА

3.1 Об'єкт експериментальних досліджень

Розглянувши основні типи змішувачів, можна виділити основні ознаки схеми, яка була вибрана для досліджень. Вона включає:

- ємкість для змішування, яка встановлена на пружній підвісці;
- вібраційний привод для збудження коливань;
- лопатевий вал, що має окремий привод.

В основу розробленої машини (змішувача) поставлена задача інтенсифікації процесу змішування матеріалів шляхом зменшення адгезійних сил між частинками матеріалу за рахунок використання гравітаційного ефекту. Це досягається тим, що вібраційний змішувач закріплений до корпусу на стійках контейнера, з можливістю його обертання на 360° навколо горизонтальної осі, при цьому лопатевий вал всередині контейнера, з можливістю обертання навколо горизонтальної осі, а приводи контейнера і лопатевого валу виконані окремо [137, 138].

Вібраційний змішувач (рис. 3.1) містить платформу барабана 3 яка з'єднана із рамою 1 за допомогою пружних елементів 2. До платформи 3 закріплений віброзбуджувач 10, який приводиться в рух електродвигуном 11 через еластичну муфту (на рисунку не показано). На стійках 4 закріплений контейнер 5 з можливістю його обертання на 360° навколо горизонтальної осі. Всередині контейнера 5 розміщений лопатевий вал 6 з лопатями 7, який встановлений в опорах 9. Приводом лопатевого валу 6 є мотор-редуктор 13, який з'єднаний з ним еластичною муфтою (на рисунку не показано). Привод контейнера 5 є окремим і містить електродвигун 14, муфту 15 і відкриту зубчасту передачу 16. Контейнер 5 має люк 8 призначений для його завантаження та розвантаження. Люк 8 оснащений засувкою з механізмом її закриття та відкриття [137, 138, 139, 140].

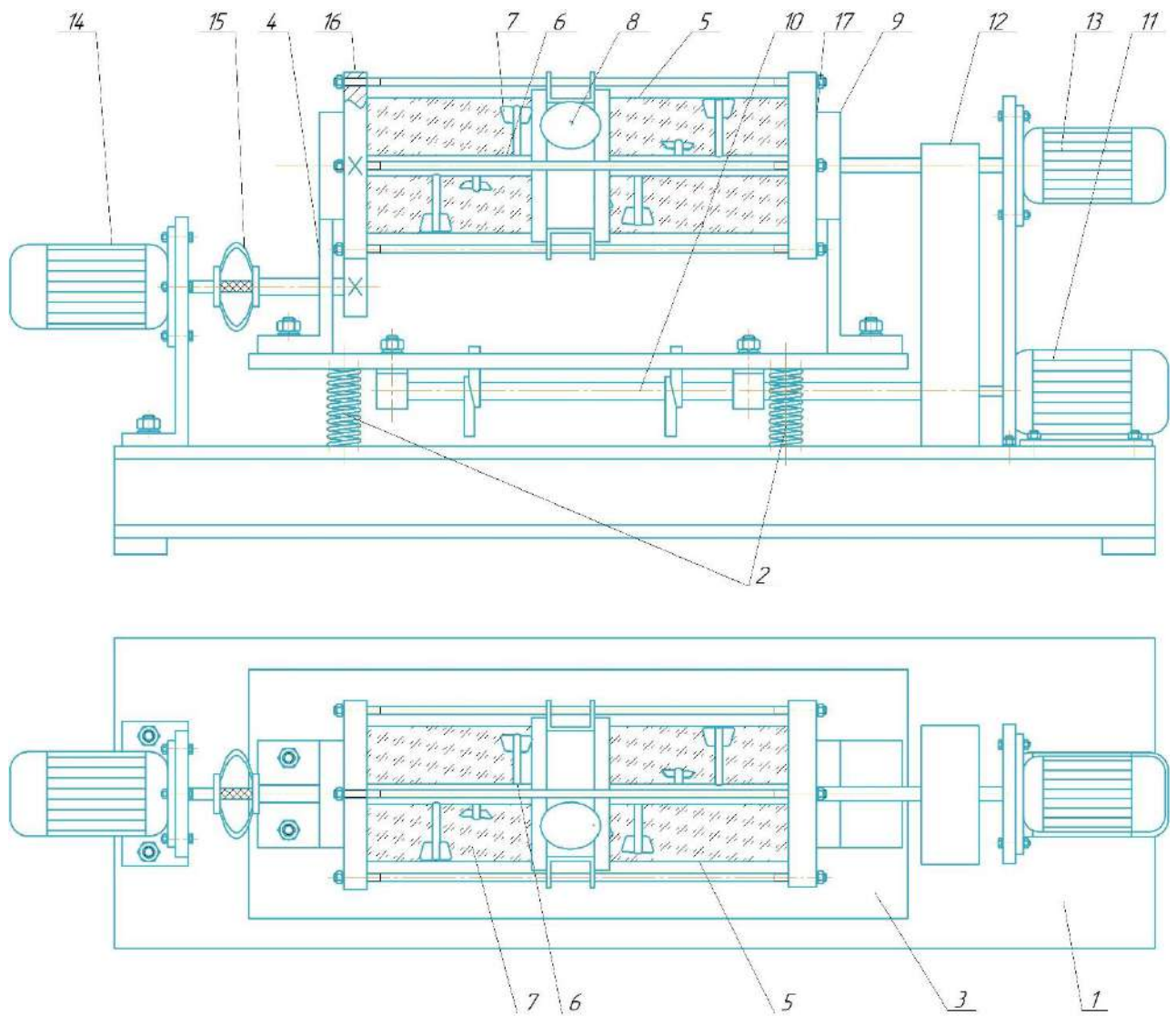


Рисунок 3.1 - Схема вібраційного змішувача: 1 – рама; 2 – пружинна підвіска; 3 – платформа контейнера; 4 – опора; 5 – корпус змішувача; 6 – лопатевий вал; 7 – лопаті; 8 – завантажувальний люк; 9 – підшипниковий вузол; 10 – віброзбуджувач; 11, 14 – електродвигун; 12 – захист; 13 – мотор-редуктор; 15 – еластична муфта; 16 – зубчаста передача; 17 – отвори для взяття проб

Ця схема реалізована як дослідно-промислова модель (рис. 3.2) для змішування комбікормів. Конструктивні параметри експериментального зразка наведені в табл. 3.1.

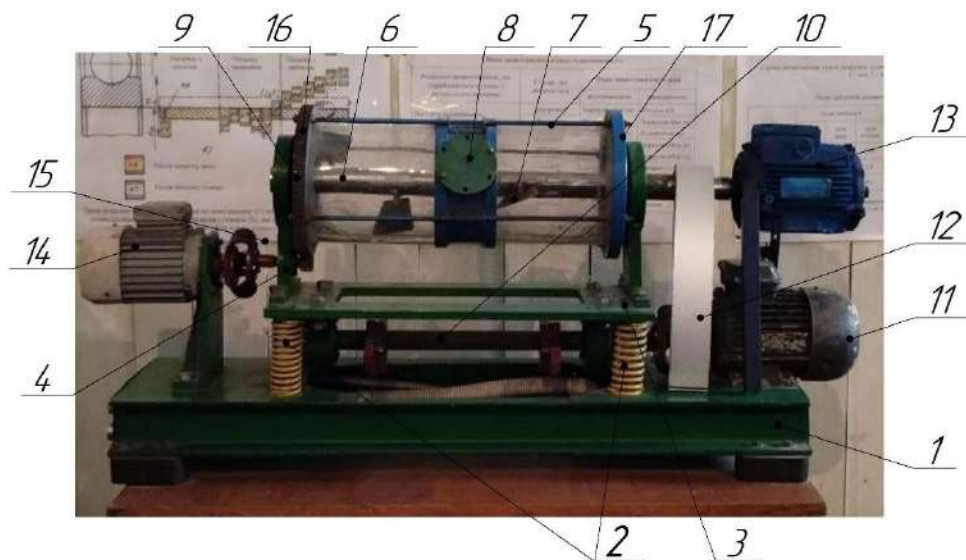


Рисунок 3.2 - Вібраційний змішувач із лопатевим валом

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри експериментального вібраційного змішувача

Конструктивні параметри		Одиниці вимірювання	Значення
Назва	Позначення		
Об'єм контейнера	V_K	дм ³	72
Маса контейнера	m_K	кг	35
Радіус циліндричної частини	R	мм	200
Висота контейнера	H_K	мм	400
Кількість пружних елементів підвіски		шт.	4
Кількість дебалансів		шт.	4
Кут розвороту дебалансів	α	град.	0-360
Частота обертання електродвигуна привода валу віброзбуджувача	n_B	хв ⁻¹	0-985
Частота обертання лопатевого валу	n_L	хв ⁻¹	0-60
Частота обертання контейнера	n_K	хв ⁻¹	0-30
Амплітуда коливань контейнера	A	мм	0-7,0
Ступінь завантаження контейнера	φ	%	75

Завданням досліджень експериментально-дослідного зразка вібраційного змішувача є знаходження:

- часу досягнення заданої однорідності $0,9 t_{0,9}$ (с);
- продуктивності Q (кг/хв)

$$Q = \frac{60M}{t_{0,9}}, \quad (3.1)$$

де M – маса суміші у змішувачі, кг ($M = 40$ кг).

- потужності, що споживається змішувачем P (Вт);
- питомих витрат енергії E (Дж/кг):

$$E = \frac{60P}{Q}. \quad (3.2)$$

3.2 Обладнання для проведення експерименту

Для вимірювання параметрів вібраційного впливу на змішувач використовували портативний віброметр UT312 (рис. 3.3), який є стандартним приладом для оцінки механічних коливань технологічного обладнання [153].

Віброметр встановлювався безпосередньо на платформі контейнера змішувача (рис. 3.4), що забезпечувало реєстрацію фактичної динаміки коливань у зоні основного впливу. Прилад застосовувався для оцінки стабільності вібрацій, що передаються на сипку суміш, а також для аналізу ефективності вібраційного процесу змішування [144, 153].

Віброметр UT312 працює в поєднанні з вбудованими датчиками та дозволяє вимірювати ключові характеристики коливального процесу. Вимірювання проводилися в різних точках платформи для оцінки рівномірності розподілу вібрацій. Прилад фіксує такі параметри (табл. 3.2):

- амплітуда коливань;
- віброшвидкість;
- віброприскорення.

Таблиця 3.2

Технічна характеристика портативного віброметра UT312

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання віброприскорення	0,1–199,9 м/с ²
Діапазон вимірювання віброшвидкості	0,1–199,9 мм/с
Діапазон вимірювання віброзміщення (амплітуда)	0,001 – 1,999 мм (пікове значення)
Частотний діапазон	10 Гц–1 кГц
Тип датчика	п'єзоелектричний акселерометр
Габарити	185 мм × 68 мм × 30 мм
Вага (з батареєю)	230 г



Рисунок 3.3 - Загальний вигляд портативного віброметра UT312

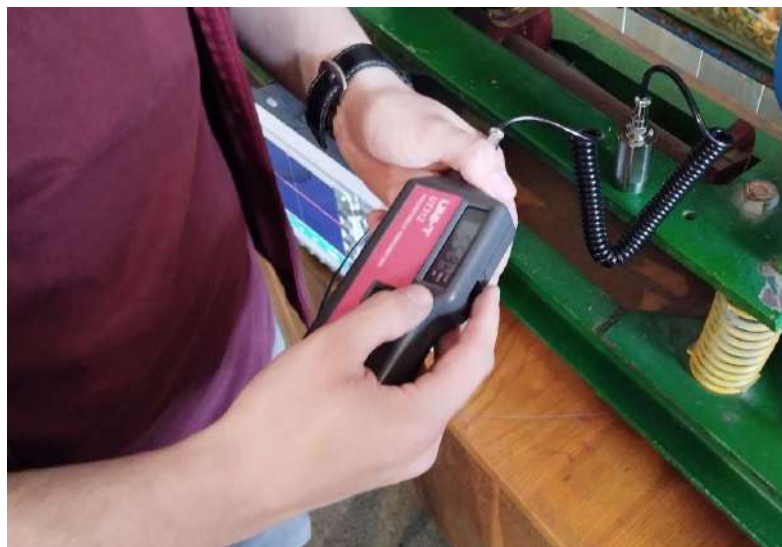


Рисунок 3.4 - Вимірювання параметрів вібрації на платформі контейнера за допомогою віброметра UT312

Цифровий осцилограф Owon SDS7102 (рис. 3.5) призначений для візуалізації електричних сигналів у часовій області. Він дозволяє спостерігати форму сигналу, вимірювати його амплітуду, частоту, період та інші параметри, що дає змогу детально аналізувати роботу електронних схем і електроприводів, де наявні змінні електричні сигнали. Осцилографи широко використовуються в наукових дослідженнях, промисловості та навчальних закладах для тестування, налаштування й діагностики обладнання [154].

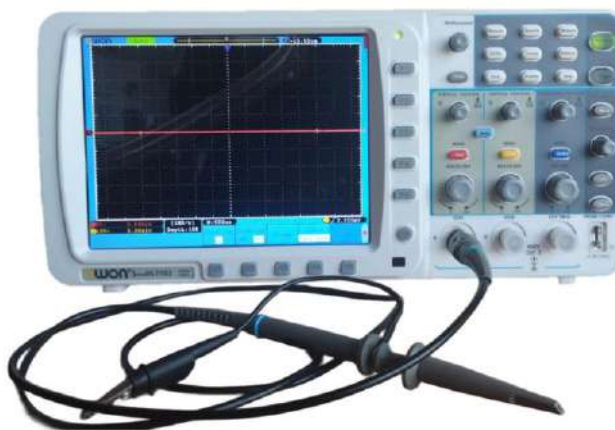


Рисунок 3.5 - Загальний вигляд цифрового осцилографа Owon SDS7102

Цифровий осцилограф має два канали для одночасного аналізу кількох сигналів, робочий діапазон частот до 100 МГц. Він дає змогу з високою точністю відстежувати зміну електричних параметрів у реальному часі, а також зберігати отримані дані в цифровому вигляді. Завдяки розширеним функціям прилад дозволяє вимірювати амплітуду, частоту, фазу та інші характеристики сигналу, що необхідно для оцінки енергетичних показників привода змішувача. У процесі дослідження до одного з каналів осцилографа було підключено цифровий вихід датчика магнітного поля KY-024 (рис. 3.6), розташованого біля обертового елемента з постійним магнітом. Це дало змогу фіксувати імпульси, що генеруються при кожному обертанні, та визначати частоту обертання валу за періодом повторення сигналу [144, 154].

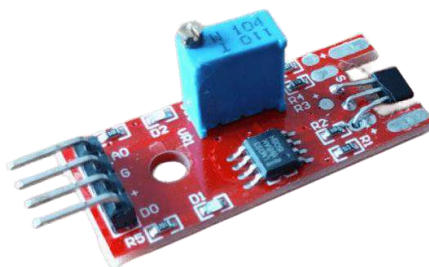


Рисунок 3.6 - Модуль датчика магнітного поля KY-024

У дослідженні застосовували побутовий ватметр-розетку (рис. 3.7), який забезпечував орієнтовне вимірювання активної електричної потужності, споживаної приводним електродвигуном. Прилад давав змогу фіксувати миттєві

значення напруги, сили струму, потужності та обчислювати спожиту електроенергію в мережі змінного струму [155].



Рисунок 3.7 - Ватметр цифровий

Така комбінація вимірювальних приладів – осцилографа і ватметра – забезпечила комплексну оцінку електричного навантаження під час роботи змішувача й дала змогу визначити питомі енерговитрати залежно від режимів вібрації та обертання контейнера [144, 145, 154, 155].

Загалом, застосування осцилографа й ватметра дозволило встановити раціональні режими роботи обладнання, за яких досягається висока ефективність змішування за мінімального енергоспоживання. Такий підхід є особливо актуальним для дослідження технологічної доцільності використання вібраційних змішувачів у кормовиробництві.

Основними компонентами (рис. 3.8) використовували кукурудзу (дєрь грубого помелу, 3-5 мм) та горох (дєрь грубого помелу, 3-5 мм). Щільність суміші становила в межах 700-800 кг/м³. Загальна маса завантаження складала 40 кг.



а)



б)

Рисунок 3.8 - Робочий наповнювач, що використовували в дослідженнях:

а) – дєрь кукурудзи 730 кг/м³; б) – дєрь гороху 770 кг/м³.

3.3 Вибір методик проведення досліджень

В процесі змішування відбувається взаємне переміщення часток різних компонентів, які до змішування знаходились окремо або в нерівномірно розподіленому стані. Але в ідеальному процесі необхідною умовою є отримання такої суміші, де б в будь-якій точці частки різних компонентів знаходились би в потрібних співвідношеннях. Через велику кількість факторів (фізико-механічні характеристики компонентів, методи змішування, конструктивні особливості змішувачів та режими їх роботи), що впливають на взаємне розміщення часток і кінцеву якість суміші, практично неможливо досягти такого ідеального розподілу. У суміші, яка обробляється, існує безмежна кількість варіантів взаємного розміщення часток компонентів, співвідношення яких у довільних точках є випадковою величиною. Тому більшість методів оцінки якості суміші базуються на методах статистичного аналізу, де досліджуваний матеріал аналізують за однією випадковою величиною. При цьому суміш вважають двохкомпонентною, тобто із загальної маси виділяють один компонент, який є ключовим, а всі інші об'єднують в другий – умовний компонент. За ступенем розподілу ключового компонента в масі другого умовного компонента роблять висновки про якість суміші [167, 168].

Згідно з вимогами до комбікормів [50, 53, 144, 147, 148, 149, 150, 151, 152], однорідність повинна становити понад 90% для сумішей, що використовуються в спеціалізованому птахівництві (наприклад, для початкових фаз вирощування або племінного стада), і не менше 80% – для стандартних повнораціонних кормів. Такі широкі межі допустимої однорідності, на нашу думку, пов'язані з тим, що наявне обладнання для змішування зернових компонентів не завжди забезпечує достатній рівень перемішування за структурною й фракційною однорідністю.

Важливою умовою використання вібрації в змішувачах є дотримання оптимального ступеня заповнення контейнера. Адже необхідно забезпечити пересипання матеріалу по вільній поверхні. Якщо ступінь заповнення контейнера вібророзмішувача надто великий, то площа пересипання суміші зменшується й умови змішування погіршуються. Якщо ж ступінь заповнення малий, то може виникати

сегрегація. На основі досліджень встановлено, що контейнер віброзмішувача слід заповняти на 75–85% від повного об'єму [6, 55, 105, 107, 108, 141, 144].

Різноманітні методи та методики проведення досліджень процесу вібраційного змішування [7, 8, 9, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163] представлені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Аналіз відомих робіт з експериментального дослідження процесу вібраційного змішування

№ п/п	Матеріали, що змішуються	Умови проведення експерименту			Метод визначення однорідності суміші
		Вібробуджувач		Форма контейнера, наявність активатора, ступінь заповнення	
		A, мм	ω, с ⁻¹		
1	2	3	4	5	6
1	- Річковий пісок. - Кухонна сіль або хлористий калій. Співвідношення компонентів 9:1.	*	*	Циліндрична, D = 200 мм. Ступінь заповнення φ = 0,5.	Величина проби – 2 г. Концентрацію ключового компонента в пробі визначали методом титрування: $V = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}{N - 1}}, \%$
2	Гравій: - фракція 1...8 мм; - фракція 2...5 мм, пофарбований нітрофарбою в білий і чорний кольори з добавкою 25% нітрогліцерину (по вазі).	5,3 ÷ 2	8,3 ÷ 41,7	Циліндрична, D = 100 мм, L = 80 мм, торцеві стінки з оргскла, в деяких випадках броньовані силікатним склом. Ступінь заповнення φ = 0,75-0,85.	а) фото та кінозйомка; б) коефіцієнт варіації однорідності суміші: $C_v = \frac{\sigma}{n_{сер}},$ де $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - n_{сер})^2}{N}},$ n – кількість однокольорових часток в одиничному об'ємі (площі), шт.; n _{сер} – середня кількість однокольорових часток в тій же площі, шт.; N – кількість одиничних площ (30-40), на які поділена площа завантаження змішувача, шт.

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
3	- Шар поліхлорвінілової смоли із середнім розміром часток 100 мкм та насипною вагою 0,6 г/см ³ . - Синька (суха).	до 3,2	100	Прозорий циліндр, $D = 70$ мм. Висота шару матеріалу 10-30 мм.	Інтенсивність змішування віброкиплячого шару фіксували візуально за рівномірним розподілом синьки у всьому об'ємі суміші в горизонтальній площині.
4	- Дерев'яна стружка. - Гравій.	Значні амплітуди	Малі частоти коливань	Циліндрична з ексцентрично розміщеною трубою, всередині якої обертається однотальний інерційний вібробудувач. Безперервної дії.	Коефіцієнт однорідності суміші: $M = 97\%$.
5	- Цукор-пісок (0,3-1 мм). - Какао-жмих (30-25 мм).	*	*	Млин ударної дії (подрібнення із змішуванням).	Підрахунок часток через кожні 10 с проводили візуально за допомогою мікроскопа. Щільність розподілу подрібнених часток за розмірами визначали методом просіювання на стандартному наборі сит.
6	- Технічний бікарбонат натрію. - Кальцинована сода. Компоненти взяті у рівних співвідношеннях (за масою)	2,5	23,3	Плексигласовий контейнер із розмірами 240×240×500мм. Висота шару змінювалась від 50 до 250 мм.	Змішування перевіряли шляхом визначення загальної лужності компонентів та суміші у відібраних пробах. Матеріал вважали перемішаним, якщо лужність проби відхилялася від середньої розрахункової не більше, ніж на 0,25 мл нормального розчину HCl.
7	- Пісок. - Гравій фракції 5...10 мм. Співвідношення компонентів 7:2,8.	0÷1 5	до 33,3	Циліндрична, $D = 530$ мм $L = 1200$ мм. У верхній частині зріз 75 мм. $V = 0,18$ м ³ .	*

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6
8	Порошок сульфату анідина: - білого кольору; - червоного кольору; Співвідношення 50:50.	*	*	Горизонтальний замкнутий лоток шириною 85 мм з бортами висотою 10 мм.	У лоток спочатку засипали рівним шаром порошок червоного кольору, а потім на нього в такий же кількості за об'ємом – порошок білого кольору. Рівномірність появи рожевого забарвлення визначали візуально.
9	- Порошок титану Ti. - Порошок вуглецю С. Співвідношення компонентів 68:17 (за масою).	*	*	Циліндрична, $D = 130$ мм, $L = 350$ мм. Кут нахилу до горизонтальної осі – 20° . Активатор-циліндр $D = 32,5$ мм ($1/3-1/4$) D корпусу Частота обертання корпусу $n_k = 15$ хв ⁻¹ .	Коефіцієнт η (ступінь відхилення від ідеального змішування): $\eta = \frac{m_{Ti_{факт}} - m_{Ti_{теор.}}}{m_{Ti_{теор.}}} \cdot 100\%$ де $m_{Ti_{факт}}$ – кількість Ti в пробі; $m_{Ti_{теор}}$ – кількість Ti при ідеальному змішуванні. Величину $m_{Ti_{факт}}$ визначають за ваговим методом.
10	Кварцовий пісок: - чорного кольору; - білого кольору.	0,7	50	Прямокутна. Плексигласовий контейнер із розмірами 25×25, 50×50, 100×100, 200×200 мм. Висота шару матеріалу 30 мм.	Вага проби складала 2% від загальної ваги суміші. Визначали відхилення вагової концентрації за формулою: $C = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - P)^2},$ де N – кількість відібраних проб; i – номер проби; x_i – вагове відношення чорного піску до білого в пробі; P – вагове відношення чорного піску до білого у всьому об'ємі шару суміші.
11	Пісок двох фракцій.	*	*	Барабанний змішувач. Періодичної дії.	Коефіцієнт однорідності суміші: $M = 97\%$

* - в літературних джерелах дані не представлені.

Більшість дослідників за основу критерію оцінки якості суміші приймають величину середнього квадратичного відхилення вмісту ключового компонента в пробах, взятих із суміші [164]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{m})^2}{n-1}}, \quad (3.3)$$

де X_i – вміст ключового компонента в i -й пробі;

$\bar{m}$ – середнє арифметичне вмісту ключового компонента у всіх пробах;

n – загальна кількість відібраних проб.

Хоча відомі й інші залежності, запропоновані різними дослідниками в якості критерія оцінки якості суміші сипучих матеріалів [7, 11, 13, 22, 83, 86, 89, 165, 166], представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Критерії оцінки якості суміші сипучих матеріалів

№ п/п	Назва	Позначення	Формула для розрахунку
1	Коефіцієнт неоднорідності	V_c	$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} \%$
2	Ступінь змішування	M	$M = 1 - \frac{S^2 - S_R^2}{S_0^2 - S_R^2}; \quad S_0^2 = p(1-p);$ $S_R^2 = \frac{p(1-p)}{m}$
3	Стандартне відхилення	S	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}$
4	Коефіцієнт якості	J	$J = \frac{\bar{c}}{p}$
5	Відносна дисперсія	$\frac{S_p}{p}$	$\frac{S_p}{p} = \frac{1}{g} \left[\left(\frac{1-p}{p} \right)^2 p \gamma_p (1 + C_p^2) + q \gamma_q (1 + C_q^2) \right]$
6	Дисперсія	S_u^2	$S_u^2 = S^2 - S_R^2; \quad S_R = \frac{pq}{m}$
7	Коефіцієнт однорідності	δ	$\delta = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{ V_{1i} - V_{2i} }{V_{1i} + V_{2i}}$
8	Повнота перемішування	U	$U = a \Delta F = \frac{F}{F_0}$

Продовження таблиці 3.3

9	Інтенсивність сегрегації	J_c	$J_c = \frac{S_a^2}{\bar{C}_a \bar{C}_s} \equiv \frac{S_s^2}{\bar{C}_a \bar{C}_s}$
10	Ступінь перемішування	M	$M = \frac{S - S_a}{S_0 - S}; S_0^2 = p(1 - p);$ $S_R^2 = \frac{p \cdot (1 - p)}{m}$

де S_0 – середнє квадратичне відхилення концентрації ключового компонента в пробах (СКВВ) для незмішаної суміші; S_R – СКВВ при рандомальному стані суміші, тобто при максимально можливому, в статистичному розумінні, змішуванні; S_{II} – дійсне значення СКВВ суміші; S – виміряне значення СКВВ; g – вага проби; p, q – фактичний ваговий відносний вміст компонентів в суміші; C_p, C_q – коефіцієнти відхилення ваги часток для компонентів p і q ($C_p = S_p/\gamma_p$; $C_q = S_q/\gamma_q$); γ_p, γ_q – середнє значення ваги часток, віднесене до числа часток компонентів p і q ; a – коефіцієнт пропорційності; U – імовірність того, що хоча б один з елементів даної поверхні розділу попадає у виділений елементарний об'єм; ΔF – елемент поверхні розділу між компонентами; m – кількість часток в пробі; S_a, S_b – СКВВ концентрації компонентів відповідно по a і b ; $\bar{C}_a, \bar{C}_s$ – середнє значення концентрацій компонентів a і b в пробах.

Але найбільшого застосування в якості критерію оцінки якості змішування набув коефіцієнт однорідності δ [124, 164]:

$$\delta = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{1i} - V_{2i}|}{V_{1i} + V_{2i}}, \% \quad (3.4)$$

де V_{1i} – значення параметра для компонента I у i -й пробі;

V_{2i} – значення параметра для компонента II у i -й пробі;

N – загальна кількість проб.

Оскільки компоненти суміші мали однакову крупність і подібну щільність, застосування гравіметричного методу виявилось недоцільним через відсутність

чітких відмінностей у фізичних властивостях. З огляду на це, було прийнято рішення здійснювати визначення однорідності суміші за допомогою кількісного аналізу проб із візуальним розподілом компонентів за кольором. Такий підхід дозволив ефективно оцінити масову частку контрольного компонента у кожній пробі, а подальший розрахунок коефіцієнта однорідності здійснювався за узагальненою математичною залежністю.

Усі експериментальні дослідження проводились із дотриманням вимог чинних нормативних документів, зокрема ДСТУ ISO 6497:2005 [167] та ДСТУ ISO 6498:2005 [168], що регламентують підготовку проб і методи оцінювання однорідності кормових сумішей. Використані ваги пройшли державну повірку й відповідали метрологічним вимогам, що забезпечило достовірність і відтворюваність отриманих результатів.

3.3.1 Методика визначення амплітудно-частотних та енергетичних характеристик віброзмішувача

Для вибору раціонального режиму роботи установки за критерії оцінки приймаємо амплітудно-частотну й енергетичну характеристики. Це дасть змогу оцінити технологічні можливості розробленого змішувача та вибрати робочі режими для експлуатації віброзмішувача в заданих технологічних умовах [144, 145, 165].

У ході експериментальних досліджень вібраційних характеристик процесу використовували портативний віброметр UT312, який забезпечує вимірювання віброшвидкості, віброприскорення та віброзміщення. Однак, відповідно до технічних характеристик приладу, безпосереднє вимірювання амплітуди віброзміщення можливе лише в межах до 2 мм. Для оцінки більших значень використовували розрахунковий підхід на основі даних про віброшвидкість [153, 154].

Припускаючи гармонічний характер коливань, амплітуду віброзміщення A , м, визначали за відомими значеннями віброшвидкості v , м/с, та частоти вібрації f , Гц. Частоту приймали рівною частоті обертання

валу віброзбуджувача, яка визначалася за формулою:

$$f = \frac{n}{60}, \quad (3.5)$$

де n – частота обертання валу віброзбуджувача, хв^{-1} .

Амплітуду віброзміщення обчислювали за класичним рівнянням гармонічного руху:

$$A = \frac{v \cdot 1000}{2\pi f}, \quad (3.6)$$

де A – амплітуда віброзміщення, мм;

v – пікова віброшвидкість, м/с;

f – частота вібрації, Гц.

У якості характеристики вібраційного поля приймаємо коефіцієнт режиму вібрації [164, 166], або коефіцієнт динамічності [165], який визначається за формулою:

$$k_b = \frac{A_b \omega_b^2}{1000g} = \frac{A_b}{1000g} \left(\frac{2\pi n_b}{60} \right)^2, \quad (3.7)$$

де A_b – амплітуда коливань контейнера, мм;

n_b – частота обертання віброзбуджувача, хв^{-1} ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Таблиця 3.4

Фактори експериментальних досліджень

Рівень	Частота обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}, \text{хв}^{-1} (x_1)$	Частота обертання контейнера $n_{\text{к}}, \text{хв}^{-1} (x_2)$	Коефіцієнт режиму вібрації $k_b (x_5)$	Тривалість змішування $t, \text{с} (x_6)$
Нижній (-1)	20	0	0	70
Нульовий (0)	40	15	5,6	100
Верхній (1)	60	30	11,2	130
Інтервал Δ	20	15	5,6	30

де x_1 – закодоване значення частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$; x_2 – закодоване значення частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$; x_5 – закодоване значення частоти коефіцієнту режиму вібрації k_b ; x_6 – закодоване значення тривалості змішування t .

3.3.2 Методика визначення якості змішування

Метою досліджень є встановлення залежності однорідності суміші δ від часу змішування t при різних схемах змішування в зоні мінімальних сумарних енерговитрат на привод змішувача.

Для проведення експерименту були обрані матеріали, описані в п. 3.2.

Із відомих методів відбору проб для оцінки якості суміші у змішувачах періодичної дії широкого розповсюдження набули два методи [2, 7, 59, 169]:

- метод квартування (поділу на квадрати);
- метод точкового відбору проб.

Використання першого методу не дозволяє виявляти застійні зони в змішувачі, вимагає вивантаження суміші після кожного дослідження, що призводить до втрати реальної схеми розподілу контрольного компонента в суміші. Тому в експериментальних дослідженнях використовувався метод точкового відбору проб. Через рівні проміжки часу відбиралися проби із контейнера змішувача (рис. 3.9) за допомогою спеціального пробовідбірника (рис.3.8) [5, 27, 171].

Пробовідбірник, зображений на рис. 3.6, виконаний у вигляді труби 1 з конічним наконечником та вікнами. В трубу 1 по довжині щільно вставляється труба 2, яка розділена внутрішніми перегородками 3 на ряд камер 4. Кожна камера має вікно, яке за розмірами та розміщенням співпадає з відповідним отвором в трубі 1.

