

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**МАЛЄГІН РОМАН ДМИТРОВИЧ**

УДК 631.363:636.085:636.4 (043.5)

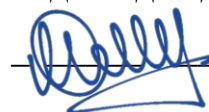
**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
РОТОРНОГО КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА  
РІДКИХ КОРМІВ ДЛЯ СВИНЕЙ**

Галузь знань 13 – Механічна інженерія  
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

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



Роман МАЛЄГІН

Науковий керівник:

Алієв Ельчин Бахтияр огли, доктор  
технічних наук, старший дослідник

Дніпро – 2025

## АНОТАЦІЯ

*Малеєїн Р.Д.* Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія») – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти та науки України, Дніпро, 2025.

*Мета дослідження:* підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних рідких кормів для свиней за рахунок удосконалення конструкції роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

*Задачі дослідження:*

– з урахуванням аналізу сучасного стану галузі та результатів попередніх досліджень обґрунтувати структуру технічної системи приготування повнораціонних рідких кормів для свиней і визначити напрями підвищення її ефективності;

– розробити фізико-математичну модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному диспергаторі-гомогенізаторі в залежності від його конструктивно-режимних параметрів;

– дослідити явище кавітації у розробленому роторному диспергаторі-гомогенізаторі методами чисельного моделювання;

– експериментально дослідити процес приготування повнораціонних рідких кормів для відгодівлі свиней за допомогою роторного диспергатора-гомогенізатора та визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри цього обладнання залежно від виду кормових компонентів;

– розробити автоматизовану систему керування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, здійснити його виробничу перевірку та виконати оцінку економічної ефективності застосування результатів досліджень.

*Об'єкт дослідження:* технологічний процес приготування повнораціонних рідких кормів для годівлі свиней та технічний засіб для його реалізації.

*Предмет дослідження:* закономірності протікання процесу приготування повнораціонних рідких кормів для годівлі свиней.

*Методи дослідження.* Теоретичні дослідження базуються на методах чисельного моделювання в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+ з використанням фізико-математичних моделей взаємодій багатофазних середовищ, основних положень теоретичної механіки, молекулярної теорії і законів гідродинаміки. При цьому застосовувалися методи інтегрального та диференційного числення, які реалізовані у програмному середовищі Wolfram Cloud.

Експериментальні дослідження включали методіку планування багатофакторних експериментів та виконувалися як у виробничих, так і в лабораторних умовах, із використанням розроблених і стандартних методик, фізичних моделей, експериментальних зразків робочих органів, сертифікованих приладів і обладнання. Для аналізу отриманих даних застосовували статистичні методи обробки у програмних середовищах Wolfram Cloud і Microsoft Excel.

*Уперше* встановлені емпіричні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку зміни якісних показників диспергованого гомогенного рідкого корму (фракційний склад частинок в суміші, показник розшарованості суміші, температура суміші в кінці процесу, кінематична в'язкість суміші) і технологічних параметрів (потужність, що споживається, продуктивність, витрати енергії) від конструктивно-технологічних параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора (частота обертання ротора, діаметра вхідного отвору статора, час роботи обладнання).

*Отримало подальший розвиток* фізико-математична модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному кавітаційному диспергаторі-гомогенізаторі в залежності від його конструктивно-режимних параметрів (кількість резонаторів, частота обертання статора, діаметра вхідного отвору статора);

*Практичне значення одержаних результатів.* Проведена виробнича перевірка дослідного роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора на базі ФГ «Моніка» підтвердила його ефективність у реальних умовах. Результати досліджень

впроваджені в освітній процес ДДАЕУ при викладанні навчальної дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія». Результати науково-технічної роботи впроваджено та використано у виробничій діяльності підприємства ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» і ПП «Агромех плюс» у вигляді комплектів конструкторської документації на роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор рідких кормів.

Розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що складається з електродвигуна, підшипникового вузла, вала з лопатками та резонаторами ротора, статора з наскрізним отвором і дифузорами, вхідних патрубків для подачі сипких і рідких компонентів, вихідного патрубка, кришки та робочої камери. Особливістю конструкції є те, що при поєднанні конфузоров ротора та резонаторів статора утворюються лопаті, форма яких повторює кривизну робочого колеса відцентрового насоса. Періодичне високошвидкісне поєднання конфузоров ротора та резонаторів статора породжує кавітацію, яка додатково забезпечує подрібнення компонентів рідкого корму.

Створено фізико-математичну модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному диспергаторі-гомогенізаторі з урахуванням його конструктивних і режимних параметрів. У процесі теоретичних досліджень була створена методика визначення ключових параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, зокрема кількості отворів у роторі  $k_p$  та статорі  $k_c$ , ширини отвору  $z$  у роторі та статорі, а також довжини кола  $i$ , де відбувається їхнє зіткнення. Встановлено, що значення кількості отворів у роторі та статорі має варіюватися в межах від 16 до 48. На основі теорії Жуговського, яка описує гідравлічний удар, було розроблено методику для визначення швидкості руху суміші в отворах і каналах кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що дозволило розрахувати його потужність і продуктивність.

Чисельне моделювання роботи роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора дозволило визначити залежності мінімальних (min) та максимальних (max) швидкостей руху рідкої фази суміші та тисків як у дифузори ( $V_{rot}$ ,  $P_{rot}$ ), так і у вхідному отворі ( $V_{in}$ ,  $P_{in}$ ) від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  і кількості

резонаторів  $N_{\text{hole}}$ . При значеннях  $n = 3000$  об/хв,  $D_{\text{in}} = 0,06$  м і  $N_{\text{hole}} = 16$  максимальна швидкість суміші у вхідному отворі  $V_{\text{in max}}$  досягає 7,3 м/с. У той же час у дифузори найвище значення швидкості  $V_{\text{rot max}}$ , яке становить 27,5 м/с, спостерігається за тих самих умов частоти та діаметра отвору, але за  $N_{\text{hole}} = 48$ . Найвище значення тиску рідкої фази у вхідному отворі  $P_{\text{in max}}$  становить 154,4 кПа, так само як і у дифузори  $P_{\text{rot max}}$ , що спостерігається за умов  $n = 3000$  об/хв,  $D_{\text{in}} = 0,06$  м,  $N_{\text{hole}} = 48$ . Максимальне та мінімальне значення числа кавітації  $X_{\text{max}}$  і  $X_{\text{min}}$ , які залежать від кількості резонаторів  $N_{\text{hole}}$ , діаметра вхідного отвору  $D_{\text{in}}$  та частоти обертання ротора  $n$ , розглядаються як основний критерій якісної оцінки кавітаційного процесу в досліджуваному обладнанні. При частоті обертання ротора  $n = 2747$  об/хв та кількості резонаторів  $N_{\text{hole}} = 48$ , значення числа кавітації досягають своїх меж: мінімальне становить  $X_{\text{min}} = 0,04$ , а максимальне –  $X_{\text{max}} = 0,45$ . Такий режим відповідає явищу плівкової кавітації, коли кавітаційна порожнина відокремлюється від основного потоку рідини у стійкому режимі. Умовою максимізації продуктивності диспергатора дає можливість визначити діаметр вхідного отвору  $D_{\text{in}} = 0,06$  м.

В ході експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів встановлені залежності для пшениці, ячменю та сої у вигляді рівнянь регресії другого порядку зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{\text{fr}}$ , показника розшарованості суміші  $i_{\text{d}}$ , температури суміші в кінці процесу, кінематичної в'язкості  $\nu$ , потужності, що споживається  $N$ , витрат енергії  $E$ , питомих витрати енергії  $E_{\text{Q}}$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{\text{in}}$  і часу роботи обладнання  $t$ . Застосування критеріїв Кохрена та Фішера дозволило підтвердити адекватність отриманих рівнянь регресії. Аналізуючи отримані залежності встановлено, що при умові, коли показник розшарованості суміші  $i_{\text{d}}$  менше 5 %, вміст частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{\text{fr}}$  є максимальним, питомі витрати енергії  $E_{\text{Q}}$  мають бути мінімізовані, спостерігається оптимальне значення часу роботи обладнання  $t$  для різних типів вхідного матеріалу в межах 45,1–50,4 хв. Найменші питомі витрати енергії  $E_{\text{Q}}$  спостерігаються при використанні сої – 0,696 МДж/кг, пшениці – 0,794 МДж/кг і ячменю – 0,896 МДж/кг. При цьому раціональне значення частоти обертання ротора  $n$  повинна бути в межах 2267–2431 об/хв, а діаметр вхідного отвору статора  $D_{\text{in}}$  в межах 0,057–0,060 м.

Розроблено дискретну систему автоматичного керування кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів на основі графа кінцевого автомата, який включає 15 станів на основі автомата Мура. Система керування дає змогу реалізувати процес приготування рідких кормів у автоматичному режимі з мінімальним втручанням оператора. Проведена виробнича перевірка дослідного роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора підтвердила його ефективність у реальних умовах. Пристрій стабільно забезпечує продуктивність на рівні 27–35 кг/год при середній потужності, що споживається 1,1 кВт, що свідчить про високу енергоефективність. Отримана рідка кормова суміш характеризується високим ступенем диспергування (90–92 % часток розміром  $<0,5$  мм) та стабільною в'язкістю (68–75 мм<sup>2</sup>/с), забезпечуючи однорідну структуру корму для легкого споживання і засвоєння.

У результаті техніко-економічного розрахунку встановлено, що розроблений роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор, при використанні на свинофермі (200 голів на дорощуванні) з річною потребою корму 146 т, забезпечує економічний ефект у 22 521 грн порівняно з проточним гомогенізатором STS Group і 74 604 грн – порівняно з роторним кавітаційним диспергатором РКД. При цьому питомий економічний ефект становить 0,15 грн/кг (STS) і 0,51 грн/кг (РКД), а строк окупності – 0,88 року (STS) і 0,58 року (РКД).

**Ключові слова:** тваринництво, свинарство, кормозабезпечення, годівля, корм, рідкий корм, кормова суміш, комбікорми, компоненти, зерно, насіння, відходи, змішування, переробка, приготування, добовий раціон, зоотехнічні вимоги, однорідність суміші, фізико-механічні властивості, обладнання, експериментальна установка, змішувач кормів, гомогенізатор, диспергатор, конструкція, адаптивний, кавітаційна обробка, бункер, ротор, статор, дифузор, резонатор, дозатор кормів, дослідження, процес, експеримент, моделювання, ефективність, параметри, якість, енергоємність, продуктивність, температура, фракційний склад, число кавітації, частота обертання, тривалість, амплітуда, діаметр, інтенсивність, швидкість, енергетичні ресурси, подача, тиск, потужність, рівняння регресії, статистичний аналіз, залежність, система автоматичного керування.

## ANNOTATION

*Malegin R. D.* Substantiation of the design and technological parameters of a rotary cavitation disperser-homogenizer of liquid feed for pigs. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

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

*Purpose of the Study:* The aim of the research is to increase the efficiency of the preparation process for complete liquid feeds for pigs by improving the design of a rotary cavitation disperser-homogenizer and substantiating its structural and technological parameters.

*Objectives of the Study:*

- To justify the structure and pathways for enhancing the efficiency of a technical system for preparing complete liquid feeds for pig nutrition based on the analysis of the industry status and previous research.
- To develop a physical and mathematical model of the hydrodynamic motion of liquid feed components in a rotary disperser-homogenizer depending on its design and operational parameters.
- To investigate the phenomenon of cavitation in the developed rotary disperser-homogenizer using numerical modeling methods.
- To conduct experimental studies on the technological process of preparing complete liquid pig feed with the rotary disperser-homogenizer and to determine its optimal structural and technological parameters depending on the type of feed components.
- To develop an automated control system for the liquid feed disperser-homogenizer, test it under production conditions, and evaluate the economic effectiveness of the research outcomes.

*Object of Study:* The technological process of preparing complete liquid feed for pig nutrition and the technical means for its implementation.

*Subject of Study:* The patterns of the process of preparing complete liquid feeds for pig nutrition.

*Research Methods:* Theoretical studies are based on numerical modeling methods in the Simcenter Star-CCM+ software environment using physical-mathematical models of multiphase media interaction, fundamental principles of theoretical mechanics, molecular theory, and hydrodynamics. Integral and differential calculus methods implemented in Wolfram Cloud were also applied. Experimental studies included multi-factor experiment planning and were conducted in both laboratory and industrial settings using developed and standard techniques, physical models, experimental samples of working elements, and certified instruments and equipment. Statistical data analysis was performed in Wolfram Cloud and Microsoft Excel environments.

*Novel Findings:* For the first time, empirical second-order regression equations were established showing the dependencies between the quality indicators of the dispersed homogeneous liquid feed (particle size distribution, mixture stratification index, final mixture temperature, and kinematic viscosity) and technological parameters (power consumption, performance, energy usage) in relation to the design-technological parameters of the cavitation disperser-homogenizer (rotor speed, inlet diameter of the stator, equipment operating time). The physical-mathematical model of hydrodynamic motion in the rotary cavitation disperser-homogenizer was further developed, reflecting changes depending on structural-operational parameters (number of resonators, rotor speed, stator inlet diameter).

*Practical Significance:* The pilot tests of the developed rotary cavitation disperser-homogenizer at the "Monika" farm confirmed its efficiency under real-world conditions. The research results have been integrated into the educational process at DDAEU within the course "Machines and Equipment in Animal Husbandry" for students in the Bachelor's program of "Agroengineering" (specialty 208). Additionally, the results have been implemented in the production activities of LLC "DONSPETSMONTAZH-AGRO" and PE "Agromekh Plus" through design documentation kits for the rotary cavitation disperser-homogenizer.

A structurally and technologically justified design scheme of the rotary cavitation disperser-homogenizer was developed, consisting of an electric motor, bearing assembly, shaft with blades and rotor resonators, stator with through-hole and diffusers, inlet pipes for dry and liquid components, outlet pipe, cover, and working chamber. A distinctive feature

of the design is the formation of blades shaped like centrifugal pump impellers at the intersection of rotor confusers and stator resonators. Their periodic high-speed engagement generates cavitation, enabling additional grinding of feed components.

A physical-mathematical model of hydrodynamic movement in the rotary disperser-homogenizer was established, depending on design-operational parameters. A methodology was developed to determine key parameters such as the number of holes in the rotor  $k_p$  and stator  $k_c$ , hole width  $z$ , and contact circle length  $i$ . The optimal number of holes ranges from 16 to 48. Using Zhukovsky's theory of hydraulic shock, a method was created to determine fluid velocity and calculate the device's power and output.

Numerical modeling identified the minimum and maximum fluid velocities and pressures at the diffuser ( $V_{rot}$ ,  $P_{rot}$ ) and stator inlet ( $V_{in}$ ,  $P_{in}$ ), depending on rotor speed  $n$ , inlet diameter  $D_{in}$ , and resonator quantity  $N_{hole}$ . At  $n = 3000$  rpm,  $D_{in} = 0.06$  m, and  $N_{hole} = 16$ , the maximum inlet velocity  $V_{in\ max}$  reaches 7.3 m/s. The maximum diffuser velocity  $V_{rot\ max}$  is 27.5 m/s at  $N_{hole} = 48$ . Maximum inlet and diffuser pressure values reach 154.4 kPa under similar conditions. The cavitation number ( $X_{max}$ ,  $X_{min}$ ) varies with  $N_{hole}$ ,  $D_{in}$ , and  $n$ , indicating optimal cavitation regimes ( $X_{min} = 0.04$ ,  $X_{max} = 0.45$ ), corresponding to film cavitation.

During experimental studies, second-order regression equations were developed for wheat, barley, and soy based on the proportion of 0–0.5 mm particles  $k_{fr}$ , mixture stratification  $i_d$ , final temperature, viscosity  $\nu$ , power consumption  $N$ , energy consumption  $E$ , and specific energy usage  $E_Q$  versus rotor speed  $n$ , stator inlet diameter  $D_{in}$ , and time  $t$ . Cochran and Fisher criteria confirmed regression accuracy. Optimal operating time ranges from 45.1–50.4 min depending on feed type. Minimum  $E_Q$  values: soy – 0.696 MJ/kg, wheat – 0.794 MJ/kg, barley – 0.896 MJ/kg. Optimal rotor speed: 2267–2431 rpm; stator inlet diameter: 0.057–0.060 m.

A discrete automatic control system for the cavitation disperser-homogenizer was developed based on a finite state machine graph (Moore machine with 15 states), enabling minimal operator intervention. Field testing confirmed stable performance: 27–35 kg/h with average power of 1.1 kW. The liquid feed produced showed 90–92% dispersion of particles

<0.5 mm and stable viscosity (68–75 mm<sup>2</sup>/s), ensuring homogeneous and easily digestible feed.

*Economic Analysis:* A cost-benefit analysis showed that the developed disperser-homogenizer, when used at a pig farm (200 head, 146 t/year feed requirement), provides savings of UAH 22,521 compared to the STS Group inline homogenizer and UAH 74,604 compared to the RCD disperser. The specific economic effect is UAH 0.15/kg (STS) and UAH 0.51/kg (RCD), with payback periods of 0.88 and 0.58 years, respectively.

**Keywords:** animal husbandry, pig farming, feed preparation, liquid feed, compound feed, homogenizer, disperser, cavitation treatment, rotor, stator, numerical modeling, energy efficiency, automatic control, regression analysis, feed mixture, viscosity, productivity.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування:*

1. Алієв Е.Б., Дудін В.Ю., Алієва О.Ю., **Малєгін Р. Д.** Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора рідких кормів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* № 21. 2020. С. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>. – **категорія Б** (Здобувачу належить розробка 3д моделі для моделювання)

2. Алієв Е.Б., Алієва О.Ю., **Малєгін Р.Д.** Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва. *Наукові горизонти.* 2020. № 07 (92). С. 112–19. DOI: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-112-119>. – **категорія А, Scopus** (Здобувачу належить один із запропонованих способів переробки рослинної сировини)

3. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Яропуд В.М., **Малєгін Р.Д.** Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2020. № 2 (109). С. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>. – **категорія Б** (Здобувачу належить розробка технології наповнення ємності та виведення готового продукту)

4. Aliiev E., **Maliehin R.**, Ivliev V., Aliieva O. Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed. *Scientific Horizons.* 2021. 24 (2). P. 16–26. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26) – **категорія А, Scopus** (Здобувачу належить розробка 3д моделі для моделювання)

5. Алієв Е.Б., **Малєгін Р.Д.** Результати експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора рідких кормів для свиней. *Сільськогосподарські машини.* 2024. 50: 48–60. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1334> – **категорія Б** (Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень)

***Розділи монографії:***

6. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., **Малєгін Р. Д.**, Лупко К. О., Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 2022. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0 (*Здобувачу належать розділ «3.3. Кавітаційний диспергатор-гомогенізатор для приготування рідких харчових продуктів і кормів»*).

***Патент України на корисну модель:***

7. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Алієва О. Ю., **Малєгін Р. Д.** Патент України на корисну модель 147500, МПК (2006) B01F 7/00, B01F 13/06 (2006.01). Роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u202008225. Заявл. 22.12.2020. Опубл. 12.05.2021, бюл. № 19. (*Здобувачу належить розробка конструктивної схеми установки*)

***Тези і матеріали конференцій:***

8. Алієв Е.Б., Алієва О.Ю., **Малєгін Р.Д.** Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження. Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» (29 травня 2020 р.). Житомир: ПНУ. 2020. С. 76–79. (*Здобувачу належить моделювання процесу кавітації*)

9. Алієв Е.Б., **Малєгін Р.Д.** Обґрунтування доцільності використання диспергаторів рідких кормів. Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2020 р.). Харків: ХНТУСГ, 2020. С. 7. (*Здобувачу належить обґрунтування ефективності рідкої годівлі*)

10. Алієв Е.Б., **Малєгін Р.Д.** Ефективність впровадження технології годівлі тварин кормами після кавітаційної обробки. Матеріали XVI міжнародна научна практична конференція «Найновітє научни постижения – 2020» (15–22 март 2020 г.).

Volume 3. Софія «Бял ГРАД-БГ ОДД». 2020. С. 39–41. *(Здобувачу належить обґрунтування ефективності кавітаційної обробки)*

11. Алієв Е., **Малєгін Р.**, Алієва О. Етапи розробки гомогенізатора-диспергатора рідких кормів. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (14–16 травня 2022 р.). Кропивницький: ЦНТУ. 2022. С. 40–41. *(Здобувачу належить розробка конструкторської документації)*

12. **Малєгін Р.Д.** Аналіз динамічних характеристик рідкої фази суміші у дифузори диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней. 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. 173–176.

***Депонований звіт:***

13. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгіх Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., Лупко К., Лінко М., **Малєгін Р.** Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322 *(Здобувачу належать розділ 2.6, 3.3 і висновки).*

## ЗМІСТ

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	21
1.1 Ефективність рідкого годування свиней .....	21
1.2 Технологічне забезпечення приготування рідких кормів .....	22
1.3 Аналіз сучасного устаткування для диспергування і гомогенізації кормових компонентів .....	32
1.4 Огляд досліджень процесу гомогенізації і диспергування рідкої суміші та ефекту кавітації .....	44
1.5 Висновки до розділу .....	56
1.6 Мета і завдання досліджень .....	58
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОТОРНОГО КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА РІДКИХ КОРМІВ .....	60
2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми .....	60
2.2 Аналітичні дослідження робочих органів .....	68
2.3 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання .....	73
2.4 Методика чисельного моделювання .....	75
2.5 Результати чисельного моделювання .....	80
2.6 Висновки до розділу .....	100
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА РІДКИХ КОРМІВ .....	102
3.1 Мета і програма експериментальних досліджень .....	102
3.2 Проєктування і виготовлення експериментального зразка обладнання	103
3.3 Створення експериментального стенду і налаштування додаткового обладнання .....	105
3.4 Методика експериментальних досліджень .....	115
3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних .....	117
3.6 Висновки до розділу .....	119
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА РІДКИХ КОРМІВ .....	121

4.1 Вплив конструктивно-технологічних параметрів диспергатора-гомогенізатора на якість кормової суміші.....	121
4.2 Вплив конструктивно-технологічних параметрів на енергоефективність процесу приготування кормів .....	140
4.3 Раціоналізація конструктивно-технологічних параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів .....	148
4.4 Висновки до розділу .....	152
<b>5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>155</b>
5.1 Розробка автоматизованої системи керування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів .....	155
5.2 Виробничі випробування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів.....	159
5.3 Впровадження результатів досліджень .....	164
5.4 Техніко-економічна ефективність.....	165
5.5 Висновки до розділу .....	168
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>170</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>173</b>
Додаток А.....	191
Додаток Б.....	192
Додаток В .....	193
Додаток Г.....	195
Додаток Д.....	198
Додаток Е .....	199
Додаток Ж.....	200
Додаток И.....	201
Додаток К .....	202
Додаток Л.....	205
Додаток М .....	206

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасних умовах ведення тваринництва, зокрема свинарства, питання ефективного використання кормових ресурсів набуває все більшої актуальності. Підвищення продуктивності та зниження собівартості продукції неможливе без впровадження енергоощадних, технологічно обґрунтованих методів обробки кормів. Серед таких методів особливе місце займає виробництво рідких кормів, які забезпечують більш повне засвоєння поживних речовин, покращують санітарно-гігієнічний стан годівлі та зменшують втрати корму при зберіганні й транспортуванні.