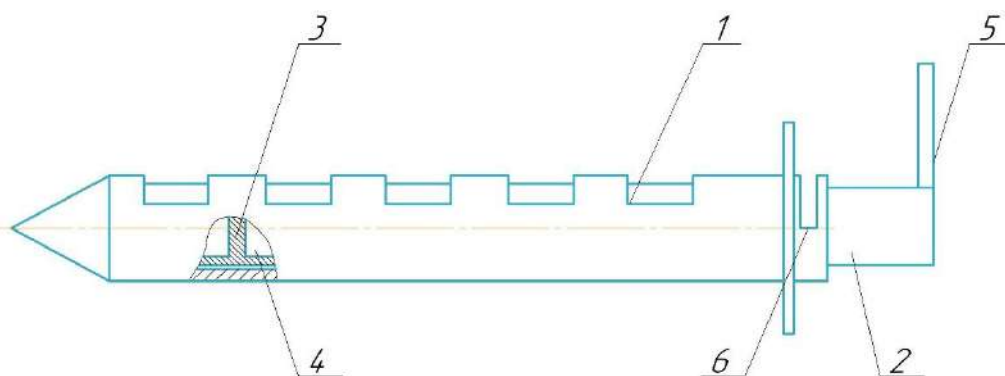


Рисунок 3.8 - Схема трубчатого пробовідбірника: 1, 2 – труба; 3 – внутрішні перетинки; 4 – камери; 5, 6 – важелі

При повороті внутрішньої труби 2 за допомогою важеля 5 отвори в ній

можуть співпадати з отворами в зовнішній трубі 1 або перекриватися її стінками. Положення «Камери відкриті» або «Камери закриті» фіксуються важелем 6, що з'єднаний із стінкою внутрішньої труби та рухається по напрямній зовнішньої труби. При введенні пробовідбірника в суміш камери внутрішньої труби закриті. Після фіксації глибини введення пробовідбірника камери відкриваються, в них самопливом засипається суміш, після чого камери закриваються й пробовідбірник виймають. Суміш кожної камери складає одну пробу. Конструкція такого пробовідбірника, що широко використовується дослідниками, дає можливість одночасно відбирати від 4-х до 20-ти проб. Проби відбиралися пробовідбірником у шаховому порядку з чотирьох глибин контейнера (рис. 3.9).

Кількість проб 19, повторність дослідів трикратна [170, 171].

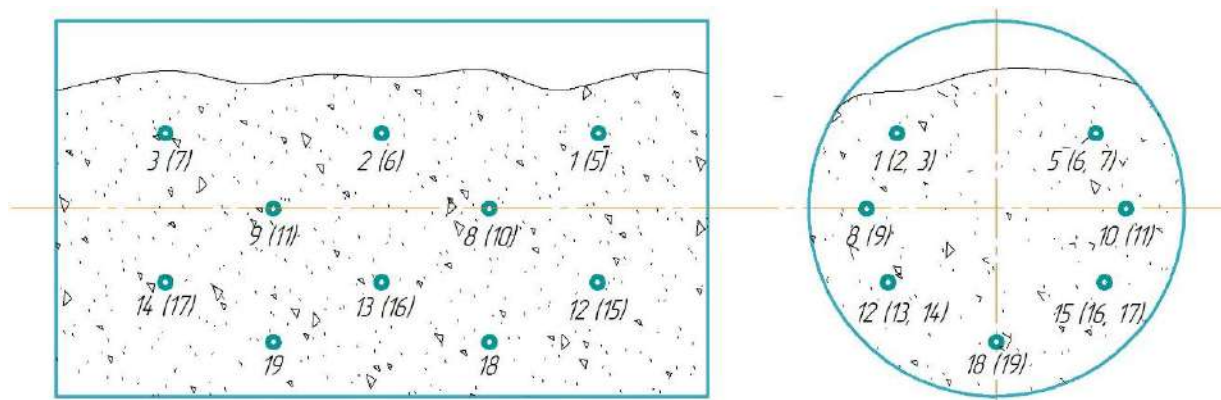


Рисунок 3.9 - Схема відбору проб із контейнера змішувача

Для оцінювання рівня однорідності суміші використовували метод кількісного аналізу проб за візуальними ознаками компонентів. Оскільки розміри частинок були однаковими, ідентифікацію контрольного компонента здійснювали на основі відмінностей у кольорі. Такий підхід дозволив достовірно визначити масову частку кожного компонента в пробах.

Масу проби для оцінювання однорідності суміші визначали з урахуванням вимог репрезентативності, точності вимірювань і зручності подальшого ручного аналізу. Оптимальне значення було встановлено на рівні 50 г, що забезпечувало достатню кількість частинок для об'єктивної оцінки складу, враховуючи

однакову крупність компонентів. Відібрані проби зважували на лабораторних вагах AXIS AD500 (рис. 3.10) з точністю 0,01 г, після чого вручну визначали масу контрольного компонента. Такий підхід дозволяв отримати достовірні дані для подальшого обчислення коефіцієнта однорідності змішування [172].



Рисунок 3.10 - Загальний вигляд ваги лабораторної електронних AXIS AD500

Отримані значення концентрацій використовували для розрахунку коефіцієнта однорідності суміші відповідно до формули (3.4), що дозволяло кількісно оцінити ефективність процесу змішування залежно від часу та режиму роботи обладнання.



Рисунок 3.11 - Досліджувана суміш

Для візуального контролю процесу змішування даних матеріалів проводили фотозйомку контейнера із завантаженням після взяття кожної партії проб.

3.4 Висновки до третього розділу.

1. Розроблено й виготовлено дослідний зразок вібраційного змішувача, який має незалежні приводи для лопатевого валу та контейнера, а також вібробуджувач із регульованим ексцентриситетом. Передбачено можливість варіювання амплітуди та частоти коливань. Конструкція забезпечує комбінований вплив на суміш, що дозволяє дослідити ефект синергетичної дії механічного та вібраційного змішування.

2. Для фіксації параметрів вібрації використано портативний віброметр UT312, встановлений на платформі контейнера.

3. У якості суміші обрано два сипких компоненти (кукурудза і горох) однакової фракції (3-5 мм), які відрізняються кольором. Такий підхід дозволив провести візуальне сортування при ручному аналізі проб та уникнути використання ситового або хімічного методу.

5. Проби суміші відбиралися точковим способом у 19 місцях контейнера з використанням спеціального пробовідбірника. Це дозволило отримати репрезентативну вибірку для кількісного аналізу. Маса однієї проби становила 50 г, що забезпечувало достатню точність і зручність у ручному сортуванні.

6. Оскільки частинки суміші мали однакову крупність, однорідність визначали вручну шляхом візуального сортування частинок за кольором. За результатами зважування розраховували масову частку контрольного компонента в кожній пробі. Далі проводили обчислення коефіцієнта однорідності згідно з формулою (3.4).

7. Оцінку енергетичних показників роботи змішувача проводили за допомогою цифрового ватметра шляхом вимірювання споживаної електричної потужності. На основі отриманих значень розраховували питомі витрати енергії з урахуванням продуктивності. Це дає змогу визначити енергооптимальні режими роботи змішувача.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Постановка експерименту та початкові дані

З метою дослідження впливу режимних параметрів на якісні та енергетичні показники процесу змішування у вібраційному змішувачі було проведено серію експериментальних досліджень. Основними факторами, що варіювались у процесі експерименту, були:

- x_1 – частота обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, хв^{-1} ;
- x_2 – частота обертання контейнера $n_{\text{к}}$, хв^{-1} ;
- x_5 – коефіцієнт режиму вібрації $k_{\text{в}}$;
- x_6 – тривалість змішування t , с.

Планування експерименту здійснювалося за методом повного факторного експерименту з урахуванням варіації факторів на трьох рівнях: нижньому (–1), базовому (0) та верхньому (+1) [173]. Для підвищення точності оцінок і можливості апроксимації результатів використано кодоване представлення змінних.

Всього виконано 75 дослідів відповідно до затвердженої експериментальної матриці. У кожному досліді визначали такі показники:

- коефіцієнт однорідності суміші δ ;
- потужність, що споживається змішувачем P , Вт;
- продуктивність змішувача Q , кг/хв;
- питомі витрати енергії E , Дж/кг.

Збирання й обробка експериментальних даних здійснювались із використанням хмарного обчислювального середовища Wolfram Cloud [131], яке дозволило побудувати квадратичні рівняння регресії та провести статистичну перевірку їхньої адекватності. Первинні результати вимірювань і кодування факторів наведено в таблиці додатка Д.

Отримані регресійні моделі стали основою для подальшого аналізу впливу режимних параметрів і їхніх комбінацій на ефективність процесу змішування.

4.2 Визначення залежності коефіцієнта однорідності суміші від режимних параметрів

Для встановлення кількісного впливу режимних параметрів на однорідність суміші було використано методику побудови регресійного рівняння другого порядку [174]. На основі результатів обробки експериментальних даних у середовищі Wolfram Cloud [131] отримано рівняння залежності коефіцієнта однорідності δ у кодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,918657 + 0,002425 x_1 - 0,01005 x_1^2 + 0,00345 x_2 - 0,00245 x_1 x_2 - \\ & - 0,0028 x_2^2 + 0,003375 x_5 + 0,0003 x_1 x_5 - 0,00175 x_2 x_5 - \\ & - 0,00765 x_5^2 + 0,0240667 x_6 - 0,0014 x_1 x_6 + 0,00205 x_2 x_6 - \\ & - 0,00025 x_5 x_6 - 0,0117143 x_6^2. \end{aligned} \quad (4.1)$$

У таблиці 4.1 наведено результати статистичної обробки рівняння регресії (4.1), яке описує залежність коефіцієнта однорідності суміші δ від основних технологічних факторів. Також представлено числові значення оцінених коефіцієнтів регресійної моделі, відповідні стандартні похибки, значення критеріїв Стюдента й асимптотичні значимості (р-значення), які є критерієм перевірки статистичної значущості кожного члена моделі [174, 175].

Таблиця 4.1

Статистичний аналіз коефіцієнтів регресії рівняння (4.1)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стюдента	Асимптотична значимість
1	2	3	4	5
a_{00}	0,918657	0,0016818	546,235	$1,28897 \cdot 10^{-112}$
a_{10}	0,002425	0,000908275	2,6699	0,0097482
a_{20}	0,00345	0,000908275	3,79841	0,000342232
a_{50}	0,003375	0,000908275	3,71584	0,000446799
a_{60}	0,0240667	0,000938062	25,6557	$4,85562 \cdot 10^{-34}$
a_{12}	-0,00245	0,00128449	-1,90736	0,0612635
a_{15}	0,0003	0,00128449	0,233555	0,816126
a_{16}	-0,0014	0,00128449	-1,08992	0,280105
a_{25}	-0,00175	0,00128449	-1,3624	0,178163
a_{26}	0,00205	0,00128449	1,59596	0,115752

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
a_{56}	-0,00025	0,00128449	-0,194629	0,846341
a_{11}	-0,01005	0,00133694	-7,51714	$3,27308 \cdot 10^{-10}$
a_{22}	-0,0028	0,00133694	-2,09433	0,0404628
a_{55}	-0,00765	0,00133694	-5,722	$3,56004 \cdot 10^{-7}$
a_{66}	-0,0117143	0,00158561	-7,38785	$5,44414 \cdot 10^{-10}$
Показник	DF	SS	MS	Критерій Фішера
Модель	15	61,03	4,06867	123298
Помилка	60	0,00197991	0,0000329985	1,93

Згідно з отриманими результатами, статистично значущими при рівні довірчої ймовірності 95 % ($t_{\text{табл}} = 2,01$) [176, 177] виявилися такі коефіцієнти: a_{10} , a_{20} , a_{50} , a_{60} , a_{11} , a_{22} , a_{55} , a_{66} , оскільки модулі відповідних значень критерію Стюдента перевищують табличне значення. Це вказує на суттєвий вплив відповідних факторів та їхніх квадратичних ефектів на варіацію коефіцієнта однорідності. Натомість коефіцієнти взаємодії між факторами (a_{12} , a_{15} , a_{16} , a_{25} , a_{26} , a_{56}) виявилися статистично незначущими, що свідчить про відсутність істотного ефекту взаємодії в межах проведеного експерименту.

Серед оцінених параметрів моделі особливе місце займає вільний член $a_{00} = 0,918657$, який є базовим значенням коефіцієнта однорідності при нульових значеннях кодованих факторів, тобто в центрі області планування. Надзвичайно високе значення критерію Стюдента для цього коефіцієнта ($t = 546,235$) і практично нульова асимптотична значимість ($p < 10^{-110}$) свідчать про його абсолютну статистичну достовірність. Це підтверджує, що середнє значення відгуку в центрі плану є надійно визначеним і відображає реальну характеристику системи.

Відкидаючи незначущі коефіцієнти регресії рівняння (4.1) на основі порівняння їхніх модулів із табличним значенням критерію Стюдента $t_{\text{табл}} = 2,01$, отримуємо уточнену залежність коефіцієнта однорідності δ від факторів досліджень у розкодованому вигляді (4.2):

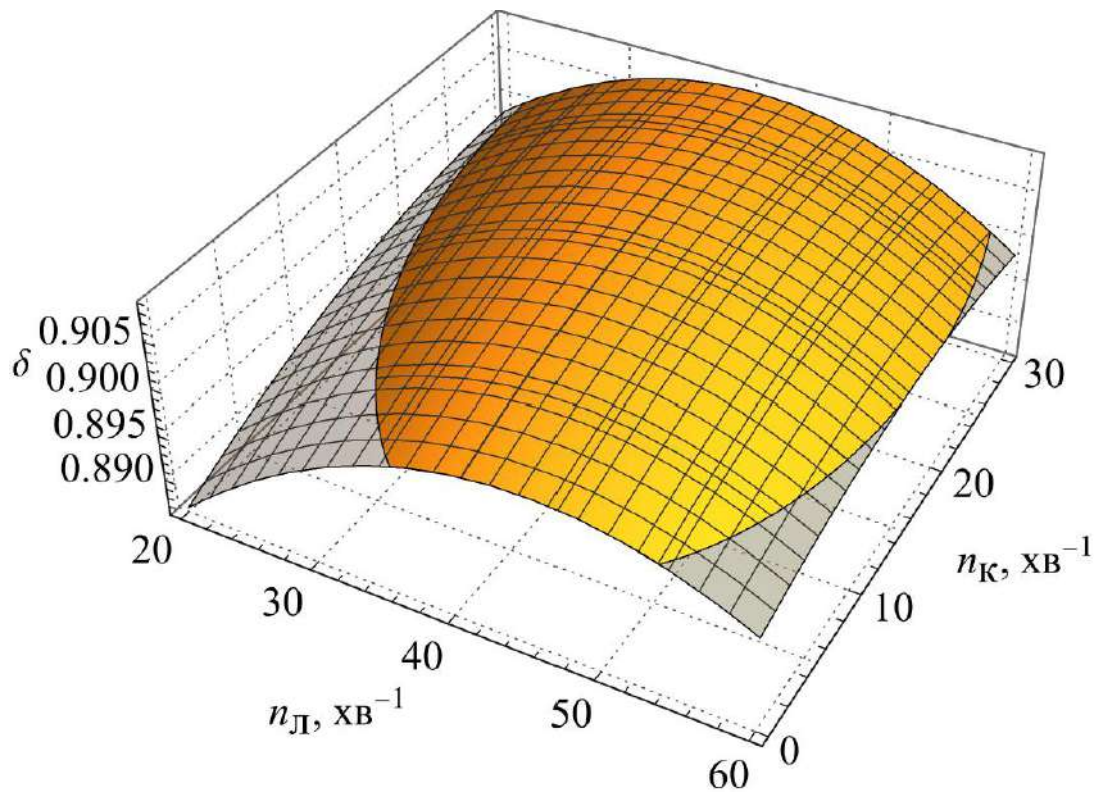
$$\begin{aligned} \delta = & 0,641051 + 0,00333482 k_v - 0,000243941 k_v^2 + 0,00093 n_k - \\ & - 0,0000124444 n_k^2 + 0,00225375 n_d - 8,16667 \cdot 10^{-6} n_k n_d - \\ & - 0,000025125 n_d^2 + 0,0034054 t - 0,0000130159 t^2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

На основі уточненого регресійного рівняння (4.2), отриманого в розкодованих координатах, було побудовано просторові поверхні відгуку, які характеризують зміну коефіцієнта однорідності змішування δ залежно від комбінацій основних режимних параметрів: частоти обертання лопатевого валу $n_{лн}$, частоти обертання контейнера n_k (рис. 4.1 а), коефіцієнта режиму вібрації k_v та тривалості змішування t (рис. 4.1 б). Побудовані графіки наочно ілюструють вплив відповідних змінних на якість змішування та дозволяють визначити області ефективних режимів, за яких досягається заданий рівень однорідності.

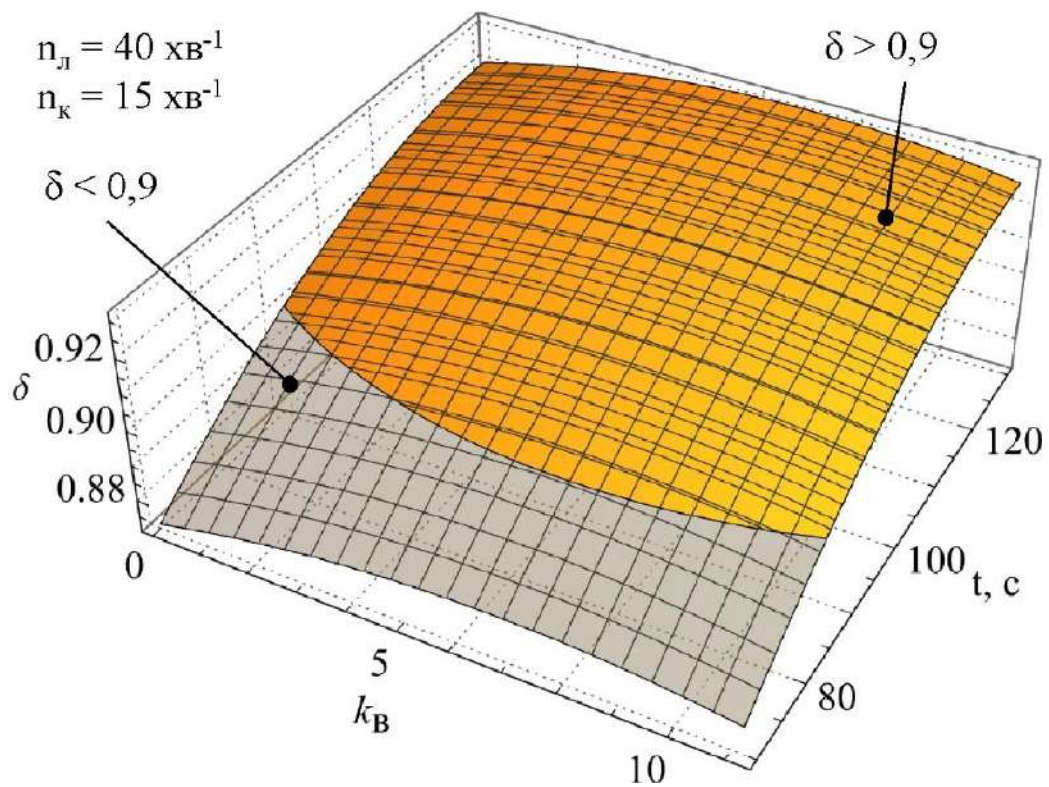
Зображена поверхня відгуку на рисунку 4.1 (а), яка відображає зміну коефіцієнта однорідності змішування δ залежно від частоти обертання лопатевого валу n_d і частоти обертання контейнера n_k за умови фіксованих значень коефіцієнта режиму вібрації $k_v = 5,6$ та тривалості змішування $t=100$. Форма поверхні має опуклий характер із чітко вираженим максимумом у правій верхній області графіка, що свідчить про наявність оптимальної комбінації кінематичних параметрів, за якої забезпечується найвищий рівень однорідності суміші.

Зі зростанням обертів як лопатевого валу, так і контейнера спостерігається підвищення значення δ . При цьому аналіз форми поверхні й коефіцієнтів у рівнянні (4.2) свідчить, що частота обертання лопатевого валу має більший вплив на результат, ніж частота обертання контейнера. Це пояснюється домінуванням зсувного змішування над об'ємним, оскільки активна робота лопатей забезпечує більш інтенсивне переміщення та перерозподіл частинок у масі суміші.

Наявність від'ємних квадратичних членів у рівнянні для обох змінних вказує на ефект насичення: при досягненні певних порогових значень подальше збільшення швидкостей обертання не забезпечує суттєвого приросту однорідності, а іноді може призводити до її незначного зниження внаслідок вторинного розшарування.



a)



б)

Рисунок 4.1 - Залежність коефіцієнта однорідності δ від частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ (а), коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$, тривалості змішування t (б)

Максимальне значення коефіцієнта однорідності $\delta = 0,932$ зафіксовано при $n_{\text{л}} = 40,9 \text{ хв}^{-1}$ і $n_{\text{к}} = 23,9 \text{ хв}^{-1}$. Натомість при мінімальних значеннях обертів ($n_{\text{л}} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 0 \text{ хв}^{-1}$) коефіцієнт однорідності знижується до $\delta = 0,851$, що є недостатнім з технологічної точки зору. Область поверхні, де $\delta > 0,9$, є зоною раціональних режимів, яка характеризується поєднанням середніх і високих значень частот обертання.

На рисунку 4.1 (б) представлено поверхню відгуку, яка ілюструє зміну коефіцієнта однорідності змішування δ залежно від коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$ та тривалості процесу змішування t , за фіксованих значень частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}} = 40 \text{ хв}^{-1}$ і частоти обертання контейнера $n_{\text{к}} = 15 \text{ хв}^{-1}$. Вибрані фіксовані значення відповідають зоні оптимуму, виявленій на рисунку 4.1 (а), і дозволяють більш детально проаналізувати вплив вібраційного режиму та часу як факторів другого рівня впливу.

Форма поверхні підтверджує наявність вираженої нелінійної залежності коефіцієнта однорідності від обох параметрів. Згідно з рівнянням (4.2), вплив кожного з факторів є позитивним у межах дослідженого діапазону (відповідні лінійні коефіцієнти додатні), однак від'ємні квадратичні члени свідчать про ефект насичення. Це проявляється у згладжені поверхні у верхній частині графіка: подальше збільшення $k_{\text{в}}$ або t не дає суттєвого приросту коефіцієнта δ , а в окремих точках – навіть призводить до його незначного зниження.

Максимальне значення коефіцієнта однорідності $\delta = 0,932$ досягається за значень $k_{\text{в}} = 6,83$ та $t = 130 \text{ с}$, а мінімальне – $\delta = 0,851$ – при $k_{\text{в}} = 0$, $t = 70 \text{ с}$. Технологічно доцільною є зона, у якій $\delta \geq 0,9$, що досягається при збалансованому поєднанні параметрів: помірно високий рівень вібраційної інтенсивності та достатня тривалість змішування, за умов активного кінематичного впливу.

Отже, рисунки 4.1 (а) і 4.1 (б) у взаємозв'язку дозволяють сформулювати повну картину впливу основних режимних змінних на однорідність змішування, виокремити технологічно обґрунтовані області їх варіювання та створити

передумови для подальшої оптимізації процесу з урахуванням енергетичних і продуктивних критеріїв.

Отримані графічні залежності (рис. 4.1 а, б) дозволяють візуально оцінити вплив основних режимних параметрів на однорідність змішування, однак для точного визначення умов досягнення заданого рівня однорідності необхідно скористатися аналітичним виразом. З цією метою із рівняння (4.2) було аналітично виділено параметр часу t , зафіксувавши значення коефіцієнта однорідності на рівні $\delta=0,9$ (4.3). Це дозволило отримати рівняння, яке описує залежність тривалості змішування $t_{0,9}$ (4.4) від частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ та коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$:

$$\delta(n_{\text{л}}, n_{\text{к}}, k_{\text{в}}) = 0,9 \rightarrow \quad (4.3)$$

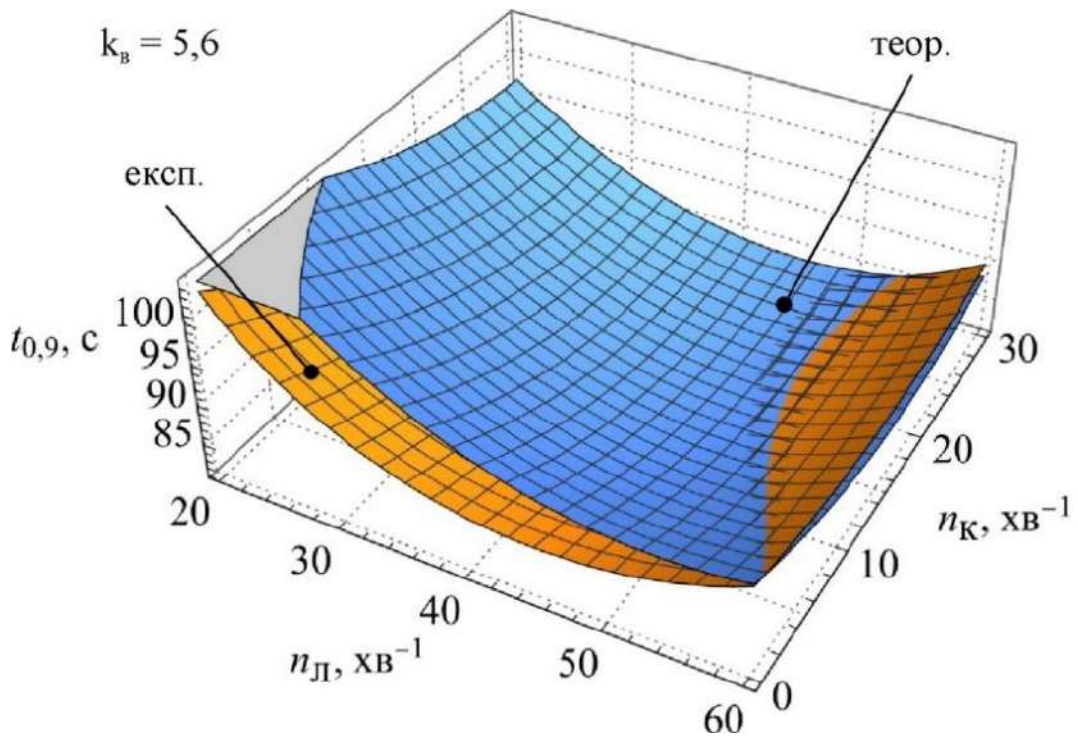
$$\begin{aligned} t_{0,9} = & 0,00609756 (21454 - 0,119523 (-5,23724 \cdot 10^9 + 4,82375 \cdot 10^8 k_{\text{в}} - \\ & - 3,52856 \cdot 10^7 k_{\text{в}}^2 + 1,34523 \cdot 10^8 n_{\text{к}} - 1,80006 \cdot 10^6 n_{\text{к}}^2 + \\ & + 3,26 \cdot 10^8 n_{\text{л}} - 1,18129 \cdot 10^6 n_{\text{к}} n_{\text{л}} - 3,63428 \cdot 10^6 n_{\text{л}}^2)^{0,5}). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Залежність (4.4) має складну багатофакторну структуру з квадратичними та комбінованими членами, що відповідає моделі другого порядку. Вона враховує як індивідуальні впливи кожного з параметрів, так і їхню взаємодію, зокрема вплив перехресного добутку $n_{\text{к}} n_{\text{л}}$. Це дозволяє описати ефект зміни умов перемішування навіть при невеликих відхиленнях від базових значень.

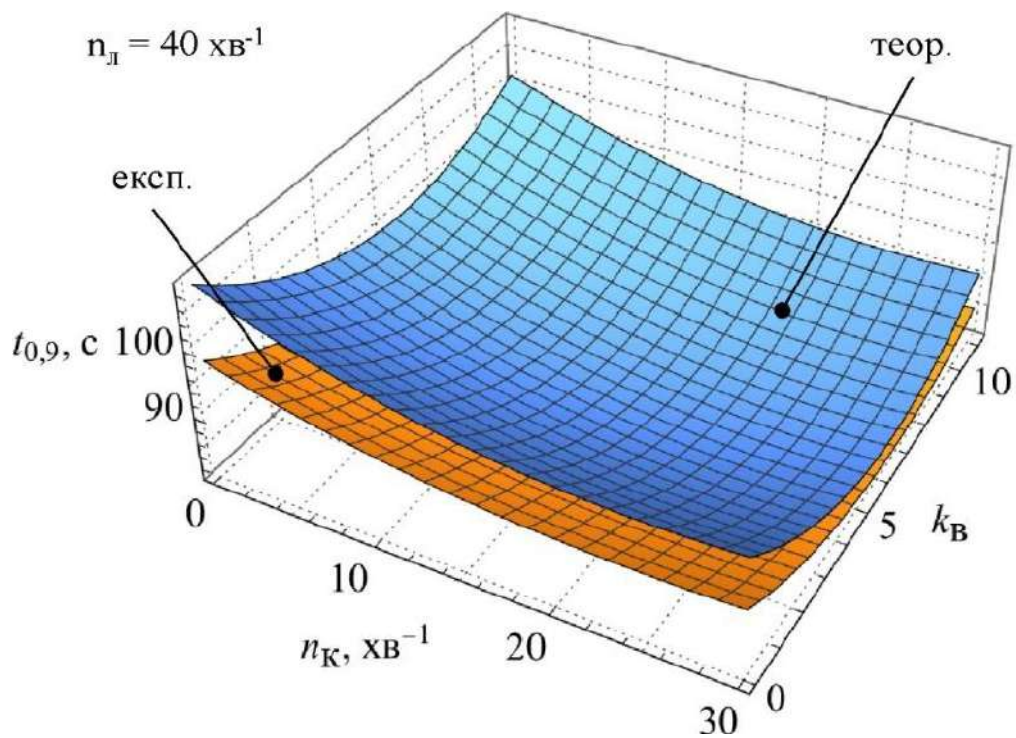
На рисунках 4.2 (а) та 4.2 (б) представлено графічне порівняння залежності часу досягнення заданої однорідності суміші $t_{0,9}$ побудованої на основі експериментальної моделі (4.4), з теоретичною залежністю (2.22). Обидві поверхні дають змогу проаналізувати узгодженість між експериментальними даними й аналітичним описом процесу.

На рисунку 4.2 (а) відображено просторову залежність $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$ та частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ при фіксованому коефіцієнті режиму вібрації $k_{\text{в}} = 5,6$. Поверхня має виражену опуклу форму з мінімумом у центральній області, що відповідає оптимальному поєднанню параметрів, за якого час змішування є мінімальним. Зростання або зниження будь-якого з параметрів за межі раціонального інтервалу призводить

до зростання $t_{0,9}$, що пов'язано з втратою ефективності змішування внаслідок надлишкових або недостатніх механічних впливів.



а)



б)

Рисунок 4.2 - Залежність часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу n_L , частоти обертання контейнера n_K (а), коефіцієнта режиму вібрації k_B , частоти обертання контейнера n_K (б)

На рисунку 4.2 б показано залежність $t_{0,9}$ від частоти обертання контейнера n_k та коефіцієнта режиму вібрації k_v при фіксованій частоті обертання лопатевого валу $n_d = 40 \text{ хв}^{-1}$. Аналогічно до попереднього випадку, поверхня характеризується наявністю області мінімуму й ефектом насичення при граничних значеннях параметрів. Підвищення k_v у поєднанні з помірними значеннями n_k сприяє скороченню тривалості змішування, тоді як надмірна інтенсивність вібрацій або недостатній обертальний рух контейнера можуть зумовити зниження ефективності перемішування.

Коефіцієнт кореляції між результатами, отриманими за рівняннями (4.4) і (2.22) становить 0,87, що, згідно зі шкалою Чеддока [178], вказує на високий ступінь зв'язку між ними. Це підтверджує правильність побудови регресійної моделі та її узгодженість із фундаментальною аналітичною залежністю.

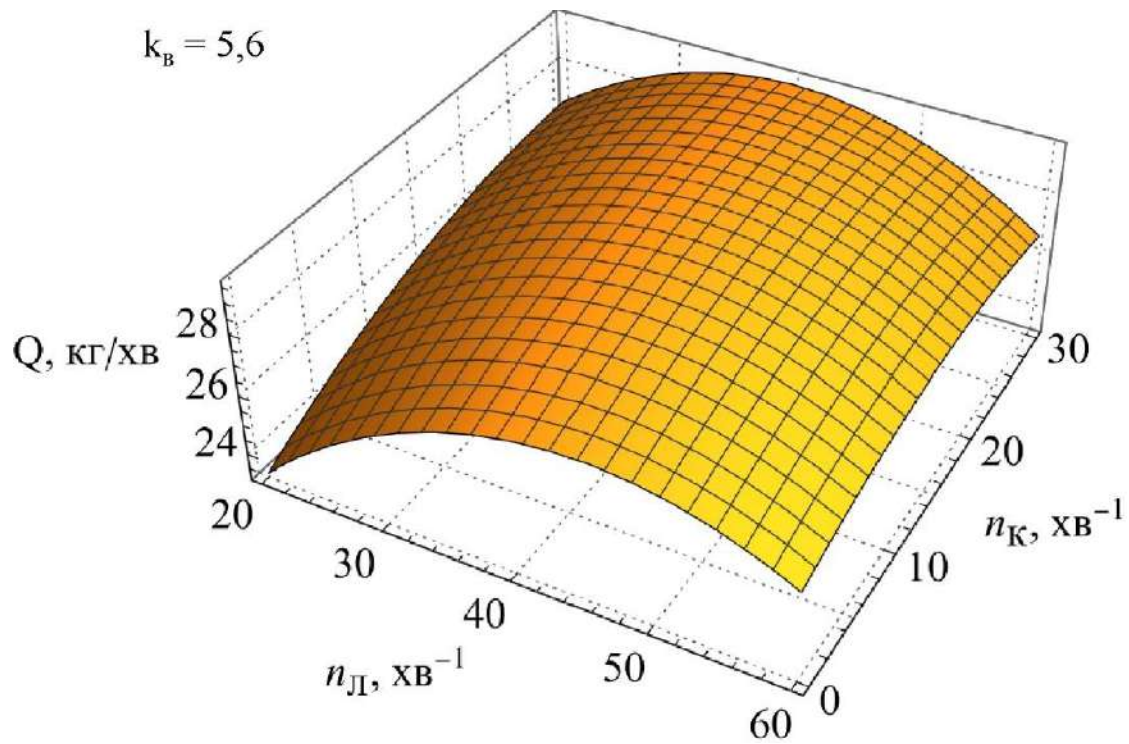
З огляду на вище зазначене, можна стверджувати, що результати, зображені на рисунках 4.2 (а) і 4.2 (б), підтверджують ефективність застосованого методу моделювання, демонструють надійність отриманих рівнянь для опису процесу досягнення заданої однорідності та створюють підґрунтя для подальшої оптимізації параметрів змішування.

4.3 Емпірична модель продуктивності змішувача та її аналіз

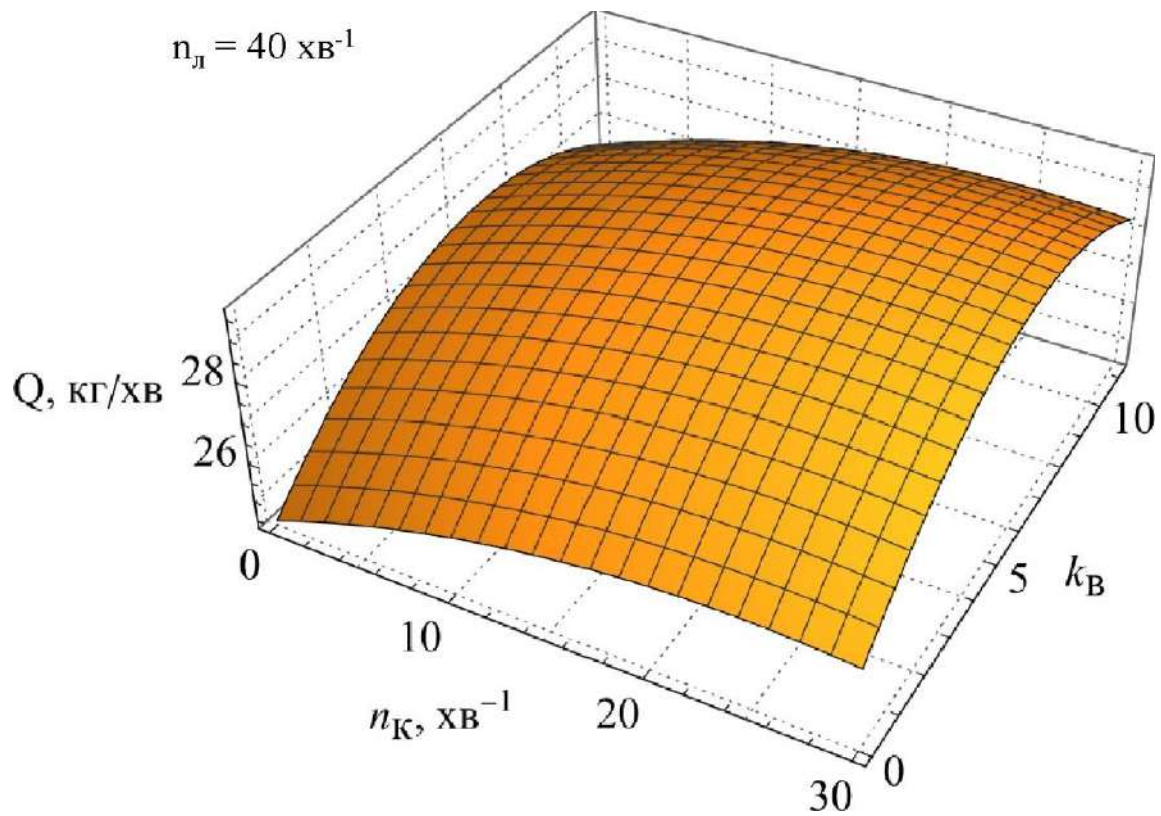
Скориставшись отриманими залежностями тривалості змішування $t_{0,9}$ (4.4) та розрахунковим співвідношенням продуктивності (3.1), визначено емпіричну залежність для продуктивності змішувача Q , яка враховує вплив основних режимних параметрів. У загальному вигляді ця залежність має форму:

$$Q = 2400 / (0,00609756 (21454 - 0,119523 (-5,23724 \cdot 10^9 + 4,82375 \cdot 10^8 k_v - 3,52856 \cdot 10^7 k_v^2 + 1,34523 \cdot 10^8 n_k - 1,80006 \cdot 10^6 n_k^2 + 3,26 \cdot 10^8 n_d - 1,18129 \cdot 10^6 n_k n_d - 3,63428 \cdot 10^6 n_d^2)^{0,5})). \quad (4.5)$$

Рівняння (4.5) дозволяє безпосередньо оцінити вплив режимних параметрів на продуктивність, що є важливим критерієм ефективності роботи змішувача.



а)



б)

Рисунок 4.3 - Залежність продуктивності змішувача Q від частоти обертання лопатевого валу n_L , частоти обертання контейнера n_K (а), коефіцієнта режиму вібрації k_B , частоти обертання контейнера n_K (б)

На рисунку 4.3 зображено просторові залежності продуктивності змішувача Q , кг/хв, від основних технологічних параметрів: частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ та коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$, отримані на основі рівняння (4.5). Обидві поверхні дозволяють візуалізувати характер впливу двох змінних за фіксованого третього параметра.

На рисунку 4.3 (а), показано залежність продуктивності від частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$ та частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ при фіксованому коефіцієнті режиму вібрації $k_{\text{в}} = 5,6$. Поверхня має опуклу форму з чітко вираженим максимумом у правій верхній частині графіка. Найвищі значення продуктивності досягають $Q = 28,4$ кг/хв при $n_{\text{л}} = 30$ хв⁻¹ та $n_{\text{к}} = 30$ хв⁻¹. У той час як при мінімальних значеннях параметрів ($n_{\text{л}} = 20$ хв⁻¹, $n_{\text{к}} = 0$ хв⁻¹) спостерігається зменшення продуктивності до $Q = 23,7$ кг/хв. Поступове зростання Q при підвищенні обох параметрів свідчить про їх синергетичний вплив на ефективність подачі матеріалу.

На рисунку 4.3 (б) зображено залежність продуктивності від коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$ та частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ при фіксованій частоті обертання лопатевого валу $n_{\text{л}} = 40$ хв⁻¹. Тут також спостерігається зона високої продуктивності: максимальне значення становить $Q = 28,6$ кг/хв при $k_{\text{в}} = 6,5$ та $n_{\text{к}} = 30$ хв⁻¹. Натомість у зоні низьких значень параметрів ($k_{\text{в}} = 0$, $n_{\text{к}} = 0$) продуктивність падає до $Q = 24,0$ кг/хв. Характер поверхні вказує на домінуючий позитивний вплив $k_{\text{в}}$, особливо при підвищених значеннях $n_{\text{к}}$, тоді як окремо зростання $k_{\text{в}}$ без обертання контейнера не забезпечує ефективного переміщення матеріалу.

Отже, обидві поверхні (рис. 4.3 а і 4.3 б) демонструють наявність оптимальних поєднань режимних параметрів, за яких досягається найвища продуктивність змішувача. Це дозволяє обґрунтовано визначати раціональні режими роботи обладнання відповідно до заданих виробничих завдань.

4.4 Енергетична оцінка роботи вібраційного змішувача

Для визначення впливу режимних параметрів на енергоспоживання змішувача побудовано регресійну модель залежності споживаної потужності P , Вт, від частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$ та коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$. Залежність (4.6) отримано в закодованому вигляді за результатами обробки експериментальних даних у середовищі Wolfram Cloud [131]:

$$\begin{aligned}
 P = & 716,819 + 198,275 x_1 + 48,325 x_1^2 + 64,625 x_2 - 0,35 x_1 x_2 + \\
 & + 32,225 x_2^2 + 140,5 x_5 + 1,5 x_1 x_5 - 1,4 x_2 x_5 + 71,575 x_5^2 - \\
 & - 1,34667 x_6 - 0,05 x_1 x_6 + 1,375 x_2 x_6 + 0,125 x_5 x_6 - 0,438095 x_6^2.
 \end{aligned}
 \quad (4.6)$$

Статистична обробка рівняння (4.6) наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Статистичний аналіз коефіцієнтів регресії рівняння (4.6)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Ст'юдента	Асимптотична значимість
a_{00}	716,819	1,37941	519,655	$2,56958 \cdot 10^{-111}$
a_{10}	198,275	0,744969	266,152	$6,86998 \cdot 10^{-94}$
a_{20}	64,625	0,744969	86,7486	$9,07931 \cdot 10^{-65}$
a_{50}	140,5	0,744969	188,598	$6,33434 \cdot 10^{-85}$
a_{60}	- 1,34667	0,769401	- 1,75028	0,0851821
a_{12}	- 0,35	1,05355	- 0,332212	0,740887
a_{15}	1,5	1,05355	1,42376	0,159695
a_{16}	- 0,05	1,05355	- 0,0474588	0,962305
a_{25}	- 1,4	1,05355	- 1,32885	0,18893
a_{26}	1,375	1,05355	1,30512	0,196836
a_{56}	0,125	1,05355	0,118647	0,905951
a_{11}	48,325	1,09656	44,0694	$2,07638 \cdot 10^{-47}$
a_{22}	32,225	1,09656	29,3872	$2,54123 \cdot 10^{-37}$
a_{55}	71,575	1,09656	65,272	$1,962 \cdot 10^{-57}$
a_{66}	- 0,438095	1,30052	- 0,33686	0,737398
Показник	DF	SS	MS	Критерій Фішера
Модель	15	$5,03968 \cdot 10^7$	$3,35979 \cdot 10^6$	151347
Помилка	60	1331,95	22,1992	1,93

Відкидаючи незначущі коефіцієнти регресії рівняння (4.6) на основі порівняння їхніх модулів із табличним значенням критерію Стюдента $t_{\text{табл}} = 2,01$ [178], отримуємо залежність потужності P , що споживається змішувачем, від факторів досліджень у розкодованому вигляді (4.7):

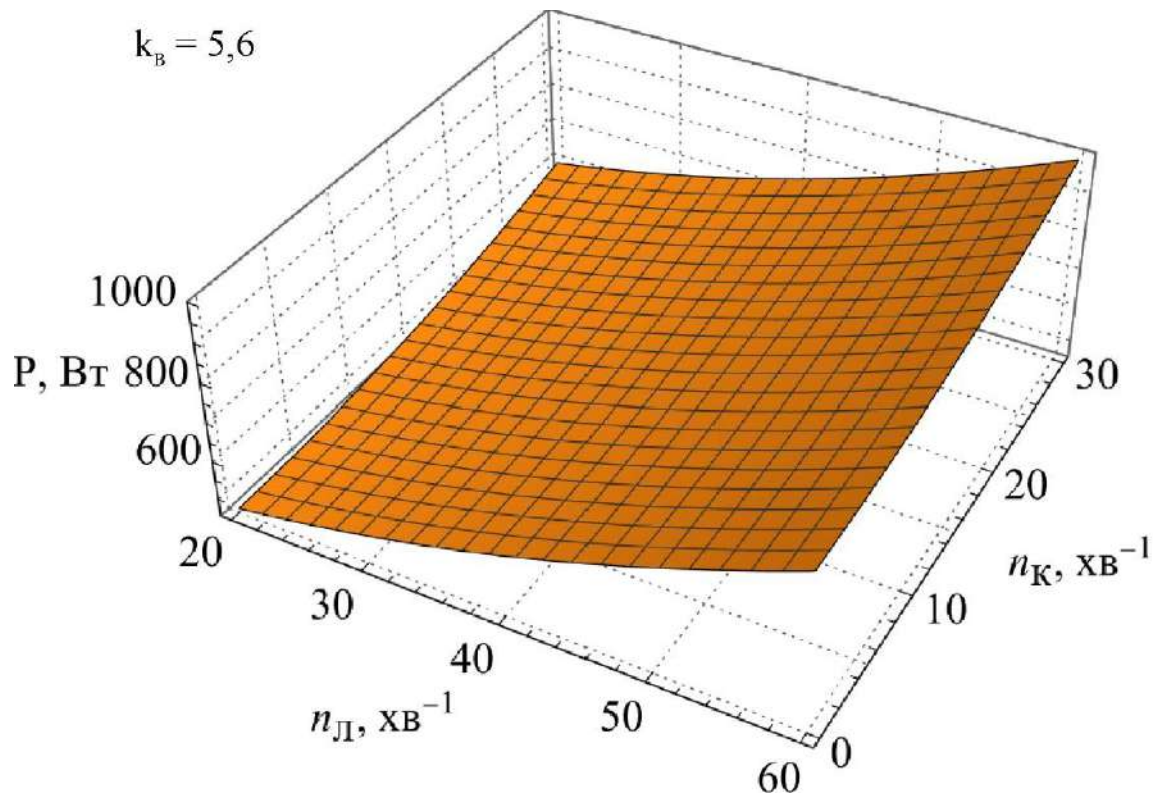
$$P = 412,244 - 0,473214 k_v + 2,28237 k_v^2 + 0,0116667 n_k + 0,143222 n_k^2 + 0,24875 n_l + 0,120812 n_l^2. \quad (4.7)$$

На рисунку 4.4 представлено просторові залежності потужності P , що споживається змішувачем, від основних режимних параметрів. Поверхні побудовані на основі рівняння (4.7), що дозволяє оцінити, як змінюється енергоспоживання залежно від частоти обертання лопатевого валу n_l , частоти обертання контейнера n_k (рис.4.4 а), коефіцієнта режиму вібрації k_v та тривалості змішування t (рис.4.4 б).

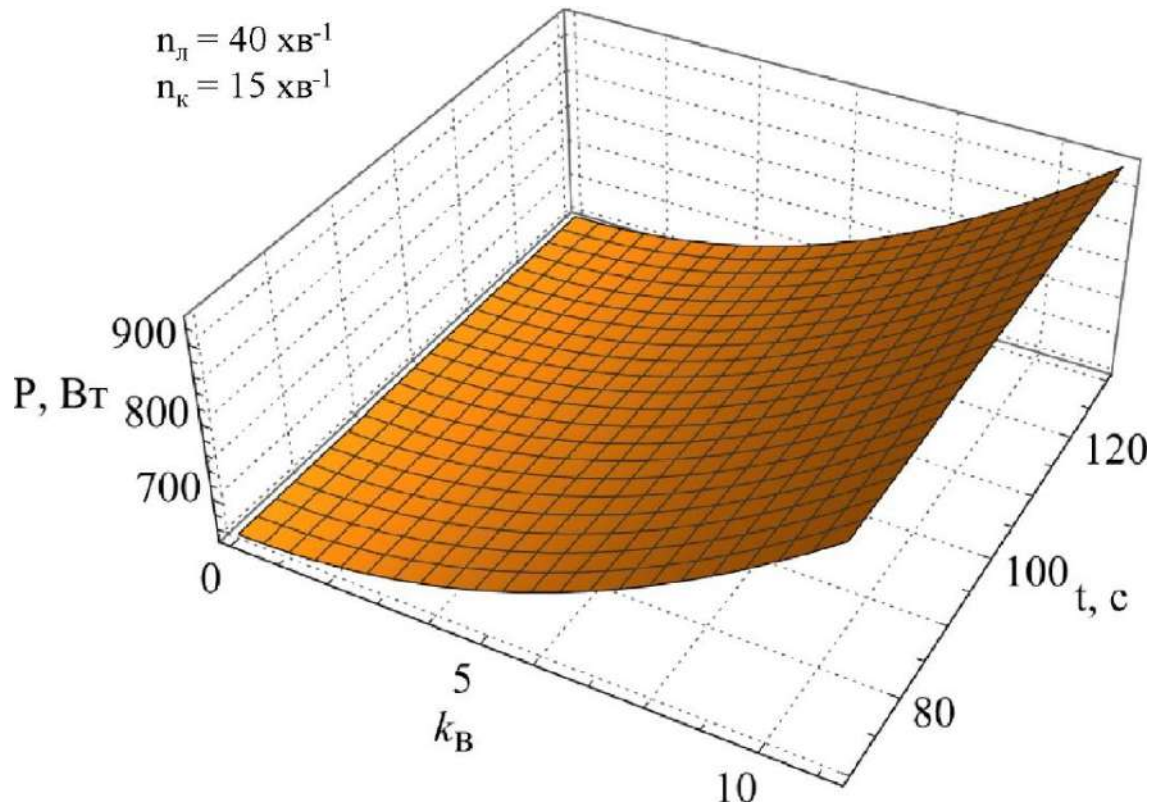
На рисунку 4.4 (а) зображено залежність потужності від частоти обертання лопатевого валу n_l і частоти обертання контейнера n_k за фіксованого значення $k_v = 5,6$. Поверхня демонструє зростання потужності зі збільшенням обох параметрів, що пояснюється зростанням опору руху матеріалу та навантаженням на електроприводи.

На рисунку 4.4 (б) зображено зміну потужності залежно від коефіцієнта режиму вібрації k_v та тривалості змішування t при $n_l = 40 \text{ хв}^{-1}$ і $n_k = 15 \text{ хв}^{-1}$. Залежність має плавний характер, з монотонним зростанням енергоспоживання у напрямку збільшення обох параметрів. Таке зростання зумовлене тривалим часом навантаження та активізацією вібраційної дії, що потребує додаткової енергії. У практичному сенсі це означає, що навіть за помірних швидкостей, подовження процесу або посилення вібраційного впливу суттєво впливає на загальні енергетичні витрати.

Мінімальне значення споживаної потужності становить $P = 465 \text{ Вт}$ при $n_l = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_k = 0 \text{ хв}^{-1}$, $k_v = 0,1$. Максимум досягається при $n_l = 60 \text{ хв}^{-1}$, $n_k = 30 \text{ хв}^{-1}$ і становить $P = 1272 \text{ Вт}$ при $k_v = 11,2$, що вказує на суттєве навантаження в інтенсивних режимах змішування.



a)



б)

Рисунок 4.4 - Залежність потужності P , що споживається змішувачем, від частоти обертання лопатевого валу n_L (а), частоти обертання контейнера n_K , коефіцієнта режиму вібрації k_B , тривалості змішування t (б)

Отримані поверхні (рис. 4.4) дозволяють не лише оцінити вплив окремих факторів на споживану потужність, а й виокремити області, у яких забезпечується оптимальне співвідношення між енергоспоживанням та ефективністю процесу змішування. Це має принципове значення для задач енергоефективного керування технологічним процесом.

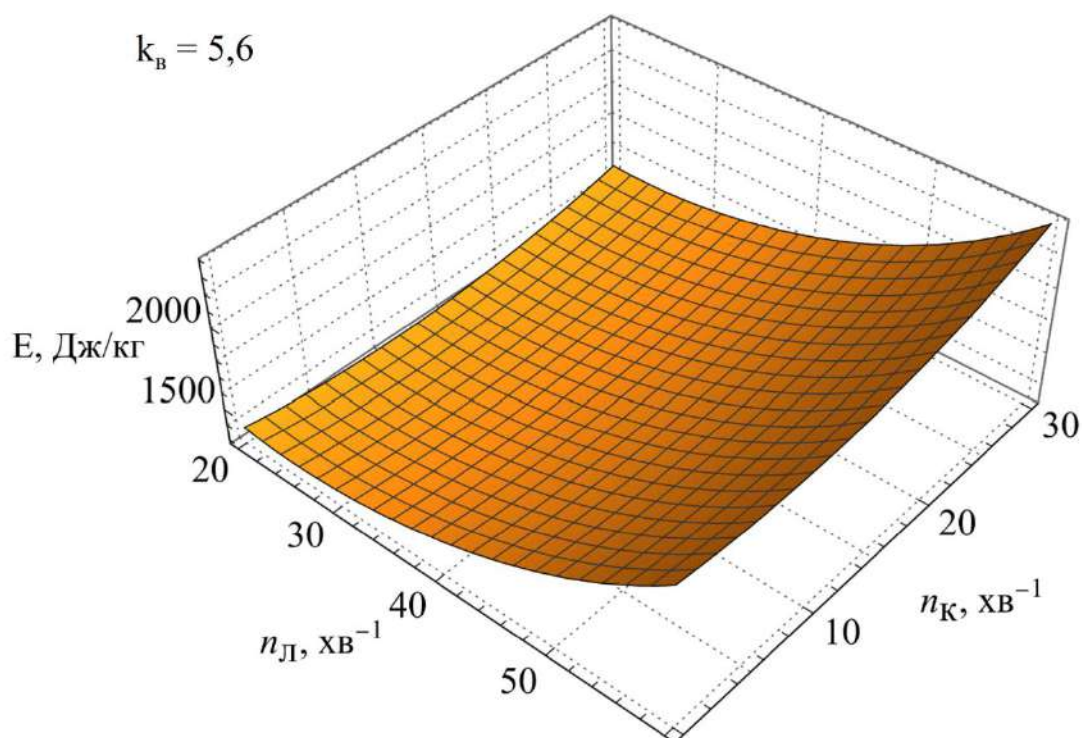
4.5 Питомі витрати енергії при роботі вібраційного змішувача

Для оцінювання енергетичної ефективності роботи змішувача використано показник питомих витрат енергії E , який характеризує кількість електричної енергії, необхідної для отримання одиниці готової продукції при забезпеченні заданого рівня однорідності. Такий підхід дозволяє об'єктивно оцінити економічність процесу змішування з урахуванням продуктивності, тривалості та потужності споживання.

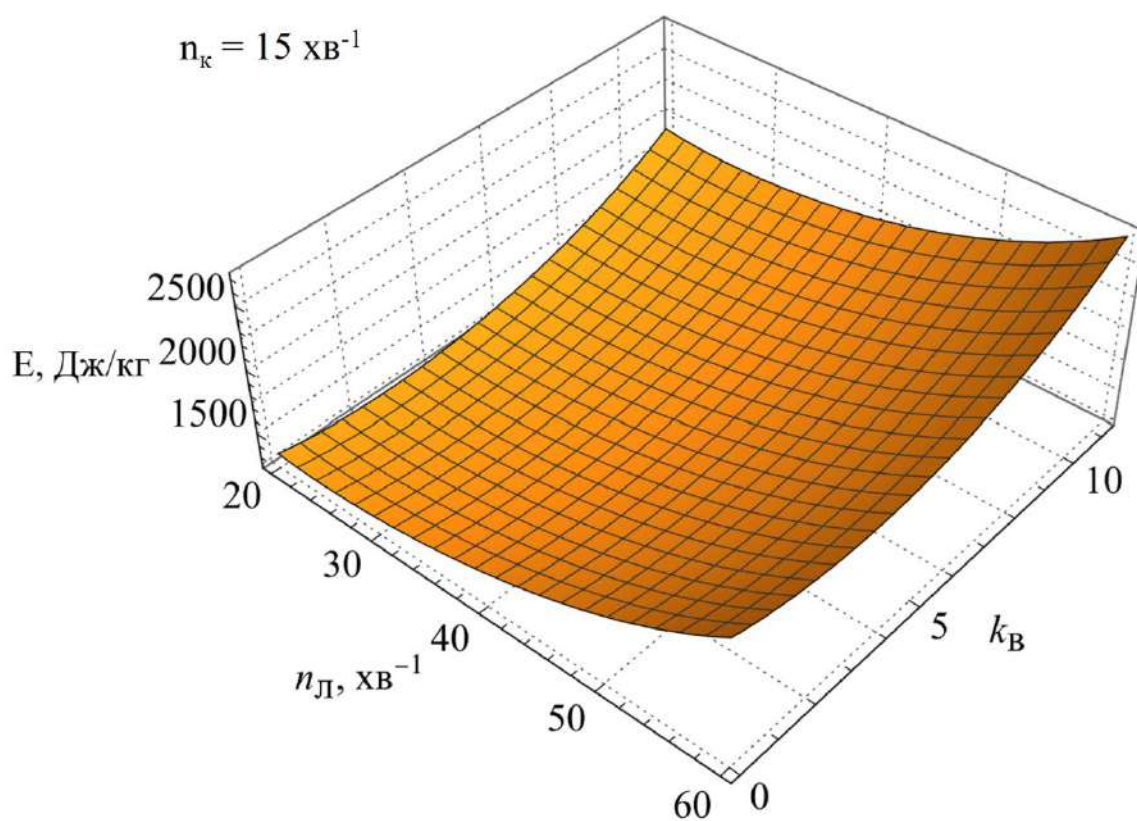
На основі рівнянь (3.2), (4.5) і (4.7) отримано узагальнену залежність питомих витрат енергії E (4.8), яка враховує вплив основних режимних параметрів – частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}}$, частоти обертання контейнера $n_{\text{к}}$, коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}}$:

$$\begin{aligned}
 E = & (412,244 - 0,473214 k_{\text{в}} + 2,28237 k_{\text{в}}^2 + 0,0116667 n_{\text{к}} + \\
 & + 0,143222 n_{\text{к}}^2 + 0,24875 n_{\text{л}} + 0,120812 n_{\text{л}}^2) (0,00609756 (21454 - \\
 & - 0,119523 (- 5,23724 \cdot 10^9 + 4,82375 \cdot 10^8 k_{\text{в}} - 3,52856 \cdot 10^7 k_{\text{в}}^2 + \\
 & + 1,34523 \cdot 10^8 n_{\text{к}} - 1,80006 \cdot 10^6 n_{\text{к}}^2 + 3,26 \cdot 10^8 n_{\text{л}} - 1,18129 \cdot 10^6 n_{\text{к}} n_{\text{л}} - \\
 & - 3,63428 \cdot 10^6 n_{\text{л}}^2)^{0,5})) / 40.
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

На рисунку 4.5 представлено просторові залежності питомих витрат енергії E , Дж/кг, що характеризують енергоефективність змішування при різних поєднаннях режимних параметрів. Поверхні побудовано на основі рівняння (4.8), яке враховує вплив тривалості змішування, потужності, продуктивності, а також кінематичних і вібраційних характеристик системи.



a)



б)

Рисунок 4.5 - Залежність питомих витрат енергії E змішувача від частоти обертання лопатевого валу n_L , частоти обертання контейнера n_K (а), коефіцієнта режиму вібрації k_B , частоти обертання лопатевого валу n_L (б)

На рисунку 4.5 (а) показано зміну E залежно від частоти обертання лопатевого валу n_L та частоти обертання контейнера n_K при фіксованому коефіцієнті режиму вібрації $k_B = 5,6$. Поверхня має увігнутий характер із зоною мінімуму поблизу $n_L = 23,3 \text{ хв}^{-1}$ та $n_K = 10,1 \text{ хв}^{-1}$. У цих умовах питомі витрати енергії становлять $E = 1228 \text{ Дж/кг}$. Зі зростанням обох частот витрати енергії зростають, досягаючи максимуму $E = 3000 \text{ Дж/кг}$ при $n_L = 60 \text{ хв}^{-1}$, $n_K = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_B = 11,2$. Такий характер зміни пояснюється збільшенням потужності без пропорційного зростання продуктивності на межі режимного діапазону.

На рисунку 4.5 (б) показано залежність E від коефіцієнта режиму вібрації k_B та частоти обертання лопатевого валу n_L при фіксованій частоті обертання контейнера $n_K = 15 \text{ хв}^{-1}$. Поверхня також демонструє зростання енерговитрат зі збільшенням інтенсивності параметрів, при цьому найнижчі значення спостерігаються в області помірних значень $n_L = 30\text{-}40 \text{ хв}^{-1}$ та $k_B = 2,69$. Зона мінімуму відповідає найбільш збалансованому режиму, коли час змішування, потужність і продуктивність перебувають у раціональному співвідношенні.

Отже, отримані результати дозволяють встановити область мінімальних питомих витрат енергії й обґрунтувати доцільні межі режимів експлуатації змішувача з урахуванням енергоощадності.

У результаті узагальнення залежностей, побудованих за експериментальними даними, визначено раціональні режимні параметри роботи вібраційного змішувача, що забезпечують оптимальне поєднання якості змішування, продуктивності та енергоефективності.

Раціональними параметрами є:

- частота обертання лопатевого валу $n_L = 23,3 \text{ хв}^{-1}$,
- частота обертання контейнера $n_K = 10,1 \text{ хв}^{-1}$,
- коефіцієнт режиму вібрації $k_B = 2,69$.

При цих значеннях забезпечуються:

- споживана потужність $P = 513 \text{ Вт}$,
- продуктивність $Q = 25,1 \text{ кг/год}$,
- тривалість досягнення заданої однорідності $t_{0,9} = 95,7 \text{ с}$,

– питомі витрати енергії $E = 1228$ Дж/кг.

4.6 Висновки до четвертого розділу

1. Визначено діапазони зміни основних конструктивно-режимних параметрів: частоти обертання лопатевого валу $n_{\text{л}} = 20\text{-}60$ хв⁻¹, контейнера $n_{\text{к}} = 0\text{-}30$ хв⁻¹, коефіцієнта режиму вібрації $k_{\text{в}} = 0\text{-}12$, часу змішування $t = 70\text{-}130$ с. Як вихідні показники досліджувалися коефіцієнт однорідності суміші δ , продуктивність Q , споживана потужність P , питомі витрати енергії E та тривалість змішування до заданої якості $t_{0,9}$.

2. Встановлено, що коефіцієнт однорідності суміші δ істотно залежить від тривалості змішування й інтенсивності дії механічних і вібраційних факторів. Максимальне значення $\delta = 0,932$ досягнуто при $n_{\text{л}} = 40,9$ хв⁻¹, $n_{\text{к}} = 23,9$ хв⁻¹, $k_{\text{в}} = 6,83$, $t = 130$ с. Мінімальний рівень $\delta = 0,851$ спостерігається при $n_{\text{л}} = 20$ хв⁻¹, $n_{\text{к}} = 0$ хв⁻¹, $k_{\text{в}} = 0$, $t = 70$ с. Побудована модель дозволяє прогнозувати якість суміші та виявляти умови, за яких забезпечується необхідна однорідність, що є основним критерієм ефективності змішування.

Визначено, що для досягнення порогового значення однорідності $\delta = 0,9$ мінімальна тривалість змішування $t_{0,9}$ становить 70 с при раціональних режимах, тоді як при нефективних комбінаціях параметрів цей час збільшується до 130 с. Тому досягнення заданої якості змішування можливе як за рахунок підвищення тривалості, так і за умови оптимізації частот і рівня вібрації.

3. Порівняння результатів, отриманих за експериментальними регресійними моделями, з теоретичними залежностями показало високу ступінь узгодженості. Зокрема, для залежності тривалості змішування $t_{0,9}$, розрахованої за рівняннями (4.4) та (2.22), коефіцієнт кореляції становив 0,87, що відповідає високому рівню зв'язку за шкалою Чеддока. Це дозволяє використовувати спрощені теоретичні залежності для попередніх розрахунків і аналітичного обґрунтування режимів змішування, а також свідчить про надійність отриманих результатів.

4. Продуктивність змінюється в межах від 23,7 до 28,6 кг/хв. Максимум досягається при $n_{\text{л}} = 40 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 6,5$, що відповідає поєднанню активного перемішування та вібраційної дії. У той час як при мінімальних значеннях параметрів ($n_{\text{л}} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 0 \text{ хв}^{-1}$) спостерігається зменшення продуктивності до $Q = 23,7 \text{ кг/хв}$. Отримана модель дозволяє прогнозувати вихід готової суміші залежно від умов експлуатації.

5. Потужність змішувача залежить від усіх основних режимних параметрів і змінюється в межах 465-1272 Вт. Мінімальне енергоспоживання зафіксовано при $n_{\text{л}} = 20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 0 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 0,1$, а максимальне – при $n_{\text{л}} = 60 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 11,2$. Найбільший вплив на потужність має частота обертання лопатевого валу.

6. Аналіз питомих витрат енергії E показав, що їх величина тісно пов'язана як із потужністю, так і з продуктивністю змішувача. Мінімальні витрати $E = 1228 \text{ Дж/кг}$ спостерігаються при $n_{\text{л}} = 23,3 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 10,1 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 2,69$, а максимальні – $E = 3000 \text{ Дж/кг}$ при $n_{\text{л}} = 60 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}} = 30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}} = 11,2$. Надмірне зростання швидкостей і вібрації не призводить до пропорційного збільшення продуктивності, що знижує енергоефективність. Визначено область оптимального балансу між витратою енергії та обсягом готової суміші.

7. Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що ефективна робота вібраційного змішувача досягається за умов раціонального поєднання режимних параметрів, при якому забезпечується висока однорідність суміші, достатній рівень продуктивності, прийнятна тривалість процесу та мінімальні питомі енерговитрати. Найкращі показники було досягнуто при частоті обертання лопатевого валу близько $n_{\text{л}} = 23,3 \text{ хв}^{-1}$, контейнера $n_{\text{к}} = 10,1 \text{ хв}^{-1}$ та коефіцієнті режиму вібрації на рівні $k = 2,69$, при цьому $P = 513 \text{ Вт}$, $Q = 25,1 \text{ кг/хв}$, $t_{0,9} = 95,7 \text{ с}$, $E = 1228 \text{ Дж/кг}$.