Водночас, технологія приготування рідких кормів потребує використання спеціалізованого обладнання, здатного забезпечити ефективне диспергування та гомогенізацію сировини. Сучасні роторні машини, які використовуються для цих цілей, не завжди відповідають вимогам енергоефективності, стабільності якості суміші та можливості адаптації до різних типів зернової сировини. Крім того, недостатньо вивченими залишаються режими кавітаційного впливу на кормові компоненти, що відкриває нові напрями для наукового пошуку.

Застосування роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора дає змогу значно інтенсифікувати процеси подрібнення та змішування, одночасно забезпечуючи високу якість і стабільність кормової суміші. Однак для досягнення максимальної ефективності такого обладнання необхідне глибоке наукове обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів з урахуванням реальних умов виробництва, фізико-хімічних властивостей сировини та енергетичних витрат.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Дослідження, що стали основою дисертаційної роботи, виконані в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) в рамках науково-дослідних проєктів: «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини на біологічно цінні харчові продукти та кормові добавки» (№ ДР 0120U100322, 2020–2022 рр.) та

«Розробка і вдосконалення механотронних систем для виробничих процесів у тваринництві» (№ ДР 0121U109891, 2021–2025 рр.).

**Мета дослідження:** підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних рідких кормів для свиней за рахунок удосконалення конструкції роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

Для досягнення поставленої мети висунуто **наукову гіпотезу**, відповідно до якої підвищення ефективності процесу, зокрема зменшення питомих енерговитрат і забезпечення необхідної якості повнораціонних рідких кормів для свиней, можливе шляхом застосування роторного диспергатора-гомогенізатора з робочими органами із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що створюють додаткові кавітаційні процеси.

**Задачі дослідження:**

– з урахуванням аналізу сучасного стану галузі та результатів попередніх досліджень обґрунтувати структуру технічної системи приготування повнораціонних рідких кормів для свиней і визначено напрями підвищення її ефективності;

– розробити фізико-математичну модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному диспергаторі-гомогенізаторі в залежності від його конструктивно-режимних параметрів;

– дослідити явище кавітації у розробленому роторному диспергаторі-гомогенізаторі методами чисельного моделювання;

– експериментально дослідити процес приготування повнораціонних рідких кормів для відгодівлі свиней за допомогою роторного диспергатора-гомогенізатора та визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри цього обладнання залежно від виду кормових компонентів;

– розробити автоматизовану систему керування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, здійснити його виробничу перевірку та виконати оцінку економічної ефективності застосування результатів досліджень.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес приготування повнораціонних рідких кормів для годівлі свиней та технічний засіб для його реалізації.

**Предмет дослідження:** закономірності протікання процесу приготування повнораціонних рідких кормів для годівлі свиней.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження базуються на методах чисельного моделювання в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+ з використанням фізико-математичних моделей взаємодій багатофазних середовищ, основних положень теоретичної механіки, молекулярної теорії і законів гідродинаміки. При цьому застосовувалися методи інтегрального та диференційного числення, які реалізовані у програмному середовищі Wolfram Cloud.

Експериментальні дослідження включали методіку планування багатофакторних експериментів та виконувалися як у виробничих, так і в лабораторних умовах, із використанням розроблених і стандартних методик, фізичних моделей, експериментальних зразків робочих органів, сертифікованих приладів і обладнання. Для аналізу отриманих даних застосовували статистичні методи обробки у програмних середовищах Wolfram Cloud і Microsoft Excel.

**Наукова новизна одержаних результатів.** *Уперше:*

– встановлені емпіричні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку зміни якісних показників диспергованого гомогенного рідкого корму (фракційний склад частинок в суміші, показник розшарованості суміші, температура суміші в кінці процесу, кінематична в'язкість суміші) і технологічних параметрів (потужність, що споживається, продуктивність, витрати енергії) від конструктивно-технологічних параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора (частота обертання ротора, діаметра вхідного отвору статора, час роботи обладнання).

*Отримало подальший розвиток:*

– фізико-математична модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному кавітаційному диспергаторі-гомогенізаторі в залежності від його конструктивно-режимних параметрів (кількість резонаторів, частота обертання статора, діаметра вхідного отвору статора);

**Практичне значення одержаних результатів.** Проведена виробнича перевірка дослідного роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора на базі ФГ «Моніка» підтвердила його ефективність у реальних умовах. Результати

досліджень впроваджені в освітній процес ДДАЕУ при викладанні навчальної дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія». Результати науково-технічної роботи впроваджено та використано у виробничій діяльності підприємства ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» і ПП «Агромех плюс» у вигляді комплектів конструкторської документації на роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор рідких кормів.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати, представлені у дисертації, здобуті автором особисто. Формулювання наукових завдань, аналіз отриманих даних та їх інтерпретація виконувалися у співпраці з науковим керівником і частково – з колегами, з якими підготовлено спільні публікації. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [144, 145, 146] – аналіз технічного й технологічного забезпечення процесів приготування рідких кормів; [147] – розробка конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів; [148, 149] – теоретичне обґрунтування параметрів конструкції й технологічних режимів роботи кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів; [154, 155] – організація та проведення експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались та отримали позитивну оцінку на: IV Міжнародній науково-практичній конференції «Біоенергетичні системи» (29 травня 2020 р. Житомир: ПНУ); XXI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2020 р., Харків: ХНТУСГ); XVI Міжнародній науковій практичній конференції «Найновітні наукові постиження – 2020» (15–22 березня 2020 р., Софія: «Бял ГРАД-БГ ОДД»); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (14–16 травня 2022 р., Кропивницький: ЦНТУ); III Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р., Дніпро: ДДАЕУ).

**Публікації.** Основні результати дисертації висвітлено в 13 наукових публікаціях, зокрема: 3 статті у фахових наукових журналах України (категорія Б); 2 у фахових наукових журналах України (категорія А); 1 патент на корисну модель, зареєстрований в Україні; 1 розділ колективної монографії; 5 матеріалів і тез, опублікованих у збірниках конференцій та інших наукових виданнях; 1 депонований звіт.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 208 сторінок, з яких 11 додатків займають 18 сторінок. Основний текст дисертації містить 190 сторінок, що включає 67 рисунків та 36 таблиць. Список використаних джерел налічує 161 найменування на 18 сторінках.

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1 Ефективність рідкого годування свиней

Годування поросят рідкими кормами є ключовою частиною успішного вирощування здорових та продуктивних тварин. Цей спосіб має свої особливості, які необхідно враховувати для досягнення оптимальних результатів. Важливо розглянути всі аспекти цієї годівлі, починаючи від вибору кормів до технологій подачі та впливу на здоров'я та продуктивність поросят [1, 2, 3].

Вибір рідких кормів для поросят має ґрунтуватися на їх високій поживній цінності та легкій засвоюваності. Основними компонентами рідких кормів є молочні продукти, такі як сироватка, йогурт, молоко, а також спеціально розроблені рідкі концентрати. Ці корми повинні містити всі необхідні поживні речовини, які сприяють нормальному росту та розвитку поросят [4, 5, 6].

Підготовка рідких кормів передбачає їх ретельне змішування та розведення до необхідної консистенції. Важливо забезпечити однорідність кормової суміші, щоб поросята отримували однакову кількість поживних речовин з кожною порцією. Використання спеціального обладнання для змішування та дозування кормів допомагає досягти цього завдання [7, 8, 9].

Лідером серед європейських країн за використанням рідкої системи годівлі свиней є Ірландія, де 90% господарств застосовують цей метод [10]. У Німеччині та Данії понад 60% великих свиноферм перейшли на рідке годування, а в Нідерландах цей показник сягає 50% від загального поголів'я [11]. У Фінляндії більше 90% нових свиноферм, введених в експлуатацію за останні п'ять років, використовують систему рідкої годівлі [12].

Основною перевагою рідкої годівлі є можливість використання відходів та вторинних продуктів харчової й мікробіологічної промисловості, що дозволяє зменшити витрати на зернові корми та знизити собівартість продукції. Додаткові переваги включають точніше дозування корму, спрощення внесення добавок (преміксів, медикаментів), зменшення втрат корму, відмову від напувалок,

підвищення поїдання корму до 5%, збільшення приростів до 6%, зниження коефіцієнта конверсії корму до 10%, зменшення кількості екскрементів, поліпшення економічних і екологічних показників виробництва, швидку доставку корму на великі відстані, а також можливість оперативно змінювати раціон без залучення комбикормових заводів [13, 14, 15].

Фахівці зазначають, що впровадження рідкої годівлі дозволяє знизити потребу у персоналі на 25%, зменшити витрати електроенергії та мінімізувати вплив людського фактору. Важливою перевагою також є ферментація кормової суміші, що змінює її біохімічний склад і підвищує біодоступність поживних речовин. Годування ферментованим рідким кормом (ФРК) позитивно впливає на морфологію слизової оболонки шлунково-кишкового тракту, стимулює імунітет свиней та зменшує вертикальну передачу ентеропатогенних мікроорганізмів [16, 17].

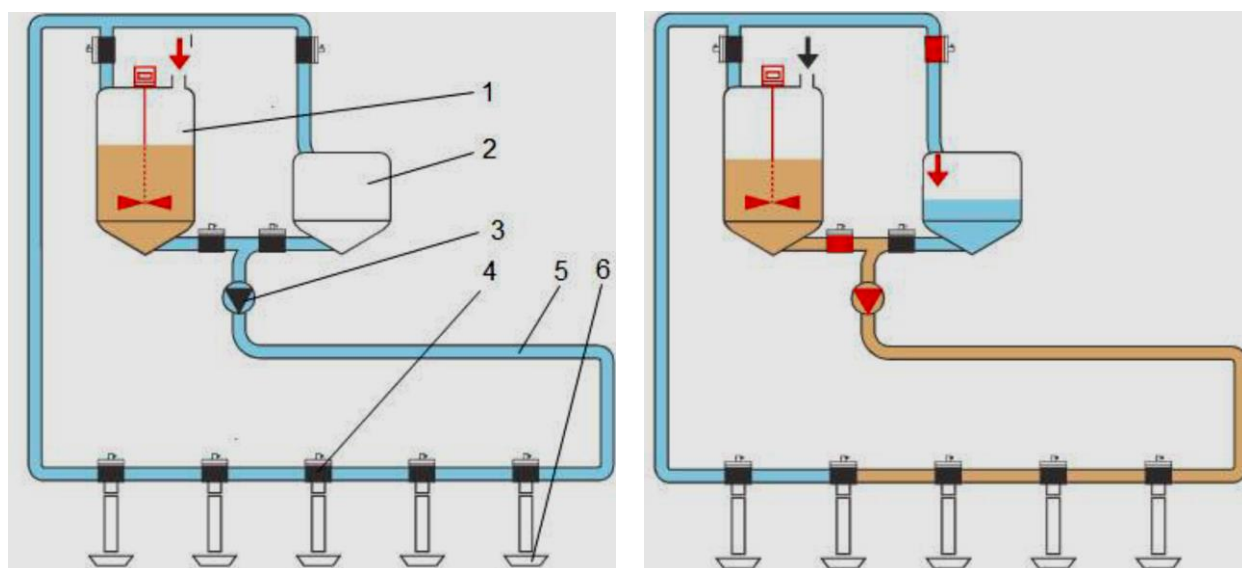
Однак рідка годівля має і недоліки. Висока вартість обладнання та його експлуатація окуповуються лише за 3–5 років. Рідкі корми мають обмежений термін зберігання, а недотримання режимів очищення систем може створити загрози для тварин. Система потребує щоденного контролю, а підвищена вологість у приміщеннях негативно впливає на умови утримання, особливо взимку [18, 19, 20].

## **1.2 Технологічне забезпечення приготування рідких кормів**

В наші часи, рідка годівля технічно забезпечується двома основними системами: суто рідка годівля (із попереднім приготуванням) та мультифазна годівля (з приготуванням перед подачею) [21, 22, 23, 24]. Розглянемо їх детально.

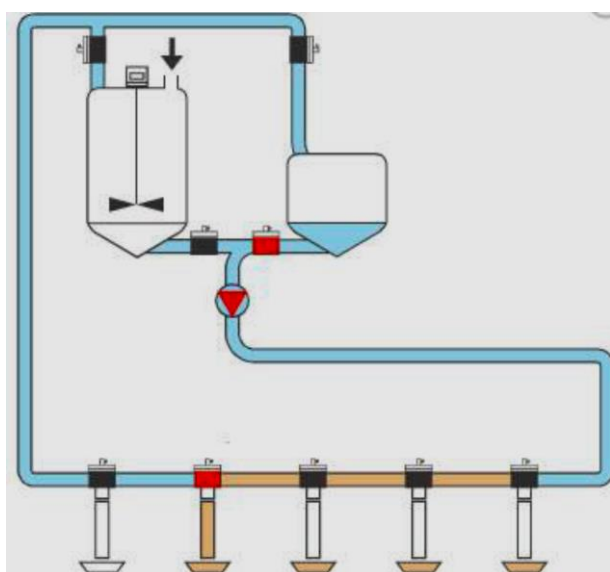
Систему рідкої годівлі розглянемо на прикладі обладнання Liquid Feeding System, компанії WEDA Dammann & Westerkamp GmbH [25, 26]. Ця система включає змішувальний резервуар, ваги, кормовий насос, ємності для технічної та свіжої води, компресор і кормові клапани, розташовані в приміщенні свинарника. Управління всіма процесами здійснюється за допомогою комп'ютера, який автоматично розраховує норми видачі рідкого корму відповідно до динаміки росту тварин та їх потреб на основі заздалегідь складеного графіка годівлі.

Корм замішується у змішувальній ємності, під якою розташовані ваги для зважування та точного дозування компонентів (рисунок 1.1, а).

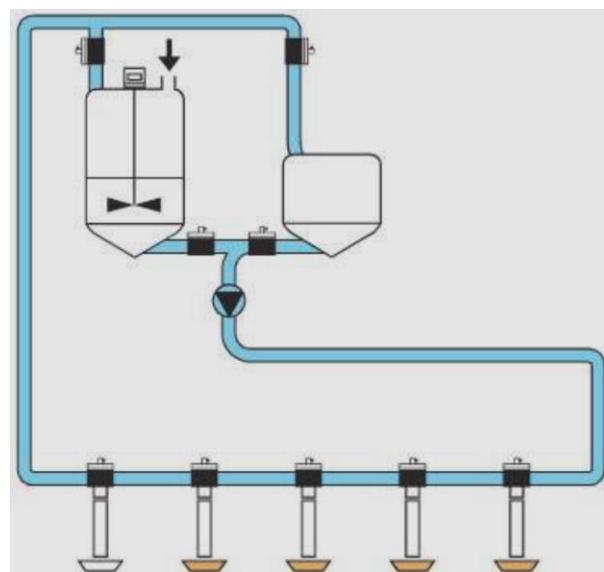


а

б



в



г

а – годування; б – годування і напування; в – годування; г – промивання системи;

1 – ємність для змішування; 2 – ємність для води; 3 – насос;

4 – клапан для корму; 5 – кормопровід; 6 – годівниці для тварин

Рисунок 1.1 – Схема роботи системи Liquid Feeding System

Подача корму відбувається через трубопровід за допомогою води, що надходить із ємності використаної води (рисунок 1.1, б). Кормова суміш транспортується насосом до кінцевого клапана, а кожна порція розподіляється по секціях до повного спорожнення змішувача. Після цього вода витісняє залишки корму, які спрямовуються в ємність використаної води (рисунок 1.1, в). У результаті корм повністю розподіляється між тваринами, а в системі залишається тільки вода, яку потім перекачують у змішувач для наступного приготування (рисунок 1.1, г). Загальний вигляд блоку приготування показано на рисунку 1.2.



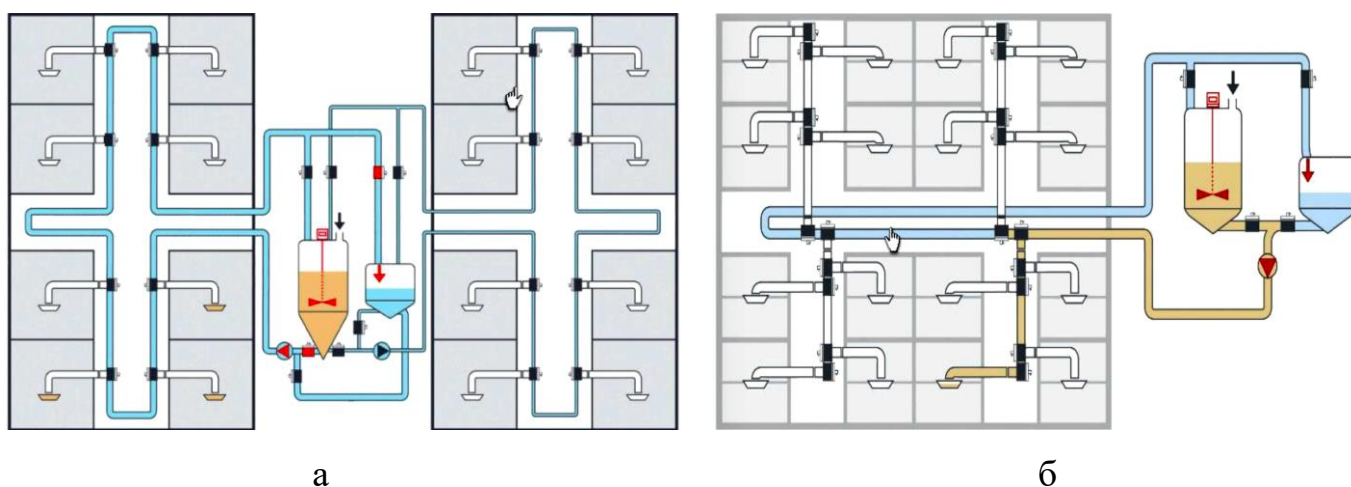
Рисунок 1.2 – Система рідкої годівлі поросят *culina sup* від Big Dutchman

Система також оснащена окремою лінією для використаної води (рисунок 1.3, а), що значно пришвидшує процес подачі корму. Вода може подаватися не тільки з кормової кухні, але й безпосередньо перед секцією.

Інша модифікація системи (рисунок 1.3, б) поєднує два варіанти рідкої годівлі в одному резервуарі, оснащеному двома вихідними отворами: великим для дорослих тварин і малим – для поросят. Така конструкція запобігає використанню залишків корму для свиноматок у годівлі молодняку.

Для великих свинарників із численними секціями пропонується технічне рішення (рисунок 1.3, в), що скорочує відстань транспортування корму,

заощаджуючи матеріали. Медикаменти при цьому вводяться безпосередньо в тупикову лінію.



а – для маточника опоросу та приміщень для дорощування;

б – для відгодівельних свинарників

Рисунок 1.3 – Компонівка систем рідкої годівлі

Принцип роботи системи рідкої годівлі поросят Babyfeed, розробленої компанією Schauer (рисунок 1.4), полягає в наступному [27, 28]. У змішувачі порційного типу, встановленому на електронних вагах, дозовано готується комбікорм, необхідний для кожного окремого кормового вентиля. Ця порція у сухому вигляді перекачується в ротаційний розподільник (обслуговує декілька годівниць), де в неї додається рідина. В результаті, через кормовипускний канал до кормомісця, надходить кашоподібна або рідка суміш. Після годування ротаційний розподільник та кормопроводи проходять очищення стисненим повітрям та водяним аерозолем.

Сухий корм транспортується через систему, після чого, пройшовши через ротаційний розподільник, він подається до годівниці у вигляді сухої, кашоподібної або рідкої суміші. Годівниці, оснащені датчиками, можуть заповнюватися до восьми разів на день. Перед приготуванням нової порції комп'ютер перевіряє, чи спожито попередній корм. Якщо годівниця порожня, система автоматично готує наступну порцію для відповідного місця. У випадку, якщо корм ще залишився, цей пункт

пропускається, і система переходить до іншого. Перевірка годівниць здійснюється через 10, 20 і 30 хвилин після годування. На основі зібраної статистики система автоматично регулює обсяг корму, що подається на кожне місце, забезпечуючи точну відповідність потребам тварин.



Рисунок 1.4 – Система рідкої годівлі поросят Babyfeed від Schauer

Збільшення кількості поросят при опоросі є бажаним результатом для підвищення продуктивності свинарства, але водночас створює низку серйозних проблем, серед яких ключовою є недостача корму, зокрема для підсисних поросят. Збільшення кількості поросят при опоросі перевищує фізіологічні можливості свиноматок забезпечувати їх достатньою кількістю молока. Це призводить до того, що частина поросят недоотримує необхідних поживних речовин для нормального росту та розвитку [29, 30]. Для компенсації браку молока потрібно впроваджувати додаткові джерела живлення у вигляді заміників молока або повнораціонних рідких

кормів. Проте розробка, приготування та введення таких кормів потребує значних фінансових і технологічних ресурсів. Поросята, які не отримують достатньої кількості молока або замінників, зіштовхуються з ризиками затримки росту, ослабленням імунної системи та підвищеною смертністю. Це негативно впливає на загальні економічні показники господарства [31, 32, 33, 34].