РОЗДІЛ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Визначення технічного рівня розробки в порівнянні з існуючими змішувачами

Сучасний ринок сільськогосподарської техніки характеризується наявністю широкого спектру різноманітних машин як вітчизняних, так і закордонних. Вибір споживачем тієї або іншої машини залежить від критерію оцінки її ефективності. Такими критеріями можуть бути продуктивність, питомі енерговитрати на привод, маса машини та багато інших. Кожний окремо взятий критерій не може дати однозначну відповідь про переваги та недоліки машини, тобто визначити її конкурентоздатність серед інших машин, які призначені для виконання аналогічних технологічних процесів. Зробити однозначний висновок про конкурентоздатність машини можна тільки в тому випадку, якщо скористатися узагальнюючим показником, який враховує окремі показники та ступінь їх впливу на нього [179].

Існує методика визначення конкурентоздатності технологій вирощування сільськогосподарських культур за комплексним коефіцієнтом конкурентоздатності, який враховує енергетичні, екологічні, економічні показники порівнювальних технологій (базової та нової) та якість машин, які застосовуються при реалізації цих технологій. Були спроби аналогічним чином порівняти деякі машини для тваринництва [179, 181].

Вказана методика більш прийнятна для порівняння технологій вирощування сільськогосподарських культур, тому що показники, які використовуються для визначення комплексного коефіцієнта конкурентоздатності, більш характерні саме для технологій (наприклад, коефіцієнт енергетичної ефективності технологій). Крім того, дана методика дає змогу порівняти два об'єкти. У випадку, якщо порівнюється між собою більша кількість об'єктів, застосування даної методики дещо ускладнюється.

Для порівняння окремих машин використовують узагальнюючі показники оцінки двох видів [180]. Обидва визначаються як середнє геометричне від окремих оціночних показників, але при визначенні одного із них враховують ступені вагомості окремих показників.

Саме таку методику використано для визначення узагальнюючих показників для чотирьох змішувачів періодичної дії: ВЗШ-2, А1-ДЗІ, А9-ДЗГ-0,1 та ВЗ-72 (змішувача, який розробляється). Показниками для оцінки технічного рівня машин були прийнято: продуктивність машин (кг/хв), питомі енерговитрати на потужність привода (Дж/кг), габаритні розміри змішувачів, що виражені в одиницях об'єму, який займає кожен з них (м³), маса (кг) [5, 179, 185]. Показник якості технологічного процесу – коефіцієнт однорідності суміші δ , прийнятий для всіх машин таким, що відповідає вимогам, тобто знаходиться в межах 80-90%, тому він не використовується для визначення узагальнюючих показників.

За першим способом узагальнюючий показник оцінки визначаємо таким чином:

$$D^I = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n} \quad (5.1)$$

де $d_1, d_2 \dots d_n$ – перевага по окремо взятих показниках.

Перевага d_i визначаються як:

$$d_i = \exp\left[-e^{-(x'_i - 4)}\right] \quad (5.2)$$

де x'_i - значення кожного i -того показника по безрозмірній шкалі.

Інтервали варіювання $d_{\min}$, $d_{\max}$ (рис. 5.1) кожного показника залежать від його ступеня вагомості, тому для продуктивності $d_{\max} = 0,639$, $d_{\min} = 0,361$; для питомих енергозатрат $d_{\max} = 0,6425$, $d_{\min} = 0,3575$; для об'єму, який займає змішувач $d_{\max} = 0,6365$, $d_{\min} = 0,3635$; для маси $d_{\max} = 0,582$, $d_{\min} = 0,418$.

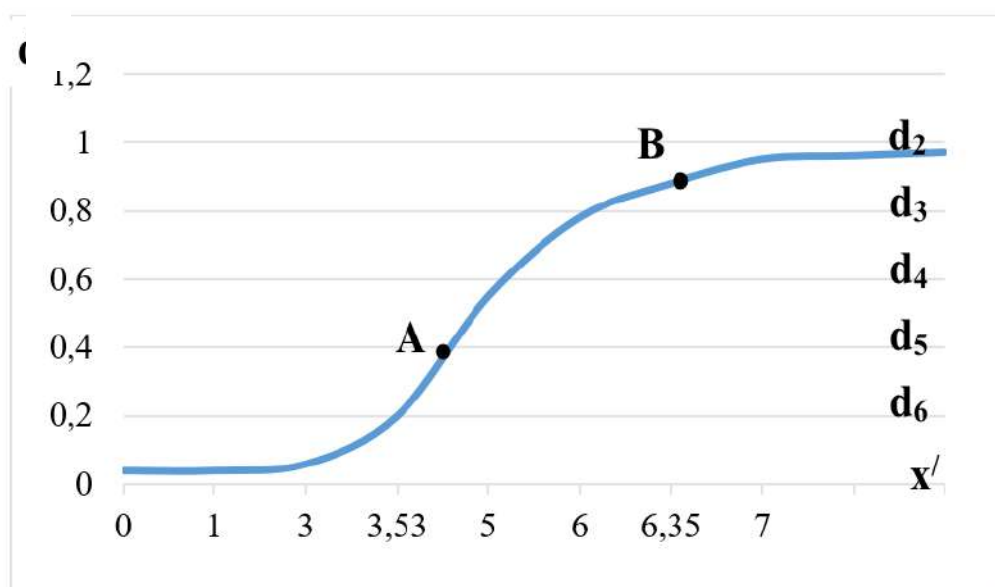


Рисунок 5.1 - Шкала значень коефіцієнта переваги (бажаності):
 $d_1 = 1,0$ – максимально можливий рівень якості; $d_2 = 1,0 \dots 0,8$ – допустимий і відмінний; $d_3 = 0,8 \dots 0,6$ – допустимий і добрий; $d_4 = 0,6 \dots 0,37$ – допустимий і достатній; $d_5 = 0,37 \dots 0,2$ – небажаний рівень; $d_6 = 0,2 \dots 0,0$ – недопустимий рівень

Значення показників x_i переносимо на безрозмірну шкалу x' з урахуванням масштабних лінійних коефіцієнтів:

$$M'_x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{(x'_B - x'_A)}, \quad (5.3)$$

де $x_{\max}$ і $x_{\min}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення окремих номінальних показників машин;

x'_B – значення безрозмірної шкали x' , яке відповідає $d_{\max} = 0,91$;

x'_A – значення безрозмірної шкали x' , яке відповідає $d_{\min} = 0,2$.

При цьому значення x'_A і x'_B визначаємо за формулами:

$$x'_B = 4 + [-\ln(-\ln d_{\max})] \quad (5.4)$$

$$x'_A = 4 + [-\ln(-\ln d_{\min})] \quad (5.5)$$

Кожне статистичне значення окремого показника оцінки машини x_i переводимо в масштабні значення шкали за формулами:

– для показників, збільшення яких покращує конкурентоздатність машини

(продуктивність):

$$X'_i = X'_A + \frac{X_{ic} - X_{imin}}{M'_x} \quad (5.6)$$

– для показників, збільшення яких погіршує конкурентоздатність машини (питомі енерговитрати на привод, об'єм, який займає змішувач, маса машини):

$$X_i = X'_B - \frac{X_{ic} - X_{imin}}{M'_x} \quad (5.7)$$

де X_{ic} – статистичне значення i -того показника.

Після чого знаходимо всі показники d_i за формулою (5.2), потім узагальнюючий D' -й показник за формулою (5.1), максимальне значення якого відповідає кращому варіанту машини.

Аналогічно першому способу, при визначенні узагальнюючого показника другого виду, кожний окремий показник перетворюємо в безрозмірну величину за такими формулами:

– для показників, збільшення яких покращує конкурентоздатність машини (продуктивність):

$$d_i = d_{imax} + (d_{imin} - d_{imax}) \cdot (X_i - X_{imax}) / (X_{imin} - X_{imax}). \quad (5.8)$$

– для показників, збільшення яких погіршує конкурентоздатність машини (питомі енерговитрати на привод, габаритні розміри, маса машини):

$$d_i = d_{imax} + (d_{imin} - d_{imax}) \cdot (X_i - X_{imax}) / (X_{imin} - X_{imax}). \quad (5.9)$$

де X_{imax} , X_{imin} – граничні значення окремих показників;

d_{imin} , d_{imax} – безрозмірні оцінки показника.

Для розрахунків ми прийняли $d_{imax} = 5$, $d_{imin} = 1$.

Узагальнюючу оцінку визначаємо як середнє геометричне окремих значень:

$$D'' = \sum_{i=1}^n a_i \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i^{a_i}} \quad (5.10)$$

де a_i – ступінь вагомості i -того показника.

Ступінь вагомості показників визначаємо методом граничних і номінальних значень за формулою:

$$a_i = \frac{1 - q_i}{\sum_{i=1}^n (1 - q_i)} \quad (5.11)$$

де q_i – доля покращення i -го критерію в майбутньому.

$$q_i = \frac{P_{\text{іпр}}}{P_{\text{ін}}} \quad (5.12)$$

$$q_i = \frac{P_{\text{ін}}}{P_{\text{іпр}}} \quad (5.13)$$

де $P_{\text{іпр}}$ – граничне (прогнозоване) значення показника по i -му критерію;

$P_{\text{ін}}$ – номінальне значення показника по i -му критерію.

В залежності від напрямку покращення показника, використовуємо ту чи іншу формулу для визначення q_i . Якщо відповідно до вимог технічного прогресу показник треба зменшити, (наприклад, питомі енерговитрати на привод, об'єм, що займає змішувач, масу), то використовуємо формулу (5.12), якщо ці показники треба збільшити (наприклад, продуктивність), тоді використовуємо формулу (5.13) [182].

У якості номінальних значень використовуємо середні статистичні значення показників, які досягнуто в період проведення оцінки технічного рівня та рівня якості машин. Граничні значення показників визначаємо як найкраще значення даного показника для групи машин, яка оцінюється.

У нашому випадку ступені вагомості показників визначаються за результатами оцінки тільки даної групи машин. У разі оцінки іншої групи машин аналогічного технологічного призначення вони матимуть інше значення.

У табл. 5.1 наведено реальні номінальні техніко-економічні показники традиційних змішувачів та нового вібраційного змішувача ВЗ-72, що пропонується для порівняння [183].

Таблиця 5.1

Техніко-експлуатаційні показники змішувачів

Ступінь вагомості показників, a_i		0,278	0,285	0,273	0,164
№ п/п	Марка	Показники			
		Продуктивність, кг/хв	Питомі енерговитрати на привод, Дж/кг	Об'єм, що займає машина, м ³	Маса, кг
1	ВЗШ-2	10	6588	0,61	132
2	А1-ДЗІ	6,6	4968	0,55	135
3	А9-ДЗГ-0,1	20	6588	1,77	440
4	ВЗ-72	25,2	1228	1,29	105

У таблиці 5.2 наведено безрозмірні величини по окремих показниках та узагальнюючі показники кожної машини, отримані в результаті обчислень за двома способами (у чисельнику – по першому способу (D^I), у знаменнику – по другому (D^{II}) [184].

Таблиця 5.2

Значення окремих безрозмірних величин та узагальнюючих показників

№ п/п	Марка	Показники				Узагальнюючі показники
		По продуктивності	По питомих енерговитратах на привод	По об'єму, що займає машина	По масі	
1	ВЗШ-2	$\frac{0,4355}{2,0}$	$\frac{0,3575}{1,0}$	$\frac{0,625}{4,8}$	$\frac{0,5698}{4,68}$	$\frac{0,485}{2,396}$
2	А1-ДЗІ	$\frac{0,361}{1,0}$	$\frac{0,4725}{2,5}$	$\frac{0,6365}{5,0}$	$\frac{0,5684}{4,64}$	$\frac{0,498}{2,591}$
3	А9-ДЗГ-0,1	$\frac{0,639}{5,0}$	$\frac{0,3575}{1,0}$	$\frac{0,3635}{1,0}$	$\frac{0,418}{1,0}$	$\frac{0,432}{1,564}$
4	ВЗ-72	$\frac{0,5427}{3,5}$	$\frac{0,6425}{5,0}$	$\frac{0,4837}{2,57}$	$\frac{0,582}{5,0}$	$\frac{0,560}{3,776}$

5.2 Впровадження результатів досліджень

Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень, пов'язаних з обґрунтуванням конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача, впроваджені у навчальний процес освітньо-професійної програми «Агроінженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисципліни «Машини, обладнання та їх використання для переробки сільськогосподарської продукції» (додаток Е).

Розроблений вібраційний змішувач проходив виробничу перевірку на базі ФГ «Літагор» (Вінницька обл., Хмільницький р-н., село Миколаївка) (додаток Ж). Найвищі показники ефективності змішування були досягнуті за оптимального поєднання частоти обертання лопатевого валу та контейнера, а також відповідного значення коефіцієнта режиму вібрації. У таких умовах забезпечувалася помірна енергоспоживаність, висока продуктивність, достатня швидкість досягнення однорідності суміші та раціональна питома витрата енергії.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» (місто Калинівка, Вінницька область) отримало конструкторську і технічну документацію для виготовлення дослідного зразка вібраційного змішувача для виробничих випробувань і серійного виробництва (додаток З).

5.3 Місце вібраційного змішувача в технологічній схемі приготування комбікорму та техніко-економічна ефективність впровадження

Розроблений вібраційний змішувач з об'ємом контейнера 72 дм³ і продуктивністю 0,8 т/год призначений для використання у сфері тваринництва, зокрема в невеликих фермерських та присадибних господарствах. Може застосовуватися для приготування повнораціонних комбікормів, преміксів і

мінерально-вітамінних добавок для різних видів сільськогосподарських тварин, включаючи птицю, кролів, нутрій та інших хутрових звірів [137, 138, 144].

У технологічній схемі виробництва комбікормів, що включає лінію основного дозування й змішування, віброзмішувач займає ключове місце.

На рис. 5.2 показано апаратурно-технологічну схему виробництва комбікорму, що передбачає поетапне дозування, змішування та підготовку компонентів. Сировина надходить у виробничий процес у мішках 1, що розміщуються на піддоні та транспортуються за допомогою візка 2. Далі підйомник 3 подає сировину в ємність 4, звідки вона подається шнековим живильником 5 у просіювач-дозатор 6, який забезпечує контрольовану подачу компонентів у вібраційний змішувач 8, керування яким здійснюється з пульта 7 [185].

Вібраційний змішувач 8 відіграє ключову роль у процесі виробництва комбікормів, забезпечуючи рівномірне змішування сухих компонентів за рахунок комбінованої дії коливань та обертового руху контейнера й лопатевого валу. Така технологія дозволяє досягти високої однорідності суміші за короткий час, що є важливим для забезпечення стабільної якості кінцевого продукту. Завдяки вібраційному змішуванню знижується ймовірність утворення грудок і забезпечується рівномірний розподіл інгредієнтів.

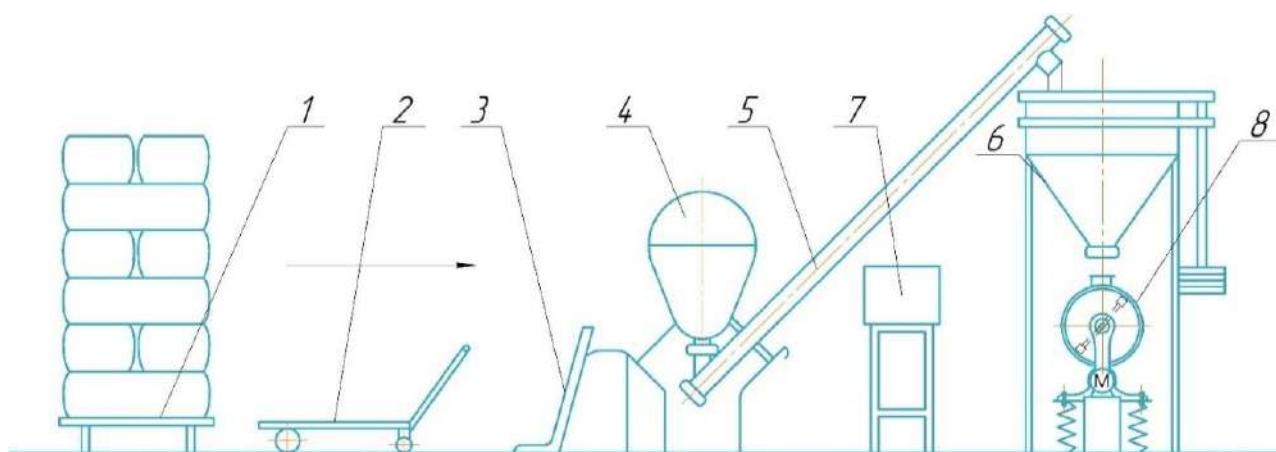


Рисунок 5.2 - Апаратурно-технологічна схема виробництва комбікорму:
1 – піддон із мішками; 2 – візок; 3 – підйомник; 4 – ємність; 5 – шнековий живильник; 6 – просіювач-дозатор; 7 – пульт керування; 8 – вібраційний змішувач

Готова суміш, після проходження процесу змішування у вібраційному змішувачі 8, направляється на фасування, де дозується відповідно до заданої ваги і пакується в мішки для зберігання або транспортування. Далі продукція маркується, складається на піддони та готується до відвантаження споживачеві або переведення на складські приміщення для тимчасового зберігання [185, 186].

Проведемо порівняння економічних характеристик розробленого та базового змішувачів за показником питомих експлуатаційних витрат (П), грн/т, без урахування конкретних обсягів сумішей. Розрахунки виконуватимемо для умов роботи в одну зміну. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 5.3 [186, 187, 190].

Таблиця 5.3

Вихідні дані для розрахунку

Показники	Змішувачі	
	Базовий	Розроблений
Продуктивність, т/год.	0,9	0,8
Тривалість змін, год.	8	8
Тривалість змішування, хв.	6,0	1,6
Технологічна потужність, кВт.	3,2	0,56
Строк служби, років	10	10
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	0,1	0,1
Коефіцієнт відрахувань на ТО і ремонт	0,08	0,08
Балансова вартість, грн	58 940	
Капітальні вкладення, грн		38 500

Переваги експериментального змішувача перед серійним:

- зменшення енерговитрат завдяки зниженню технологічної потужності (0,56 кВт проти 2,2 кВт), що свідчить про меншу питому енергоємність процесу змішування;

- скорочення тривалості змішування з 6,0 хв до 1,6 хв, що забезпечує підвищення продуктивності робочого циклу.

Питомі експлуатаційні витрати [190]:

$$П = П_з + П_е + П_а + П_т, \text{ грн/т,} \quad (5.14)$$

де $П_з$ – питомі експлуатаційні витрати на виплату заробітної плати, грн/т;

Π_e – питомі витрати на електроенергію, грн/т;

Π_a – питомі амортизаційні відрахування, грн/т;

Π_t – питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання, грн/т.

Питомі експлуатаційні витрати на виплату заробітної плати:

$$\Pi_3 = \frac{n \cdot f \cdot \delta}{Q}, \text{ грн/т}, \quad (5.15)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу;

f – годинна тарифна ставка одного працівника, грн./год. Мінімальна заробітна плата, з початку 2025 року, складає у місячному розмірі – 8000 грн [188], у погодинному розмірі – 48 гривень, тому приймаємо $f = 48$ грн/год;

$\delta = 1,22$ – коефіцієнт нарахування на заробітну плату;

Q – продуктивність змішувача, т/год (табл. 5.3).

За формулою (5.15) знаходимо питомі експлуатаційні на виплату заробітної плати для базового змішувача:

$$\Pi_{3.6} = \frac{1 \cdot 48 \cdot 1,22}{0,9} = 65 \text{ грн/т},$$

для розробленого змішувача

$$\Pi_{3.6} = \frac{1 \cdot 48 \cdot 1,22}{0,8} = 73,2 \text{ грн/т}.$$

Питомі витрати на електроенергію визначаємо за формулою

$$\Pi_e = \frac{N \cdot c_e}{Q}, \text{ грн/т}, \quad (5.16)$$

де N – потужність приводу змішувача, кВт.

$c_e = 7,98$ грн/кВт·год – вартість електроенергії для II класу для малих побутових споживачів, без ПДВ [189].

За формулою (5.16) знаходимо питомі витрати на електроенергію для базового змішувача:

$$\Pi_{e.6} = \frac{3,2 \cdot 7,98}{0,9} = 28,3 \text{ грн/т},$$

для розробленого змішувача

$$\Pi_{\text{с.р}} = \frac{0,56 \cdot 7,98}{0,8} = 5,56 \text{ грн/т.}$$

Питомі амортизаційні відрахування визначаємо за формулою

$$\Pi_a = \frac{\alpha \cdot B \cdot K}{Q}, \text{ грн/т,} \quad (5.17)$$

де B – балансова вартість змішувача, грн;

α – нормований коефіцієнт відрахувань, %;

K – коефіцієнт використання засобів механізації, розраховується за формулою:

$$K = \frac{t_{\text{фак}}}{t_{\text{фак}} \cdot 365} \quad (5.18)$$

де $t_{\text{фак}}$, $t_{\text{пл}}$ – відповідно річне та планове фактичне навантаження машини;

Приведемо коефіцієнт використання засобів механізації до однієї години при однозмінному режимі роботи протягом року

$$K = \frac{1}{8 \cdot 365} = 0,00034.$$

За формулою (5.17) визначаємо питомі амортизаційні відрахування для базового змішувача:

$$\Pi_{\text{а.б}} = \frac{0,1 \cdot 58940 \cdot 0,00034}{0,9} = 2,22 \text{ грн/т,}$$

для розробленого змішувача

$$\Pi_{\text{а.р}} = \frac{0,1 \cdot 38500 \cdot 0,00034}{0,8} = 1,63 \text{ грн/т.}$$

Питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання визначаються за формулою

$$\Pi_r = \frac{\beta \cdot B \cdot K}{Q}, \text{ грн/т,} \quad (5.19)$$

де β – нормований коефіцієнт відрахувань на ремонт, %.

Тоді, за формулою (5.19) визначаємо питомі витрати на ремонт і технічне обслуговування для базового змішувача:

$$\Pi_{т.б} = \frac{0,08 \cdot 58940 \cdot 0,00034}{0,9} = 1,78 \text{ грн/т,}$$

для розробленого змішувача

$$\Pi_{т.р} = \frac{0,08 \cdot 38500 \cdot 0,00034}{0,8} = 1,3 \text{ грн/т.}$$

За формулою (5.14) визначаємо загальні питомі експлуатаційні витрати для базового змішувача:

$$\Pi_{б} = 65 + 28,3 + 2,22 + 1,78 = 97,3 \text{ грн/т,}$$

для розробленого змішувача

$$\Pi_{р} = 73,2 + 5,56 + 1,63 + 1,3 = 81,7 \text{ грн/т,}$$

Економія питомих експлуатаційних витрат при впровадженні розробленого вібраційного змішувача:

$$E_E = \Pi_{б} - \Pi_{р} = 97,3 - 81,7 = 15,6 \text{ грн/т,} \quad (5.20)$$

Строк окупності розробленого вібраційного змішувача при його впровадженні:

$$T = \frac{B_e}{P \cdot E_E}, \text{ років} \quad (5.21)$$

де P – річний об'єм робіт, т.

Визначаємо річний об'єм робіт розробленого вібраційного змішувача при різному ступені завантаження:

$$P = \frac{Q \cdot k_{вз} \cdot t_{зм} \cdot i_{зав}}{100}, \text{ т} \quad (5.22)$$

де $k_{вз}$ – коефіцієнт використання часу зміни, $k_{вз} = 0,9$;

$i_{зав}$ – ступінь завантаження змішувача, %.

Тоді, при завантаженні змішувача на 100%

$$P = \frac{0,8 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 365 \cdot 100}{100} = 2102,4 \text{ т}$$

$$T = \frac{38500}{2102,4 \cdot 15,6} = 1,17 \text{ року}$$

З урахуванням отриманих результатів експлуатаційних витрат доцільно

перейти до розрахунку питомих приведених витрат, які враховують не лише щорічні витрати на експлуатацію обладнання, а й капітальні вкладення на його придбання та введення в експлуатацію. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити економічну ефективність застосування конкретної конструкції змішувача впродовж усього строку його служби.

Питомі приведені експлуатаційні витрати визначаються за виразом [190]

$$\text{ПП} = \text{П} + \frac{\text{В}}{\text{Р}} \cdot \text{Е}, \text{ грн/т} \quad (5.23)$$

де $\text{Е} = 0,15$ – нормований коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Питомі приведені витрати для обох варіантів змішувачів обчислюємо за формулою (5.23), приймаючи ступінь завантаження змішувача рівним 100 %

базовий змішувач

$$\text{ПП}_6 = 97,3 + \frac{58940}{2102,4} \cdot 0,15 = 101,5 \text{ грн/т},$$

розроблений вібраційний змішувач

$$\text{ПП}_6 = 81,7 + \frac{38500}{2102,4} \cdot 0,15 = 84,4 \text{ грн/т}.$$

За формулою (5.24) визначаємо річний економічний ефект від впровадження запропонованої конструкції змішувача при повному (100 %) завантаженні

$$\text{Е} = (\text{ПП}_6 - \text{ПП}_p) \cdot \text{Р} = (101,5 - 84,4) \cdot 2102,4 = 35951 \text{ грн}. \quad (5.24)$$

Узагальнені результати розрахунків економічної ефективності наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Показники економічної ефективності розробленого вібраційного змішувача

Показники	Варіанти		Розроблений у % до базового
	Базовий	Розроблений	
1	2	3	4
Продуктивність, т/год	0,9	0,8	88,8
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100,0
Балансова вартість, грн.	58940	-	-
Капітальні вкладення, грн	-	38500	-

Продовження таблиці 5.4

1	2	3	4
Питомі експлуатаційні витрати грн/т:			
- заробітна плата;	65	73,2	112,62
- витрати на електроенергію;	28,3	5,56	19,64
- амортизаційні відрахування;	2,22	1,63	73,42
- витрати на ТО та ремонт.	1,78	1,3	73,03
Максимальне річне навантаження, т	-	2102,4	-
Економія питомих експл. витрат, грн/т	-	15,6	-
Річний економічний ефект, грн	-	35951	-
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	1,17	-

Здійснена техніко-економічна оцінка експериментального вібраційного змішувача засвідчила його перевагу над базовою моделлю за рівнем експлуатаційних витрат, що досягнуто завдяки зниженню енергоємності процесу змішування. За розрахунками, річний економічний ефект становить 35 951 грн, а строк окупності капіталовкладень – 1,17 року.

5.3 Висновки до п'ятого розділу

1. Аналіз технічного рівня вібраційного змішувача ВЗ-72 порівняно з існуючими аналогами (ВЗШ-2, А1-ДЗІ, А9-ДЗГ-0,1) засвідчив його перевагу за узагальнюючими показниками, розрахованими за двома методами: першим – без урахування вагомості окремих показників, та другим – із урахуванням їхньої вагомості, визначеної методом граничних і номінальних значень. Така перевага зумовлена нижчими питомими енерговитратами, меншою масою та достатньою компактністю обладнання.

2. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язані з обґрунтуванням конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача, були впроваджені у навчальний процес освітньо-професійної програми «Агроінженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету при викладанні дисципліни «Машини, обладнання та їх використання для

переробки сільськогосподарської продукції», а також перевірені в умовах господарства ФГ «Літагор». Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» отримало технічну документацію на виготовлення дослідного зразка для подальшого промислового освоєння.

3. У технологічній схемі виробництва комбікорму віброзмішувач займає ключову позицію, забезпечуючи рівномірне змішування сухих компонентів завдяки поєднанню вібраційної та обертальної дії. Така компоновка дозволяє досягти високої якості кінцевого продукту та зменшити ймовірність агрегації частинок.

4. Здійснена техніко-економічна оцінка експериментального вібраційного змішувача засвідчила його перевагу над базовою моделлю за рівнем експлуатаційних витрат, що досягнуто завдяки зниженню енергоємності процесу змішування. За розрахунками, річний економічний ефект становить 35 951 грн, а строк окупності капіталовкладень – 1,17 року.

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

1. Волинець Є.О. Використання вібровідцентрового змішувача для приготування високоенергетичних сумішей. *Сучасні проблеми землеробської механіки*. Збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції (17-19 жовтня 2023 р.). Київ: НУБіП. 2023. С. 71–73.

ЗАГЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане наукове завдання зменшення енергетичних витрат при забезпеченні встановлених показників якості змішування сипких сумішей шляхом обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача. За результатами досліджень зроблено такі висновки:

На основі аналізу існуючих конструкцій змішувачів сипких матеріалів встановлено, що лопатеві, шнекові, барабанні, стрічкові, конусні та вібраційні змішувачі мають свої переваги й недоліки залежно від умов використання. Теоретичні й експериментальні дослідження засвідчують, що вібраційні змішувачі демонструють високу ефективність змішування, забезпечують однорідність сумішей і знижене енергоспоживання завдяки явищу псевдозрідження.

На основі попередніх досліджень і досвіду створення вібраційних змішувачів було вдосконалено конструкцію вібраційного змішувача, що забезпечує інтенсифікацію процесу за рахунок поєднання дії коливань, обертального руху лопатевого валу й обертання контейнера на 360° навколо горизонтальної осі. Така конструкція дозволяє ефективно зменшити адгезійні сили між частинками матеріалу шляхом залучення гравітаційного ефекту, що в сукупності забезпечує зменшення енергетичних витрат при забезпеченні встановлених показників якості змішування сипких сумішей.

Виконане аналітичне обґрунтування геометричних параметрів лопаті лопатевого валу змішувача дозволило визначити раціональні значення її розмірів та розміщення з урахуванням ефективності захоплення і переміщення частинок суміші (загальна довжина лопаті $L_s = 185$ мм; висота трапецієподібної пластинки $L_b = 62$ мм; більша основа трапецієподібної пластинки $B_b = 75$ мм; менша основа трапецієподібної пластинки $b_b = 45$ мм; кут нахилу трапецієподібної пластинки $\theta_b = 25^\circ$; радіус валу $R_s = 20$ мм; радіус контейнера $R_d = 200$ мм), а також забезпечення необхідної міцності та жорсткості конструкції. Використання чисельного моделювання у SolidWorks Simulation дозволило встановити раціональні значення товщини трапецієподібної пластини ($\delta_b = 2$ мм) і радіуса прутка лопаті обґрунтованість прийнятих геометричних параметрів і забезпечують надійну основу для

подальших теоретичних і експериментальних досліджень процесу змішування.

На етапі чисельного моделювання встановлено квадратична регресійна залежність (2.19) часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від частоти обертання лопатевого валу n_l , частоти обертання контейнера n_k , частоти коливання вібробудувача n_b , амплітуди коливань контейнера A_b (або коефіцієнта режиму вібрації k_b). Рівняння (2.19) і (2.22) пройшло перевірку на статистичну значущість за критерієм Стюдента, а також на адекватність за критерієм Фішера ($F(2.19) = 1839,74 \gg F_{кр} = 1,93$, $F(2.22) = 947,14 \gg F_{кр} = 1,93$), що підтверджує високу достовірність отриманої моделі. Найменшого значення $t_{0,9} = 81,2$ с досягнуто при оптимальному поєднанні факторів: $n_l = 45,9$ хв⁻¹, $n_k = 24,4$ хв⁻¹, $n_b = 823,8$ хв⁻¹, $A_b = 8,8$ мм (або $k_b = 6,68$).

Розроблено й виготовлено дослідний зразок вібраційного змішувача, який має незалежні приводи для лопатевого валу та контейнера, а також вібробудувач із регульованим ексцентриситетом. Передбачено можливість варіювання амплітуди та частоти коливань.

Ефективна робота вібраційного змішувача досягається за умов раціонального поєднання режимних параметрів, при якому забезпечується висока однорідність суміші, достатній рівень продуктивності, прийнятна тривалість процесу та мінімальні питомі енерговитрати. Найкращі показники було досягнуто при частоті обертання лопатевого валу близько $n_l = 23,3$ хв⁻¹, контейнера $n_k = 10,1$ хв⁻¹ та коефіцієнті режиму вібрації на рівні $k = 2,69$, при цьому $P = 513$ Вт, $Q = 25,1$ кг/хв, $t_{0,9} = 95,7$ с, $E = 1228$ Дж/кг.

5. Порівняння результатів, отриманих за експериментальними регресійними моделями, з теоретичними залежностями показало високу ступінь узгодженості. Зокрема, для залежності тривалості змішування $t_{0,9}$, розрахованої за рівняннями (4.4) та (2.22), коефіцієнт кореляції становив 0,87, що відповідає високому рівню зв'язку за шкалою Чеддока. Це дозволяє використовувати спрощені теоретичні залежності для попередніх розрахунків і аналітичного обґрунтування режимів змішування, а також свідчить про надійність отриманих результатів.