Технологічна лінія виробництва замінника молока для поросят включає кілька важливих етапів: починаючи від відбору і підготовки сировини, і закінчуючи фасуванням кінцевого продукту. Кожен етап має свої вимоги та технологічні процеси, які забезпечують високу якість та харчову цінність кінцевого продукту (рисунок 1.5) [35, 36, 37].

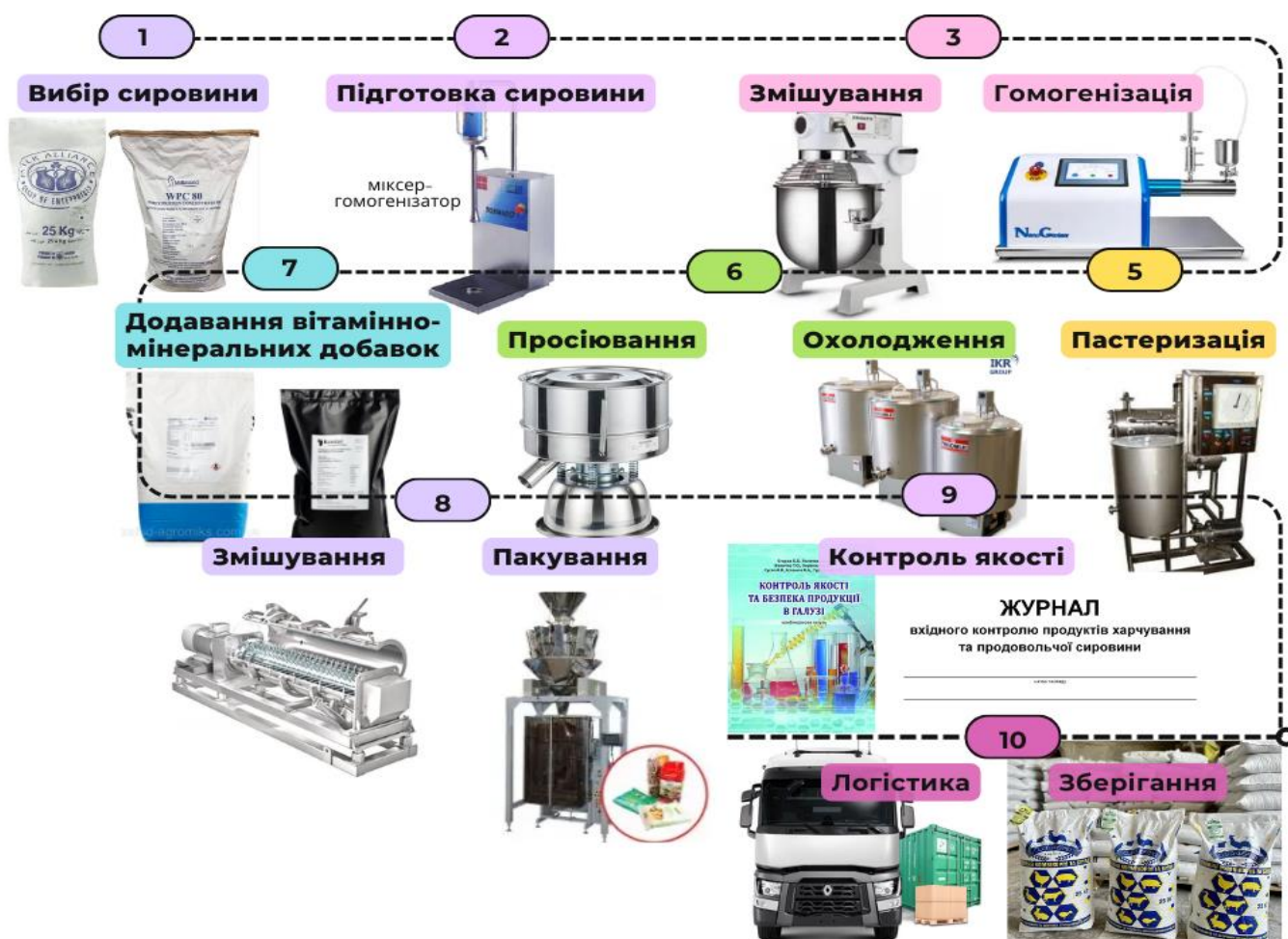


Рисунок 1.5 – Базова технологічна лінія виробництва замінника молока для поросят

Важливим етапом приготування рідких кормів є змішування і гомогенізація. На цьому етапі всі компоненти ретельно перемішуються в однорідну масу. Процес гомогенізації забезпечує рівномірний розподіл жирів у суміші, покращуючи її засвоюваність [38, 39].

Основною метою свинарства, як і будь-якого іншого бізнесу, є досягнення максимального рівня прибутковості. Найбільша частка витрат у цій галузі припадає на корми, особливо в період інтенсивного росту й відгодівлі тварин, що відкриває значний потенціал для підвищення ефективності. Водночас важливими чинниками, що також впливають на загальні витрати, залишаються конструктивні рішення щодо приміщень, систем годівлі, планування загонів, забезпечення достатнього простору для тварин, а також організація управління відходами. Усі ці аспекти варто враховувати для досягнення оптимального економічного результату [40].

До впровадження сучасних поличкових годівниць з вільним доступом до корму, які нині широко застосовуються у промисловому свинарстві, в 1960-х роках використовували підлогове годування, зумовлене обмеженим простором. Однак така система супроводжувалась значними втратами корму та нерівномірністю його розподілу, що негативно позначалося на темпах росту свиней і ефективності кормовикористання.

Альтернативою стало жолобне годування, що передбачало використання спеціальних кормових жолобів у межах загону. Попри компактність рішення, процес наповнення жолобів вимагав значних трудових зусиль. За спостереженнями, тварини, які споживали корм із жолоба, демонстрували швидше споживання корму та менші втрати, але водночас ставали більш агресивними порівняно зі свинями, яких годували з підлоги. Через ці недоліки галузь почала шукати вдосконалені системи годівлі, здатні знизити рівень втрат корму й підвищити продуктивність тварин [41, 42, 43, 44].

Постійна наявність корму в годівниці є ключовою умовою ефективного відгодовування свиней, тому особливу увагу слід приділяти конструкції годівниці, а особливо її бункерної частини. У випадках, коли тварини не мають безперервного доступу до корму, їх ріст і продуктивність можуть швидко знижуватися. Відтак, годівниця має вміщувати достатній обсяг корму, бути зручною для користування

самими тваринами та відповідати їхнім природним звичкам у процесі споживання їжі. Така конструкція сприяє збільшенню обсягів поїдання, пришвидшує ріст свиней, зменшує їх агресивність і знижує рівень стресу, що загалом позитивно позначається як на продуктивності тварин, так і на якості м'яса, а отже — і на економічних показниках ферми [45, 46].

Застосування бункерної годівниці з перегородками для голови й плечей, як вказував, дозволяє зменшити агресивну поведінку тварин. Крім того, правильно спроектована система годівлі мінімізує втрати корму, які часто виникають у процесі годування.

У свинарстві використовуються різні типи годівниць з вільним доступом — від моменту відлучення поросят до завершальної стадії відгодівлі. Найбільш традиційним є бункер для подачі сухого корму, який подає виключно гранульовану чи сипку їжу. У кінці 1980-х років набула поширення інша конструкція — комбінована годівниця для подачі вологого та сухого корму, оснащена водопостачанням. Основна її перевага — це можливість подачі корму разом із водою з однієї установки, а також попереднє змішування компонентів у спеціальній чаші перед самим споживанням. Хоча свині можуть вживати сухий корм, більшість з них все ж надає перевагу вологій суміші [47, 48].

Однією з останніх новинок у цій сфері є трубчаста годівниця, яка працює під керуванням комп'ютерної системи. Вона не має резервуара для зберігання корму, а подача здійснюється безпосередньо в режимі реального часу. Однак у разі збоїв живлення або відмови програмного забезпечення, корм не потрапляє до тварин, що може швидко призвести до зниження апетиту та зупинки росту [49].

Впровадження кавітаційного диспергування під час приготування рідких кормів дозволяє підвищити їх якість. Технологія надає приріст живої маси на 10–15%, підвищення молочності свиноматок на 9–13% і знижує кількість випадків прохолосту до 5%. У процесі обробки відбувається руйнування клітковини, розщеплення білків до амінокислот, перетворення крохмалю в цукри й емульгація жирів, що робить поживні речовини більш доступними для засвоєння. Завдяки цим перевагам рідкі корми є перспективним рішенням у годівлі тварин. (рисунок 1.6).

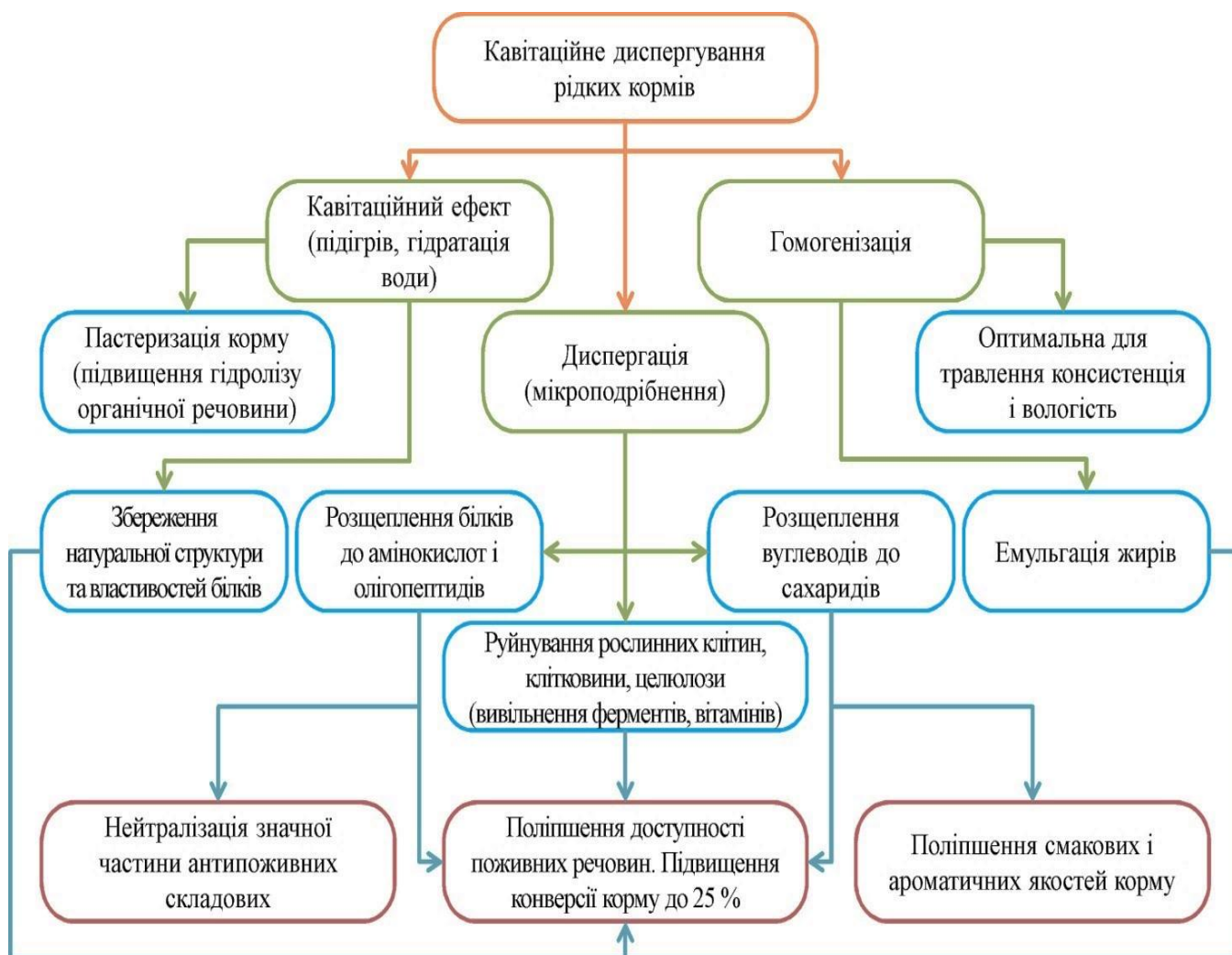


Рисунок 1.6 – Ефективність кавітаційного диспергування рідких кормів

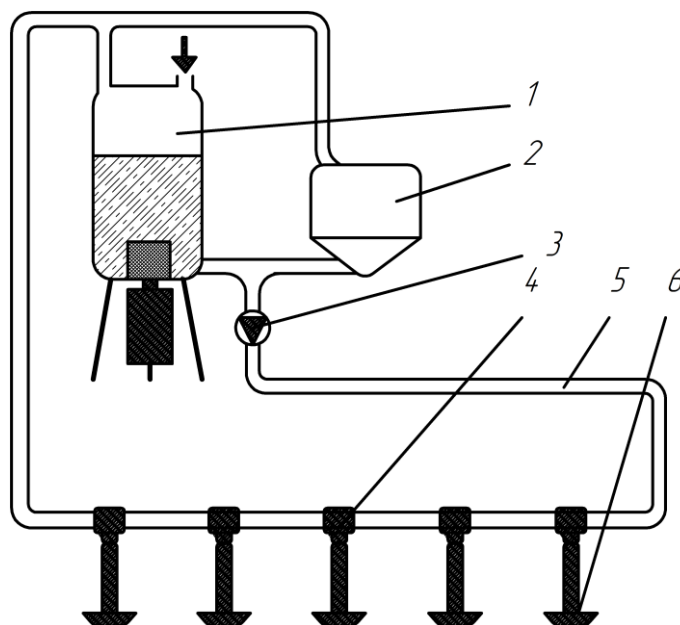
Водночас переробка корму на кавітаційних установках не призводить до жорсткої зміни білкового комплексу, характерного для інших типів термічних обробок, зберігаються натуральні вітаміни і ферменти (амілаза). В результаті виробляються гомогенні кормові суміші з оптимальною для травлення тварин вологістю (69–72 %) і дисперсністю (0,6–1,2 мм) [50, 51, 52, 53].

Зокрема, в кормових сумішах, що готують з компонентів в натуральному вигляді (зерно злакових, бобових та ін.), зберігається жива субстанція (гормони, ферменти тощо) [54, 55]. У процесі обробки вони позбавляються від олігосахарів і антиметаболітів. Кормові суміші виробляються в пастеризованому вигляді й готові до вживання.

На підставі вищезазначеного зроблено такі висновки:

- виробництво рідких кормів і кормових добавок на основі кавітаційної диспергації є ефективним, з точки зору економіки, передовим методом, що забезпечує покращення біологічних і хімічних якостей кормів;
- метод дозволяє застосовувати весь спектр компонентів рослинної сировини;
- отримати гомогенну рідку кормову суміш з добрими органолептичними якостями за рахунок зміни поживних речовин (вуглеводів, білків, клітковини тощо);
- кавітаційна обробка надає м'яку дію на протеїновий комплекс рослинної сировини, що забезпечує високий ступінь емульгації жирів, який призводить до збільшення його перетравлюваність тваринами (на 6,3 %);
- збільшується доступність мономірних елементів за рахунок зниження ефекту важко перетравності клітковини;
- збільшується екстракція біологічно активних речовин та розчинних білків;
- зменшуються втрати поживних речовин;
- збільшується до 70 % вміст протеїну через білки жомової частини;
- технологія кавітаційної обробки всієї маси рослинної сировини забезпечує позбавлення від необхідності переробки жому;
- кавітаційний ефект при диспергуванні зеленої маси забезпечує максимальне екстрагування компонентів із рослинних клітин;
- кавітаційна обробка доречна для білковмісних компонентів (пивна дробина, меляса, відходи спиртопереробної промисловості тощо);
- можна стверджувати про високу ефективність кормів, які біохімічно підготовлені для згодовування сільськогосподарським тваринам всіх видів.

Вищезазначені переваги процесу диспергування і гомогенізації рідких кормів дозволяють включити їх до технологічної лінії приготування рідких кормів (рисунок 1.7).



1 – диспергатор-гомогенізатор рідких кормів; 2 – ємність для води;  
 3 – циркуляційний насос; 4 – клапан для корму; 5 – кормопровід; 6 – годівниця для тварин

Рисунок 1.7 – Удосконалена технологічна лінія приготування рідких кормів

### **1.3 Аналіз сучасного устаткування для диспергування і гомогенізації кормових компонентів**

Якість кормів основним чином визначається технологічними операціями при їх приготуванні. По-перше, корми повинні бути однорідними за фракційним складом. Тобто процес подрібнення повинен забезпечувати однаковий фракційний склад за кожним з компонентів рослинної сировини, що входить до складу корму. По-друге, корми повинні бути однорідними по розподілу компонентів в суміші. Тобто процес змішування повинен забезпечувати високий коефіцієнт варіації розподілу компонентів рослинної сировини у всьому об'ємі (або масі) суміші. По-третє, корми повинні зберігати всі поживні речовини і вітамінні комплекси, не містити шкідливих речовин, забезпечуючи вимоги безвідходності трансформації рослинної сировини вздовж харчового ланцюга. Тобто приготування кормів повинно містити такі технологічні процеси, що задовольняють зазначеним умовам [56, 57, 58].

Вищезазначені вимоги відповідають процесу диспергування і гомогенізації кормових компонентів із застосуванням кавітаційної обробки. Згідно з [59] диспергування (dispersion) – технологічний процес тонкого подрібнення та розподілу в об'ємі твердого матеріалу, рідини або газу, в результаті якого виникають дисперсні системи: порошки, суспензії, емульсії, аерозолі. В свою чергу гомогенізація (homogenization) – технологічний процес, в ході якого зменшується ступінь неоднорідності розподілу компонентів і фаз в об'ємі гетеро фазної системи [60]. Кавітація (cavitation) – фізичний процес утворення бульбашок (каверн) в рідких середовищах, з подальшим їх спаданням і вивільненням великої кількості енергії (ударна хвиля), що виникає в результаті зовнішніх фізичних впливів [61]. Тобто кавітаційна обробка компонентів кормів дозволяє їх подрібнювати за рахунок дії ударної хвилі.

На сьогодні існує багато диспергаторів і гомогенізаторів, працюючих на використанні ефекту кавітації, в тому числі і для переробки кормових компонентів в корми підвищеної засвоюваності. В основному ці гідродинамічні установки призначені для приготування вологих кормових паст із зернових, олійних і бобових культур, кормів тваринного походження для молодняка і дорослих сільськогосподарських тварин з одночасним їх знезараженням і руйнуванням токсичних речовин (мікотоксинів і алкалоїдів) у вигляді суспензій і емульсій [62, 63, 64, 65].

Відомі наступні типи устаткування для диспергування [66]:

- подрібнення робочими органами, що розмелюють (кульові, бісерні, вібраційні, дезінтегратори);
- пристрої самоподрібнення (барабанні, відцентрові, струменеві);
- вибухові подрібнювачі (із скиданням тиску, з використанням вибухових речовин).

Недоліки цих типів пристроїв: знос робочих органів, що мелють; забруднення продуктами зносу подрібнюваного матеріалу; велика енергоємність диспергування; низький ККД, агрегація (злипання) частинок при збільшенні дисперсності матеріалу.

Останніми роками з'явилося устаткування для диспергування з одночасною гомогенізацією [67]: ультразвукові пристрої; ультразвукові пристрої кавітацій;

електрогідравлічні пристрої; пристрої роторних пульсацій; гідроударні установки [68, 69, 70, 71, 72, 73].

Ультразвукові пристрої застосовуються рідко і в специфічних умовах (наприклад, для гомогенізації майонезу), а електрогідравлічні пристрої поки не знайшли застосування. Найбільшого поширення за кордоном набули пристрої роторних пульсацій і ті, що приходять їм на зміну – гідроударні установки.

Відбувається закономірний перехід до способу диспергування компонентів в двофазному (компонент + рідина) середовищі, що дозволяє сумістити процеси диспергування і гомогенізації в одному апараті. Рідиною може бути вода або будь-яка інша рідина, наприклад, олія, що виділяється при подрібненні олійних культур, сік при переробці помідорів, гороху тощо. Це дає можливість використовувати фізичні властивості другої фази (нестисливість, закони Паскаля і Бернуллі) і застосувати нові фізичні ефекти (гідравлічний удар, кавітацію, імпульси високого тиску, турбулентність) [74].

Обробка кавітацією дозволяє провести подрібнення сировини і подальшу гомогенізацію кормо сумішей, що дає можливість проводити їх транспортування по стандартних системах рідкої кормо роздачі [75, 76, 77, 78].

Спосіб диспергування матеріалу в двофазному середовищі позбавлений недоліків сухого способу диспергування оскільки рідина не так сильно зношує матеріал робочих органів, не забруднює кормову суміш, запобігає агрегації за рахунок зменшення поверхневої енергії твердої фази (цей ефект посилюється додаванням поверхнево-активних речовин) [79, 80].

Основними елементами найпоширеніших конструкцій кавітаційних гідроударних диспергаторів є ротор і статор (рисунок 1.8) [81]. У роторі по колу розташовані резонансні камери (резонатори). У статорі отвори – конфузори. При обертанні ротора відбувається періодичне перекриття вихідних отворів резонаторів. Частота обертання ротора зазвичай знаходиться в межах 3000–4000 об/хв.



Рисунок 1.8 – Робочі органи кавітаційних гідроударних диспергаторів [82]

Подрібнення відбувається за рахунок дії на частинку кавітації, а також подвійного (прямого і зворотного) гідравлічного удару при перериванні потоку пульпи із заданою частотою. Частота спеціально підбирається рівній власній частоті ротора. Дія гідравлічного удару носить пульсуючий характер. Частинки що подрібнюються піддаються гідравлічному удару в резонансних камерах (резонаторах). За рахунок збігу власної частоти резонаторів з частотою проходження імпульсів тиску в камерах відбувається багаторазове (у 10 разів в порівнянні з апаратами роторних пульсацій) збільшення амплітуди значення тиску [82]. Гідродинамічні процеси в установці супроводжуються розвинутою турбулентністю [83]. Це сприяє хорошему ступеню гомогенізації оброблюваного матеріалу.