6. Здійснена техніко-економічна оцінка експериментального вібраційного змішувача засвідчила його перевагу над базовою моделлю за рівнем експлуатаційних витрат, що досягнуто завдяки зниженню енергоємності процесу змішування. За розрахунками, річний економічний ефект становить 35 951 грн, а термін окупності капіталовкладень – 1,17 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полевода Ю.А., Волинець Є.О. Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. № 4 (111). С. 72–79. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-8.
2. Полевода Ю.А., Рябоконь В.М. Обґрунтування процесу змішування сипких кормів. *Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК* : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції, 28-30 листопада 2017 р. Вінниця : ВНАУ, 2017. С. 122–123.
3. Полевода Ю.А. Перспективи застосування вібраційних ефектів в рідких технологічних системах харчових і переробних виробництв. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2015. № 1. С. 124–130.
4. Купчук І.М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. № 3 (90). С. 44–52.
5. Гудова А.В. Оптимізація режимів роботи гвинтового кормозмішувача з вібраційною дією : дис. кандидата техн. наук : 05.05.1 / Національний університет біоресурсів і природокористування. Київ, 2014. 155 с.
6. Паламарчук І.П. Науково-технічні основи розроблення енергозберігаючих вібромашин механічної дії харчових і переробних виробництв : дис. доктора техн. наук : 05.18.12 / Національний університет біоресурсів і природокористування. Київ, 2008. 461 с.
7. Цуркан О.В. Розробка та дослідження енергоощадного вібраційного змішувача для внесення преміксів в комбікорми : дис. канд. техн. наук : 08.01.01 / Харків, 2004. 155 с.
8. Берник М.П. Енергозберігаючий вібропривод нового змішувача для переробних виробництв : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.03 «Системи приводів» / Вінниця, 2001. – 20 с.
9. Купчук І.М. Обґрунтування технологічної схеми та конструктивної реалізації вібраційного подрібнення сировини спиртового виробництва : дис.

кандидата техн. наук : 05.18.12 / Вінницький національний аграрний університет. Вінниця: ВНАУ, 2017. 170 с.

10. Цуркан О.В., Кесарчук І.М. Комбінований вібраційний змішувач. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 1 (53). С.114–115.

11. Янович В.П. Розробка вібровідцентрового дезінтегратора для виробництва складних фармацевтичних сумішей. *Збірник наукових праць вінницького національного аграрного університету*. 2012. № 11 (66) С. 366–369.

12. Берник П.С., Стоцько З.А., Паламарчук І.П. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. 336 с.

13. Паламарчук І.П., Берник М.П., Цуркан О.В. Обґрунтування технологічних та конструктивних схем енергозберігаючих віброзмішувачів барабанного типу. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2001. №1 (17). С.35–41.

14. Barabash V.M., Abiev R.S., Kulov N.N. Theory and Practice of Mixing: A Review. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 52. P. 473–487.

15. Mill powder tech solutions. *The Taiwan Leading Brand in Powder Technology*. URL: <https://www.mill.com.tw/en/application/Spice/3-4.html> (дата звертання: 15. 05.2021).

16. Mixers and Blenders. *Grinding & Mixing Solutions*. URL: <https://www.mill.com.tw/en/category/Mixers-Blenders/mixers-blenders.html> (дата звертання: 14. 05.2021).

17. Mixers and dryers Amixon. *Innovation and unique solutions*. URL: <https://www.amixon.com/en/products/mixers-overview> (дата звертання: 15. 05.2021)

18. Tsurkan O.V., Gerasimov O.O., Polyevoda Y.A., Tverdokhlib I.V., Rimar T.I., Stanislavchuk O.V. Kinetic features of vibrating and filtration dewatering of fresh-peeled pumpkin seeds. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 52, № 2. P. 69–76.

19. Hui T.C., Zhang X., Adiga D., Miller G.H., Ristenpart W.D. Vibrational manipulation of dry granular materials in lab-on-a-chip devices. *Lab on a Chip*. 2024.

№ 24. P. 123–135. DOI: 10.1039/d3lc00722g

20. Daniyan I., Aderoba A., Atamunotoru D. et al. Development and performance of a livestock feed mixer. *MOJ App Bio Biomech*. 2018. Vol. 2, Issue 4. P. 242–245.

21. Balami A., Adgidzi D., Mua'zu A. Development and Testing of an Animal Feed Mixing Machine. *International Journal of Basic and Applied Science*. 2013. Vol. 1 Issue 3. P. 491–503.

22. Піддубний В.А., Стадник І.Я., Чагайда А.О., Петриченко Є.А. Обґрунтування параметрів змішувача для борошняних компонентів. *Технічна інженерія*. 2022. № 1 (89). С. 3–10. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-3-10](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-3-10).

23. Volynets Y. Improvement of the vibrating mixer of food mixes. *Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference «Prospects and achievements in applied and basic sciences»*. Budapest. 2021. С.632–635.

24. Volynets Y. Vibratory conveyor for loading food mixture mixer. *Сучасні вектори розвитку аграрної науки*. Міжнародної науково-практичної конференції (17-18 вересня 2024 р.). Херсон. Кропивницький: ХДАЕУ. 2024. С. 225–228.

25. Волинець Є.О. Обґрунтування конструкції змішувача харчових сумішей малої продуктивності. *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.). Дніпро: ДДАЕУ. 2024. С. 32–34.

26. Palamarchuk I., Mushtruk M., Stadnyk I., Derkach A., Boyko Y. Heat exchange optimization in transport and technological machines using vibromechanical intensification. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. P. 792–805. Code: 327069. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_70.

27. Гулий І.С., Пушанко М.М. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця : Нова книга, 2007. 648 с.

28. Паламарчук І.П. Тенденції розвитку конструктивних та технологічних схем вібраційних машин для реалізації механічних процесів переробки сільськогосподарської продукції. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2006. № 1

(43). С. 160–167.

29. Потаєв В.М., Франчук В.П., Надутий В.П. Вібраційна техніка і технології у енергоємних підприємствах. Дніпропетровськ, 2001. 315 с.

30. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. № 3 (95). 2016. С.6–12.

31. Калетнік Г.М., Черниш О.М., Березовий М.Г. Використання сучасних методів механіки для сільського господарства. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2011. № 1 (65). С.8–18.

32. Калетнік Г.М., Янович В.П. Обґрунтування режимних та конструктивних параметрів гіраційного млина для виробництва високоактивних преміксів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 1 (84). С.15–21.

33. Омелянов О.М., Токарчук О.А. Обґрунтування амплітудно-частотних характеристик та конструктивних параметрів сепаратора з вібраційним приводом збудження просторових коливань. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 1 (104). С. 30–37. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-4.

34. Сахацький М.І., Абдуллаєва Е.С. Продуктивність бройлерів залежно від умов їх вирощування у клітках. *Тваринництво та технології харчових продуктів*. 2018. № 289. С. 63–71.

35. Славов В.П., Карпусь М.М., Кривий М.М. та ін. Еколого-зоотехнічні умови ефективного використання кормів : навч. посіб. Київ, 2003. 120 с.

36. Цап С.В., Свеженцов А.І., Непорочна О.Т. Використання ферментного препарату Оллзайм ССФ у комбікормах для курей-несучок. *Ефективні корми і годівля*. 2007. № 8 (24). С. 22–24.

37. Мазур В.А., Гончарук І.В., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Телекало Н.В., Купчук І.М. Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур : монографія. Вінниця : Нілан-ЛТД, 2021. 180 с.

38. Якубчак О.М., Хоменко В.І., Мельничук С.Д. Ветеринарно-санітарна експертиза з основами технології і стандартизації продуктів тваринництва : підручник. Київ: Біопром, 2005. 800 с.

39. Бородай В.П., Сахацький М.І., Ветрійчук А.І., Мельник В.В. Технологія виробництва продукції птахівництва. Вінниця. Нова Книга, 2006. 360 с.
40. Єгоров Б.В., Шаповаленко О.І., Макаринська А.В. Технологія виробництва преміксів : навчальний посібник. Центр учбової літератури, 2007. 288 с.
41. Бесулін В.І., Гужва В.І., Куцак С.М. Птахівництво і технологія виробництва яєць і м'яса птиці: навчальний посібник. Біла Церква, 2003. 448 с.
42. Марченков Ф., Коптєв В. Кормові ферменти для кращого травлення. *Наше птахівництво*. 2009. № 5. С. 32–33.
43. Віннікова Л.Г., Поварова Н.М., Синиця О.В. Основи птахівництва та переробки птиці. К.: «Освіта України», 2020. 2016 с.
44. Подпратов Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва : підручник. Київ: Аграрна освіта, 2014. 393 с.
45. Чудак Р.А., Побережець Ю.М., Купчук І.М., Вугляр В.С. Використання кормових добавок і комбикормів нового покоління у годівлі свиней та птиці : монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2022. 248 с.
46. Чудак Р.А., Побережець Ю.М., Льотка Г.І., Купчук І.М. Сучасні кормові добавки у годівлі птиці: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2021. 281 с.
47. Захаренко М.О., Шевченко Л.В., Михальська В.М. та ін. Роль мікроелементів у життєдіяльності тварин. Ветеринарна медицина України. 2004. № 2. С.13-16.
48. Ібатуллін І.І., Мельник Ю.Ф., Отченашко В.В. Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин. Київ. 2014. 422 с.
49. Патрєва Л.С., Коваль О.А. Технологія виробництва продукції птахівництва. Миколаїв. МДАУ, 2008. 281 с.
50. Мельник В.В. Корми для птиці. *Сучасне птахівництво*. 2010. № 5-6. С. 14–20.
51. Кліценко Г.Т. Мінеральне живлення тварин. Київ: Світ, 2001. 575 с.
52. Котов Б.І., Спірін А.В., Солоня О.В., Калініченко Р.А. Стан і перспективи теплової і механічної переробки зернової сировини на корм.

Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. № 3 (95). С. 139–142.

53. Лемешева М.М. Годівля сільськогосподарської птиці. Суми: «Слобожанщина». 2013. 152 с.

54. Медвідь С.М., Гунчак А.В., Гутий Б.В., Ратич І.Б. Потреба сільськогосподарської птиці в енергії, поживних біологічно активних речовинах. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія «Сільськогосподарські науки»*. 2017. Т. 19. № 79. С.127–134.

55. Polievoda Y., Volynets Y. Study of the characteristics of vibrorheological models of bulk raw materials in the working area of a vibrocentrifugal mixer. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 3 (110). С. 35-43. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-4.

56. Harish G., Muralidharan A., Thiagarajan C. et al. Evaluation of design and materials for mixer jar to optimize it's vibration level. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 119, Issue 12. P. 15765–15774.

57. Паламарчук І.П., Янович В.П., Полєвода Ю.А., Брянський В.В. Аналіз математичної моделі вібровідцентрового змішувача для виготовлення сухих молочних сумішей. *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету*. 2010. №4. С. 5–12.

58. Wang X., Wang L., Chen M. et al. Micro-vibration parameters fast demodulation algorithm and experiment of self-mixing interference. *Optoelectronics letters*. 2014. Vol. 10, Issue 4. P. 304–307.

59. Солоня О.В. Статика взаємодії абсолютно твердих тіл із сипучим середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. № 3 (90). С. 105–116.

60. Солоня О.В., Ковбаса В.П. Статика та динаміка взаємодії абсолютно твердих конкрецій із сипучим середовищем. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. № 1 (92). С. 12–22.

61. Onyegu O., Ibifuro O., Idung M, et al. Design and fabrication of an industrial poultry feed tumble mixer. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. 2012. Vol. 20. P. 49–60.

62. Распопова В.Б. Розробка моделей та методів аналізу складних систем

засобами комп'ютерної математики. Київ : НУЦПІ НАНУ, 2016. 122 с.

63. Mohagheghian S., Ghajar A., Elbing B. Effect of vertical vibration on the mixing time of a passive scalar in a sparged bubble column reactor. *Fluids*. 2020. Vol. 5, Issue 6. P. 1–18.

64. Паламарчук І.П., Полєвода Ю.А., Янович В.П. Аналіз математичної моделі вібровідцентрової машини для очищення рідкої сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 4. С. 129–136.

65. Янович В.П. Аналіз математичної моделі вібровідцентрового дезінтегратора для виробництва лікарських фітопрепаратів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2012. № 44. С. 51–60.

66. Гуць В.С., Полєвода Ю.А., Коваль О.А. Визначення структурно-механічних характеристик в'язкопружних дисперсних систем. *Упаковка*. 2011. № 1. С. 46–47.

67. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). P. 32–38. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-4.

68. Kupchuk I.M., Solona O.V., Derevenko I.A., Tverdokhlib I.V. Verification of the mathematical model of the energy consumption drive for vibrating disc crusher. *Inmateh – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 55, Issue 2. P. 111–118.

69. Шевченко І.А., Алієв Е.Б., Доруда С.О. Моделювання процесу потокового змішування кормосумішей з використанням методу дискретних елементів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. № 97 (1). P. 536–544.

70. Iwasaki T., Munetake S., Takaomi K. Analysis of collision energy of bead media in a high-speed elliptical rotor-type powder mixer using the discrete element method. *Powder Technology*. 2001. № 121. P. 239–248.

71. Xu J., Li Y., Chen Z. The Effect of Vibration Mixing on the Mechanical Properties of Steel-Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*. 2021. № 14 (13). 3654. DOI:10.3390/ma14133654

72. Lupo M., Sofia D., Barletta D., Poletto M. Calibration of DEM Simulation

of Cohesive Particles. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. № 4. P. 379–384.

73. Zhang S., Wang X. Effect of vibration parameters and wall friction on the mixing characteristics of binary particles in a vertical vibrating container subject to cohesive forces. *Powder Technology*. 2022. Vol. 413. P. 118078.

74. Bahaulddin D., Nadhim M. The effects of frequency and amplitude of vibration on the mixing and segregation processes in granular materials. *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 882. P. 1–14.

75. Spirin A., Volynets Y. Vibratory conveyor for loading food mixture mixer. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. Т. 2. № 3 (337). С. 328–333. DOI 10.31891/2307-5732-2024-337-3-49.

76. Ольшанський В., Бурлака В., Сліпченко, М. Вільні коливання пружно нелінійного осцилятора з сухим тертям. *Інженерія природокористування*. 2020. № 4 (14). С. 32–40.

77. Деревенько І.А., Котов Б.І., Степаненко С.П., Попадюк І.М. Теоретичні аспекти сепарації зернових матеріалів на ступінчасто-конічному решітці вібровідцентрових машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 3 (83) С. 175–180.

78. Лазарєва Д.В., Курган І.В. Вільні коливання ортотропних пластин. *Мехатронні системи. Енергоефективність та Ресурсозбереження*. 2019. № 5 (138). С. 53–61. DOI: 10.30857/1813-6796.2019.5.6

79. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. № 3 (95). 2016. С.6–12.

80. Ковбаса В.П., Солоня О.В., Спірін А.В., Цуркан О.В. Про спрощення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 1(100). С. 44–49.

81. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Спольнік О.І., Замрій М.А. Вільні коливання осцилятора за наявності квадратичного в'язкого опору та сухого тертя. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 33–40. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-2-4

82. Korendiy V., Lanets O., Kachur O., Dmyterko P., Kachmar R.

Determination of inertia-stiffness parameters and motion modelling of three-mass vibratory system with crank excitation mechanism. *Vibroengineering Procedia*. 2021. Vol. 36. P. 7–12.

83. Lanets O., Kachur O., Korendiy V., Dmyterko P., Nikipchuk S., Derevenko I. Determination of the first natural frequency of an elastic rod of a discrete-continuous vibratory system. *Vibroengineering Procedia*. 2021. Vol. 37. P. 7–12.

84. Lanets O., Kachur O., Korendiy V., Lozynskyy V. Controllable crank mechanism for exciting oscillations of vibratory equipment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 2. P. 43–52.

85. Омельянов О.М. Особливості використання механічних коливань в технологічних процесах. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2017. № 4 (87) С. 129–134.

86. Slipchenko M., Stadnik M., Solona O. Formulation of boundary conditions and equations of dynamics of grain mixture on the plate spreader of vibrocentrifugal separator. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 4 (115). P. 98–103. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-4-13.

87. Slipchenko M., Stadnik M., Solona O., Tokarchuk O. Dynamics of the grain mixture on the plate spreader of a vibrating centrifugal separator. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 1 (116). С. 5–10. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-1.

88. Стаднік М.І., Солона О.В., Бурлака С.А. Дослідження впливу геометрії робочих органів змішувача на кінетику змішування сипких середовищ. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2025. № 2 (348). С. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-2>.

89. Honcharuk I., Kupchuk I., Solona O., Tokarchuk O., Telekalo N. Experimental research of oscillation parameters of vibrating-rotor crusher. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 3. P. 97–100. DOI: 10.15199/48.2021.03.19.

90. Lanets O., Derevenko I. Mathematical modeling of the possibility of creating interresonance discrete-continuous vibration technological equipment without a spring. *Vibroengineering Procedia*. 2024. Vol. 55. P. 47–53.

91. Maistruk P., Lanets O., Maistruk V. Determining the influence of

continuous section shape and dimensions on stresses over a wide range of vibration frequency. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2024. Vol. 10, Issue 4. P. 57–74.

92. Майструк П.В., Ланець О.С., Майструк В.В. Лінійний динамічний аналіз континуальних ділянок вібраційних машин. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2024. № 58. С. 38–46.

93. Yaroshevich N., Lanets O., Yaroshevych O. Slow oscillations in systems with inertial vibration exciters. *Mechanisms and Machine Science*. 2023. Vol. 116. P. 29–42.

94. Фельдман Л.П., Петренко А.І., Дмитрієва О.А. Чисельні методи в інформатиці. Київ: Видавнича група BHV, 2006. 480 с.

95. Kachur O., Korendiy V., Lanets O., Kachmar R., Nazar I., Heletiy V. Dynamics of a vibratory screening conveyor equipped with a controllable centrifugal exciter. *Vibroengineering Procedia*. 2023. Vol. 48. P. 8–14.

96. Maistruk P., Lanets O., Maystruk V., Derevenko I. Establishment of the natural frequency of oscillations of the two-dimensional continuous member of the vibrating table. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2022. Vol. 52, Issue 3. P. 199–214.

97. Lanets O., Maistruk P., Maystruk V., Derevenko I. Approximate calculation of natural frequencies of oscillations of the plate with variable cross-section of the discrete-continuous inter-resonance vibrating table. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. 2022. Vol. 8, Issue 2. P. 41–50.

98. Dmytriv V., Lanets O., Dmytriv I., Horodetskyi I. Modelling of work of the rotor-type blade pump with revolving stator. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. 2022. Vol. 26, Issue 4. P. 17–28.

99. Вислоух С.П., Волошко О.В., Тимчик Г.С., Філіппова М.В. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи : підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 228 с.

100. Ланець О.С., Деревенько І.А., Новицький Ю.Л., Чубик Р.Р.

Обґрунтування конструкції та встановлення параметрів високошвидкісного двомасового резонансного вібраційного транспортера з інерційним приводом. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2022. № 56. С. 48–66.

101. Maistruk P., Lanets O., Stupnytskyy V. Approximate calculation of the natural oscillation frequency of the vibrating table in inter-resonance operation mode. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 71, Issue 2. P. 151–166.

102. Borovets V., Lanets O., Korendiy V., Dmyterko P. Volumetric vibration treatment of machine parts fixed in rotary devices. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 373–383.

103. Полевода Ю.А., Волинець Є.О. Дослідження віброреологічних моделей шару сипкого середовища. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 1 (112). С. 60–69. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-9.

104. Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Волинець Є.О., Походай М.В. Особливості конструкції комбінованого змішувача для переробних і харчових виробництв. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 1. С. 149–154.

105. Берник М.П. Дослідження динаміки руху вібраційного змішувача з дебалансним віброзбуджувачем та маятниковим приводом лопатевого валу. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства*. 2002. № 9. С. 338–345.

106. Веселовська Н.Р., Зелінська О.В., Іванчук Я.В. Загальні принципи побудови і дослідження детермінованих моделей вібраційних та віброударних машин з гідроімпульсним приводом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. № 4 (91). С.21–28.

107. Калетнік Г.М., Чаусов М.Г., Швайко В.М., Пришляк В.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість : підручник. Київ : «Хай-Тек-Прес», 2013. 528 с.

108. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с.

109. Томашевський В.М. Моделювання систем. Київ: Видавнича група

BHV, 2005. 352 с.

110. Shevchenko I., Aliiev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 6 (108). P. 6–13.

111. Алієв Е.Б., Павленко С.І. Симуляція процесу формування бурта і змішування компонентів компостної суміші однобарабанным аератором. *Вібрації в техніці та Simulation а технологіях*. 2023. № 2 (109). P. 30–39.

112. Шевченко І.А., Алієв Е.Б., Доруда С.О. Моделювання процесу потокового змішування кормосумішей з використанням методу дискретних елементів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. № 97. Т. 1. С. 536–544.

113. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2020. 340 с.

114. Алієв Е.Б. Науково-методичні основи чисельного моделювання механізованих процесів агропромислового виробництва. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ. 2024. С. 3–5.

115. Алієв Е.Б. Науково-методичні основи чисельного моделювання механізованих процесів агропромислового виробництва. Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2024 року) присвяченій 124-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, 95-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУБіП України. 2024. С. 321–324.

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

117. Shur M.L., Strelets M.K., Travin A.K., Spalart P.R. Turbulence Modeling in Rotating and Curved Channels: Assessing the Spalart-Shur Correction. *AIAA*

Journal. 2000. № 38 (5). P. 784–792.

118. Spalart P.R. Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000. № 21. P. 252–263.

119. Задачин В.М., Конюшенко І.Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

120. Гончаров О.А., Васильєва Л.В., Юнда А.М. Чисельні методи розв’язання прикладних задач: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2020. 142 с.

121. Simcenter STAR-CCM+ 2021.3. Verification Suite. 2021. 333 p.

122. Simcenter STAR-CCM+. Help. User guide, tutorials, knowledge base, and tech support. 2022.

123. Johnson K.L. Contact Mechanics. 1987. 434 p.

124. Полевода Ю.А., Волинець Є.О., Бистрицький О.П. Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 4 (107). С. 20–25. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-3.

125. Pachon-Morales J., Do H., Colin J., Puel F., Perre P. DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests. *Advanced Powder Technology*. 2019. № 30 (4). С. 732–750.

126. Алієв Е.Б., Кошулько В.С., Кочережко Н.В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного змішувача комбікормів періодичної дії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-1

127. Кисельов О.В., Комарова І.Б., Мілько Д.О., Бакарджиєв Р.О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): навчальний посібник. За заг. ред. Д.О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС. 2017. 1181 с.

128. Wolfram S.A Project to Find the Fundamental Theory of Physics (816 p.). 2020. Wolfram Media, Inc.

129. Engineering Toolbox. Ресурс із розрахунковими формулами, таблицями та прикладами. URL: <https://www.engineeringtoolbox.com/> (дата звернення: 10.08.2023).

130. Stack Exchange (Engineering). Ресурс із питаннями та відповідями з інженерії та механіки. URL: <https://engineering.stackexchange.com/> (дата звернення: 11.08.2023).

131. Wolfram Cloud. Хмара програмування. URL: <https://www.wolframcloud.com/> (дата звернення: 11.08.2023).

132. Бакарджієв Р.О., Комаров А.О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2015. № 28. С. 255–260.

133. Шевченко І.А., Алієв Е.Б., Доруда С.О. Результати моделювання процесу потокового змішування кормосумішей змішувачем-кормороздавачем. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Кіровоградський національний технічний університет*. 2013. № 43 (1). Р. 202–207.

134. Малаков О.І., Бурлака С.А., Михальова Ю.О. Математичне моделювання та основи конструювання вібраційних змішувачів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2019. № 5 (277). С. 30–33. DOI: 10.31891/2307-5732-2019-277-5-30-33.

135. Волинець Є.О. Дослідження моделі руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування*. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (21-22 лютого 2023 р.). Полтава: ПДАУ. 2023. С. 46–49.

136. Алієв Е.Б. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Системна інженерія агропромислового машинобудування» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» ОНП «Галузеве машинобудування». Частина 1-4. Дніпро: ДДАЕУ. 2024. 645 с.

137. Полєвода Ю.А., Волинець Є.О. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Ескізне креслення «Принципова схема вібровідцентрового змішувача» : Свідоцтво № 122109 від 20.12.2023; заяв. № с202306088 від 16.09.2023.

138. Полєвода Ю.А., Янович В.П., Твердохліб І.В., Михальова Ю.О., Волинець Є.О. Патент на корисну модель. Змішувач сипких мас. № 128838. Публікація відомостей 10.10.2018. Бюл. № 19.

139. Лисогор В.М., Пришляк В.М., Янович В.П. Алгоритмічна модель ідентифікації випадкового пошуку процесів перемішування, подрібнення інгредієнтів фармацевтичних та харчових виробництв. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2012. № 10. Том 1. С. 141–145.

140. Павленко В.С., Паламарчук І.П., Цуркан О.В., Полєвода Ю.А. З'єднання в машинобудуванні. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2015. 110 с.

141. Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання. Харків : НТУ «ХП», 2020. 275 с.

142. Карнаух С.Г., Таровик М.Г. Деталі машин: курс лекцій для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ: ДДМА, 2017. 26 с.

143. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунку деталей машин. Львів: Афіша, 2003. 560 с.

144. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Київ : НТУУ «КП», 2007. 436 с.

145. Горбатенко І.Ю. Основи наукових досліджень. Київ : Вища школа, 2001. 92 с. 179.

146. ДСТУ 7693:2015. Комбікормова сировина. Загальні технічні умови. [Чинний від 2015-08-01]. Київ, 2015. (Державний стандарт України).

147. ДСТУ 4120-2002. Комбікорми повнораціонні для сільськогосподарської птиці. Технічні умови. [Чинний від 2003-04-01]. Київ, 2003. (Державний стандарт України).

148. ДСТУ 2421-1994. Комбікорми. Терміни та визначення. З Поправкою (ІПС № 8-96). [Чинний від 1995-01-01]. Київ, 1995. (Державний стандарт України).

149. ДСТУ 8024:2015. Комбікорми гранульовані. Загальні технічні умови. [Чинний від 2017-01-01]. Київ, 2017. (Державний стандарт України).

150. ДСТУ 4687:2006. Комбікорми, премікси, вітамінні препарати, продукція птахівництва. Методи визначення вітамінів А, Е, В2 та каротиноїдів. [Чинний від 2007-07-01]. Київ, 2007. (Державний стандарт України).

151. ДСТУ 7111:2009. Білково-вітамінні добавки. Загальні технічні умови. [Чинний від 2011-01-01]. Київ, 2011. (Державний стандарт України).

152. ДСТУ 8186:2015. Корми для тварин. Соя повножирова екструдована із вологого консервованого зерна. Технічні умови. [Чинний від 2017-01-01]. Київ, 2017. (Державний стандарт України).

153. Unit-T. Цифровий віброметр UNI-T UT312. URL: <https://uni-t.ua/uk> (дата звертання: 24.12.2023).

154. Hantek. OWON SDS7102. URL: <https://uni-t.ua/uk> (дата звертання: 25.12.2023).

155. Fiskars. Ваттметр лічильник енергоспоживання з дисплеєм. URL: <https://fiskars.kiev.ua/ua> (дата звертання: 25.12.2023).

156. Ярошенко Л.В. Двовальний вібраційний змішувач. Патент на корисну модель. № 119074. Публікація відомостей 25.04.2019. Бюл. № 8.

157. Маслов О.Г., Саленко Ю.С. Патент на корисну модель. Вібраційний змішувач. № 115753. Публікація відомостей 25.04.2017. Бюл. № 8.

158. Матвеєв К.Д., Ліпкан А.В., Лузан П.Г., Шмат С.І., Кісільов Р.В., Дрозд І.К. Патент на корисну модель. Комбінований стрічково-лопатевий змішувач кормів. № 63424. Публікація відомостей 10.10.2011. Бюл. № 19.

159. Саленко Ю.С. Патент на корисну модель. Лопатевий змішувач примусової дії. № 47066. Публікація відомостей 11.01.2010. Бюл. № 1.

160. Богатирьов Г.М. Патент на винахід. Змішувач лопатевий двовальний. № 65743. Публікація відомостей 15.04.2004. Бюл. № 4.

161. Коц І.В., Трубаєнко А.А. Патент на корисну модель. Вібраційний змішувач бетонної суміші з гідроприводом. № 140671. Публікація відомостей 10.03.2020. Бюл. № 5.

162. Іскович-Лотоцький Р.Д., Берник М.П., Білоус Б.Д. Патент на корисну модель. Вібраційний змішувач. № 23682. Публікація відомостей 31.08.1998. Бюл. № 4.

163. Цуркан О.В., Павленко В.С., Кесарчук І.М. Патент на корисну модель. Вібраційний змішувач. № 49491. Публікація відомостей 26.04.2010. Бюл. № 8.

164. Zheng Y., Zhou Y., Nie F., Luo H., Huang X. Effect of a Novel Vibration Mixing on the Fiber Distribution and Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete. *Sustainability*. 2022. № 14 (13). 7920. DOI:10.3390/su14137920

165. Ярошенко Л.В. Нові сільськогосподарські вібраційні машини з вертикальним привідним валом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2002. № 4 (25). С. 97–105.

166. Ярошенко Л.В., Стужук І.В., Пазюк В.М. Удосконалення конструкції віброзмішувача для змішування сипучої зернової продукції. *Науково-технічний прогрес у розвитку машин і засобів механізації сільського господарства* : матеріали науково-технічної конференції. Вінниця : ВНАУ, 2009. С. 85–90.

167. ДСТУ ISO 6497:2005. Корми для тварин. Методи відбирання проб. [Чинний від 2008-03-01]. Київ, 2008. (Державний стандарт України).

168. ДСТУ ISO 6498:2006. Корми для тварин. Готування проб для дослідження. [Чинний від 2007-07-01]. Київ, 2007. (Державний стандарт України).

169. Kottlan A., Glasser B.J., Khinast J. Vibratory mixing of pharmaceutical powders on a single-tablet-scale. *Powder Technology*. 2023. № 387. Р. 385–395. DOI:10.1016/j.powtec.2021.04.040

170. Li J., Zhang H., Wang R. Reducing segregation in vibrated binary-sized granular mixtures by adjusting particle size ratio. *Granular Matter*. 2024. № 26. Р. 45. DOI: 10.1007/s10035-024-01476-6

171. Шейко В.М., Кушнарєнко Н.М. Організація та методика науково-дослідницької діяльності : підручник. Київ : Знання, 2004. 307 с.
172. UNIPRO. Ваги лабораторні електронні AXIS AD500. URL: <https://unipro.com.ua/ua> (дата звернення: 02.02.2024)
173. Амосов В.В., Сало В.М., Свірень М.О. Математичне моделювання процесів і машин: навчальний посібник для студентів агротехнічних спеціальностей. Харків: Мачулін, 2020. 218 с.
174. Павленко П.М., Філоненко С.Ф., Чередніков О.М., Трейтяк В.В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ : НАУ, 2017. 392 с.
175. Чуйко Г.П., Дворник О.В., Яремчук О.М. Математичне моделювання систем і процесів: навчальний посібник. Миколаїв: ЧДУ імені Петра Могили, 2015. 244 с.
176. Павленко С.І. Чисельне моделювання процесу змішування компонентів компостної суміші робочим органом змішувача формувальника буртів. *Зірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2016. № 3 (95). С. 42–48.
177. Фетісов В.С. Математичні та статистичні пакети. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2011. 324 с.
178. Кисельов О.В., Комарова І.Б., Мілько Д.О., Бакарджієв Р.О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт) : навчальний посібник. Запоріжжя : СТАТУС, 2017. 1181 с.
179. Гарькавий А.Д., Петриченко В.Ф., Спірін А.В. Конкурентоспроможність технологій і машин. Вінниця : Тірас, 2003. 32 с.
180. Бойцова І.А. Чисельні методи: конспект лекцій. Одеса: Видавництво ОНУ ім. І. І. Мечникова, 2015. 126 с.
181. Спірін А.В., Солоня О.В., Килимнюк В.І. Оцінка на конкурентоздатність вібраційного млина. *Вібрації в техніці і технологіях*. 2005. №2 (400). С. 93–95.

182. Тимченко А.А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: підручник для студентів вищих закладів освіти. Київ. Либідь, 2020. 270 с.

183. Тимченко А.А. Основи системного підходу та системного аналізу об'єктів нової техніки: навч. посіб. Київ : Либідь, 2004. 288 с.

184. Задачин В.М., Конюшенко І.Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Харків: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

185. Волинець Є.О. Використання вібровідцентрового змішувача для приготування високоенергетичних сумішей. *Сучасні проблеми землеробської механіки*. Збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції (17-19 жовтня 2023 р.). Київ: НУБіП. 2023. С. 71–73.

186. Мирончук В.Г. та ін. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця : Нова книга, 2004. 288 с.

187. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. [Чинний від 2006-01-01]. Київ, 2005. 16 с. (Державний стандарт України).

188. 7eminar. Погодинна оплата праці: що враховувати в 2025 році. URL: <https://7eminar.ua/news/3029-pogodinna-oplata-praci-shho-vrachovuvati-v-2025-roci> (дата звернення: 25.02.2025).

189. Енера. Тарифи на послуги постачальника універсальних послуг (ПУП). URL: <https://vin.enera.ua/el/tariff> (дата звернення: 14.02.2025).

190. Техніко-економічне обґрунтування застосування машин, обладнання і технологій : навч. посіб / Р.Б. Гевко та ін. Тернопіль. 2002. 164 с.

ДОДАТКИ

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 122109

Ескізне креслення «Принципова схема вібровідцентрового змішувача»

(вид, назва твору)

Автор (співавтори) Полєвода Юрій Алікович, Волинець Євгеній Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності), псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать спільно Полєвода Юрій Алікович, вул. 600-річчя, 9В-2, кв. 15, м. Вінниця, 21021; Волинець Євгеній Олександрович, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008

(прізвище, ім'я, по батькові (за наявності) фізичної особи / найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 20 грудня 2023 р.

Директор Державної організації
«Український національний
офіс інтелектуальної власності
та інновацій»

Олена ОРЛЮК



НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРНОІВІ)

Оригіналом цього документа є електронний документ з ідентифікатором:

CR1725201223

Для отримання оригіналу документа необхідно:

1. Перейти за посиланням: <https://sis.nipo.gov.ua>
2. Обрати пункт меню «СЕРВІСИ» «Отримати оригінал документу».
3. Вказати ідентифікатор документу та натиснути на кнопку «Завантажити».

Цей ідентифікатор є конфіденційною інформацією,
не повідомляйте його нікому



МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРНОІВІ)



вул. Дмитра Голзенка, 1, м. Київ, 01601, тел.: +380 44 209-27-06, +380 67 501-05-95
e-mail: office@nipo.gov.ua, http://www.nipo.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 44673629

20.12.2023 р. № 07337/АП/23

Юрію ПОЛЄВОДІ

вул. 600-річчя, 9В-2, кв. 15, м.
Вінниця, 21021

*Стосовно реєстрації твору за заявкою
№ с202306088*

Відповідно до статті 4 Закону України «Про авторське право і суміжні права» та пункту 7 розділу III Порядку державної реєстрації авторського права і договорів, які стосуються майнових прав на твір, затвердженого наказом Міністерства економіки України від 16 серпня 2023 р. № 11319, зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 9 жовтня 2023 р. за № 1760/40816, надсилаємо Вам свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір від 20 грудня 2023 р. № 122109 за заявкою від 16 серпня 2023 р. № с202306088.

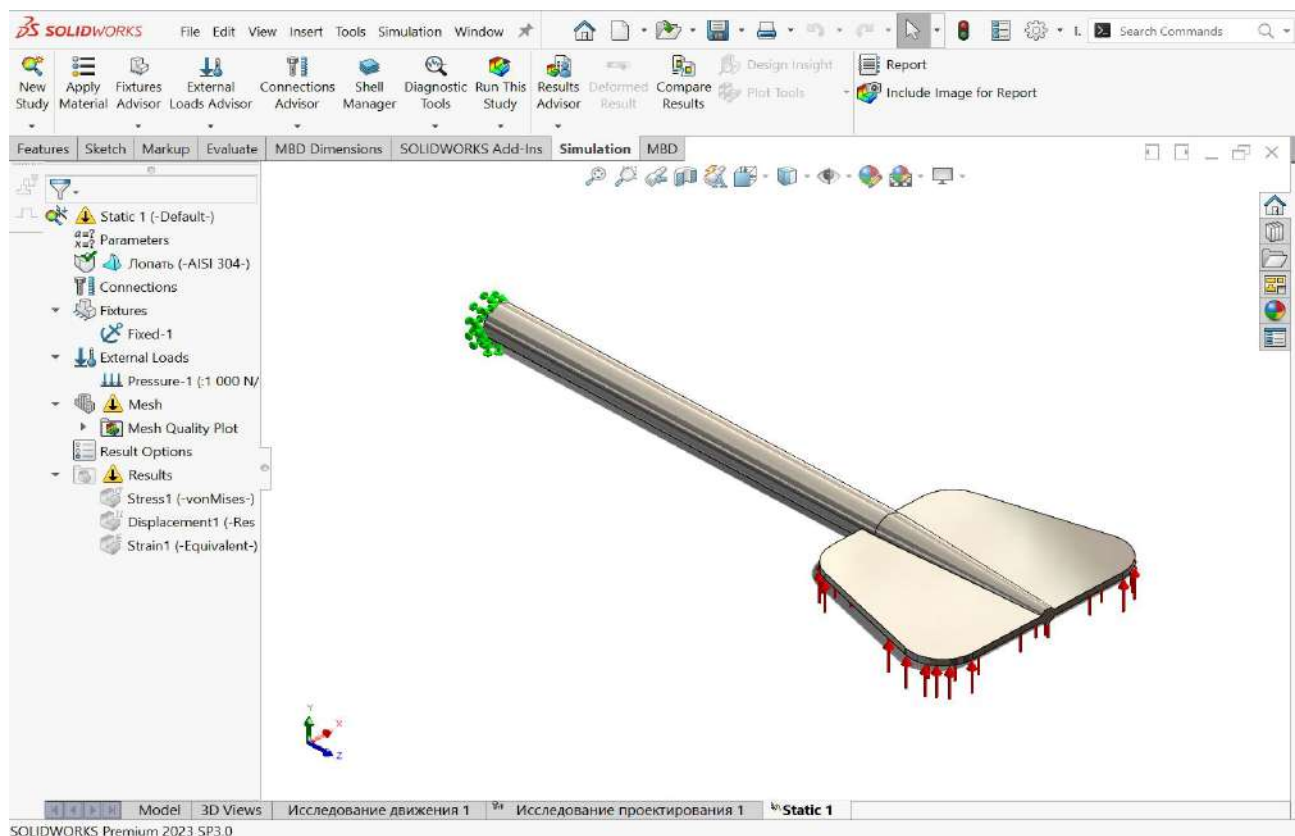
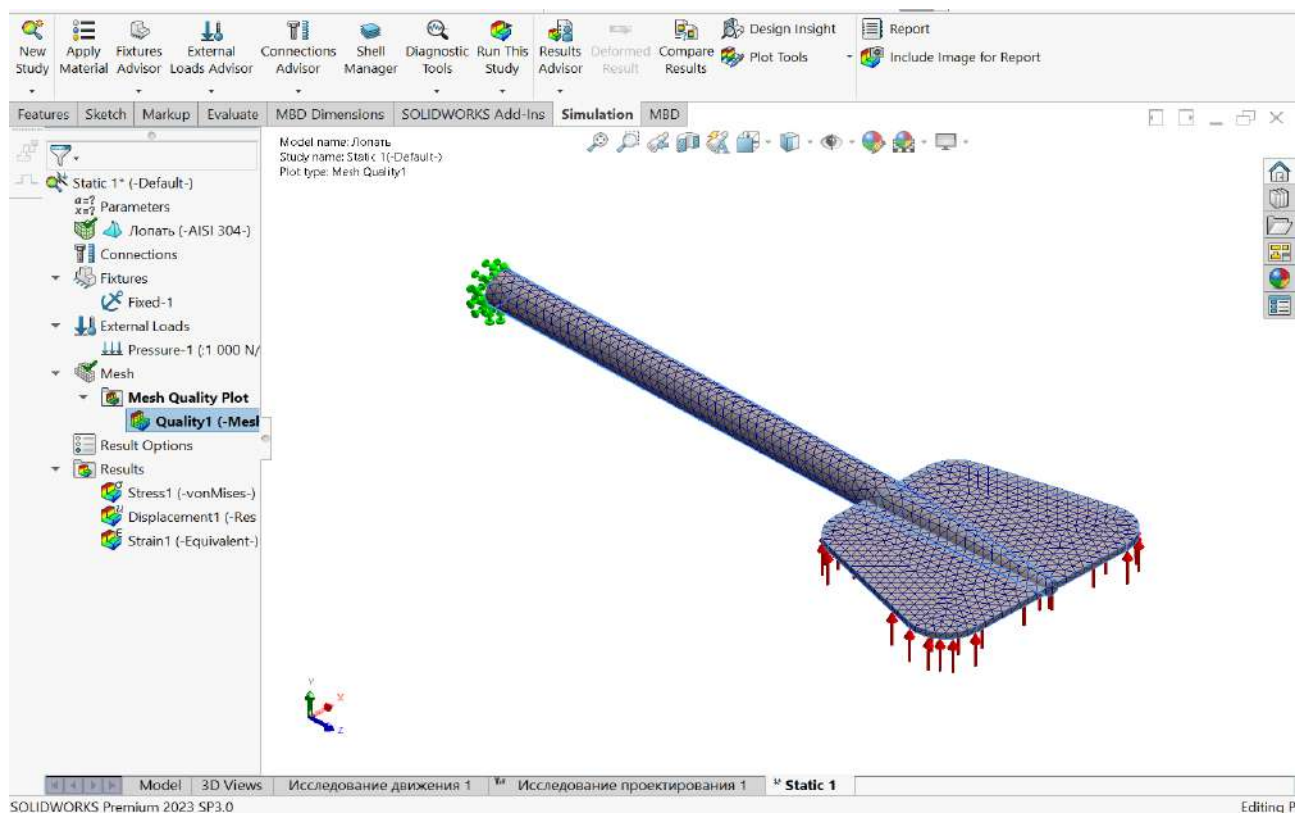
Додаток: на 2 арк.

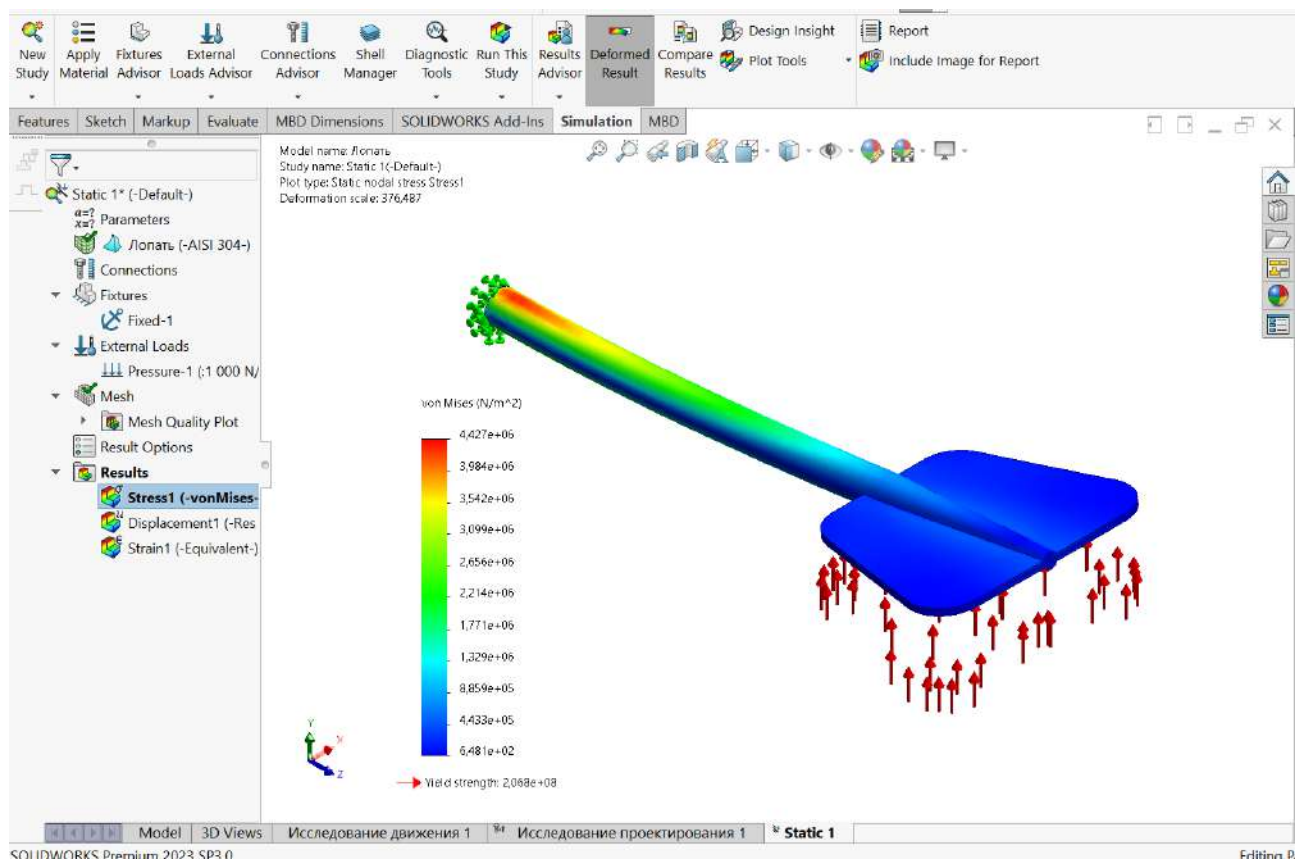
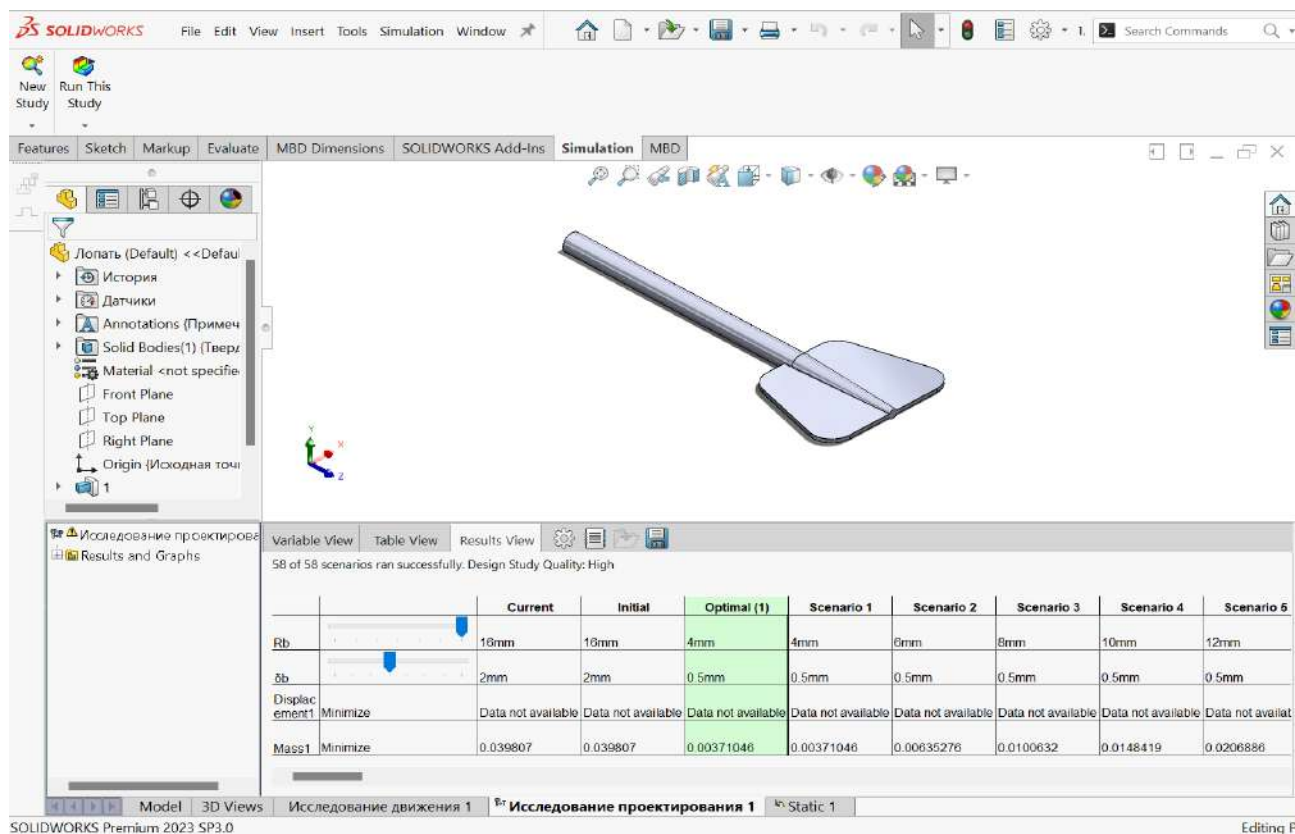
Начальник департаменту розвитку сфери
авторського права і суміжних прав

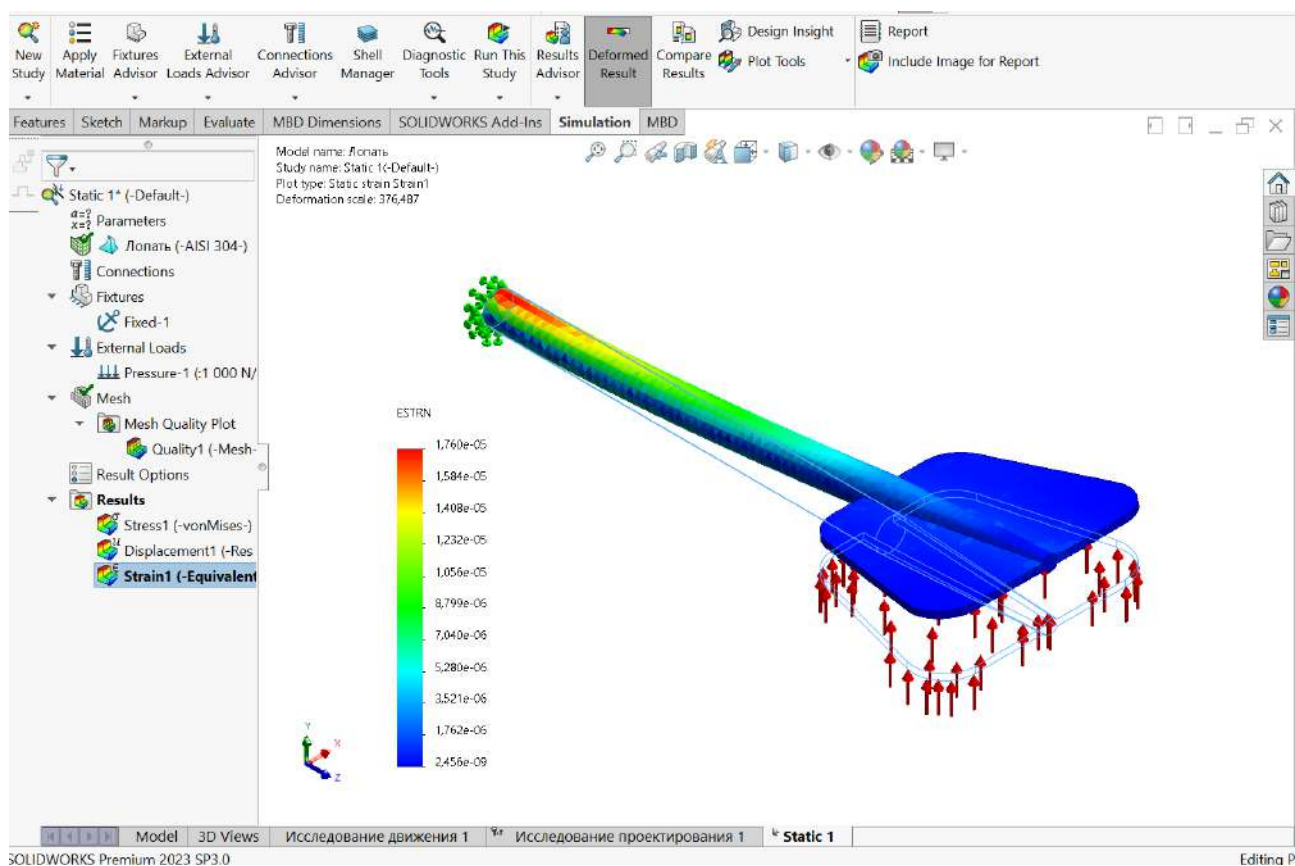
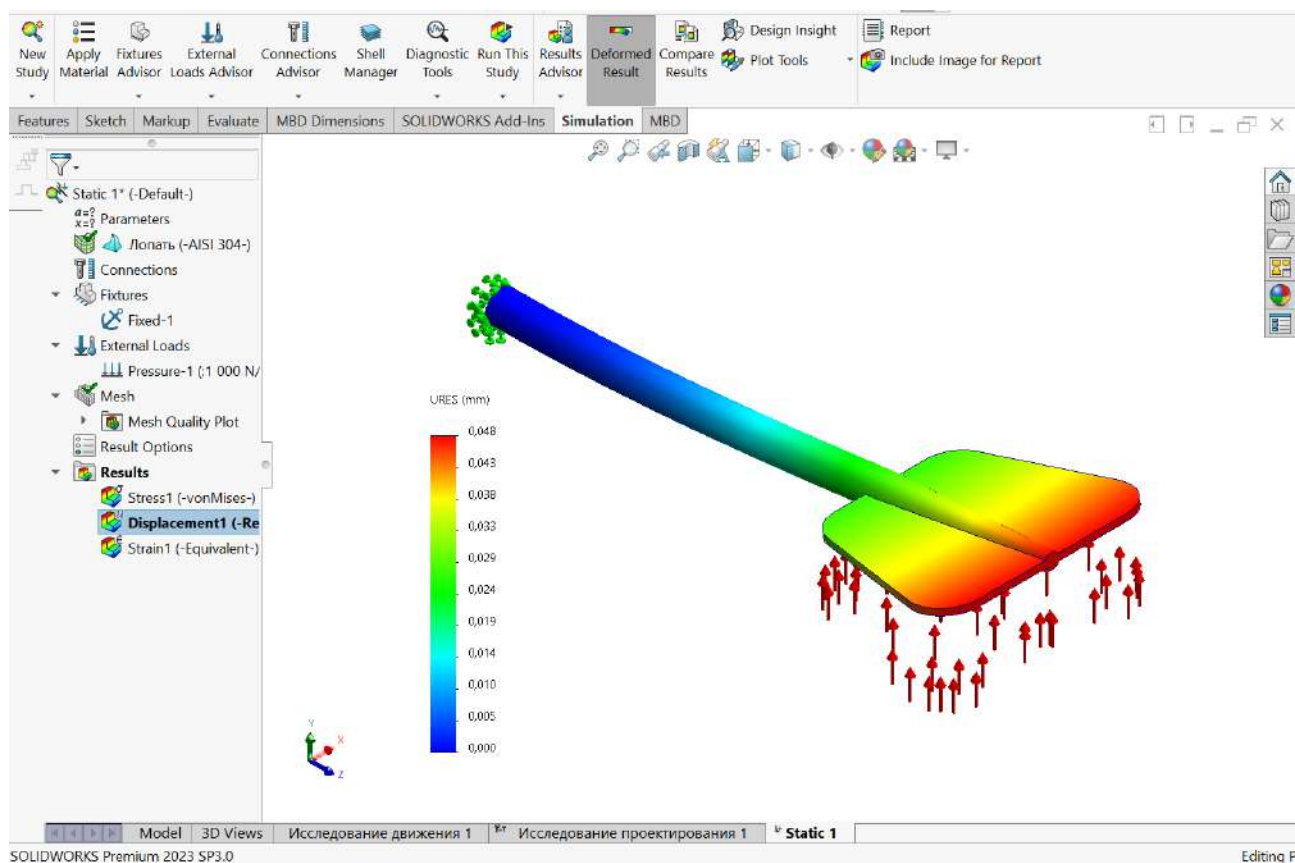
Любов МАЙДАНИК

Додаток Б

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану лопаті в програмі SolidWorks Simulink