Принцип кавітаційної переробки кормових компонентів використовували багато розробників техніки і нових технологій кормоприготування. В Україні – це дослідження, пов'язані із створенням і випробовуванням кормоприготувальних агрегатів серії АКГСМ «Мрія» – роторно-пульсаційних апаратів [84] для одержання кормових добавок з амаранту та інших зернових матеріалів. Особливої уваги заслуговують дослідження «Кавікорм інжиніринг», технологія «Cavikorm» на базі роторного подрібнювача-диспергатора «РІД-2» (рисунок 1.9) заснована на принципі енергоефективного отримання комплексних

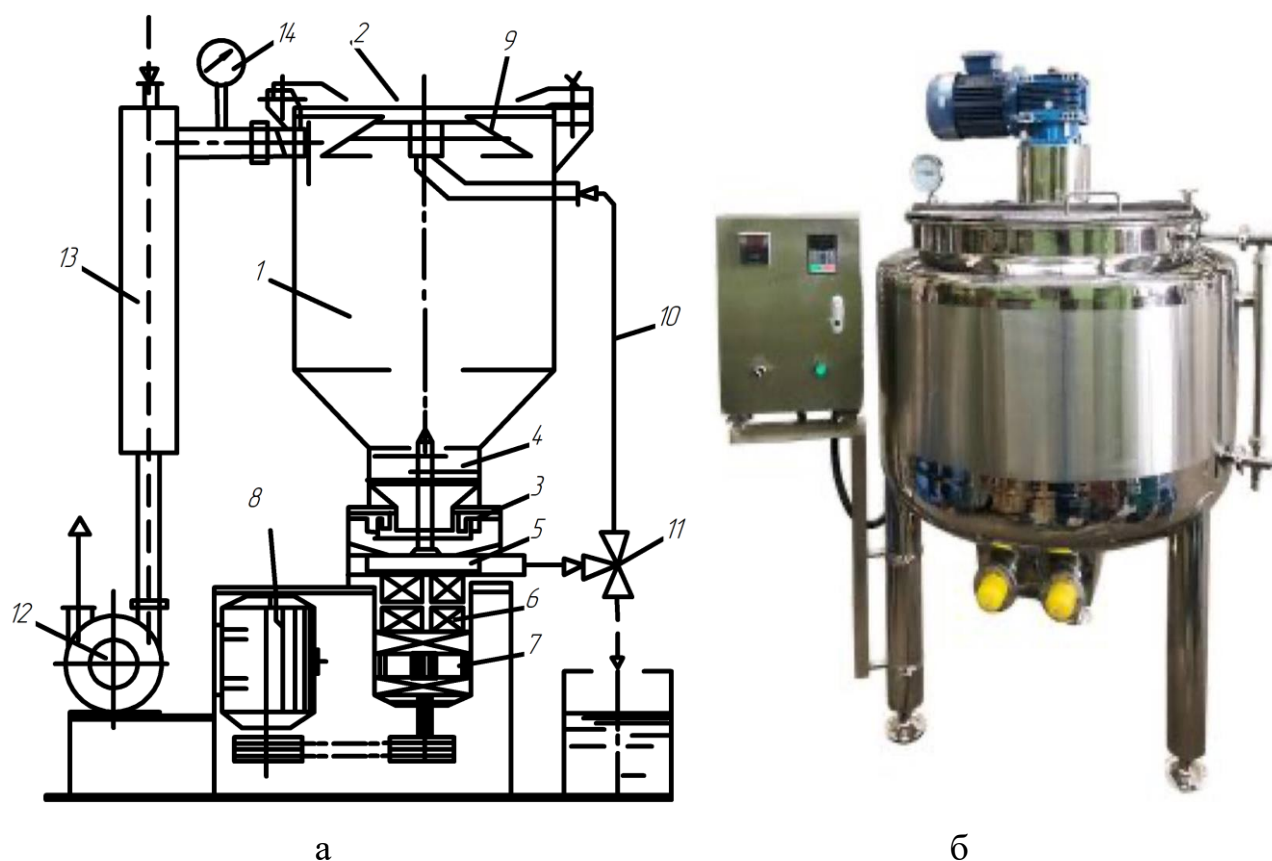
кормових добавок з високим вмістом збалансованого по незамінних амінокислотах білка, легкозасвоюваних вуглеводів, вітамінів і біологічно активних речовин з відходів харчової переробки [85].



Рисунок 1.9 – Установка приготування кормів «Cavikorm»

Роторний гомогенізатор, описаний у патенті України №65406 (рисунок 1.10) [86], включає завантажувальну ємність, корпус із вихідним патрубком, коаксіально розміщені: ніж, ротор, статори та диск із лопатками. Завантажувальна ємність виконана у формі бака з ущільненою кришкою і сполучена з вакуум-насосом. У верхній частині бака встановлений тарілчастий розподільник рідини, з'єднаний із вихідним патрубком через трубопровід.

Основними недоліками цього обладнання є неможливість контролю якості диспергування та гомогенізації рідинної суміші під час її циркуляції. Це вимагає багаторазового проходження суміші через робочі органи, що збільшує енергоспоживання і знижує продуктивність. Крім того, введення вакуум-насоса ускладнює конструкцію, підвищує її металоємність і збільшує енерговитрати. Інтенсифікацію кавітаційного ефекту під час диспергування можна досягти шляхом конструктивних змін.



1 – ємність; 2 – верхня кришка; 3 – вивантажувальний патрубок; 4 – корпус; 5 – ножі;  
 6 – ротор; 7, 8 – статори; 9 – лопатевий диск; 10 – вакуумне ущільнення; 11 –  
 підшипники; 12 – електродвигун; 13 – розподільник;  
 14 – трубопровід; 15 – кран; 16 – вакуумний насос; 17 – водяний конденсатор; 18 –  
 вакуумметр

Рисунок 1.10 – Схема (а) і загальний вигляд (б) роторного гомогенізатора [87]

Роторний кавітаційний диспергатор, описаний у патенті України №97802 (рисунок 1.11) [88], має робочу камеру з конусоподібною напрямною, два ряди ножів на привідному валу, ротор із отворами та лопатями, статор із кавітаційними пристроями та ущільнювач потоку рідкого середовища. Ущільнювач розташований співвісно з конусоподібною напрямною у її верхній частині і може переміщуватися у вертикальній площині. Він виконаний у формі зрізаного конуса з бічними поверхнями, паралельними поверхням напрямної.

Основними недоліками цього обладнання є відсутність можливості підігріву суміші та автоматичного завантаження рідких і сипких компонентів, що знижує продуктивність. Також ускладнення конструкції через ущільнювач потоку ускладнює налаштування безперервної потокової подачі суміші в зону обробки. Відсутність зворотних зв'язків і системи керування знижує продуктивність кавітаційного диспергування.

Насос-гомогенізатор, описаний у патенті України №57304 (рисунок 1.12) [89], має корпус із вхідним і напірним патрубками, рухливий і нерухомий ротори з лопатями, причому рухливий ротор складається з покривного і лопатевого дисків. Лопаті лопатевого диска мають криволінійну форму, а нерухомий ротор закріплений у корпусі, на внутрішніх стінках якого розташовані виступи. На усмоктувальній частині корпуса встановлені додаткові лопатки, спрямовані у бік обертання рухливого ротора. У лопатевому диску виконані прорізи, а виступи нерухомого ротора розташовані у шаховому порядку щодо прорізів.

Основна задача даного обладнання це перекачування рідкої суміші із одночасною гомогенізацією, що унеможливорює процес диспергування великих частинок сипкого матеріалу, які знаходяться в рідкій суміші, через утворення заторів при проходженні крізь отвори ротора. Окрім цього наявність одноетапної гомогенізації рідинної суміші під час проходження крізь отвори ротора не забезпечує високу ефективність даного процесу, що знижує якість отриманого продукту.

Гвинтовий диспергатор, описаний у статті Ковальова О.О. [92] (рис 1.13), що містить складений циліндричний корпус з кожухом охолодження, завантажувальним і розвантажувальним патрубком, встановлений у корпусі вздовж його осі з можливістю обертання шнеку, розділений на секції з чергуванням гвинтових секцій і конічних секцій, встановлені в корпусі втулки, кожна з яких коаксіально охоплює одну з конічних секцій шнека і має внутрішню конічну поверхню, причому корпус оснащено кільцями з різьбовою внутрішньою поверхнею, кожне з яких охоплює корпус в зоні розташування однієї із втулок, на зовнішніх поверхнях яких виконано виступи з різьбою для взаємодії з різьбою. Диспергатор містить корпус 1 із завантажувальним патрубком 2, циркуляційну камеру 3, шнек 4, багатозахідні шнеки 5 і 6, конічні вали 7 і 8, привідний вал 9, конічну втулку 10, зазори 11 і перемички 12.

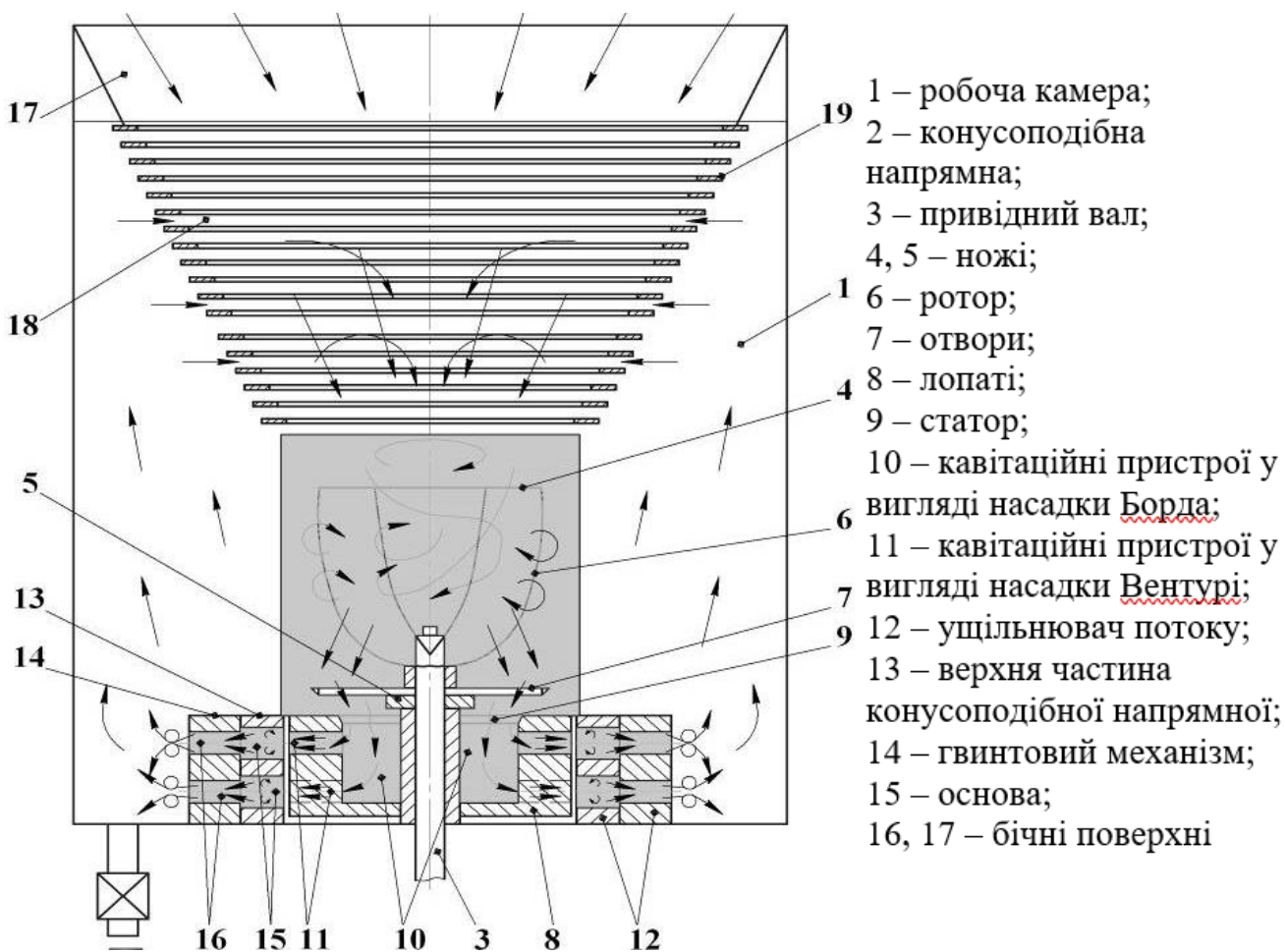
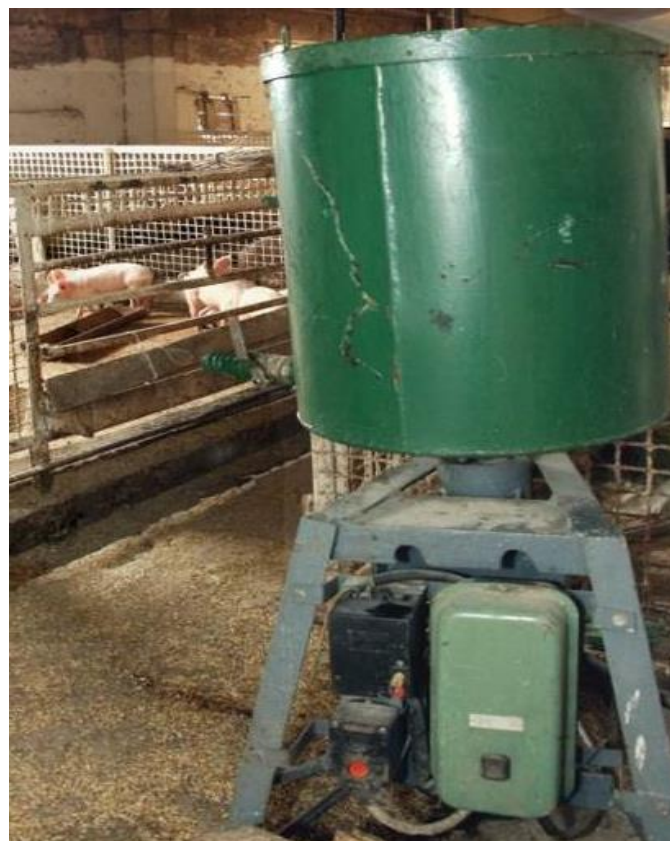
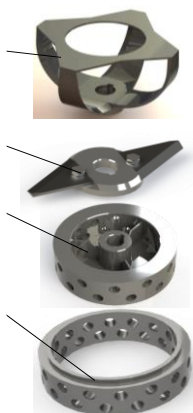
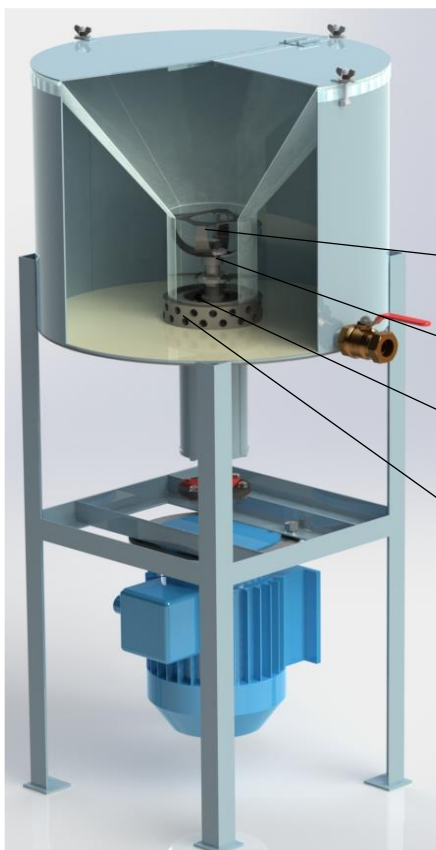
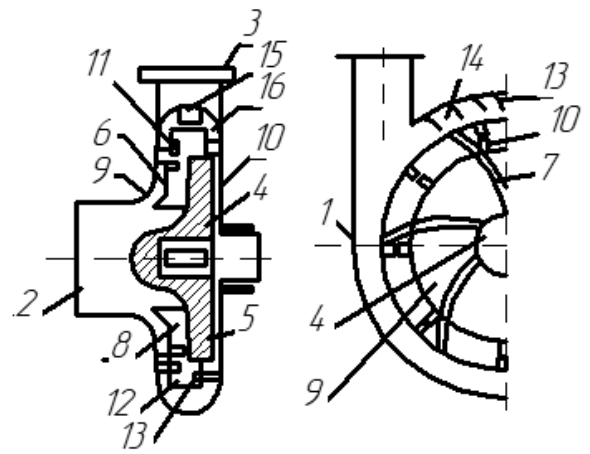


Рисунок 1.11 – Схема і загальний вигляд роторного кавітаційного диспергатора [90]



1 – корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – напірний патрубок; 4 – рухливий ротор;  
 5 – основа; 6 – покриваючий диск; 7 – лопатевий диск; 8 – міжлопатеві канали;  
 9 – циліндричне підведення; 10 – нерухомий ротор; 11 – виступи; 12 – лопаті;  
 13 – отвори; 14 – всмоктувальна частина

Рисунок 1.12 – Схема і загальний вигляд насоса-гомогенізатора [91]

Має певні недоліки, які можуть обмежувати його використання. Конструкція пристрою є складною, оскільки включає в себе численні компоненти, такі як гвинтові та конічні секції, втулки, кільця з різьбовою поверхнею та інші елементи. Це ускладнює виготовлення, монтаж та обслуговування пристрою. Велика кількість компонентів призводить до високої питомої матеріаломісткості, що збільшує загальну вартість виробництва. Складність регулювання і налаштування також є

значним недоліком, оскільки забезпечення ефективної роботи пристрою вимагає точного налаштування внутрішніх конічних поверхонь, зазорів і перемичок.

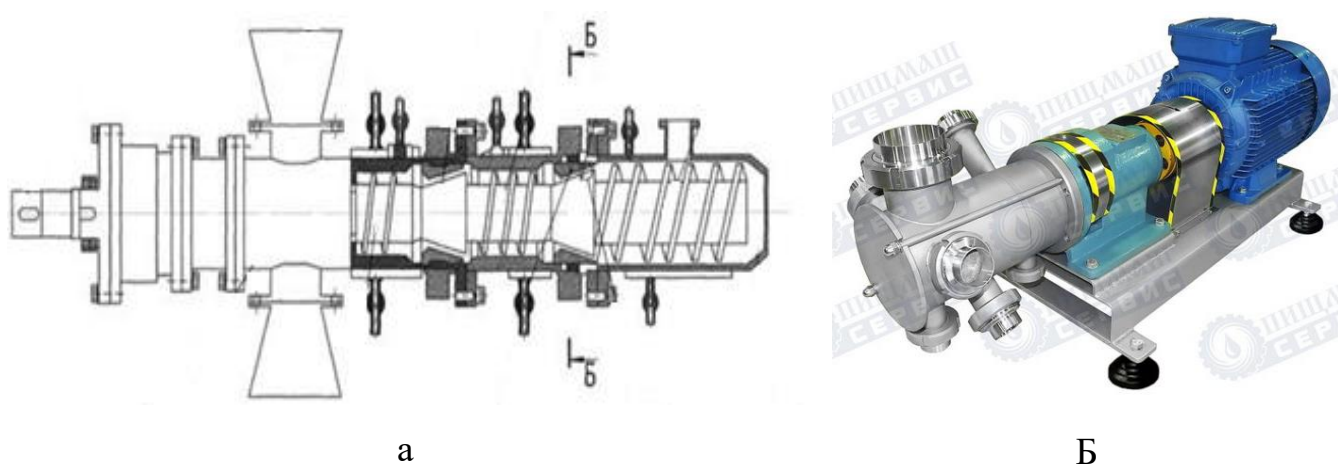


Рисунок 1.13 – Схематичне зображення (а) і загальний вигляд (б) гвинтового диспергатора [92]

Патент на корисну модель № 70499 [92] під назвою «Диспергатор» (рисунок 1.14) стосується пристрою для подрібнення, гомогенізації та обробки матеріалів, зокрема харчових продуктів чи інших сировинних компонентів. Диспергатор призначений для забезпечення високого ступеня подрібнення матеріалів, підвищення якості оброблюваної продукції та забезпечення енергоефективності процесу. Пристрій може бути використаний у харчовій, аграрній чи інших промисловостях, де потрібне подрібнення чи гомогенізація різних матеріалів. Основні переваги включають високу продуктивність, енергоефективність, універсальність застосування для різних видів сировини, можливість досягнення необхідного ступеня подрібнення та гомогенізації.

Однак патент також має певні недоліки. До них можна віднести високу питому матеріаломісткість пристрою, складність обслуговування в порівнянні з простішими конструкціями, а також можливі обмеження щодо типів сировини, які можуть бути оброблені на пристрої. Незважаючи на недоліки, цей винахід пропонує сучасне технічне рішення, яке може вдосконалити виробничі процеси, особливо в галузях, пов'язаних із харчовою чи переробною промисловістю.