Програмний код Wolfram Cloud для побудови діаграми розсіву даних

```

M1 = {{4, 0.5, 2.778}, {6, 0.5, 0.6217}, {8, 0.5, 0.2486}, {10, 0.5, 0.1459}, {12, 0.5, 0.1078},
      {14, 0.5, 0.08726}, {16, 0.5, 0.07668}, {4, 1, 2.698}, {6, 1, 0.5461}, {8, 1, 0.1773},
      {10, 1, 0.07745}, {12, 1, 0.04167}, {14, 1, 0.02626}, {16, 1, 0.01863}, {4, 1.5, 2.685},
      {6, 1.5, 0.5386}, {8, 1.5, 0.1701}, {10, 1.5, 0.07037}, {12, 1.5, 0.03488}, {14, 1.5, 0.01979},
      {16, 1.5, 0.01248}, {4, 2, 2.742}, {6, 2, 0.5369}, {8, 2, 0.1683}, {10, 2, 0.06865},
      {12, 2, 0.03323}, {14, 2, 0.0182}, {16, 2, 0.01096}, {4, 2.5, 2.694}, {6, 2.5, 0.5366},
      {8, 2.5, 0.1678}, {10, 2.5, 0.06806}, {12, 2.5, 0.03264}, {14, 2.5, 0.01762}, {16, 2.5, 0.01041},
      {4, 3, 2.751}, {6, 3, 0.5367}, {8, 3, 0.1676}, {10, 3, 0.06783}, {12, 3, 0.0324}, {14, 3, 0.01738},
      {16, 3, 0.01017}, {4, 3.5, 2.762}, {6, 3.5, 0.5376}, {8, 3.5, 0.1676}, {10, 3.5, 0.06775},
      {12, 3.5, 0.03228}, {14, 3.5, 0.01726}, {16, 3.5, 0.01005}, {4, 4, 2.804}, {6, 4, 0.5386},
      {8, 4, 0.1678}, {10, 4, 0.06774}, {12, 4, 0.03223}, {14, 4, 0.0172}, {16, 4, 0.009981}};

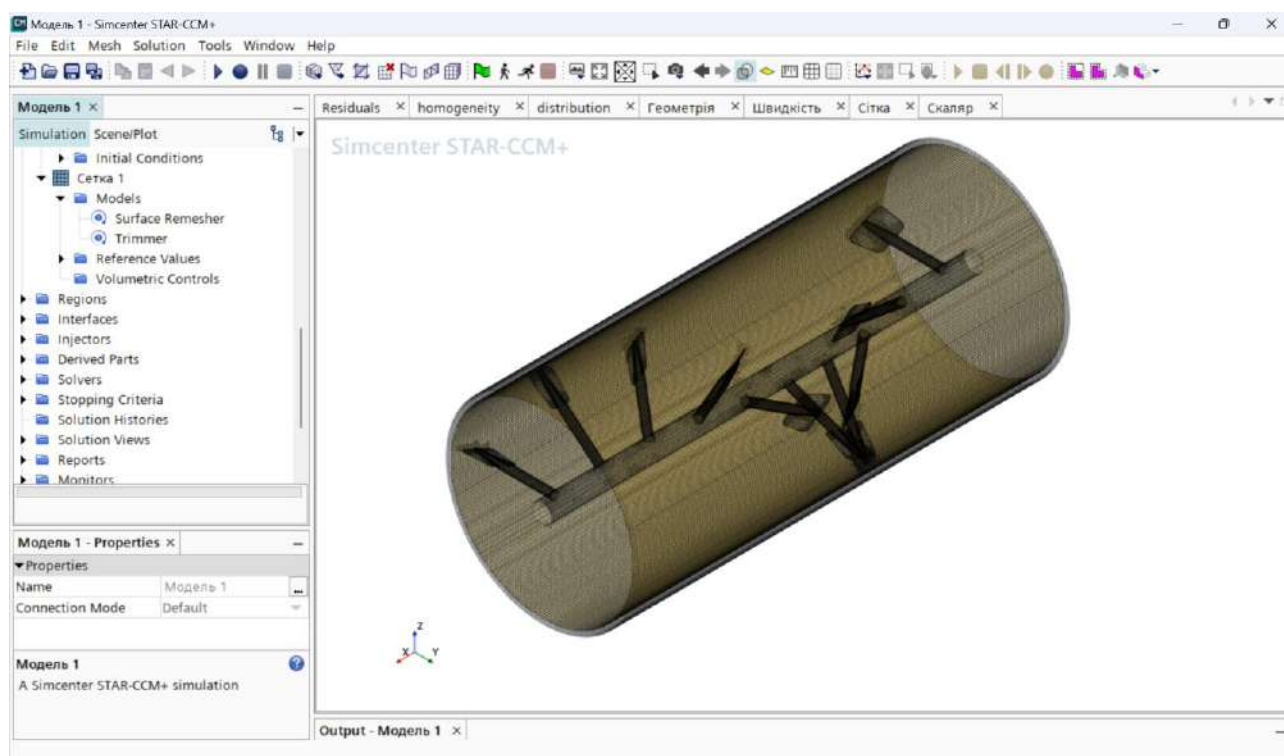
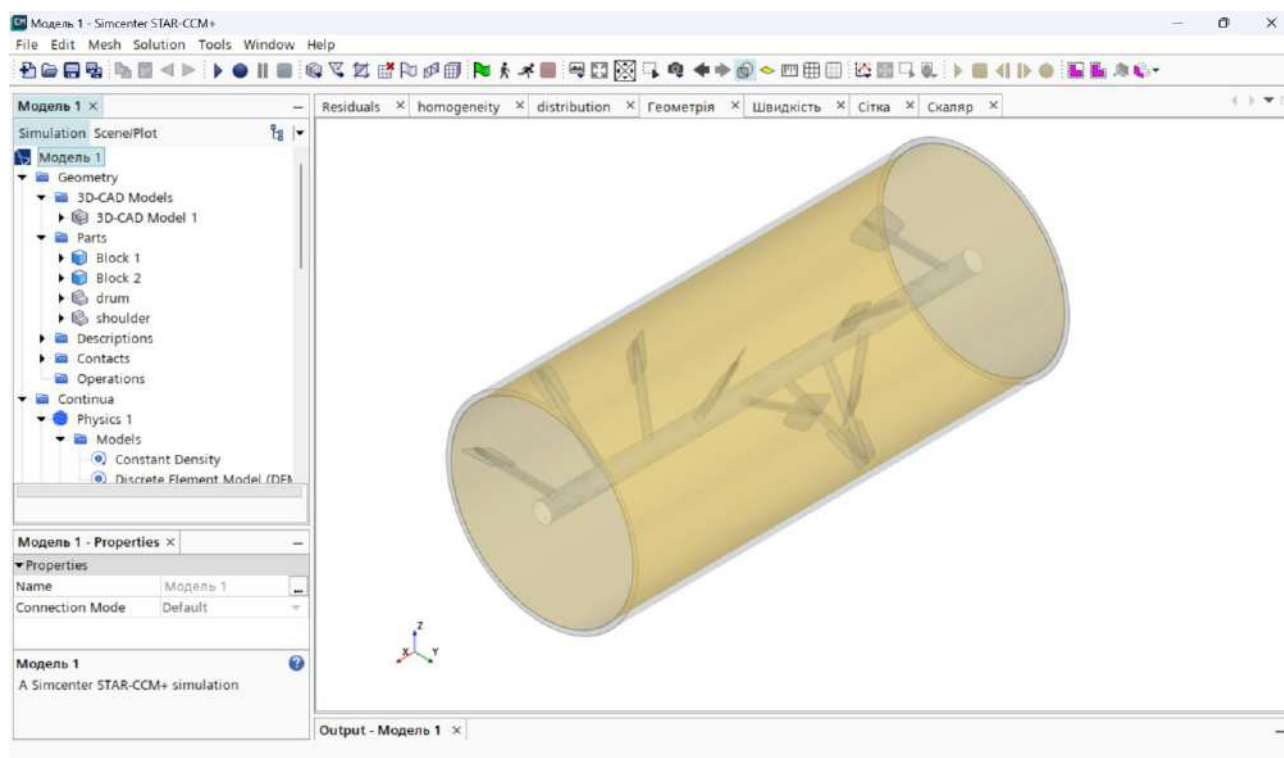
M2 = {{4, 0.5, 0.185523}, {6, 0.5, 0.317638}, {8, 0.5, 0.50316}, {10, 0.5, 0.742095}, {12, 0.5, 1.03443},
      {14, 0.5, 1.380175}, {16, 0.5, 1.77933}, {4, 1, 0.264276}, {6, 1, 0.394974}, {8, 1, 0.57909},
      {10, 1, 0.816615}, {12, 1, 1.10755}, {14, 1, 1.451895}, {16, 1, 1.849645}, {4, 1.5, 0.34312},
      {6, 1.5, 0.4723685}, {8, 1.5, 0.65506}, {10, 1.5, 0.89117}, {12, 1.5, 1.1807}, {14, 1.5, 1.523635},
      {16, 1.5, 1.91998}, {4, 2, 0.422106}, {6, 2, 0.549855}, {8, 2, 0.7311}, {10, 2, 0.96578},
      {12, 2, 1.25389}, {14, 2, 1.595415}, {16, 2, 1.99035}, {4, 2.5, 0.501295}, {6, 2.5, 0.627465},
      {8, 2.5, 0.807225}, {10, 2.5, 1.040465}, {12, 2.5, 1.32714}, {14, 2.5, 1.66724}, {16, 2.5, 2.06076},
      {4, 3, 0.58077}, {6, 3, 0.705235}, {8, 3, 0.88347}, {10, 3, 1.115235}, {12, 3, 1.400465},
      {14, 3, 1.739135}, {16, 3, 2.13123}, {4, 3.5, 0.660645}, {6, 3.5, 0.783205}, {8, 3.5, 0.959855},
      {10, 3.5, 1.19012}, {12, 3.5, 1.47388}, {14, 3.5, 1.811105}, {16, 3.5, 2.201765}, {4, 4, 0.741235},
      {6, 4, 0.86143}, {8, 4, 1.03641}, {10, 4, 1.26513}, {12, 4, 1.547405}, {14, 4, 1.883165},
      {16, 4, 2.27238}};

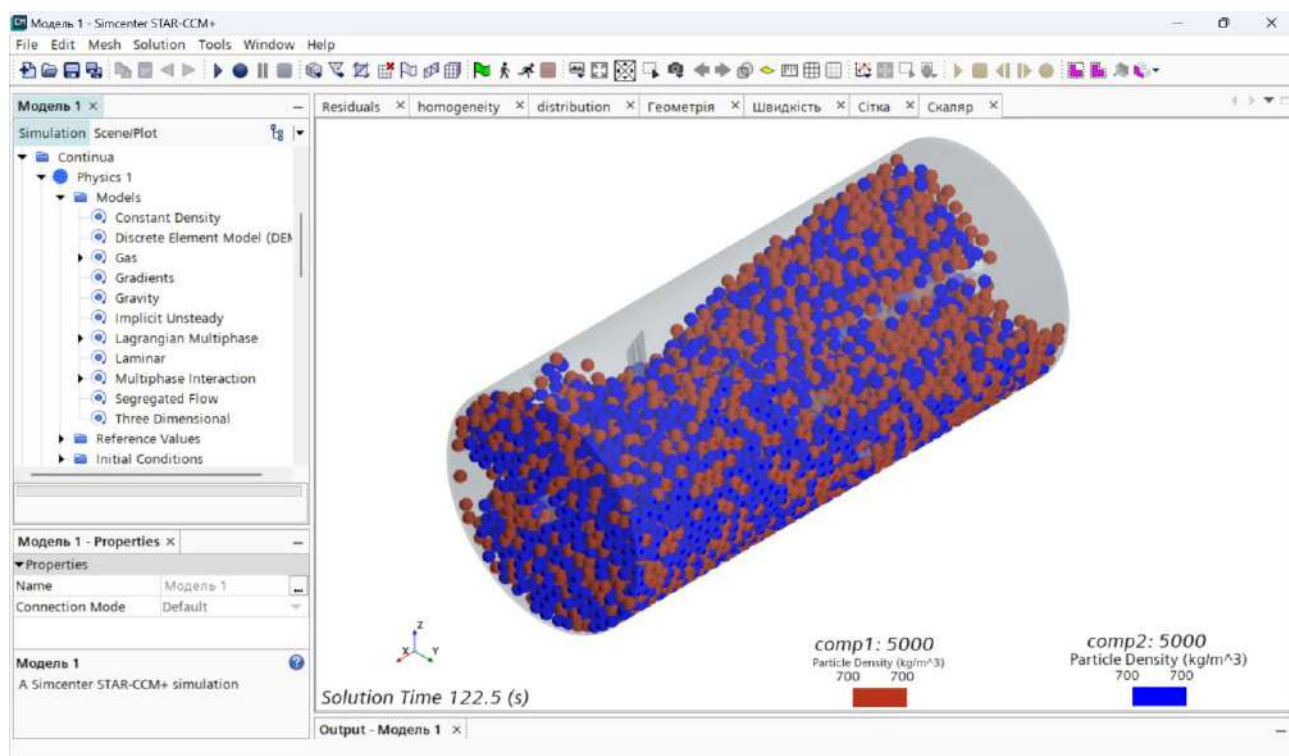
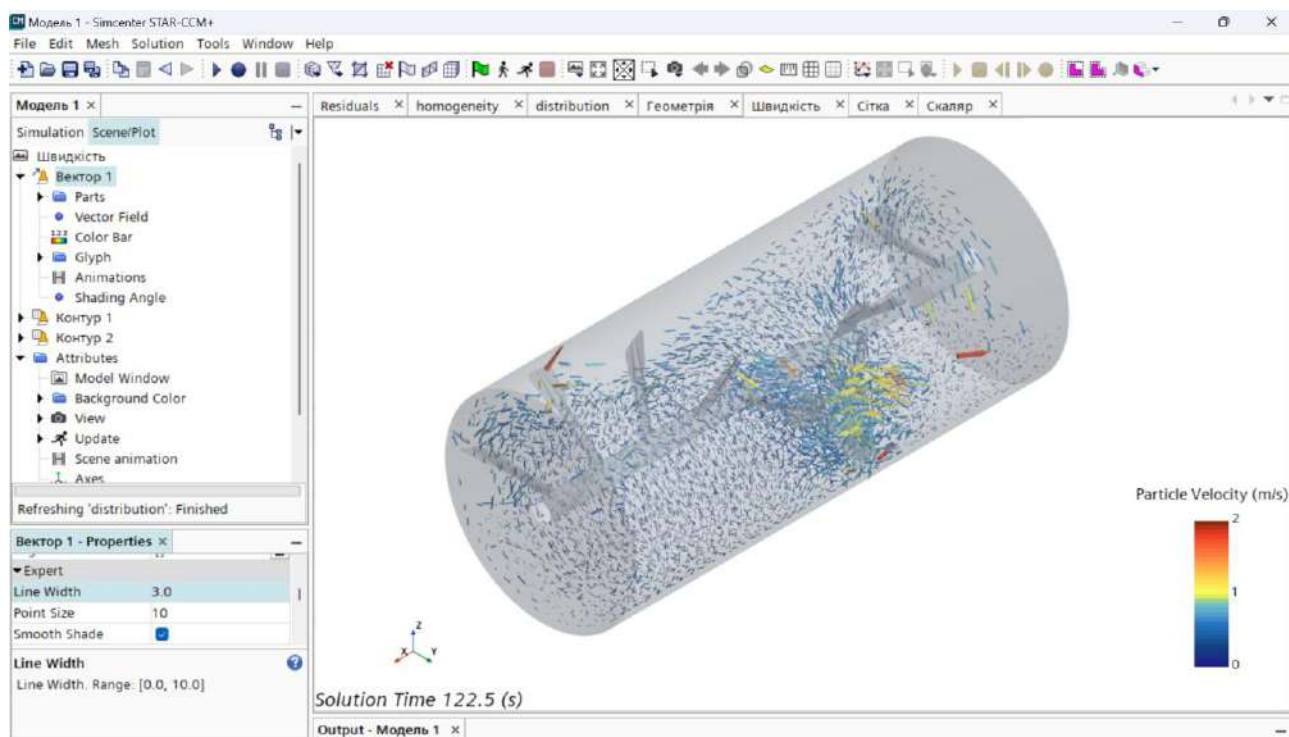
ListPlot3D[{M1, M2}, PlotStyle -> {{Opacity[0.5], Orange}, {Opacity[0.5], Cyan}},
  |тримірна діаграма розсіву... |стиль графіка |прозорість |помаранч... |прозорість |блакитний
  AxesLabel -> {"Rb, мм", "δb, мм", ""},
  |позначення на осях
  LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontColor -> Black, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 5,
  |стиль помітки |директива |розмір шрифту |копір шрифту |чорний |сімейство шрифту |сітка
  PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]
  |тематичний стиль графіка |легенди графіка |автоматичний

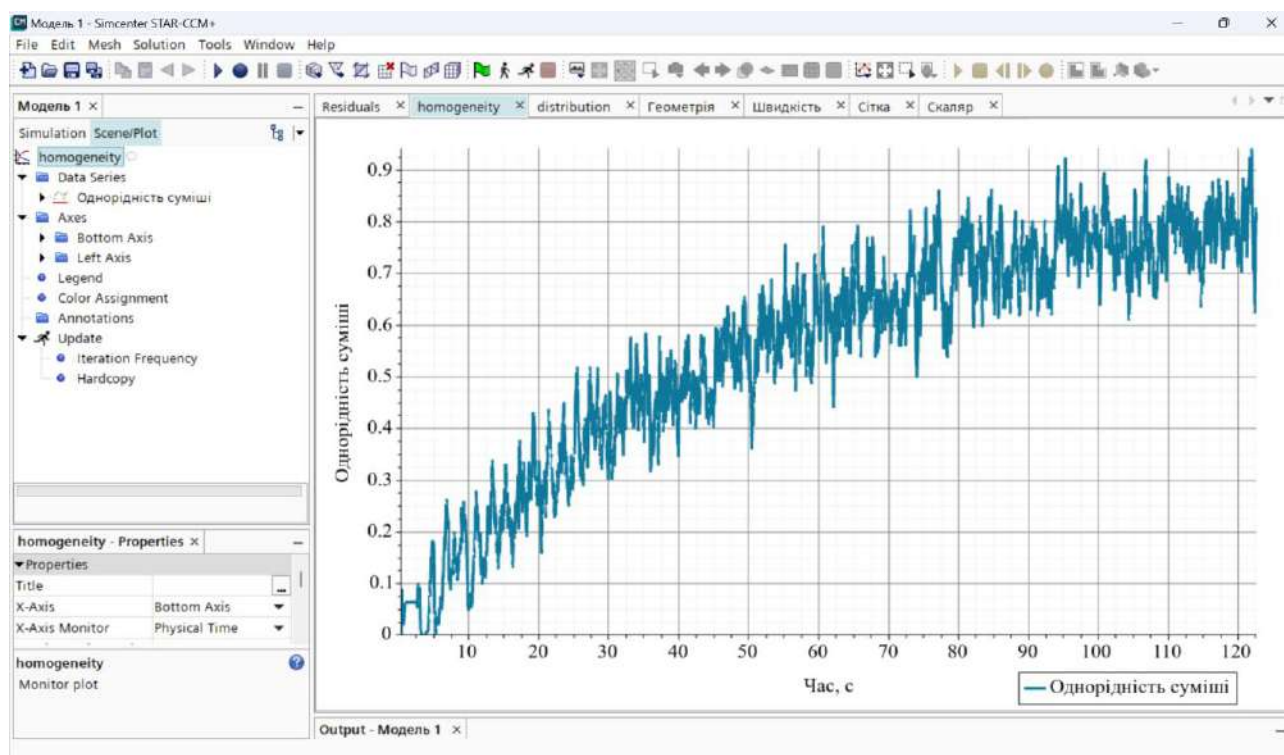
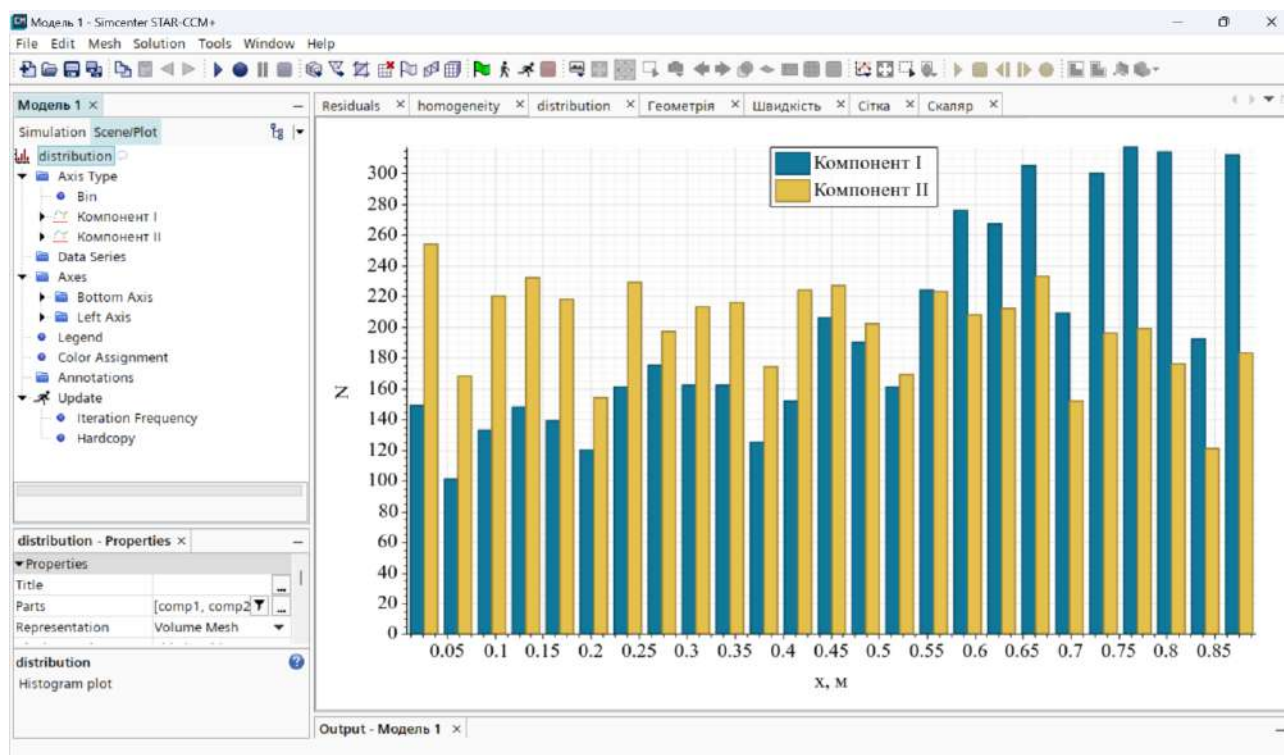
```

Додаток В

Процес моделювання процесу змішування в Simcenter STAR-CCM+







Додаток Г

Результати другого етапу чисельного моделювання процесу змішування

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	n _л , XB ⁻¹	n _к , XB ⁻¹	n _в , XB ⁻¹	A _в , мм	t _{0,9} , с	k _в	x ₅
1	-1	-1	-1	-1	20	0	200	0	119.8	0,00	-1
2	-1	-1	-1	0	20	0	200	5	114.1	0,22	-0,96
3	-1	-1	-1	1	20	0	200	10	131.2	0,45	-0,92
4	-1	-1	0	-1	20	0	600	0	128.8	0,00	-1
5	-1	-1	0	0	20	0	600	5	133.4	2,01	-0,64
6	-1	-1	0	1	20	0	600	10	104.8	4,02	-0,28
7	-1	-1	1	-1	20	0	1000	0	149.3	0,00	-1
8	-1	-1	1	0	20	0	1000	5	115.8	5,59	0
9	-1	-1	1	1	20	0	1000	10	119.3	11,18	1
10	-1	0	-1	-1	20	15	200	0	119.1	0,00	-1
11	-1	0	-1	0	20	15	200	5	96.9	0,22	-0,96
12	-1	0	-1	1	20	15	200	10	108	0,45	-0,92
13	-1	0	0	-1	20	15	600	0	118.4	0,00	-1
14	-1	0	0	0	20	15	600	5	100.3	2,01	-0,64
15	-1	0	0	1	20	15	600	10	97	4,02	-0,28
16	-1	0	1	-1	20	15	1000	0	126.7	0,00	-1
17	-1	0	1	0	20	15	1000	5	109.8	5,59	0
18	-1	0	1	1	20	15	1000	10	102.5	11,18	1
19	-1	1	-1	-1	20	30	200	0	112	0,00	-1
20	-1	1	-1	0	20	30	200	5	98.3	0,22	-0,96
21	-1	1	-1	1	20	30	200	10	101.8	0,45	-0,92
22	-1	1	0	-1	20	30	600	0	117.9	0,00	-1
23	-1	1	0	0	20	30	600	5	96.2	2,01	-0,64
24	-1	1	0	1	20	30	600	10	99	4,02	-0,28
25	-1	1	1	-1	20	30	1000	0	127	0,00	-1
26	-1	1	1	0	20	30	1000	5	104.6	5,59	0
27	-1	1	1	1	20	30	1000	10	105.7	11,18	1
28	0	-1	-1	-1	40	0	200	0	119.3	0,00	-1
29	0	-1	-1	0	40	0	200	5	101.5	0,22	-0,96
30	0	-1	-1	1	40	0	200	10	100.5	0,45	-0,92
31	0	-1	0	-1	40	0	600	0	128.2	0,00	-1
32	0	-1	0	0	40	0	600	5	100.1	2,01	-0,64
33	0	-1	0	1	40	0	600	10	91	4,02	-0,28
34	0	-1	1	-1	40	0	1000	0	111.5	0,00	-1
35	0	-1	1	0	40	0	1000	5	107.2	5,59	0
36	0	-1	1	1	40	0	1000	10	107.9	11,18	1
37	0	0	-1	-1	40	15	200	0	103	0,00	-1
38	0	0	-1	0	40	15	200	5	87.2	0,22	-0,96
39	0	0	-1	1	40	15	200	10	85	0,45	-0,92

№	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	n _л , XB ⁻¹	n _к , XB ⁻¹	n _в , XB ⁻¹	A _в , мм	t _{0,9} , с	k _в	x ₅
40	0	0	0	-1	40	15	600	0	99.5	0,00	-1
41	0	0	0	0	40	15	600	5	89.7	2,01	-0,64
42	0	0	0	1	40	15	600	10	83	4,02	-0,28
43	0	0	1	-1	40	15	1000	0	113.5	0,00	-1
44	0	0	1	0	40	15	1000	5	95.5	5,59	0
45	0	0	1	1	40	15	1000	10	96.2	11,18	1
46	0	1	-1	-1	40	30	200	0	95.6	0,00	-1
47	0	1	-1	0	40	30	200	5	83.3	0,22	-0,96
48	0	1	-1	1	40	30	200	10	85	0,45	-0,92
49	0	1	0	-1	40	30	600	0	99.9	0,00	-1
50	0	1	0	0	40	30	600	5	83	2,01	-0,64
51	0	1	0	1	40	30	600	10	80.7	4,02	-0,28
52	0	1	1	-1	40	30	1000	0	109.1	0,00	-1
53	0	1	1	0	40	30	1000	5	88.4	5,59	0
54	0	1	1	1	40	30	1000	10	87.8	11,18	1
55	1	-1	-1	-1	60	0	200	0	119.4	0,00	-1
56	1	-1	-1	0	60	0	200	5	95.4	0,22	-0,96
57	1	-1	-1	1	60	0	200	10	96.2	0,45	-0,92
58	1	-1	0	-1	60	0	600	0	116.5	0,00	-1
59	1	-1	0	0	60	0	600	5	94.8	2,01	-0,64
60	1	-1	0	1	60	0	600	10	85	4,02	-0,28
61	1	-1	1	-1	60	0	1000	0	119.6	0,00	-1
62	1	-1	1	0	60	0	1000	5	96.4	5,59	0
63	1	-1	1	1	60	0	1000	10	85.9	11,18	1
64	1	0	-1	-1	60	15	200	0	112.3	0,00	-1
65	1	0	-1	0	60	15	200	5	86	0,22	-0,96
66	1	0	-1	1	60	15	200	10	85.8	0,45	-0,92
67	1	0	0	-1	60	15	600	0	106.5	0,00	-1
68	1	0	0	0	60	15	600	5	92.1	2,01	-0,64
69	1	0	0	1	60	15	600	10	95.7	4,02	-0,28
70	1	0	1	-1	60	15	1000	0	111.3	0,00	-1
71	1	0	1	0	60	15	1000	5	96.5	5,59	0
72	1	0	1	1	60	15	1000	10	93.1	11,18	1
73	1	1	-1	-1	60	30	200	0	107.5	0,00	-1
74	1	1	-1	0	60	30	200	5	84.4	0,22	-0,96
75	1	1	-1	1	60	30	200	10	94.5	0,45	-0,92
76	1	1	0	-1	60	30	600	0	108.1	0,00	-1
77	1	1	0	0	60	30	600	5	93.3	2,01	-0,64
78	1	1	0	1	60	30	600	10	85.9	4,02	-0,28
79	1	1	1	-1	60	30	1000	0	113.1	0,00	-1
80	1	1	1	0	60	30	1000	5	99.9	5,59	0
81	1	1	1	1	60	30	1000	10	91.8	11,18	1

Програмний код Wolfram Cloud для визначення квадратичних рівнянь регресії залежності для часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від чотирьох факторів досліджень

```

M = {{-1, -1, -1, -1, 119.8}, {-1, -1, -1, 0, 114.1}, {-1, -1, -1, 1, 131.2},
      {-1, -1, 0, -1, 128.8}, {-1, -1, 0, 0, 133.4}, {-1, -1, 0, 1, 104.8},
      {-1, -1, 1, -1, 149.3}, {-1, -1, 1, 0, 115.8}, {-1, -1, 1, 1, 119.3},
      {-1, 0, -1, -1, 119.1}, {-1, 0, -1, 0, 96.9}, {-1, 0, -1, 1, 108},
      {-1, 0, 0, -1, 118.4}, {-1, 0, 0, 0, 100.3}, {-1, 0, 0, 1, 97},
      {-1, 0, 1, -1, 126.7}, {-1, 0, 1, 0, 109.8}, {-1, 0, 1, 1, 102.5},
      {-1, 1, -1, -1, 112}, {-1, 1, -1, 0, 98.3}, {-1, 1, -1, 1, 101.8},
      {-1, 1, 0, -1, 117.9}, {-1, 1, 0, 0, 96.2}, {-1, 1, 0, 1, 99},
      {-1, 1, 1, -1, 127}, {-1, 1, 1, 0, 104.6}, {-1, 1, 1, 1, 105.7},
      {0, -1, -1, -1, 119.3}, {0, -1, -1, 0, 101.5}, {0, -1, -1, 1, 100.5},
      {0, -1, 0, -1, 128.2}, {0, -1, 0, 0, 100.1}, {0, -1, 0, 1, 91},
      {0, -1, 1, -1, 111.5}, {0, -1, 1, 0, 107.2}, {0, -1, 1, 1, 107.9},
      {0, 0, -1, -1, 103}, {0, 0, -1, 0, 87.2}, {0, 0, -1, 1, 85},
      {0, 0, 0, -1, 99.5}, {0, 0, 0, 0, 89.7}, {0, 0, 0, 1, 83},
      {0, 0, 1, -1, 113.5}, {0, 0, 1, 0, 95.5}, {0, 0, 1, 1, 96.2},
      {0, 1, -1, -1, 95.6}, {0, 1, -1, 0, 83.3}, {0, 1, -1, 1, 85},
      {0, 1, 0, -1, 99.9}, {0, 1, 0, 0, 83}, {0, 1, 0, 1, 80.7},
      {0, 1, 1, -1, 109.1}, {0, 1, 1, 0, 88.4}, {0, 1, 1, 1, 87.8},
      {1, -1, -1, -1, 119.4}, {1, -1, -1, 0, 95.4}, {1, -1, -1, 1, 96.2},
      {1, -1, 0, -1, 116.5}, {1, -1, 0, 0, 94.8}, {1, -1, 0, 1, 85},
      {1, -1, 1, -1, 119.6}, {1, -1, 1, 0, 96.4}, {1, -1, 1, 1, 85.9},
      {1, 0, -1, -1, 112.3}, {1, 0, -1, 0, 86}, {1, 0, -1, 1, 85.8},
      {1, 0, 0, -1, 106.5}, {1, 0, 0, 0, 92.1}, {1, 0, 0, 1, 95.7},
      {1, 0, 1, -1, 111.3}, {1, 0, 1, 0, 96.5}, {1, 0, 1, 1, 93.1},
      {1, 1, -1, -1, 107.5}, {1, 1, -1, 0, 84.4}, {1, 1, -1, 1, 94.5},
      {1, 1, 0, -1, 108.1}, {1, 1, 0, 0, 93.3}, {1, 1, 0, 1, 85.9},
      {1, 1, 1, -1, 113.1}, {1, 1, 1, 0, 99.9}, {1, 1, 1, 1, 91.8}};

nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a40 * x4 +
  нелінійна регресія
  a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 + a14 * x1 * x4 + a23 * x2 * x3 + a24 * x2 * x4 +
  a34 * x3 * x4 +
  a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2 + a44 * x4^2,
  {a00, a10, a20, a30, a40, a12, a13, a14, a23, a24, a34, a11, a22, a33, a44 },
  {a00, a10, a20, a30, a40, a12, a13, a14, a23, a24, a34, a11, a22, a33, a44 },
  {x1, x2, x3, x4}];

Normal[nlm]
_нормальний вираз
nlm["ParameterTable"]
nlm["ANOVATable"]

```

```

 $\theta[x1\_ , x2\_ , x3\_ , x4\_ ] :=$ 
87.36296296296295` - 7.235185185185197`  $x1$  + 8.509259259259295`  $x1^2$  -
6.279629629629633`  $x2$  + 3.4250000000000047`  $x1 x2$  + 4.175925925925888`  $x2^2$  +
2.635185185185177`  $x3$  + 3.1648148148148447`  $x3^2$  - 9.492592592592603`  $x4$  -
1.96944444444444348`  $x3 x4$  + 7.870370370370389`  $x4^2$ 
x10 = 40;
dx1 = 20;
x20 = 15;
dx2 = 15;
x30 = 600;
dx3 = 400;
x40 = 5;
dx4 = 5;
 $\theta\theta[nl\_ , nk\_ , nv\_ , Av\_ ] :=$ 
 $\theta[(nl - x10) / dx1, (nk - x20) / dx2, (nv - x30) / dx3, (Av - x40) / dx4];$ 
Expand[ $\theta\theta[nl, nk, nv, Av]$ ]
розкрити дужки
FindMinimum[{ $\theta\theta[nl, nk, nv, Av]$ ,  $x10 - dx1 \leq nl \leq x10 + dx1$ ,
знайти мінімум
 $x20 - dx2 \leq nk \leq x20 + dx2$ ,  $x30 - dx3 \leq nv \leq x30 + dx3$ ,  $x40 - dx4 \leq Av \leq x40 + dx4$ },
{nl,  $x10 - dx1$ }, {nk,  $x20 - dx2$ }, {nv,  $x30 - dx3$ }, {Av,  $x40 - dx4$ }]
Opt = FindMaximum[{ $\theta\theta[nl, nk, nv, Av]$ ,  $x10 - dx1 \leq nl \leq x10 + dx1$ ,
знайти максимум
 $x20 - dx2 \leq nk \leq x20 + dx2$ ,  $x30 - dx3 \leq nv \leq x30 + dx3$ ,  $x40 - dx4 \leq Av \leq x40 + dx4$ },
{nl,  $x10 + 0 dx1$ }, {nk,  $x20 + 0 dx2$ }, {nv,  $x30 + 0 dx3$ }, {Av,  $x40 + 0 dx4$ }]
nlopt = nl /. Last[Opt];
останній
nkopt = nk /. Last[Opt];
останній
nvopt = nv /. Last[Opt];
останній
Avopt = Av /. Last[Opt];
останній
Plot3D[{ $\theta\theta[nl, nk, x30, x40]$ }, {nl,  $x10 - dx1, x10 + dx1$ },
графік функції 2-х змінних
{nk,  $x20 - dx2, x20 + dx2$ }, ColorFunction -> "DarkBands",
функція забарвлювання
AxesLabel -> {" $n_L, x_B^{-1}$ ", " $n_K, x_B^{-1}$ ", " $t_{0,9}, c$ "},
позначення на осях
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
стиль помітки директива розмір шрифту сімейство шрифту сітка
PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]
тематичний стиль графіка легенди графіка автоматичний
Plot3D[{ $\theta\theta[x10, x20, nv, Av]$ }, {Av,  $x40 - dx4, x40 + dx4$ },
графік функції 2-х змінних

```

```

{nv, x30 - dx3, x30 + dx3}, ColorFunction → "DarkBands",
    [функція забарвлення]
AxesLabel → {"AB, мм", "nB, хв-1", "t0,9, с"},
    [позначення на осях]
LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times"], Mesh → 20,
    [стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
PlotTheme → "Detailed", PlotLegends → Automatic]
    [тематичний стиль графіка] [легенди графіка] [автоматичний]

```

Програмний код Wolfram Cloud для визначення квадратичних рівнянь регресії залежності для часу досягнення заданої однорідності $t_{0,9}$ від трьох факторів досліджень

```

M = {{-1, -1, -1, 119.8}, {-1, -1, -0.96, 114.1}, {-1, -1, -0.92, 131.2},
    {-1, -1, -1, 128.8}, {-1, -1, -0.64, 133.4}, {-1, -1, -0.28, 104.8},
    {-1, -1, -1, 149.3}, {-1, -1, 0, 115.8}, {-1, -1, 1, 119.3},
    {-1, 0, -1, 119.1}, {-1, 0, -0.96, 96.9}, {-1, 0, -0.92, 108},
    {-1, 0, -1, 118.4}, {-1, 0, -0.64, 100.3}, {-1, 0, -0.28, 97},
    {-1, 0, -1, 126.7}, {-1, 0, 0, 109.8}, {-1, 0, 1, 102.5},
    {-1, 1, -1, 112}, {-1, 1, -0.96, 98.3}, {-1, 1, -0.92, 101.8},
    {-1, 1, -1, 117.9}, {-1, 1, -0.64, 96.2}, {-1, 1, -0.28, 99},
    {-1, 1, -1, 127}, {-1, 1, 0, 104.6}, {-1, 1, 1, 105.7}, {0, -1, -1, 119.3},
    {0, -1, -0.96, 101.5}, {0, -1, -0.92, 100.5}, {0, -1, -1, 128.2},
    {0, -1, -0.64, 100.1}, {0, -1, -0.28, 91}, {0, -1, -1, 111.5},
    {0, -1, 0, 107.2}, {0, -1, 1, 107.9}, {0, 0, -1, 103}, {0, 0, -0.96, 87.2},
    {0, 0, -0.92, 85}, {0, 0, -1, 99.5}, {0, 0, -0.64, 89.7},
    {0, 0, -0.28, 83}, {0, 0, -1, 113.5}, {0, 0, 0, 95.5}, {0, 0, 1, 96.2},
    {0, 1, -1, 95.6}, {0, 1, -0.96, 83.3}, {0, 1, -0.92, 85},
    {0, 1, -1, 99.9}, {0, 1, -0.64, 83}, {0, 1, -0.28, 80.7},
    {0, 1, -1, 109.1}, {0, 1, 0, 88.4}, {0, 1, 1, 87.8}, {1, -1, -1, 119.4},
    {1, -1, -0.96, 95.4}, {1, -1, -0.92, 96.2}, {1, -1, -1, 116.5},
    {1, -1, -0.64, 94.8}, {1, -1, -0.28, 85}, {1, -1, -1, 119.6},
    {1, -1, 0, 96.4}, {1, -1, 1, 85.9}, {1, 0, -1, 112.3}, {1, 0, -0.96, 86},
    {1, 0, -0.92, 85.8}, {1, 0, -1, 106.5}, {1, 0, -0.64, 92.1},
    {1, 0, -0.28, 95.7}, {1, 0, -1, 111.3}, {1, 0, 0, 96.5}, {1, 0, 1, 93.1},
    {1, 1, -1, 107.5}, {1, 1, -0.96, 84.4}, {1, 1, -0.92, 94.5},
    {1, 1, -1, 108.1}, {1, 1, -0.64, 93.3}, {1, 1, -0.28, 85.9},
    {1, 1, -1, 113.1}, {1, 1, 0, 99.9}, {1, 1, 1, 91.8}};
nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a50 * x5 +
    [нелінійна регресія]
    a12 * x1 * x2 + a15 * x1 * x5 + a25 * x2 * x5 +
    a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a55 * x5^2,
    {a00, a10, a20, a50, a12, a15, a25, a11, a22, a55}, {x1, x2, x5}];
Normal[nlm]

```

```

nlm["ParameterTable"]
nlm["ANOVATable"]

$$\theta[x1_, x2_, x5_] := 85.35090968293869 - 7.665424082090765 x1 +$$


$$8.509259259259267 x1^2 - 5.327569344236003 x2 + 3.4250000000000016 x1 x2 +$$


$$4.175925925925932 x2^2 - 4.020613321741597 x5 + 10.39332587707326 x5^2$$

x10 = 40;
dx1 = 20;
x20 = 15;
dx2 = 15;
x50 = 5.6;
dx5 = 5.6;
 $\theta\theta[nl_, nk_, kv_] := \theta[(nl - x10)/dx1, (nk - x20)/dx2, (kv - x50)/dx5];$ 
Expand[ $\theta\theta[nl, nk, kv]$ ]
[розкрити дужки]
Expand[ $\theta\theta[I8, J8, K8]$ ]
[розкрити дужки]
FindMinimum[{ $\theta\theta[nl, nk, kv]$ ,  $x10 - dx1 \leq nl \leq x10 + dx1$ ,  $x20 - dx2 \leq nk \leq x20 + dx2$ ,
 $x50 - dx5 \leq kv \leq x50 + dx5$ }, {nl, x10 - dx1}, {nk, x20 - dx2}, {kv, x50 - dx5}]
Opt = FindMaximum[{ $\theta\theta[nl, nk, kv]$ ,  $x10 - dx1 \leq nl \leq x10 + dx1$ ,
[знайти максимум]
 $x20 - dx2 \leq nk \leq x20 + dx2$ ,  $x50 - dx5 \leq kv \leq x50 + dx5$ }, {nl, x10 + 0 dx1},
{nk, x20 + 0 dx2}, {kv, x50 + 0 dx5}]
nlopt = nl /. Last[Opt];
[останній]
nkopt = nk /. Last[Opt];
[останній]
kvopt = kv /. Last[Opt];
[останній]
Plot3D[{ $\theta\theta[nl, nk, x50]$ }, {nl, x10 - dx1, x10 + dx1}, {nk, x20 - dx2, x20 + dx2},
[графік функції 2-х змінних]
ColorFunction -> "DarkBands", AxesLabel -> {" $n_L, \text{XB}^{-1}$ ", " $n_K, \text{XB}^{-1}$ ", " $t_{0,9}, \text{c}$ "},
[функція забарвлювання] [позначення на осях]
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
[стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]
[тематичний стиль графіка] [легенди графіка] [автоматичний]
Plot3D[{ $\theta\theta[x10, nk, kv]$ }, {nk, x20 - dx2, x20 + dx2}, {kv, x50 - dx5, x50 + dx5},
[графік функції 2-х змінних]
ColorFunction -> "DarkBands", AxesLabel -> {" $n_K, \text{XB}^{-1}$ ", " $k_B$ ", " $t_{0,9}, \text{c}$ "},
[функція забарвлювання] [позначення на осях]
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
[стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]
[тематичний стиль графіка] [легенди графіка] [автоматичний]