У статті [99] описано, що тверді речовини, які легко диспергуються або розчиняються в рідині, можуть змішуватися за допомогою різноманітних низькошвидкісних мішалок, таких як пропелери, турбіни з косими лопатями, імпелери та якореподібні мішалки, які забезпечують відносно м'яке перемішування. Завдяки здатності легко змочуватися, такі порошки потребують дуже низького енергоспоживання на одиницю об'єму. Ці процеси, як правило, є простими у виконанні та економічно вигідними. Якісне змішування забезпечується за рахунок належного обертання об'єму суміші в резервуарі. Геометрія бака та лопатей, а також швидкість мішалки є основними параметрами проектування (рис. 1.14)

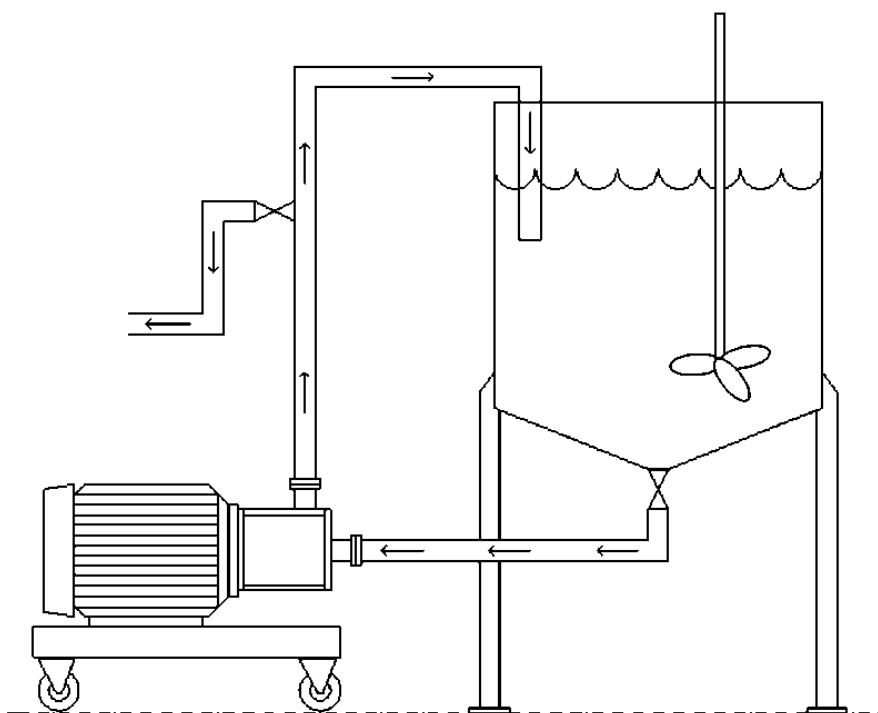


Рисунок 1.14 – Ілюстрація вбудованого роторно-статорного змішувача, підключеного до рециркуляційного контуру бака з м'яким перемішуванням [99]

Під час змішування значної кількості порошку у відносно великій партії виробники можуть розглянути можливість встановлення рециркуляційної лінії, обладнаної вбудованим роторно-статорним змішувачем, для прискорення циклу змішування. Це особливо доцільно, якщо бажано отримати більш вузький розподіл

частинок за розміром. Додаткове зсувне навантаження та перемішування, яке забезпечує такий змішувач, сприяє створенню більш однорідної дисперсії та збільшенню продуктивності шляхом швидшого завершення партії. Додатковою перевагою такого змішувача є його здатність працювати як насос для подальшої подачі готового продукту [93, 94, 95, 96, 97, 98].

Складніші тверді речовини змішуються з рідиною різними способами, які можуть включати етап попереднього змішування сировини з подальшим «полірувальним» етапом. Якщо сили притягання між окремими частинками досить сильні, то змочування (тобто введення твердих речовин у рідку фазу за умов м'якого перемішування) лише диспергує агломерати частинок. Тому для руйнування цих груп агломератів необхідне застосування високих зсувних зусиль. Наскільки інтенсивними мають бути ці зусилля – залежить від конкретної формули. Деякі порошки, наприклад, повністю диспергуються при змішуванні з використанням високошвидкісного інструменту, такого як пильчастий диспергатор або роторно-статорний пристрій. У таких випадках стадії змочування та фінішної обробки порошку здійснюються за допомогою одного змішувача.

Працюючи на крайових швидкостях близько 5000 футів/хв (приблизно 1524 м/хв), диспергатор із пильчастим диском створює інтенсивний потік у змішувальному резервуарі та забезпечує вищий рівень зсуву в порівнянні з іншими відкритими мішалками, такими як пропелери або турбіни. Він формує вихор, у який можна додавати тверді речовини для швидкого включення їх у загальну масу суміші. Роторно-статорний змішувач, зображений на рис. 1.15, зазвичай має чотирилопатевиий ротор, що обертається в межах фіксованого статора з дуже малою відстанню між елементами, на крайовій швидкості в діапазоні 3000–4000 футів/хв (914–1219 м/хв).

Такий пристрій створює як механічний, так і гідравлічний зсув, безперервно засмоктуючи компоненти суміші в ротор і виштовхуючи їх радіально через отвори в статорі. Завдяки різниці швидкості та малій відстані між ротором і статором, цей змішувач забезпечує потужніший зсув і швидше розпушування агломератів порівняно з пристроями з відкритими лопатями, навіть якщо ті працюють на вищих швидкостях. Однак багато твердих дисперсій потребують ще агресивнішого

змішування, ніж це здатні забезпечити традиційні диспергатори та роторно-статорні змішувачі з чотирма лопатями. Тому виробники часто використовують ці машини для створення попередніх сумішей або проміжних продуктів, які потім подаються у ще інтенсивніше обладнання, таке як гомогенізатори високого тиску, колоїдні або кульові млини. Проте, ці дорогі пристрої зазвичай пов'язані з низькою продуктивністю, схильністю до засмічення, тривалим очищенням і складним технічним обслуговуванням. У сучасній промисловості дійсно існує великий потенціал для вдосконалення процесу отримання дуже тонких дисперсій.



Рисунок 1.15 – Типи мішалок: а – пильчастий диспергатор б – роторно-статорний змішувач [99]

Нові розробки в галузі роторно-статорної технології намагаються задовольнити цю потребу. Виробники, які прагнуть модернізувати свої традиційні процеси диспергування, можуть знайти серед ультрависокозсувних змішувачів (Ultra-High Shear Mixers, UHSM) ефективне та економічно доцільне рішення [99].

#### **1.4 Огляд досліджень процесу гомогенізації і диспергування рідкої суміші та ефекту кавітації**

Процеси гомогенізації та диспергування рідких сумішей [100] є ключовими в багатьох галузях промисловості, оскільки забезпечують однорідність продуктів та

покращують їхні фізико-хімічні властивості. Одним із ефективних методів інтенсифікації цих процесів є використання кавітації – явища утворення та подальшого колапсу бульбашок у рідині під дією змінного тиску, що призводить до виникнення локальних зон з високими температурами та тисками. Це, в свою чергу, сприяє руйнуванню частинок та змішуванню фаз, що особливо важливо при створенні стійких емульсій та суспензій [101, 102].

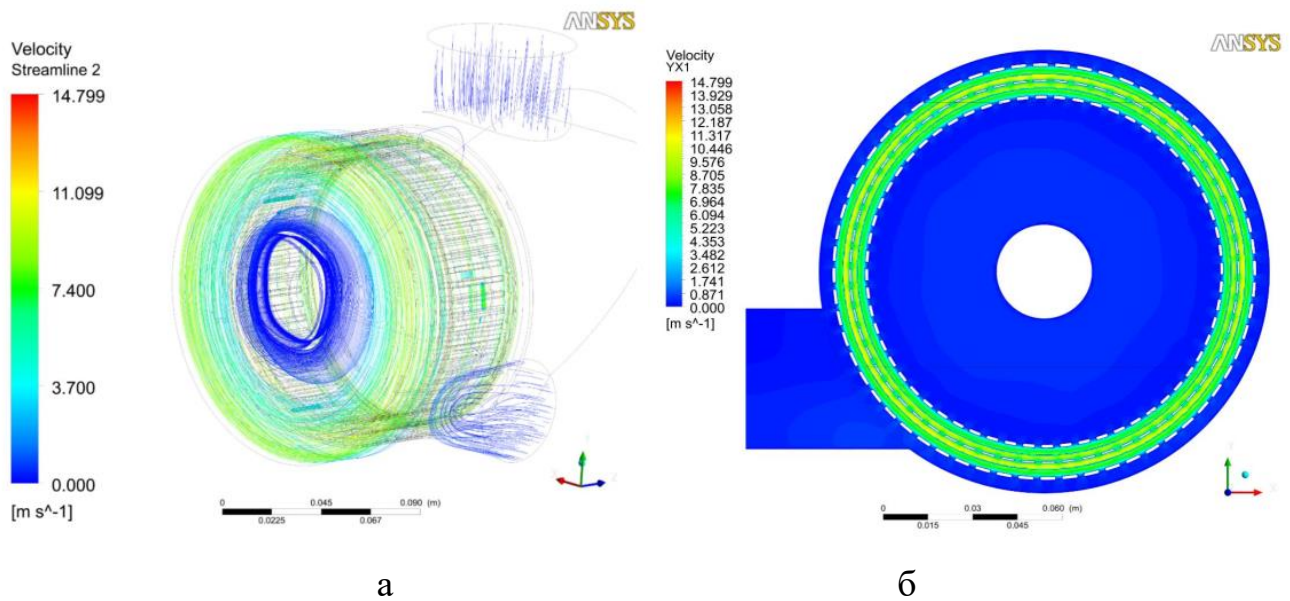
Використання кавітаційних технологій [103, 104, 105] у харчовій промисловості дозволяє ефективно перерозподіляти та диспергувати фази рідких гетерогенних систем. Зокрема, гідродинамічна кавітація сприяє інтенсифікації механічних та фізико-хімічних впливів на стадіях розчинення, перемішування, диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування та стерилізації [106]. Це забезпечує підвищення якості кінцевого продукту та зниження енерговитрат у виробничих процесах.

Процеси змішування належать до ймовірнісних або випадкових процесів [107, 108]. Це повною мірою стосується процесу змішування (гомогенізації) в'язкої рідини (води) та твердих речовин. Дійсно, тверді речовини відрізняються одна від одної розмірами, формою та іншими характеристиками, тому їхнє переміщення в рідині є випадковим. Домінування випадковості у властивостях і поведінці частинок вимагає застосування ймовірнісних моделей для опису процесів, що відбуваються в них. Одним із найефективніших математичних апаратів для опису еволюції систем із випадковими властивостями є теорія Марківських ланцюгів.

Математична модель ніколи не претендує на повний і вичерпний опис будь-якого процесу. Вона створюється для прогнозування характеру цього процесу за зміни більшої чи меншої кількості його параметрів. Враховуючи ці обставини, скористаємося найпростішим видом ланцюгів – однорідними, одномірними, дискретними в просторі й часі [109, 110, 111, 112, 113].

На рис. 1.16 представлено розподіл тисків у каналах роторно-пульсаційного апарата під час проходження крізь них рідкої кормової суміші. Аналіз показує, що максимальний приріст тиску спостерігається в зонах між ротором і статором. На цих відрізках приріст може досягти 55 кПа порівнюючи з тиском на вході в канал. Це





а – загальний вигляд; б – поперечний переріз

Рисунок 1.17 – Модель зміни швидкості в системі ротор-статор [117]

У результаті цих гідродинамічних процесів забезпечується формування однорідної, рівномірно змішаної кормової суміші, що має високу ступінь гомогенності. Такий рівень змішування є важливим для покращення біологічної доступності компонентів корму, а також для підвищення якості кінцевого продукту. [120, 121, 122].

Серед різновидів гомогенізаторів автори виділяють роторно-статорні змішувачі [123], гомогенізатори високого тиску (НРН) та ультразвукові гомогенізатори. Роторно-статорні змішувачі [124] використовуються для руйнування частинок за допомогою зсувних сил, створених обертанням ротора, хоча їх ефективність обмежена при необхідності досягнення нанорозмірних частинок. Гомогенізатори високого тиску [125] досягають подрібнення завдяки проштовхуванню суспензії через вузькі канали під високим тиском, однак такі пристрої потребують значних енергоресурсів і ретельного налаштування. Ультразвукові гомогенізатори, у свою чергу, використовують явище акустичної кавітації. У процесі роботи ультразвукові хвилі створюють цикли високого та низького тиску в рідині, які призводять до

утворення та руйнування кавітаційних бульбашок. Це створює потужні локальні сили, які розбивають частинки, забезпечуючи рівномірний розподіл фаз.

У статті [126] наголошується на широкому спектрі застосувань ультразвукових гомогенізаторів, які використовуються для гомогенізації, диспергування, емульгування, руйнування клітин, дегазації та прискорення хімічних реакцій. Наприклад, у харчовій, фармацевтичній, косметичній і хімічній галузях ультразвукові технології дозволяють створювати стійкі емульсії, рівномірні суспензії та наноемульсії, а також ефективно видаляти розчинені гази з рідин. Важливим аспектом є можливість масштабування цих процесів, що забезпечує стабільність і відтворюваність результатів [127] на всіх етапах виробництва. Масштабування ультразвукових гомогенізаторів можливе без значних змін у параметрах обробки, таких як амплітуда, тиск чи температура, що є значною перевагою порівняно з іншими технологіями.

В статті [128] описано що при виникненні процесу кавітації всередині диспергатора тиск газової суміші у бульбашці складається з власного тиску газу та тиску пари рідини, який часто приймають постійним і рівним тиску насиченої пари рідини при даній температурі. Тиск газу залежить від виду термодинамічного процесу, прийнятого в конкретній моделі руху бульбашки. Процес стиснення зазвичай вважається адіабатичним із показником адіабати, що добре узгоджується з експериментальними результатами.

В статті [129] описано, що зони підвищеного тиску утворюються в момент, коли потік рідини наштовхується на рухомий зуб робочого органа. У цей момент рідина поводить себе як стиснуте середовище, що призводить до стрибка тиску. Виникають умови, сприятливі для появи гідроудару. Зони розрідження, у свою чергу, формуються за рухомим зубом — у тій частині простору, де тиск знижується через зміну напрямку та швидкості потоку. Також під час зіткнення потоку з зубом спостерігається підвищення температури рідини. Це є ще одним наслідком стиснення: міжмолекулярна відстань зменшується, і кінетична енергія молекул збільшується.

На рис. 1.18 видно поступове, ступінчасте зростання температури від центру до периферії.

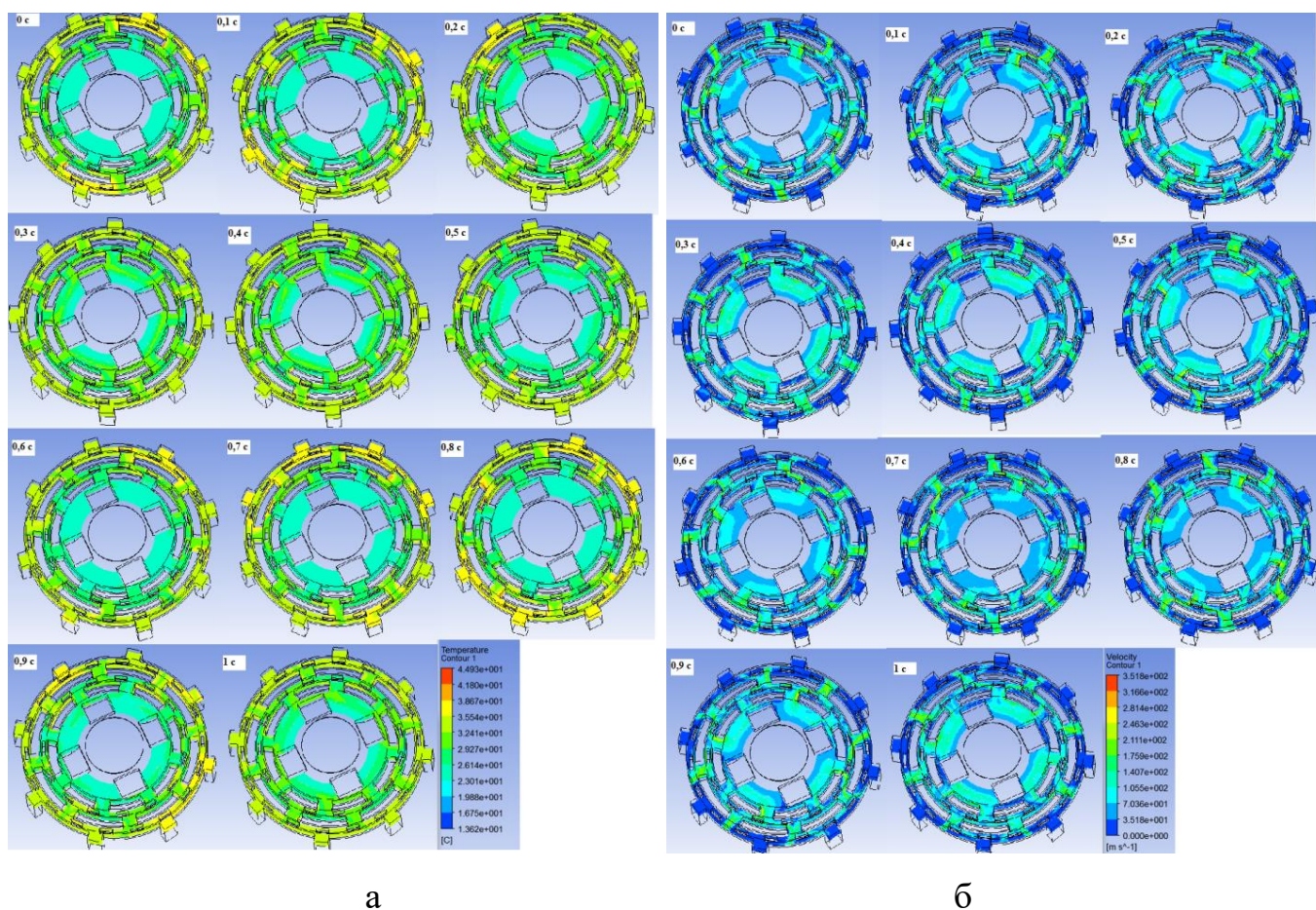
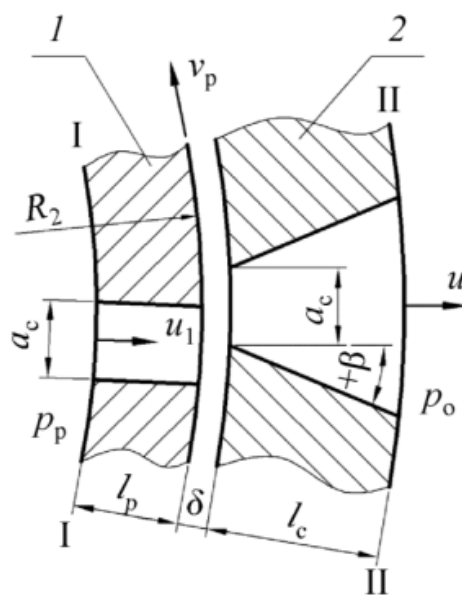


Рисунок 1.18 – Діаграма зростання температури (а), діаграма зміни тиску (б) [129]

Це логічний результат, оскільки з кожним проходженням ряду зубців зростає кількість зіткнень потоку з перешкодами. Якщо звернутися до діаграм швидкості, представлених на рис. 1.18, можна побачити протилежну картину: швидкість потоку вища там, де тиск нижчий. Це пояснюється тим, що після відкриття заслінки утворюється зона зниженого (а подекуди навіть від'ємного) тиску, в яку потік рідини буквально «втягується». Рідина спрямовується в цей простір з двох основних причин. Перша — це перепад тиску між станами із закритою та відкритою заслінкою. Друга причина пояснюється тим, що потік ударяється об перешкоду, він турбулізується й набуває додаткової енергії турбулентності. Після відкриття заслінки цей потік із

підвищеною швидкістю спрямовується в зону зниженого тиску. Таким чином, конструкція центробіжно-роторного диспергатора створює умови для виникнення явища гідроудару. Це явище є корисним у процесі подрібнення зерна, оскільки сприяє додатковому розм'якшенню зовнішньої твердої оболонки зернин.

У дослідженнях [130] приведено опис імпульсного руху кормової суміші в каналах диспергатора зображеного на рисунку 1.19 з використанням диференціального рівняння Бернуллі.



1 – ротор, 2 – статор

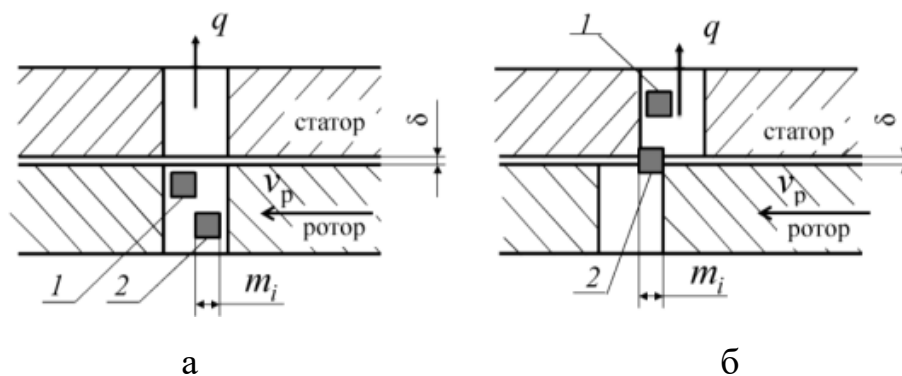
Рисунок 1.19 – імпульсний рух кормової суміші в каналах диспергатора [130]

Розрахункове значення індексу кавітації  $i_k$  використовували для обґрунтування меж варіювання конструктивно-технологічних параметрів диспергатора.

Для математичного опису процесу механічного подрібнення зерна кукурудзи робочими елементами диспергатора, зображеного на рис. 1.20, було прийнято припущення, що частинки зерна рівномірно розподілені по об'єму кормової суміші, а їх розташування в каналах є випадковим.

Руйнуванню піддаються лише ті частинки, які в фазі закриття каналу статора перетинають межу робочих елементів у той момент, коли протилежні стінки каналів ротора і статора знаходяться на відстані, що дорівнює розміру самої частинки  $m_i$ .

У дослідженнях [131] описано процеси струминної гомогенізації молока були отримані осереднені значення основних параметрів. Однак для отримання більш детальної та достовірної інформації щодо миттєвих характеристик процесу доцільним є використання методів комп'ютерного моделювання. Для цього була створена параметризована геометрична модель камери гомогенізації, яку попередньо розробили у середовищі тривимірного проектування.



а – фаза поєднання каналів; б – фаза перекриття каналів; 1, 2 – частинки зерна.

Рисунок 1.20 – Схема руху частинок зерна в каналах ротора і статора [130]

Під час моделювання як ключові змінні фактори, що впливають на якість процесу гомогенізації, було визначено: тиск подавання знежиреного молока (який формує швидкість його потоку), діаметр каналу для подачі вершків та ширину робочої зони камери в місці введення вершкової фази.

Серед великої кількості параметрів, які можливо аналізувати в ході симуляцій, особливу увагу було приділено розподілу швидкостей потоків молока та вершків у центральній зоні камери — саме в цій області відбувається інтенсивне перемішування та гомогенізація. Теоретичні розрахунки показують, що для досягнення рівня дисперсності, аналогічного клапанним гомогенізаторам, необхідно забезпечити

швидкість потоку знежиреного молока в межах 55–85 м/с, що відповідає тиску подачі в діапазоні 3–9 МПа.

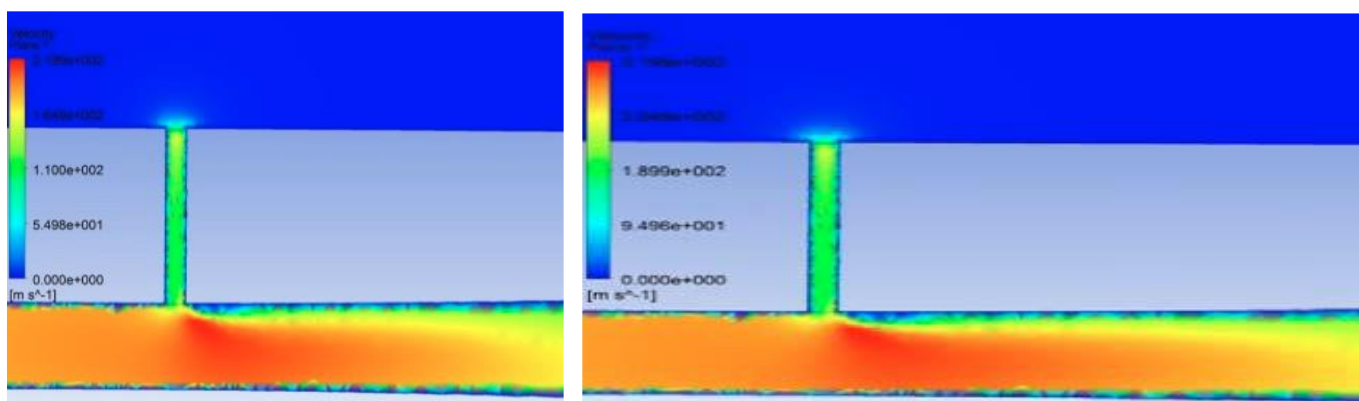
Аналіз полів швидкості свідчить, що в тонкому пристінному шарі центрального каналу потік має ламінарний характер із високим градієнтом швидкостей між фазами. Такий градієнт сприяє ефективному подрібненню жирових кульок у цій ділянці. У деяких дослідженнях саме цьому фактору надавали визначального значення при диспергуванні жирів у щілинних гомогенізаторах, де розмір робочої щілини становить 0,25–0,6 мм, а пристінний шар може охоплювати всю її ширину [132].

Однак, у моделі дослідного гомогенізатора товщина пристінного шару є незначною у порівнянні з діаметром центрального каналу, тому його вплив на загальну ефективність гомогенізації вважається мінімальним. У переважній частині поперечного перерізу потоку (85–90%) спостерігається недостатній градієнт швидкості для повноцінного диспергування жирової фази. Також виявлено, що рівень кавітації та турбулентності у цих умовах є недостатнім для досягнення необхідного ступеня подрібнення жирових кульок.

Зі зростанням тиску в каналі подачі знежиреного молока в діапазоні від 3 до 9 МПа спостерігається підвищення швидкості потоку — з приблизно 60 м/с (рис. 1.21, а) до 100 м/с (рис. 1.21, б). Зона, в якій досягається максимальне значення швидкості, не розміщується по центру головного каналу. При збільшенні тиску вона зміщується у напрямку руху знежиреного молока, від місця подачі вершків до протилежної стінки камери. Це свідчить про залежність положення зони максимальної швидкості від рівня тиску в системі подачі.

У статті [133] розглядаються різні типи кавітаційних пристроїв, серед яких виділяються гідродинамічні апарати проточного типу з нерухомим кавітатором у робочій камері. Автори зазначають, що такі пристрої є найбільш ефективними та зручними в експлуатації для генерування кавітації в потоці рідини. Основним робочим органом цих апаратів є проточна робоча камера з встановленим кавітуючим елементом, за яким утворюється бульбашкове кавітаційне поле, що інтенсивно впливає на оброблюване середовище. Ефективність кавітаційного впливу визначається кратністю оброблення в гідродинамічному кавітаційному апараті

(ГКА). Автори також обговорюють можливі шляхи вдосконалення конструкцій кавітаційних апаратів, зокрема, послідовне встановлення в проточній камері декількох кавітаторів. Це дозволяє підвищити інтенсивність кавітаційного впливу та забезпечити більш ефективне диспергування багатокомпонентних харчових емульсій. Результати експериментальних досліджень, проведених авторами, демонструють переваги використання гідродинамічної кавітації порівняно з традиційними методами обробки емульсій, зокрема, зниження енерговитрат та покращення якості кінцевого продукту. Стаття підкреслює перспективність застосування гідродинамічної кавітації в харчовій промисловості для обробки багатокомпонентних емульсій, що може сприяти підвищенню ефективності виробничих процесів та покращенню якості продукції.



а –  $\Delta p_{\text{зн}} = 3$  МПа; б –  $\Delta p_{\text{зн}} = 9$  МПа (при  $a = 2$  мм и  $d_{\text{в}} = 0,5$  мм)

Рисунок 1.21 – Поля швидкостей при тиску подавання знежиреного молока [132]

Кінематична в'язкість кормових суспензій має істотний вплив на фізико-механічні властивості корму. Це впливає на енергоємність процесу перекачування кормової суспензії через трубопроводи до місця згодовування, також на показник розшарованості.

В дослідженні [134] вказано, що при низьких об'ємних частках твердих включень в'язкість суспензії зростає (рис. 1.22). Проте істотні взаємодії між частинками ще не спостерігаються, і реологічна поведінка системи визначається

ньютонівськими властивостями рідкої фази – розчинника. Із підвищенням об'ємної концентрації частинок зростає ймовірність їх зіткнень. Частинки починають діяти як перепони, і при виникненні тертя під час зіткнення потрібне додаткове зсувне зусилля. Коли об'ємна частка твердих компонентів наближається до  $\phi_{\max}$ , постійні взаємодії між частинками суттєво збільшують силу, необхідну для зсуву зразка, і цей внесок уже домінує над зсувним напруженням, що потрібне для деформації самого розчинника.

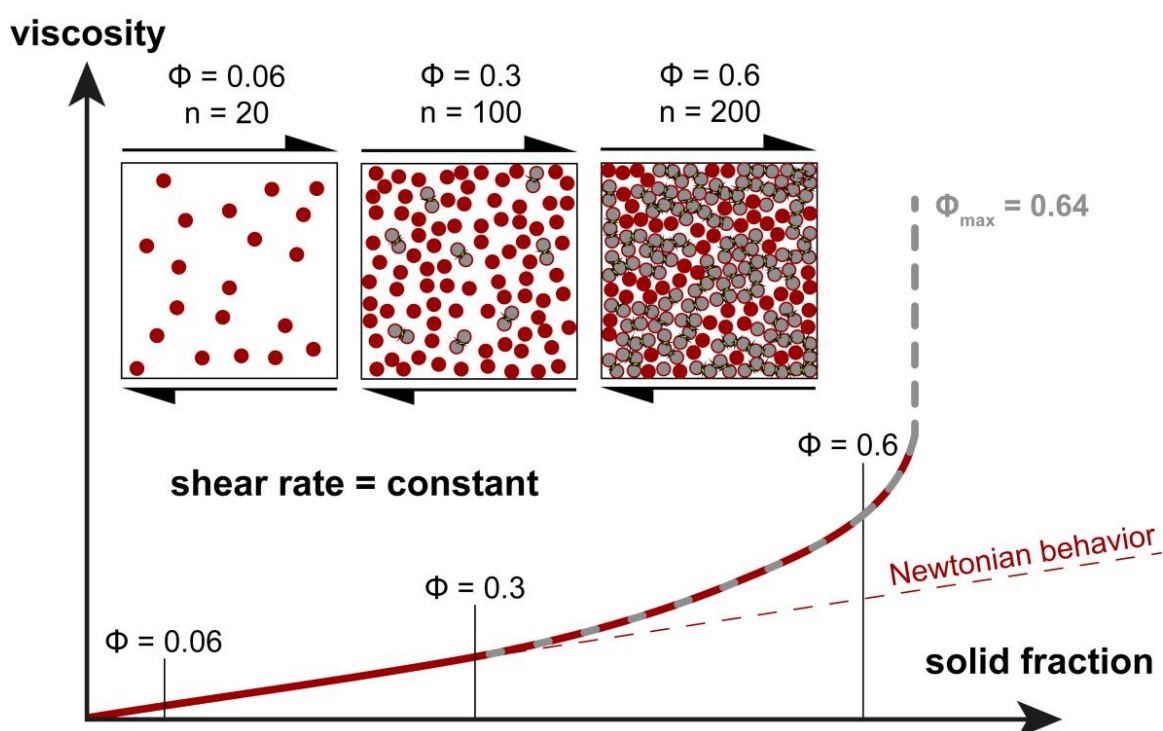


Рисунок 1.22 – Залежність кінематичної в'язкості суспензії від фракційного складу твердої речовини [134]

У такому стані реологічна відповідь суспензії також починає залежати від швидкості зсуву. Настає поява неньютонівської поведінки потоку, наприклад, прояви псевдопластичності (shear-thinning), яка є сильно варіативною для різних суспензій і може розпочинатися за  $\phi$  у межах від 0,1 до 0,5. Крім того, при високих швидкостях зсуву частинки можуть утворювати кластери, що призводить до ефекту ущільнення (jamming) та реологічного явища дилатансії (shear-thickening). Перехід від shear-

thinning до shear-thickening є специфічним для конкретної системи та визначається такими факторами, як розмір частинок (та його розподіл) і форма частинок [135, 136, 137, 138].

У статті [139] запропоновано просте та нове параметричне рівняння, яке описує відносну в'язкість суспензії як функцію концентрації твердих частинок у широкому діапазоні – від дуже розбавленого до висококонцентрованого стану, на основі моделі Кости. Запропонований закон в'язкості (рис. 1.23) переважно залежить від об'ємної концентрації твердих частинок  $\phi$  та максимальної густини  $\phi_m$ , при досягненні якої відбувається перехід у новий режим.

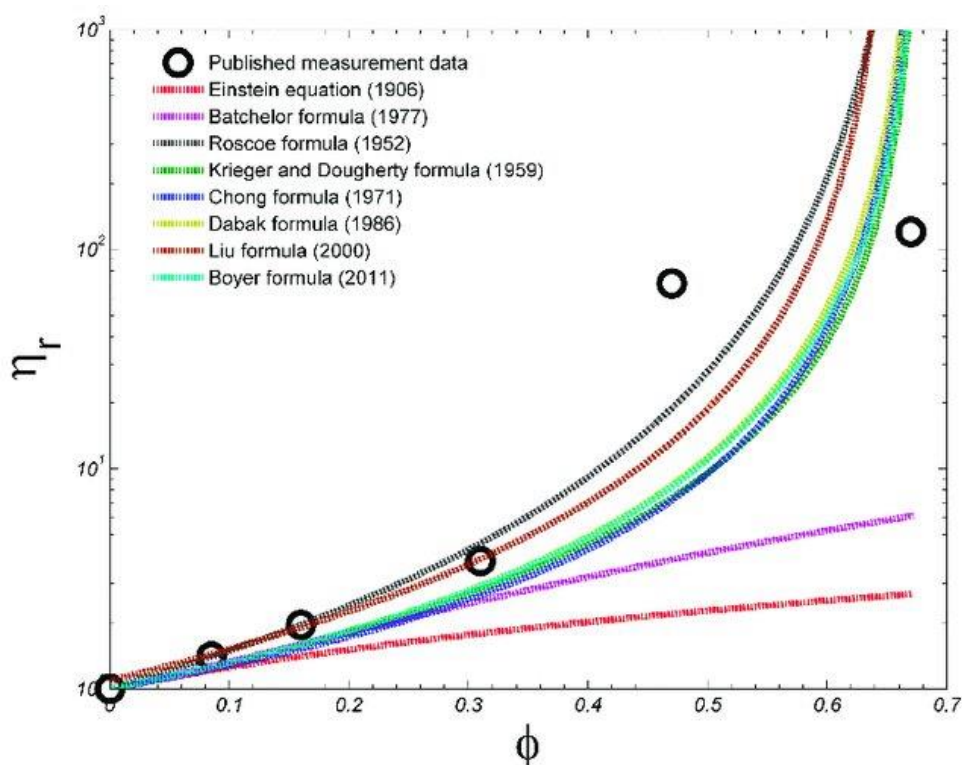


Рисунок 1.23 – Залежність кінематичної в'язкості суспензії від концентрації твердих речовин [139]

Було проведено вимірювання в'язкості як розбавленої, так і висококонцентрованої каолінітової суспензії (з вмістом твердого компонента понад 40%, але менше 50%) у реометрі з коаксіальними циліндрами. Запропонована формула продемонструвала здатність точно описувати об'ємну в'язкість у

гіперконцентрованому режимі в рамках проведеного експерименту [140, 141, 142, 143].

## **1.5 Висновки до розділу**

1. Годування поросят рідкими кормами є сучасним і високоефективним підходом у тваринництві, що забезпечує оптимальні умови для росту і розвитку тварин. Основними перевагами рідкої годівлі є можливість використання відходів харчової промисловості, зниження витрат на зернові корми, зменшення витрат на утримання персоналу та підвищення біодоступності поживних речовин завдяки ферментації кормів. Технологія кавітаційного диспергування відіграє ключову роль у підвищенні ефективності приготування рідких кормів. Вона дозволяє досягти однорідної консистенції сумішей, покращити засвоюваність білків, жирів і вуглеводів, а також знизити втрати поживних речовин. Рідке годування дозволяє використовувати спеціалізовані системи, які автоматизують процес приготування і подачі корму, забезпечують точне дозування, швидке транспортування корму та очищення системи. Завдяки можливості оперативної зміни раціону такі системи сприяють покращенню продуктивності свинарства та зменшенню собівартості продукції. Попри численні переваги, рідке годування має й певні недоліки, такі як висока вартість обладнання, обмежений термін зберігання кормів та необхідність суворого дотримання санітарних норм. Однак впровадження новітніх технологій, зокрема кавітаційного диспергування, допомагає мінімізувати ці проблеми та підвищити ефективність виробництва. Таким чином, рідке годування з використанням інноваційних технологій є перспективним напрямком, що забезпечує високі економічні, екологічні та технологічні показники у свинарстві.

2. Рідке годування сільськогосподарських тварин є сучасним та ефективним методом, який забезпечує високу якість кормів, економічну вигідність і підвищення продуктивності тварин. Основними технологіями є системи із попереднім приготуванням рідкого корму та мультифазні системи, які дозволяють готувати корм безпосередньо перед подачею. Автоматизовані системи, такі як Liquid Feeding System

і Spotmix, забезпечують точне дозування, економію часу, зниження людського фактору і покращення якості годівлі. Ключовою інновацією є використання кавітаційного диспергування, яке дозволяє створювати однорідні кормові суміші з високою біодоступністю поживних речовин. Ця технологія сприяє розщепленню клітковини, емульгації жирів, збереженню вітамінів та ферментів, а також збільшенню доступності протеїнів і біологічно активних речовин. Результатом є покращення засвоюваності кормів, збільшення приростів живої маси тварин, підвищення молочності свиноматок і зниження випадків хвороб. Сучасні системи рідкої годівлі мають широкі можливості для налаштування, дозволяють зменшити витрати на корм, оптимізувати виробничі процеси та підвищити економічну ефективність господарств. Однак висока вартість обладнання та необхідність регулярного обслуговування потребують обґрунтованого підходу до їх впровадження. В цілому, рідке годування із застосуванням кавітаційних технологій є перспективним напрямком у сучасному тваринництві.

3. На підставі аналізу літературних джерел і публікацій встановлено, що: виробництво рідких кормів і кормових добавок на основі кавітаційної диспергації є ефективним, з точки зору економіки - передовим методом, що забезпечує покращення біологічних і хімічних якостей кормів; метод дозволяє застосовувати весь спектр компонентів рослинної сировини; отримати гомогенну рідку кормову суміш з добрими органолептичними якостями за рахунок зміни поживних речовин (вуглеводів, білків, клітковини тощо); кавітаційна обробка надає м'яку дію на протеїновий комплекс рослинної сировини, що забезпечує високий ступінь емульгації жирів, який призводить до збільшення його перетравлюваності тваринами (на 6,3%); збільшується екстракція біологічно активних речовин та розчинних білків; можна стверджувати про високу ефективність кормів, які біохімічно підготовлені для згодовування сільськогосподарським тваринам всіх видів.

4. Під час патентного дослідження було виявлено деякі недоліки конструкції раніше існуючих пристроїв через які кавітація, найефективніше, проходить при низькій частоті обертання, що призводить до підвищеного енергоспоживання та ускладнення конструкції установок для приготування кормових сумішей.

Незважаючи на великий потенціал кавітаційної обробки корму, існує ряд недоліків і обмежень у дослідженнях, які потребують подальшого вивчення. Це включає обмежену експериментальну базу, недостатній аналіз довгострокових ефектів, високу вартість установок, а також можливий негативний вплив на структуру і склад корму. Після аналізу процесів диспергації і гомогенізації на основі кавітації сформульовано завдання розробки роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, здатного одночасно здійснювати диспергування, емульгування та гомогенізацію компонентів у рідкому середовищі з підвищеною продуктивністю, покращеною якістю та зниженим рівнем енергоспоживання.

5. Огляд досліджень та патентний пошук показав, що недостатньо досліджено процес кавітації, що виникає при різкій зміні тиску, викликаній зміною швидкості потоку речовини в каналах ротора і статора запропонованих раніше установок даного типу. Процес виникнення кавітації і її впливу на процес подрібнення твердої речовини потребує подальшого дослідження задля оптимізації процесів диспергації і гомогенізації.

## **1.6 Мета і завдання досліджень**

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних рідких кормів для свиней за рахунок удосконалення конструкції роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

У рамках дослідження необхідно виконати такі завдання:

– з урахуванням аналізу сучасного стану галузі та результатів попередніх досліджень обґрунтувати структуру технічної системи приготування повнораціонних рідких кормів для свиней і визначено напрями підвищення її ефективності;

– розробити фізико-математичну модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному диспергаторі-гомогенізаторі в залежності від його конструктивно-режимних параметрів;

– дослідити явище кавітації у розробленому роторному диспергаторі-гомогенізаторі методами чисельного моделювання;

– експериментально дослідити процес приготування повнораціонних рідких кормів для відгодівлі свиней за допомогою роторного диспергатора-гомогенізатора та визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри цього обладнання залежно від виду кормових компонентів;

– розробити автоматизовану систему керування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, здійснити його виробничу перевірку та виконати оцінку економічної ефективності застосування результатів досліджень.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [144, 145, 146].

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОТОРНОГО КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА РІДКИХ КОРМІВ

### 2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми

Запропоновано відповідну конструктивно-технологічну схему технічного засобу для здійснення процесу кавітаційного диспергування та гомогенізації рідких кормів, яка наведена на рисунку 2.1 (додаток А). На рисунку 2.2 представлено загальний вигляд статора роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, а на рисунку 2.3 – загальний вигляд ротора цього пристрою. Алгоритм програмного забезпечення блоку керування роторним кавітаційним диспергатором-гомогенізатором зображено на рисунку 2.4.

Роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор, зображений на рисунку 2.1, складається з ємності 1, що виконана у вигляді бака з кришкою 2, яка має вакуумне ущільнення. Конструкція передбачає наявність вихідного патрубка 3 та вхідних патрубків: для сипких компонентів 4 і для рідких компонентів 5.

Статор 6 (рисунок 2.2) закріплений жорстко в нижній частині завантажувальної ємності 1 і має форму круглого диска, на якому по концентричних колах розташовані зубчасті елементи. Простір між зубчастими елементами статора 6 утворює дифузори 7. У центральній частині статора 6 є наскрізний отвір 8.

Розташований безпосередньо під статором 6 ротор 9 (рисунок 2.3) має форму круглого диска з зубчастими елементами, що розміщені по концентричних колах. Отвори між зубчастими елементами ротора 9 формують резонатори 10. В центральній частині ротора 9 є лопаті 11, орієнтовані під кутом до його радіуса.

Ротор 9 закріплений на валу 12 підшипникового вузла 13, який встановлений у нижній частині завантажувальної ємності 1. Вал 12 підшипникового вузла 13 з'єднаний з валом асинхронного електродвигуна 14.

Вихідний патрубок 3 оснащений краном з електроприводом 15. Після крана з електроприводом 15 розташований електричний насос 16, що забезпечує

транспортування готової суміші до наступного резервуара (цей елемент не позначено на рисунку 2.1).