```

Додаток Д

Результати експериментальних досліджень вібраційного змішувача

№	x ₁	x ₂	x ₅	x ₆	n _л , XB ⁻¹	n _к , XB ⁻¹	k _в	t, с	δ _{експ}	P _л , кВт	P _к , кВт	P _в , кВт	P, Вт
1	0	0	0	-1	40	15	5,6	70	0,877	316	144	258	718
2	0	1	1	-1	40	30	11,2	70	0,882	276	187	564	1027
3	0	0	0	-1	40	15	5,6	70	0,885	318	137	265	720
4	-1	-1	0	-1	20	0	5,6	70	0,862	169	107	262	538
5	-1	0	1	-1	20	15	11,2	70	0,856	133	97	547	777
6	1	0	-1	-1	60	15	0	70	0,870	581	152	164	897
7	0	0	0	-1	40	15	5,6	70	0,885	318	136	258	712
8	1	0	1	-1	60	15	11,2	70	0,865	529	98	552	1179
9	0	-1	1	-1	40	0	11,2	70	0,876	272	59	569	900
10	-1	1	0	-1	20	30	5,6	70	0,872	178	230	254	662
11	1	-1	0	-1	60	0	5,6	70	0,884	568	98	268	934
12	1	1	0	-1	60	30	5,6	70	0,866	564	244	247	1055
13	0	-1	-1	-1	40	0	0	70	0,868	341	114	163	618
14	0	1	-1	-1	40	30	0	70	0,876	343	240	164	747
15	-1	0	-1	-1	20	15	0	70	0,852	201	151	146	498
16	0	0	0	-0,5	40	15	5,6	85	0,908	329	134	262	725
17	0	1	1	-0,5	40	30	11,2	85	0,902	268	195	557	1020
18	0	0	0	-0,5	40	15	5,6	85	0,912	319	135	261	715
19	-1	-1	0	-0,5	20	0	5,6	85	0,875	177	111	245	533
20	-1	0	1	-0,5	20	15	11,2	85	0,888	122	98	556	776
21	1	0	-1	-0,5	60	15	0	85	0,883	583	158	143	884
22	0	0	0	-0,5	40	15	5,6	85	0,906	327	136	261	724
23	1	0	1	-0,5	60	15	11,2	85	0,903	522	93	568	1183
24	0	-1	1	-0,5	40	0	11,2	85	0,896	263	67	568	898
25	-1	1	0	-0,5	20	30	5,6	85	0,899	172	232	258	662
26	1	-1	0	-0,5	60	0	5,6	85	0,892	563	113	258	934
27	1	1	0	-0,5	60	30	5,6	85	0,890	569	242	244	1055
28	0	-1	-1	-0,5	40	0	0	85	0,881	337	124	154	615
29	0	1	-1	-0,5	40	30	0	85	0,887	343	250	154	747
30	-1	0	-1	-0,5	20	15	0	85	0,882	199	148	156	503
31	0	0	0	0	40	15	5,6	100	0,924	329	132	263	724
32	0	1	1	0	40	30	11,2	100	0,914	272	195	560	1027
33	0	0	0	0	40	15	5,6	100	0,916	321	141	248	710
34	-1	-1	0	0	20	0	5,6	100	0,907	167	103	262	532
35	-1	0	1	0	20	15	11,2	100	0,898	125	98	549	772
36	1	0	-1	0	60	15	0	100	0,893	595	155	141	891
37	0	0	0	0	40	15	5,6	100	0,914	317	145	251	713
38	1	0	1	0	60	15	11,2	100	0,906	519	103	561	1183
39	0	-1	1	0	40	0	11,2	100	0,906	269	67	566	902
40	-1	1	0	0	20	30	5,6	100	0,903	166	243	260	669
41	1	-1	0	0	60	0	5,6	100	0,903	572	110	248	930
42	1	1	0	0	60	30	5,6	100	0,907	580	235	248	1063
43	0	-1	-1	0	40	0	0	100	0,898	334	124	157	615
44	0	1	-1	0	40	30	0	100	0,907	341	247	160	748
45	-1	0	-1	0	20	15	0	100	0,901	196	147	164	507

№	x ₁	x ₂	x ₅	x ₆	n _л , XB ⁻¹	n _к , XB ⁻¹	k _в	t, с	δ _{експ}	P _л , кВт	P _к , кВт	P _в , кВт	P, Вт
46	0	0	0	0,5	40	15	5,6	115	0,924	328	136	247	711
47	0	1	1	0,5	40	30	11,2	115	0,917	274	196	551	1021
48	0	0	0	0,5	40	15	5,6	115	0,922	330	137	246	713
49	-1	-1	0	0,5	20	0	5,6	115	0,913	168	103	259	530
50	-1	0	1	0,5	20	15	11,2	115	0,916	119	95	562	776
51	1	0	-1	0,5	60	15	0	115	0,911	590	151	159	900
52	0	0	0	0,5	40	15	5,6	115	0,934	326	131	263	720
53	1	0	1	0,5	60	15	11,2	115	0,908	522	103	545	1170
54	0	-1	1	0,5	40	0	11,2	115	0,920	265	64	565	894
55	-1	1	0	0,5	20	30	5,6	115	0,916	177	234	261	672
56	1	-1	0	0,5	60	0	5,6	115	0,915	572	106	246	924
57	1	1	0	0,5	60	30	5,6	115	0,929	574	228	258	1060
58	0	-1	-1	0,5	40	0	0	115	0,904	341	120	148	609
59	0	1	-1	0,5	40	30	0	115	0,924	338	242	167	747
60	-1	0	-1	0,5	20	15	0	115	0,912	189	147	156	492
61	0	0	0	1	40	15	5,6	130	0,928	320	141	254	715
62	0	1	1	1	40	30	11,2	130	0,927	283	187	551	1021
63	0	0	0	1	40	15	5,6	130	0,920	330	141	243	714
64	-1	-1	0	1	20	0	5,6	130	0,904	165	115	258	538
65	-1	0	1	1	20	15	11,2	130	0,921	126	91	568	785
66	1	0	-1	1	60	15	0	130	0,912	583	156	153	892
67	0	0	0	1	40	15	5,6	130	0,937	319	135	261	715
68	1	0	1	1	60	15	11,2	130	0,922	523	97	555	1175
69	0	-1	1	1	40	0	11,2	130	0,919	280	59	554	893
70	-1	1	0	1	20	30	5,6	130	0,922	169	235	255	659
71	1	-1	0	1	60	0	5,6	130	0,918	577	105	247	929
72	1	1	0	1	60	30	5,6	130	0,922	571	238	255	1064
73	0	-1	-1	1	40	0	0	130	0,913	348	113	156	617
74	0	1	-1	1	40	30	0	130	0,930	330	244	168	742
75	-1	0	-1	1	20	15	0	130	0,903	192	154	144	490

Програмний код Wolfram Cloud для визначення квадратичних рівнянь регресії залежності для коефіцієнта однорідності δ від факторів досліджень

```

M = {{0, 0, 0, -1, 0.877}, {0, 1, 1, -1, 0.882}, {0, 0, 0, -1, 0.885},
      {-1, -1, 0, -1, 0.862}, {-1, 0, 1, -1, 0.856}, {1, 0, -1, -1, 0.87},
      {0, 0, 0, -1, 0.885}, {1, 0, 1, -1, 0.865}, {0, -1, 1, -1, 0.876},
      {-1, 1, 0, -1, 0.872}, {1, -1, 0, -1, 0.884}, {1, 1, 0, -1, 0.866},
      {0, -1, -1, -1, 0.868}, {0, 1, -1, -1, 0.876}, {-1, 0, -1, -1, 0.852},
      {0, 0, 0, -0.5, 0.908}, {0, 1, 1, -0.5, 0.902}, {0, 0, 0, -0.5, 0.912},
      {-1, -1, 0, -0.5, 0.875}, {-1, 0, 1, -0.5, 0.888}, {1, 0, -1, -0.5, 0.883},
      {0, 0, 0, -0.5, 0.906}, {1, 0, 1, -0.5, 0.903}, {0, -1, 1, -0.5, 0.896},
      {-1, 1, 0, -0.5, 0.899}, {1, -1, 0, -0.5, 0.892}, {1, 1, 0, -0.5, 0.89},
      {0, -1, -1, -0.5, 0.881}, {0, 1, -1, -0.5, 0.887}, {-1, 0, -1, -0.5, 0.882},
      {0, 0, 0, 0, 0.924}, {0, 1, 1, 0, 0.914}, {0, 0, 0, 0, 0.916}, {-1, -1, 0, 0, 0.907},
      {-1, 0, 1, 0, 0.898}, {1, 0, -1, 0, 0.893}, {0, 0, 0, 0, 0.914}, {1, 0, 1, 0, 0.906},
      {0, -1, 1, 0, 0.906}, {-1, 1, 0, 0, 0.903}, {1, -1, 0, 0, 0.903}, {1, 1, 0, 0, 0.907},

```

```

{0, -1, -1, 0, 0.898}, {0, 1, -1, 0, 0.907}, {-1, 0, -1, 0, 0.901},
{0, 0, 0, 0.5, 0.924}, {0, 1, 1, 0.5, 0.917}, {0, 0, 0, 0.5, 0.922},
{-1, -1, 0, 0.5, 0.913}, {-1, 0, 1, 0.5, 0.916}, {1, 0, -1, 0.5, 0.911},
{0, 0, 0, 0.5, 0.934}, {1, 0, 1, 0.5, 0.908}, {0, -1, 1, 0.5, 0.92},
{-1, 1, 0, 0.5, 0.916}, {1, -1, 0, 0.5, 0.915}, {1, 1, 0, 0.5, 0.929},
{0, -1, -1, 0.5, 0.904}, {0, 1, -1, 0.5, 0.924}, {-1, 0, -1, 0.5, 0.912},
{0, 0, 0, 1, 0.928}, {0, 1, 1, 1, 0.927}, {0, 0, 0, 1, 0.92}, {-1, -1, 0, 1, 0.904},
{-1, 0, 1, 1, 0.921}, {1, 0, -1, 1, 0.912}, {0, 0, 0, 1, 0.937}, {1, 0, 1, 1, 0.922},
{0, -1, 1, 1, 0.919}, {-1, 1, 0, 1, 0.922}, {1, -1, 0, 1, 0.918}, {1, 1, 0, 1, 0.922},
{0, -1, -1, 1, 0.913}, {0, 1, -1, 1, 0.93}, {-1, 0, -1, 1, 0.903}];
nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a50 * x5 + a60 * x6 +
  |нелінійна регресія
  a12 * x1 * x2 + a15 * x1 * x5 + a16 * x1 * x6 + a25 * x2 * x5 + a26 * x2 * x6 + a56 * x5 * x6 +
  a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a55 * x5^2 + a66 * x6^2,
  {a00, a10, a20, a50, a60, a12, a15, a16, a25, a26, a56, a11, a22, a55, a66},
  {x1, x2, x5, x6}];
Normal[nlm]
|нормальний вираз
nlm["ParameterTable"]
nlm["ANOVATable"]

θ[x1_, x2_, x5_, x6_] := 0.9186571428571432` + 0.00242500000000000235` x1 -
  0.01005000000000000052` x1^2 + 0.00345000000000000034` x2 - 0.0024499999999999951` x1 x2 -
  0.002800000000000000247` x2^2 + 0.00337499999999999752` x5 - 0.0076500000000000046` x5^2 +
  0.02406666666666666705` x6 - 0.011714285714285783` x6^2
x10 = 40;
dx1 = 20;
x20 = 15;
dx2 = 15;
x50 = 5.6;
dx5 = 5.6;
x60 = 100;
dx6 = 30;
θθ[nl_, nk_, kv_, t_] := θ[(nl - x10) / dx1, (nk - x20) / dx2, (kv - x50) / dx5, (t - x60) / dx6];
Expand[θθ[nl, nk, kv, t]]
|розкрити дужки
FindMinimum[{θθ[nl, nk, kv, t], x10 - dx1 ≤ nl ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ nk ≤ x20 + dx2,
  |знайти мінімум
  x50 - dx5 ≤ kv ≤ x50 + dx5, x60 - dx6 ≤ t ≤ x60 + dx6}, {nl, x10 - dx1}, {nk, x20 - dx2},
  {kv, x50 - dx5}, {t, x60 - dx6}]
Opt = FindMaximum[{θθ[nl, nk, kv, t], x10 - dx1 ≤ nl ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ nk ≤ x20 + dx2,
  |знайти максимум
  x50 - dx5 ≤ kv ≤ x50 + dx5, x60 - dx6 ≤ t ≤ x60 + dx6}, {nl, x10 - dx1}, {nk, x20 - dx2},
  {kv, x50 - dx5}, {t, x60 - dx6}]
nlopt = nl /. Last[Opt];
|останній
nkopt = nk /. Last[Opt];
|останній
kvopt = kv /. Last[Opt];
|останній
topt = t /. Last[Opt];
|останній

```

```
Show[
  [показати]
  Plot3D[{ $\Theta$ [nl, nk, x50 - dx5, x60]}, {nl, x10 - dx1, x10 + dx1}, {nk, x20 - dx2, x20 + dx2},
    [графік функції 2-х змінних]
    AxesLabel -> {"nЛ, xB-1", "nК, xB-1", "δ"},
    [позначення на осях]
    LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
    [стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
    PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic, PlotStyle -> Opacity[0.3]],
  Plot3D[{ $\Theta$ [nl, nk, x50 - dx5, x60]}, {nl, x10 - dx1, x10 + dx1}, {nk, x20 - dx2, x20 + dx2},
    [графік функції 2-х змінних]
    AxesLabel -> {"nЛ, xB-1", "nК, xB-1", "δ"},
    [позначення на осях]
    LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 5,
    [стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
    PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic,
    [тематичний стиль графіка] [легенди графіка] [автоматичний]
    RegionFunction -> Function[{x, y, z},  $\Theta$ [x, y, x50 - dx5, x60] ≥ 0.9]
    [регіональна функція] [Функція]
  ]
Show[
  [показати]
  Plot3D[{ $\Theta$ [x10, x20, kv, t]}, {kv, x50 - dx5, x50 + dx5}, {t, x60 - dx6, x60 + dx6},
    [графік функції 2-х змінних]
    AxesLabel -> {"kB", "t, c", "δ"},
    [позначення на осях]
    LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
    [стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
    LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
    [стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
    PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic, PlotStyle -> Opacity[0.3]],
    [тематичний стиль графіка] [легенди графіка] [автоматичний] [стиль графіка] [прозорість]
  Plot3D[{ $\Theta$ [x10, x20, kv, t]}, {kv, x50 - dx5, x50 + dx5}, {t, x60 - dx6, x60 + dx6},
    [графік функції 2-х змінних]
    AxesLabel -> {"kB", "t, c", "δ"},
    [позначення на осях]
    LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"], Mesh -> 20,
    [стиль помітки] [директива] [розмір шрифту] [сімейство шрифту] [сітка]
    PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic,
    [тематичний стиль графіка] [легенди графіка] [автоматичний]
    RegionFunction -> Function[{x, y, z},  $\Theta$ [x10, x20, x, y] ≥ 0.9]
    [регіональна функція] [Функція]
  ]
NSolve[ $\Theta$ [nl, nk, kv, t] == 0.9, t]
```

Програмний код Wolfram Cloud для визначення квадратичних рівнянь регресії залежності потужності P, що споживається змішувачем, від факторів досліджень

```

M = {{0, 0, 0, -1, 718}, {0, 1, 1, -1, 1027}, {0, 0, 0, -1, 720},
     {-1, -1, 0, -1, 538}, {-1, 0, 1, -1, 777}, {1, 0, -1, -1, 897},
     {0, 0, 0, -1, 712}, {1, 0, 1, -1, 1179}, {0, -1, 1, -1, 900},
     {-1, 1, 0, -1, 662}, {1, -1, 0, -1, 934}, {1, 1, 0, -1, 1055},
     {0, -1, -1, -1, 618}, {0, 1, -1, -1, 747}, {-1, 0, -1, -1, 498},
     {0, 0, 0, -0.5, 725}, {0, 1, 1, -0.5, 1020}, {0, 0, 0, -0.5, 715},
     {-1, -1, 0, -0.5, 533}, {-1, 0, 1, -0.5, 776}, {1, 0, -1, -0.5, 884},
     {0, 0, 0, -0.5, 724}, {1, 0, 1, -0.5, 1183}, {0, -1, 1, -0.5, 898},
     {-1, 1, 0, -0.5, 662}, {1, -1, 0, -0.5, 934}, {1, 1, 0, -0.5, 1055},
     {0, -1, -1, -0.5, 615}, {0, 1, -1, -0.5, 747}, {-1, 0, -1, -0.5, 503},
     {0, 0, 0, 0, 724}, {0, 1, 1, 0, 1027}, {0, 0, 0, 0, 710},
     {-1, -1, 0, 0, 532}, {-1, 0, 1, 0, 772}, {1, 0, -1, 0, 891},
     {0, 0, 0, 0, 713}, {1, 0, 1, 0, 1183}, {0, -1, 1, 0, 902},
     {-1, 1, 0, 0, 669}, {1, -1, 0, 0, 930}, {1, 1, 0, 0, 1063},
     {0, -1, -1, 0, 615}, {0, 1, -1, 0, 748}, {-1, 0, -1, 0, 507},
     {0, 0, 0, 0.5, 711}, {0, 1, 1, 0.5, 1021}, {0, 0, 0, 0.5, 713},
     {-1, -1, 0, 0.5, 530}, {-1, 0, 1, 0.5, 776}, {1, 0, -1, 0.5, 900},
     {0, 0, 0, 0.5, 720}, {1, 0, 1, 0.5, 1170}, {0, -1, 1, 0.5, 894},
     {-1, 1, 0, 0.5, 672}, {1, -1, 0, 0.5, 924}, {1, 1, 0, 0.5, 1060},
     {0, -1, -1, 0.5, 609}, {0, 1, -1, 0.5, 747}, {-1, 0, -1, 0.5, 492},
     {0, 0, 0, 1, 715}, {0, 1, 1, 1, 1021}, {0, 0, 0, 1, 714},
     {-1, -1, 0, 1, 538}, {-1, 0, 1, 1, 785}, {1, 0, -1, 1, 892},
     {0, 0, 0, 1, 715}, {1, 0, 1, 1, 1175}, {0, -1, 1, 1, 893},
     {-1, 1, 0, 1, 659}, {1, -1, 0, 1, 929}, {1, 1, 0, 1, 1064},
     {0, -1, -1, 1, 617}, {0, 1, -1, 1, 742}, {-1, 0, -1, 1, 490}};

nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a50 * x5 + a60 * x6 +
    нелінійна регресія
    a12 * x1 * x2 + a15 * x1 * x5 + a16 * x1 * x6 + a25 * x2 * x5 + a26 * x2 * x6 +
    a56 * x5 * x6 +
    a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a55 * x5^2 + a66 * x6^2,
    {a00, a10, a20, a50, a60, a12, a15, a16, a25, a26, a56, a11, a22, a55, a66 },
    {x1, x2, x5, x6}];

Normal[nlm]
нормальний вираз

nlm["ParameterTable"]
nlm["ANOVATable"]

θ[x1_, x2_, x5_, x6_] :=
716.8190476190476` + 198.27500000000003` x1 + 48.32499999999999` x1^2 +
64.624999999999996` x2 + 32.225000000000006` x2^2 + 140.5` x5 +
71.574999999999989` x5^2

```

```

x10 = 40;
dx1 = 20;
x20 = 15;
dx2 = 15;
x50 = 5.6;
dx5 = 5.6;
x60 = 100;
dx6 = 30;
θθ[nl_, nk_, kv_, t_] :=
  θ[(nl - x10)/dx1, (nk - x20)/dx2, (kv - x50)/dx5, (t - x60)/dx6];
Expand[θθ[nl, nk, kv, t]]
|розкрити дужки

FindMaximum[{θθ[nl, nk, kv, t], x10 - dx1 ≤ nl ≤ x10 + dx1,
|знайти максимум
  x20 - dx2 ≤ nk ≤ x20 + dx2, x50 - dx5 ≤ kv ≤ x50 + dx5, x60 - dx6 ≤ t ≤ x60 + dx6},
  {nl, x10 - dx1}, {nk, x20 - dx2}, {kv, x50 - dx5}, {t, x60 - dx6}]
Opt = FindMinimum[{θθ[nl, nk, kv, t], x10 - dx1 ≤ nl ≤ x10 + dx1,
|знайти мінімум
  x20 - dx2 ≤ nk ≤ x20 + dx2, x50 - dx5 ≤ kv ≤ x50 + dx5, x60 - dx6 ≤ t ≤ x60 + dx6},
  {nl, x10 - dx1}, {nk, x20 - dx2}, {kv, x50 - dx5}, {t, x60 - dx6}]
nlopt = nl /. Last[Opt];
|останній
nkopt = nk /. Last[Opt];
|останній
kvopt = kv /. Last[Opt];
|останній
topt = t /. Last[Opt];
|останній

Plot3D[{θθ[nl, nk, x50 - dx5, x60]}, {nl, x10 - dx1, x10 + dx1},
|графік функції 2-х змінних
  {nk, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel → {"nЛ, xB-1", "nК, xB-1", "P, Вт"},
|позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times"], Mesh → 20,
|стиль помітки |директива |розмір шрифту |сімейство шрифту |сітка
  PlotTheme → "Detailed", PlotLegends → Automatic]
|тематичний стиль графіка |легенди графіка |автоматичний

Plot3D[{θθ[x10, x20, kv, t]}, {kv, x50 - dx5, x50 + dx5},
|графік функції 2-х змінних
  {t, x60 - dx6, x60 + dx6}, AxesLabel → {"kВ", "t, с", "P, Вт"},
|позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times"], Mesh → 20,
|стиль помітки |директива |розмір шрифту |сімейство шрифту |сітка
  PlotTheme → "Detailed", PlotLegends → Automatic]

```



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, тел. (0432) 46-00-03,
email: office@vsau.org, rector@vsau.org, код ЄДРПОУ 00497236

16 травня 2025 р. № 01.1-60-636
на № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукових досліджень
дисертаційної роботи **Волинця Євгенія Олександровича**
на тему: «**Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів
вібраційного змішувача**»

Повідомляємо, що наукові розробки Волинця Євгенія Олександровича за вказаною темою дисертації мають практичну цінність, що зумовлено їх впровадженням у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв інженерно-технологічного факультету.

Положення дисертаційної роботи використовуються при викладанні окремої частини навчальної дисципліни «Машини, обладнання та їх використання для переробки с.-г. продукції».

Довідка видана Волинцю Є.О. для представлення у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Розглянуто та затверджено на засіданні науково-методичної комісії Вінницького національного аграрного університету від 30 квітня 2025р., протокол № 9.

Ректор



Віктор МАЗУР

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного
аграрного університету

Віктор МАЗУР

« 08 » світня 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ФГ «Літагор»

Олександр ФОГЕЛЬ

« 08 » світня 2025 р.

А К Т

про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Вінницького національного аграрного університету, здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Волинець Євгеній Олександрович під керівництвом к.т.н., доцента кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ Полєводи Юрія Аліковича, з однієї сторони, і представник ФГ «Літагор» (ЄДРПОУ 40084086, Вінницька обл., Хмільницький р-н., село Миколаївка, вул. Миру, буд. 36а) директор Фогель Олександр Олександрович, з другої сторони, склали цей акт про те, що удосконалений Волинцем Є.О. вібраційний змішувач проходив виробничу перевірку на базі ФГ «Літагор».

Дослідження проводили до проектної документації та технічних умов, затверджених у ході науково-дослідних робіт. Конструктивні параметри експериментального зразка наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Конструктивні параметри експериментальної віброустановки

Конструктивні параметри		Одиниці вимірювання	Значення
Назва	Позначення		
Об'єм контейнера	V_K	дм ³	72
Маса контейнера	m_K	кг	35
Радіус циліндричної частини	R	мм	200
Висота контейнера	H_K	мм	400
Кількість пружних елементів підвіски		шт.	4
Кількість дебалансів		шт.	4
Кут розвороту дебалансів	α	град.	0-360
Частота обертання електродвигуна привода вала віброзбуджувача	n_B	хв ⁻¹	985
Частота обертання лопатевого вала	n_L	хв ⁻¹	30
Частота обертання контейнера	n_K	хв ⁻¹	15
Амплітуда коливань контейнера	A	мм	0-7,0
Ступінь завантаження контейнера	φ	%	75

В ході перевірки здійснено аналіз основних параметрів роботи вібраційного змішувача, що включає визначення амплітудно-частотних характеристик, коефіцієнта режиму вібрації, споживаної потужності та ефективності процесу змішування. У ході випробувань встановлено, що при коефіцієнті режиму вібрації $k = 2,5-3$ відбувається мінімізація енергетичних

витрат, що підтверджується розрахунками потужності привода вібробуджувача та лопатевого вала. Також було встановлено, що коефіцієнт однорідності суміші δ істотно залежить від тривалості змішування та інтенсивності дії механічних і вібраційних факторів. Максимальне значення $\delta=0,932$ досягнуто при $n_{\text{л}}=40,9 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}}=23,9 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}}=6,83$, $t=130 \text{ с}$. Мінімальний рівень $\delta=0,851$ спостерігається при $n_{\text{л}}=20 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}}=0 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}}=0$, $t=70 \text{ с}$.

Продуктивність змінюється в межах від 23,7 до 28,6 кг/год. Максимум досягається при $n_{\text{л}}=40 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}}=30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}}=6,5$, що відповідає поєднанню активного перемішування та вібраційної дії.

Аналіз питомих витрат енергії E показав, що їх величина тісно пов'язана як із потужністю, так і з продуктивністю змішувача. Мінімальні витрати $E=1228 \text{ Дж/кг}$ спостерігаються при $n_{\text{л}}=23,3 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}}=10,1 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}}=2,69$, а максимальні – $E=3000 \text{ Дж/кг}$ при $n_{\text{л}}=60 \text{ хв}^{-1}$, $n_{\text{к}}=30 \text{ хв}^{-1}$, $k_{\text{в}}=11,2$.

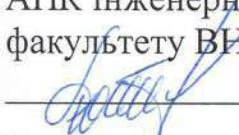
Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що ефективна робота вібраційного змішувача досягається за умов збалансованого поєднання режимних параметрів, а саме: частота обертання лопатевого вала близько $23,3 \text{ хв}^{-1}$, контейнера – $10,1 \text{ хв}^{-1}$ та коефіцієнта режиму вібрації на рівні 2,69.

Високі показники ефективності, низькі енергетичні витрати та покращена якість змішування роблять новий змішувач конкурентоспроможним на ринку та доцільним для використання в промисловості, зокрема у виробництві хлібопекарських сумішей.

Враховуючи отримані дані можна стверджувати, що удосконалена конструкція вібраційного змішувача є більш ефективною ніж базова.

Від ВНАУ

к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ

 **Юрій ПОЛЄВОДА**

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

 **Свгеній ВОЛИНЕЦЬ**

« 08 » квітня 2025 р.

Від ФГ «Літагор»

директор

 **Олександр ФОГЕЛЬ**

« 08 » квітня 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного аграрного університету



Віктор МАЗУР

2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Агромаш-Калина»



Юрій БЕЗУГЛИЙ

«01» квітня 2025 р.

А К Т**про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи**

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які отримані здобувачем третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Волинцем Євгенієм Олександровичем під керівництвом кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, інженерно-технологічного факультету, Вінницького національного аграрного університету, Полєводи Юрія Аліковича впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Агромаш-Калина» (ЄДРПОУ 32320510, Вінницька область, Хмільницький район, місто Калинівка, вул. Незалежності, 46). ТОВ «Агромаш-Калина» в особі директора Безуглого Юрія Миколайовича отримало дослідний зразок і конструкторську документацію вібраційного змішувача, яка розроблена в межах виконання дисертаційної роботи «Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача» Волинцем Є.О. і Полєводою Ю.А.

Підприємство ТОВ «Агромаш-Калина» зацікавлене у виготовленні дослідних зразків вібраційних змішувачів у кількості 4 штук для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ВНАУ

к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК інженерно-технологічного факультету ВНАУ

Юрій ПОЛЄВОДА

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

Євгеній ВОЛИНЕЦЬ

«01» квітня 2025 р.

Від ТОВ «Агромаш-Калина»

директор

Юрій БЕЗУГЛИЙ



«01» квітня 2025 р.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Волинця Євгенія Олександровича
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

№ п/п	Назва	Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від інших	Кількість друкованих сторінок/ друк. арк.)	Співавтори
1	2	3	4	5
Статті у наукових фахових виданнях України				
1.	Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2020. № 4 (111). DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-8 URL: http://tetapk.vsau.org/storage/articles/December2020/HoMyW4h7rVz9z7qVMCwb.pdf	<u>С. 72–79</u> 0,54 (0,4)	Полевода Ю.А.
2.	Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача	<i>Вібрації і техніці та технологіях.</i> 2021. № 4 (107). DOI: 10.37128/2306-8744-2022-4-3 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2022/UsEim7lWIyRCNOqrkopL.pdf	<u>С. 20–25</u> 0,49 (0,39)	Полевода Ю.А., Бистрицький О.П.
3.	Study of the characteristics of vibrorheological models of bulk raw materials in the working area of a vibrocentrifugal mixer	<i>Вібрації і техніці та технологіях.</i> 2023. № 3 (110). DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-4 URL: http://vibrojournal.vsau.org/storage/articles/December2023/44MpraZRRqTmKO5KhE4l.pdf	<u>С. 35–43</u> 0,81 (0,68)	Полевода Ю.А.
4.	Vibratory conveyor for loading food mixture mixer	<i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки.</i> 2024. Т. 2. № 3 (337). DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-49 URL: https://heraldts.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/299/293	<u>С. 328–333</u> 0,5 (0,4)	Спірін А.В.
Авторське свідоцтво. Об'єкти права інтелектуальної власності:				
5.	Ескізне креслення «Принципова схема вібровідцентрового змішувача»	Свідоцтво № 122109 від 20.12.2023; заяв. № с202306088 від 16.09.2023. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1792980/		Полевода Ю.А.

1	2	3	4	5
Матеріали наукових конференцій				
6.	Improvement of the vibrating mixer of food mixes	<i>Prospects and achievements in applied and basic sciences. Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference (9-12 February 2021). Budapest. 2021.</i> URL: https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2496/IV-Conference-February-9-122021-book.pdf?sequence=1&isAllowed=y	<u>C. 632–635</u> 0,13	
7.	Дослідження моделі руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача	<i>Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (21-22 лютого 2023 р.).</i> Полтава: ПДАУ. 2023. URL: https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/11413/zbirnyk2022.pdf	<u>C. 46–49</u> 0,10	
8.	Використання вібровідцентрового змішувача для приготування високоенергетичних сумішей	<i>Сучасні проблеми землеробської механіки. Збірник тез доповідей XXIV міжнародної наукової конференції (17-19 жовтня 2023 р.).</i> Київ: НУБіП. 2023. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u218/zbirnik_konf10_fin.pdf	<u>C. 71–73</u> 0,10	
9.	Vibratory conveyor for loading food mixture mixer	<i>Сучасні вектори розвитку аграрної науки. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (17-18 вересня 2024 р.).</i> Херсон: ХДАЕУ. 2024. URL: https://www.ksau.kherson.ua/files/konferencii/2024/10/konferenciy_2024_10.pdf	<u>C. 225–228</u> 0,13	
10.	Обґрунтування конструкції змішувача харчових сумішей малої продуктивності	<i>Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (15 листопада 2024 р.).</i> Частина 1. Дніпро: ДДАЕУ. 2024. URL: https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DD_AEU(2024)_1.pdf	<u>C. 32–34</u> 0,10	

Усього за темою дисертаційної роботи «Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача» опубліковано 10 наукових праць загальним обсягом 2,9 умовн. друк. арк. (власний доробок автора 2,43 умовн. друк. арк.) у тому числі 1,87 умовн. друк. арк. у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародних наукометричних баз; 0,56 умовн. друк. арк. у інших виданнях.

Автор

Євгеній ВОЛИНЕЦЬ

Вчений секретар

Тетяна КОРПАНЮК

МП

«06» травня 2025 р.



**АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ
НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
Волинця Євгенія Олександровича**

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, місце проведення, дата
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1.	Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей	Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи інноваційної діяльності в агропромисловій інженерії». м. Вінниця. 19-20 листопада 2020 р.
2.	Improvement of the vibrating mixer of food mixes	IV International Scientific and Practical Conference «Prospects and achievements in applied and basic sciences». Budapest. 9-12 February 2021.
3.	Дослідження режимних параметрів установки гравітаційно-пересипної дії	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». м. Вінниця. 20-21 жовтня 2022 р.
4.	Дослідження моделі руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача	V Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування». м. Полтава. 21-22 лютого 2023 р.
5.	Vibratory conveyor for loading food mixture mixer	Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні вектори розвитку аграрної науки». м. Херсон-Кропивницький. 17-18 вересня 2024 р.

Автор

Вчений секретар

МП

«06» травня 2025 р.



Євгеній ВОЛИНЕЦЬ

Тетяна КОРПАНЮК