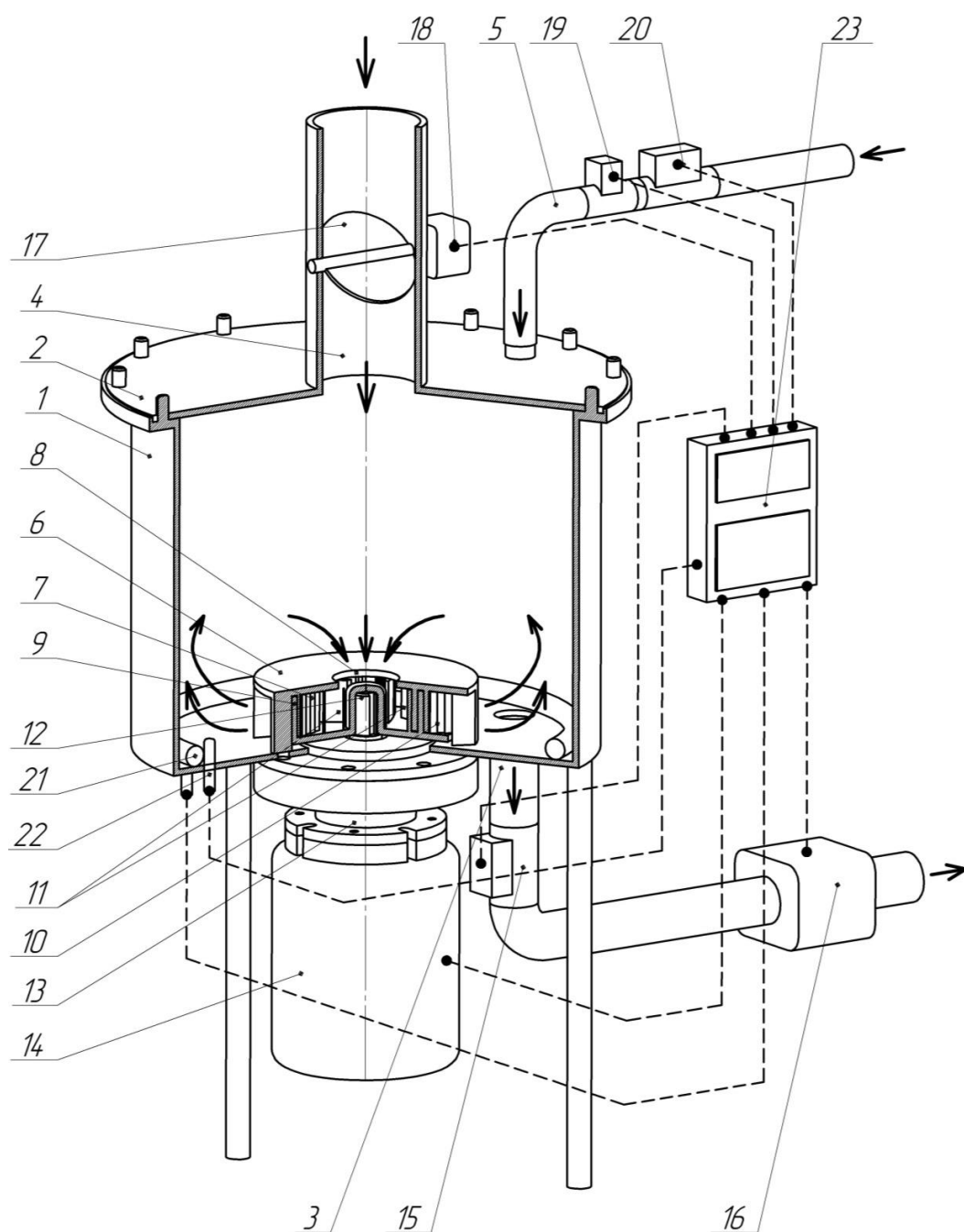


Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологічна схема роторного кавітаційного диспергатор-гомогенізатора

Заслінка 17 встановлена у входному патрубку для сипких компонентів 4, а її вал з'єднаний з валом крокового двигуна 18. До входного патрубку для рідких

компонентів 5 по черзі підключені датчик витрат рідини 19 та кран з електроприводом 20. Потім, патрубок з'єднує кран з електроприводом 20 з резервуаром для рідини (не показано на рисунку 2.1). На дні завантажувальної ємності 1 знаходяться нагрівач 21 та датчик температури 22. До блоку керування 23, який оснащений відповідним програмним забезпеченням, підключені асинхронний електродвигун 14, кран з електроприводом 15, електричний насос 16, кроковий двигун 18, датчик витрат рідини 19, кран з електроприводом 20, нагрівач 21 та датчик температури 22 за допомогою електричних проводів. Алгоритм програмного забезпечення блоку керування представлений на рисунку 2.4.

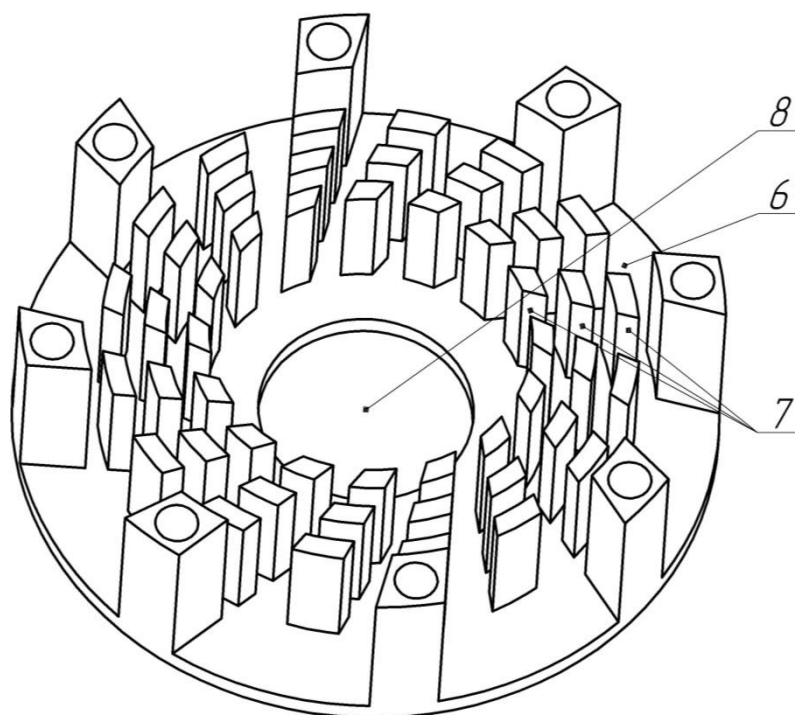


Рисунок 2.2 – Статор роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

Процес гомогенізації, емульгування та диспергування компонентів суміші в рідкому середовищі на роторному кавітаційному диспергаторі-гомогенізаторі відбувається в такий спосіб. Спочатку оператор роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора запускає процес і задає на блоці керування 23 вихідні

дані (температуру суміші  $T_c$ , об'єм необхідної суміші  $V$ , співвідношення об'єму рідкого компонента до об'єму сипкого компонента  $\eta$ ).

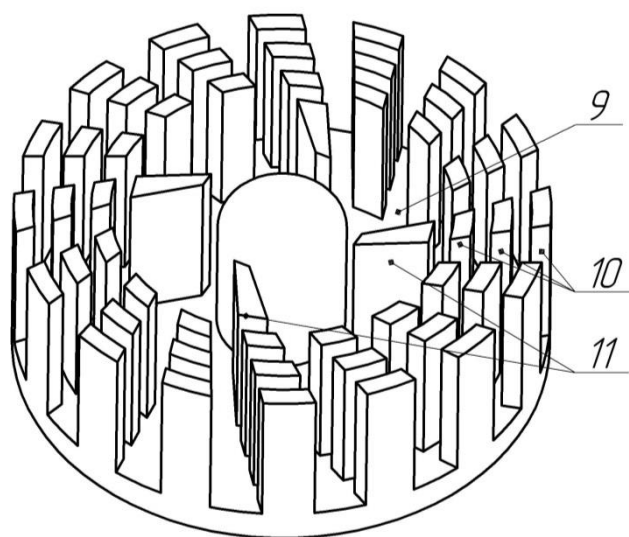


Рисунок 2.3 –Ротор роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

Блок керування 23, в результаті, передає сигнал через електричні проводи до крана з електроприводом 20. Це призводить до відкриття крана з електроприводом 20, і рідкий компонент починає рухатися через датчик витрат рідини 19 і вхідний патрубок для рідких компонентів 5 у завантажувальну ємність 1. Датчик витрат рідини 19 фіксує об'єм рідкого компонента  $V_p$  і передає це значення до блоку керування 23. Коли виконано умову (2.1) блок керування 23 передає сигнал через електричні проводи до крана з електроприводом 20 для його вимикання:

$$V_p = \frac{V_\epsilon}{\eta + 1}, \quad (2.1)$$

де  $V_\epsilon$  – максимальний об'єм ємності,  $m^3$ ;  $V_p$  – об'єм рідкого компонента,  $m^3$ ;  $\eta$  – співвідношення об'єму рідкого компонента до об'єму сипкого компонента.

Потім блок керування 23 передає сигнал до крокового двигуна 18 через електричні проводи, що відкриває заслінку 17 на кут нахилу  $\alpha$ . Кут нахилу  $\alpha$  заслінки 17 налаштовано відповідно до об'ємних витрат сипкого компонента  $Q(\alpha)$ . Сипкий компонент рухається через заслінку 17 і вхідний патрубок для сипких компонентів 4,

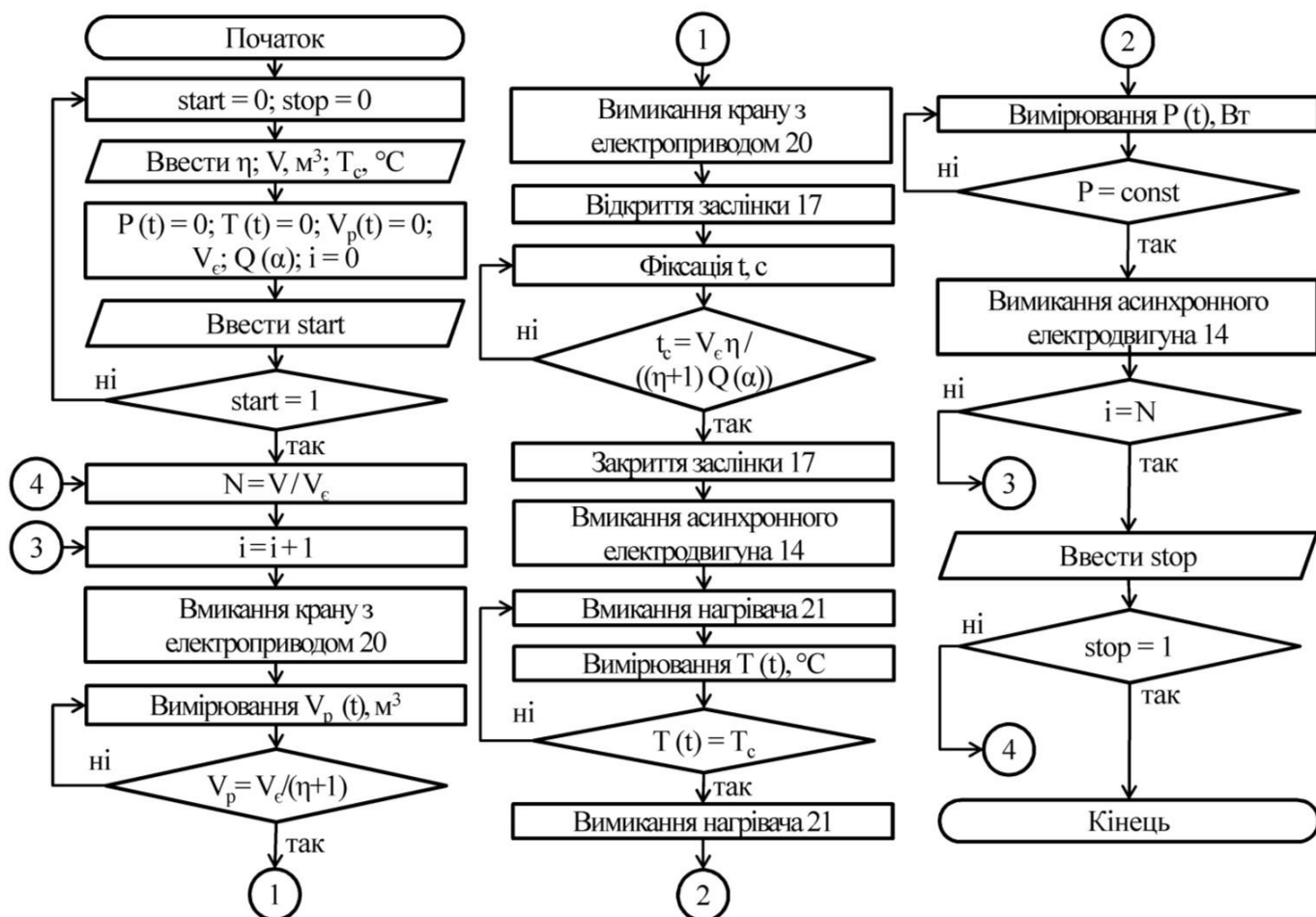
розташований в центрі кришки 2, до завантажувальної ємності 1. Через час  $t_c$  блок керування 23 передає сигнал через електричні проводи до крокового двигуна 18, що закриває заслінку 17:

$$t_c = \frac{V_c \eta}{(\eta+1)Q(\alpha)}, \quad (2.2)$$

де  $V$  – необхідний об’єм суміші,  $m^3$ ;  $\eta$  – співвідношення об’єму рідкого компонента до об’єму сипкого компонента;  $Q$  – об’ємні витрат сипкого компонента,  $m^3/год$ ;  $\alpha$  – кут нахилу заслінки,  $^\circ$ .

Після активації блоку керування 23 електричний струм через електропроводку передається до асинхронного електродвигуна 14, що дозволяє йому почати роботу. Рух вала електродвигуна 14 ініціює обертання валу 12 підшипникового вузла 13, внаслідок чого ротор 9 починає обертатися навколо своєї осі. Лопаті 11, закріплені на роторі 9, створюють різницю тиску між наскрізним отвором 8 статора 6 та завантажувальною ємністю 1, що призводить до втягування суміші у наскрізний отвір 8 статора 6.

В результаті обертання ротора 9, резонатори 10 та дифузори 7 періодично утворюють наскрізні канали, вирівнюючись між собою, через які суміш, під впливом відцентрової сили, рухається до стінок завантажувальної ємності 1 (на рисунку 1 напрямок потоку позначений стрілками). Коли резонатори 10 та дифузори 7 перекриваються, тиск різко підвищується, що спричиняє гідравлічний удар. Таким чином, суміш зазнає послідовних гідроударів. Під час збігу резонаторів 10 і дифузоров 7, кінетична енергія частинок у наскрізних отворах різко збільшується, що супроводжується зниженням тиску та зростанням швидкості потоку. Це зниження тиску спричиняє утворення парових бульбашок. Вхід у дифузори 7 формує кільцеві зони, де відбувається схлопування кавітаційних бульбашок, що, в свою чергу, призводить до додаткового руйнування частинок під впливом змінних навантажень. Окрім того, потік, насичений кавітаційними паровими бульбашками, взаємодіє зі стаціонарним шаром суміші на великій швидкості. Навколо кожного отвору утворюються зони схлопування бульбашок, що сприяє активному дифузійному обміну між рідкою та газовою фазами.



start – змінна запуску алгоритму; stop – змінна зупинки алгоритму;

$\eta$  – задане співвідношення об'єму сипкого компонента до об'єму рідкого компонента;

$V$  – заданий об'єм необхідної суміші, м<sup>3</sup>;  $T_c$  – задана температура суміші, °C;

$V_c$  – об'єм завантажувальної ємності 1, м<sup>3</sup>;  $V_p$  – об'єм рідкого компонента, м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – кут нахилу заслінки, °;  $Q(\alpha)$  – об'ємні витрати сипкого компонента, м<sup>3</sup>/с;

$t_c$  – час заповнення завантажувальної ємності 1;  $T$  – температура суміші, °C;

$P$  – потужність асинхронного електродвигун 14, що споживається, Вт;

$N$  – кількість циклів;  $i$  – номер циклу

Рисунок 2.4 – Алгоритм програмного забезпечення блоку керування роторним кавітаційним диспергатором-гомогенізатором

Це забезпечує ефективну гомогенізацію, нагрівання та знезараження середовища, а також пришвидшує активуючі хімічні реакції. Постійний рух

компонентів суміші від центру завантажувальної ємності 1 через наскрізний отвір 8 статора 6, резонатори 10 та дифузори 7 до стінок завантажувальної ємності 1 забезпечує безперервне перемішування та поступове диспергування. Процес досягнення заданої температури  $T_c$  реалізується наступним чином: блок керування 23 надсилає електричний сигнал до нагрівача 21, активуючи його. Датчик температури 22 фіксує поточну температуру суміші у завантажувальній ємності 1 і передає ці дані до блоку керування 23. Коли температура досягає  $T_c$ , блок керування 23 вимикає нагрівач 21, припиняючи процес нагріву. Під час диспергування, емульгування та гомогенізації суміші блок керування 23 визначає динаміку зміни потужності  $P(t)$ , яка необхідна для роботи асинхронного електродвигуна 14. На першому етапі процесу потужність є максимальною через активне подрібнення сипкої фази суміші та зменшення розміру частинок. Згодом потужність поступово знижується, стабілізуючись на рівні  $P = \text{const}$ , що свідчить про рівномірне розподілення компонентів у завантажувальній ємності 1 та завершення процесу гомогенізації. Коли  $P = \text{const}$  і температура досягає  $T_c$ , блок керування 23 вимикає асинхронний електродвигун 14.

Наступним етапом є вивантаження обробленої суміші. Блок керування 23 надсилає електричний сигнал до крана з електроприводом 15, внаслідок чого він відкривається. Після цього вмикається електричний насос 16, що забезпечує транспортування готової суміші з завантажувальної ємності 1 через вихідний патрубок 3, кран з електроприводом 15 та насос 16 до наступного резервуара. Коли процес вивантаження завершується, блок керування 23 вимикає електричний насос 16 і закриває кран з електроприводом 15. Цей цикл повторюється  $N$  є разів з моменту завантаження компонентів у завантажувальну ємність 1:

$$N = \frac{V}{V_c} \quad (2.3)$$

Роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор, оснащений кранами з електроприводом, електричним насосом, заслінкою з приводом крокового двигуна, датчиками витрат рідини та температури, забезпечує високу ефективність процесів диспергування, емульгування та гомогенізації. Завдяки автоматизованому керуванню

та оптимізованим параметрам роботи пристрою досягається підвищена продуктивність, покращення якості кінцевого продукту та зниження енергетичних витрат.

Процес проектування гомогенізатор-диспергатор рідких кормів ілюстровано на рисунку 2.5.

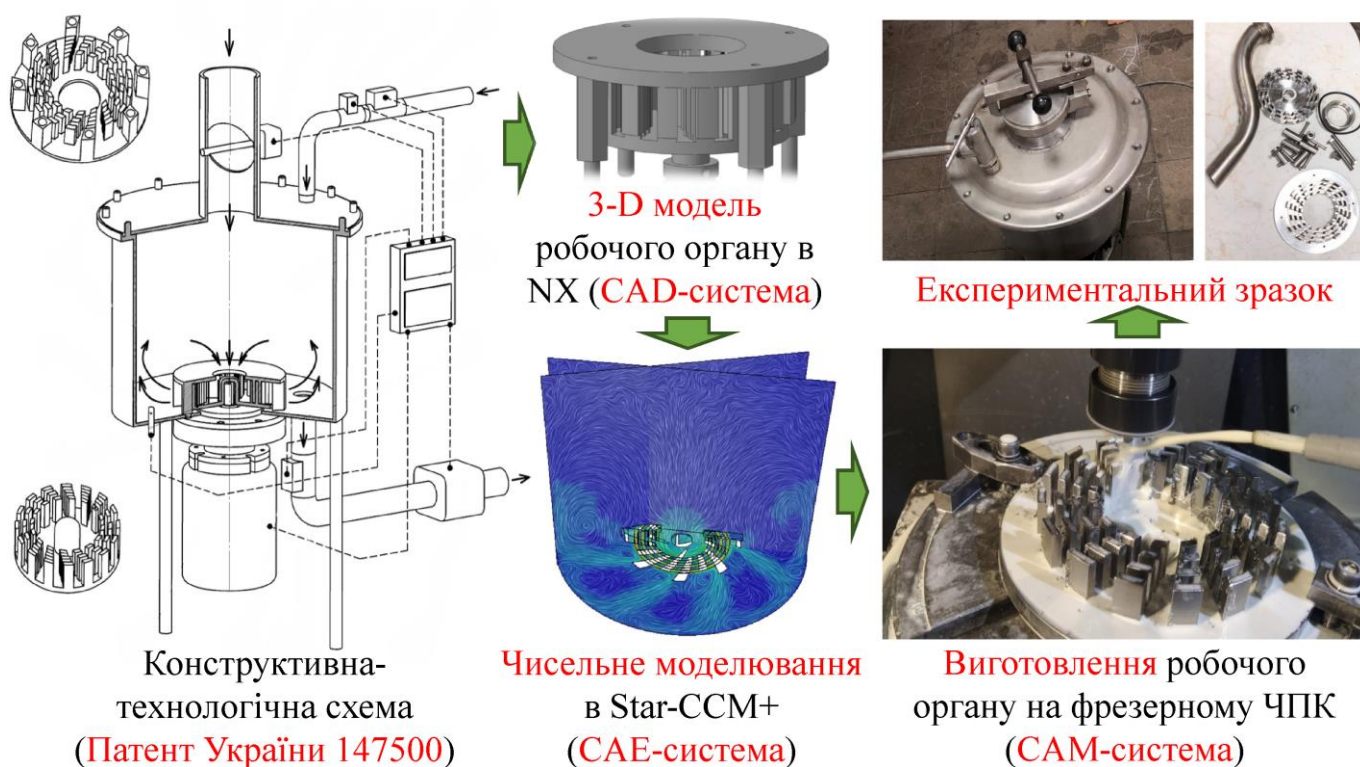


Рисунок 2.5 – Етапи проектування експериментального зразка гомогенізатора-диспергатора рідких кормів

На першому етапі, після проведення патентно-інформаційного аналізу існуючих конструкцій подібного обладнання (розділ 1), була розроблена і запатентована конструктивно-технологічна схема гомогенізатора-диспергатора рідких кормів (розділ 2.1). На другому етапі за допомогою програмного пакету Siemens NX CAD була створена 3D-модель робочих елементів: статора та ротора (розділ 2.4). На третьому етапі проведено чисельне моделювання взаємодії робочих органів гомогенізатора-диспергатора з компонентами рідкого корму за допомогою програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+ (розділ 2.5). Четвертий етап

передбачав виготовлення статора та ротора за допомогою програмного продукту Siemens NX CAM та CNC фрезерного станка (розділ 3). П'ятий етап включає виготовлення експериментального зразка (розділ 3) та проведення відповідних експериментальних випробувань (розділ 4).

## 2.2 Аналітичні дослідження робочих органів

Продуктивність роботи кавітаційного диспергатора-гомогенізатора залежить від ряду важливих параметрів: розмір і кількість отворів у статорі 6 і роторі 9; пропускна здатність ступеня обробки; частота обертання ротора 9; початковий розмір частинок, що подаються на подрібнення; рівень тиску, який утворюється при гідроударі; інтенсивність дифузійного обміну між рідкою та газовою фазами; необхідна інтенсивність імпульсних впливів для досягнення резонансного руйнування частинок; частота процесів зміни тиску в статорі 6 і стиснення в роторі 9.

Залежно від необхідного гранулометричного складу суспензії визначаються оптимальні кількість ступенів обробки та їх частотні характеристики. Для досягнення ефективного змішування та додаткового подрібнення в пристрої реалізовано конструктивні рішення, які дозволяють отримати високодисперсні, активовані та однорідні системи.

Для встановлення конструктивних характеристик роторних пристроїв, які забезпечать достатній рівень кавітаційного впливу на оброблювану сировину, проводяться попередні теоретичні розрахунки. Вони охоплюють визначення кількості і розмірів отворів у статорі 6 і роторі 9, відстані між отворами, а також їхній вплив на рівень тиску та пропускну здатність пристрою.

Методика розрахунку основних параметрів для кавітаційного диспергатора-гомогенізатора включає вимірювання відстані між отворами в статорі 6 та роторі 9 за наступними позначеннями:  $l$  – довжина кола контакту статора 6 і ротора 9, м;  $z$  – ширина отвору в статорі 6 і роторі 9, м;  $k_c$  – кількість отворів у статорі 6;  $k_p$  – кількість отворів у роторі 9.

Ці параметри дозволяють визначити раціональні конструктивні характеристики пристрою для забезпечення ефективного процесу диспергування та гомогенізації.

Пропускний лінійний розмір статора визначається як добуток параметрів  $k_c \times z$ , що також характеризує загальну ширину. Різниця між одиницею та цим добутком  $1 - k_c \times z$  дає суму відстаней між отворами. Проміжок між суміжними отворами в статорі обчислюється за формулою:

$$a_c = \frac{i - k_c \times z}{k_c}. \quad (2.4)$$

Аналогічно, сумарна ширина отворів ротора визначається добутком  $k_p \times z$ , а різниця  $1 - k_p \times z$  є сумою відстаней між отворами. Проміжок між суміжними отворами в роторі можна обчислити за допомогою виразу:

$$a_p = \frac{i - k_p \times z}{k_p}. \quad (2.5)$$

Отвори в статорі та роторі мають однакову форму і розміри.

Припускаючи, що один з отворів у статорі та роторі повністю співпадає, загальна різниця, на яку отвори не збігаються, визначається наступним виразом:

$$\Delta = \left( \frac{i}{k_p} - z \right) - \left( \frac{i}{k_c} - z \right) = \frac{i}{k_p} - \frac{i}{k_c}. \quad (2.6)$$

Унаслідок цього несумісності при обертанні ротора ширина щілини буде трохи меншою за ширину отвору  $z$ . Позначимо вираз  $\frac{i}{k_p} - \frac{i}{k_c}$  як  $\Delta$ , тоді ширина першої щілини буде  $z$ , другої –  $z - \Delta$ , третьої –  $z - 2\Delta$  і так далі.

Вираз

$$z = j \times \Delta \quad (2.7)$$

означає, що якщо отвір  $j$  повністю перекриється, то саме в ньому відбудеться явище гідроудару.

Кількість повністю відкритих та закритих отворів, де відбувається гідроудар, можна визначити за формулою:

$$N = \frac{k_c \times r}{2 \times (j+1)}. \quad (2.8)$$

Пропускна здатність ступеня «статор-ротор» для отворів з 0-го по  $j$ -й буде дорівнювати:

$$n = \frac{z \times (j+1)}{2}. \quad (2.9)$$

Тоді загальна пропускна ширина обчислюється за формулою:

$$\frac{k_c}{(j+1)} \times \frac{z \times (j+1)}{2} = \frac{z + k_c}{2}. \quad (2.10)$$

Отримане значення є сумарною пропускною здатністю.

Якщо ротор зсувається на величину  $E < \Delta$ , всі отвори до  $j$ -го зменшуються на величину  $E \times j$ , а отвори від  $j$  до  $2j$  збільшуються на ту ж величину. Пропускна здатність ступеня залишатиметься незмінною.

Пропускна здатність  $\Delta$  визначається через параметри  $z$  та  $k$ . З виразу  $z = j \times \Delta$  отримуємо:

$$\Delta = \frac{z}{j}. \quad (2.11)$$

Частота ступеня залежить від параметра  $k$ , а параметр  $z$  залежить від початкових розмірів частинок, які є вихідними значеннями. Зі зростанням значення  $\Delta$ , значення зменшується  $j$  (номер повністю закритого отвору). Великою  $\Delta$  регулюється кількість виникаючих гідроударів: зі збільшенням кількості отворів, що закривається, сила гідроудару збільшується.

Згідно наведеного опису приймаємо в подальшому кількість отворів у роторі-статорі в межах від 16 до 48 шт.

Для обчислення середньої швидкості переміщення суміші скористаємося формулою Жуговського для визначення тиску:

$$P = p(V_i - V_o) \cdot a \quad (2.12)$$

де  $p$  – показник щільності суспензії,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_i$ ,  $V_o$  – показник швидкості потоку в отворі ротора до та після перекриття,  $\text{м/с}$ ;  $a$  – показник швидкості розповсюдження

ударної хвилі в отворі ротора, що дорівнює показнику швидкості звуку в суспензії, м/с.

Розглядаючи ємність пристрою, частота гідроударів може розділитись на дві групи: частота для міжлопатевої частини пристрою та частота для отворів. Частота для міжлопатевої частини в  $j + 1$  разів вища, ніж для отворів.

Силу стиснення від гідроудару частинок  $p$  можна також обчислити за допомогою формули Жуговського, і нехтуючи малими кінцевими швидкостями  $V_0 = 0$  м/с, отримаємо вираз для  $V_1$ :

$$V_1 = \frac{2Q}{m \cdot z \cdot k_c}, \quad (2.13)$$

де  $Q$  – витрата, м<sup>3</sup>/с;  $m$  – довжина отвору, м.

Якщо величина  $p$  перевищує міцність частинки, це призведе до її руйнування. Якщо ж  $p$  менше за міцність частинки, руйнування відбудеться тільки при кількаразовому повторенні процесу диспергації або після проходження кількох ступенів пристрою.

Позначимо товщину стінки ротора тобто, глибини отвору,  $h$  (м), швидкість руху суспензії  $V_1$  (м/с), а час, за який частинка проходить через отвір ротора —  $t$  (с). Тоді час за який частинка проходить через отвір ротора:

$$t = \frac{h}{V_1}. \quad (2.14)$$

Для розрахунку частоти імпульсів які виникають внаслідок гідроударів в отворі ротора використовуємо формулу:

$$f = n \cdot k_c, \quad (2.15)$$

де  $n$  – частота обертання ротора, об/хв;  $k_c$  – кількість отворів в статорі.

Аналогічно, частота гідроударних імпульсів в отворі статора визначається за формулою:

$$f = n \cdot k_p \quad (2.16)$$

де  $k_p$  – кількість отворів в роторі.

Часовий проміжок між ударами в отворах можна обчислити як:

$$t' = \frac{1}{j} \quad (2.17)$$

Якщо  $t = t'$ , то частинка зазнає лише одного гідроудару: одного в роторі 9, а другого в статорі 6. У випадку, коли  $t < t'$ , частинка буде піддаватися кільком гідроударам під час руху через пристрій. Якщо ж  $t > t'$ , частина суспензії пройде через отвори та щілини статора 6 і ротора 9 без впливу гідроудару.

На ефективність роботи пристрою великий вплив має параметр, який визначає поведінку хвиль підвищення та зниження тиску. Хвиля підвищення тиску виникає через гідроудар, а хвиля зниження тиску – через одночасне зменшення тиску в отворі статора 6 при підвищенні тиску в отворі ротора 9.

Частота стиснення в роторі визначається виразом  $k_p \cdot n$ , а частота розрядження в статорі –  $k_c \cdot n$ .

Зниження тиску сприяє інтенсивнішому руйнуванню частинок, оскільки руйнівна дія розтягування ефективніша за дію стиснення.

Ще одним важливим фактором, що впливає на ефективність процесу, є резонансне руйнування частинок під впливом кількох послідовних гідроударних імпульсів. Якщо ці імпульси збігаються з власною частотою коливань частинки, виникає резонанс, що значно покращує ефективність її руйнування.

Перетворюючи рівняння отримуємо:

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{P}{\rho \cdot a} \cdot m \cdot z \cdot k_c \cdot \pi r^2. \quad (2.18)$$

Потужність, необхідну для прокачування рідини через диспергатор, можна визначити за формулою:

$$W = Q \cdot P. \quad (2.19)$$

Підставивши числові значення у рівняння (2.18) та (2.19), отримуємо розрахункові значення продуктивності та потужності кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що складають до 50 кг/год і до 2,1 кВт відповідно.

### 2.3 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання

Задача чисельного моделювання була сформульована таким чином: здійснити моделювання поведінки суміші рідини та зернового матеріалу під час обертання всередині робочих органів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів. Враховувались явища турбулентності. Розрахунок проводився динамічним методом (тобто враховувався часовий фактор), оскільки складна геометрія робочих органів призводить до нестабільності потоку.

Чисельне моделювання роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора проводилось в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. В основу фізико-математичного апарата лежить система нестационарних рівнянь руху рідини в їх консервативній формі.

Для кінцевого контрольного об'єму керівні рівняння потоку рідини можна записати як рівняння неперервності:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_A \rho v \cdot da = \int_V S_U dV, \quad (2.20)$$

де  $t$  – час, с;  $V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;  $a$  – вектор площини, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – швидкість, м/с;  $S_U$  – визначений користувачем вихідний вираз, кг/с.

Рівняння імпульсу потоку рідини можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v dV + \oint_A \rho v \otimes v \cdot da = -\oint_A \rho I \cdot da + \oint_A T \cdot da + \int_V f_b dV + \int_V s_U dV, \quad (2.21)$$

де  $I$  – тензор тотожності, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $T$  – тензор в'язких напружень, Па;  $f_b$  – питома рівнодіюча сила тіла, Н/м<sup>3</sup>;  $s_U$  – визначений користувачем вихідний вираз, Н/м<sup>3</sup>.

Рівняння енергії потоку рідини можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint_A \rho H v \cdot da = -\oint_A q \cdot da + \oint_A T \cdot v da + \int_V f_b \cdot v dV + \int_V S_U dV, \quad (2.22)$$

де  $E$  – повна енергія, Дж/кг;  $H$  – повна ентальпія, Дж/кг;  $q$  – тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>.

Рівняння стану є основними співвідношеннями, які описують зв'язок між густиною та внутрішньою енергією до двох основних термодинамічних змінних тиску і температури. Приймаємо для рідини рівняння стану – постійна щільність

$$\rho = \rho_0 = \text{const}, \quad (2.23)$$

де  $\rho_0$  – постійна щільність, кг/м<sup>3</sup>.

Як правило, чисельні методи, зокрема метод кінцевих об'ємів, перетворюють математичну модель у систему алгебраїчних рівнянь. Це перетворення передбачає дискретизацію керівних рівнянь у просторі та часі. Потім отримані лінійні рівняння розв'язують за допомогою алгебраїчного багатосіткового вирішувача.

Коли у рівняння збереження вводять відповідні основні співвідношення, виходить замкнута система рівнянь. Усі рівняння збереження можуть бути представлені через загальне рівняння переносу. Після інтегрування цього рівняння по контрольному об'єму  $V$  та застосувавши теорему про дивергенцію Гауса, отримаємо таку інтегральну форму рівняння переносу:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Transient Term}} + \underbrace{\int_A \rho v \phi \cdot da}_{\text{Convective Flux}} = \underbrace{\int_A \Gamma \nabla \phi da}_{\text{Diffusive Flux}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Source Term}}, \quad (2.24)$$

де  $A$  – площа поверхні контрольного об'єму, м<sup>2</sup>;  $\phi$  – перенесення скалярної властивості;  $da$  – вектор поверхні, м<sup>2</sup>.

Рух рідини, що досліджується в кавітаційному диспергаторі-гомогенізаторі, характеризуються нерівномірними коливаннями величин потоку. Часто ці флуктуації мають такі малі масштаби та високі частоти, що вирішення їх у часі та просторі потребує надмірних обчислювальних витрат. Замість того, щоб розв'язувати точні керівні рівняння турбулентних потоків (пряме чисельне моделювання), краще розв'язувати усереднені або відфільтровані величини та наближено оцінювати вплив невеликих флуктуаційних структур. Моделі турбулентності забезпечують різні підходи до моделювання цих структур.

Для чисельного моделювання прийнята модель турбулентності  $k$ - $\epsilon$  – це модель, яка складається з двох рівнянь, розв'язує рівняння переносу для турбулентної кінетичної енергії  $k$  та для швидкості турбулентної дисипації  $\epsilon$ , для того щоб визначити турбулентну в'язкість:

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\epsilon - \epsilon_0) + S_k, \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\bar{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_\varepsilon} C_\varepsilon P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left( \frac{\varepsilon}{T_\varepsilon} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon, \quad (2.26)$$

де  $k$  – кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\varepsilon$  – швидкість турбулентної дисипації,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $v$  – середня швидкість,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\mu$  – динамічна в'язкість,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_\varepsilon$ , і  $C_{\varepsilon 2}$  – коефіцієнти моделі;  $P_k$  і  $P_\varepsilon$  – умови виробництва,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ ;  $f_2$  – функція демпфування;  $S_k$  і  $S_\varepsilon$  – визначені користувачем вирази,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$ ;  $\varepsilon_0$  – показник навколишньої турбулентності в умовах джерела, протидіючого спаду турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^3$ . Можливість нав'язати вираз зовнішнього джерела також веде до визначення конкретної шкали часу,  $T_0$  яка визначається як:

$$T_0 = \max \left( \frac{k_0}{\varepsilon_0}, C_t \sqrt{\frac{v}{\varepsilon_0}} \right), \quad (2.27)$$

де  $C_t$  – модельний коефіцієнт.

## 2.4 Методика чисельного моделювання

Для проведення моделювання в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+ була розроблена CAD-сітка області, що включала ротор, статор і робочу камеру роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора з розміром комірки 0,001 м. Моделювання проводилось за допомогою геометричних параметрів ротора та статора роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, які показані на рисунок 2.6–2.7. Діаметр робочої камери становив 340 мм, висота — 270 мм, а абсолютна шорсткість поверхонь ротора та статора була встановлена на рівні  $\varepsilon = 2,5 \cdot 10^{-6}$  м. Моделювання проводилося із використанням Ейлерової багатофазної моделі, методу об'ємної рідини (VOF) та моделі взаємодії багатьох фаз. Опис динаміки рідинної фази здійснювався через  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності. Для моделювання течії рідинної фази та явища кавітації суміш розглядалася як двофазне середовище рідина-газ, де парова складова рідини виступала в ролі газової фази. У процесі руху вважалося, що щільність рідинної фази залишається сталою, а газова фаза підпорядковується рівнянню стану Ван-дер-Ваальса.

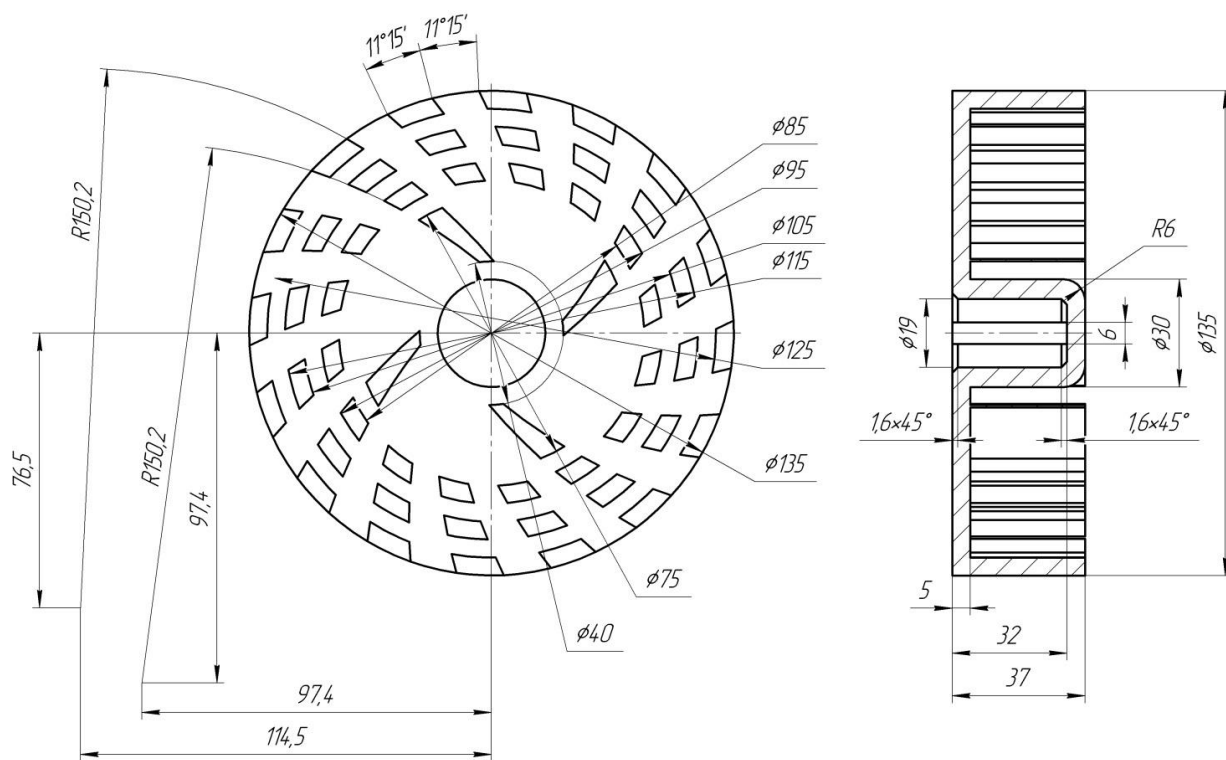


Рисунок 2.6 – Геометричні розміри ротора кавітаційного диспергатор-гомогенізатор

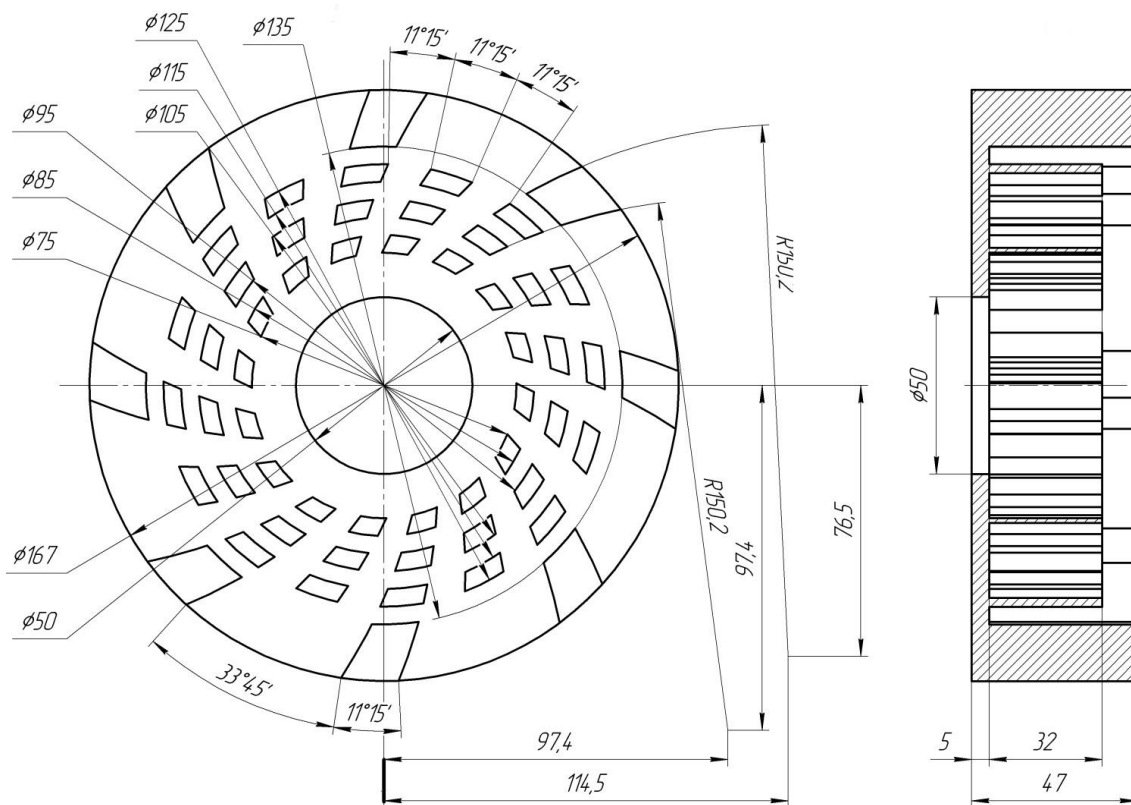


Рисунок 2.7 – Геометричні розміри статора кавітаційного диспергатор-гомогенізатор

Взаємодія між рідкою та газовою фазами моделювалася за допомогою методу об'ємної рідини (VOF-VOF) і кавітаційної моделі Schnerr-Sauer. Для проведення цього чисельного моделювання частота обертання ротора була встановлена на рівні 1500 об/хв, а період ітерацій становив 0,001 мс.

На початку моделювання область між статором та ротором була повністю заповнена рідиною, тобто її вміст дорівнював  $\alpha_f = 1$ . Початкові умови включали температуру 27 °С і тиск 101,2 кПа. Вихідними даними для рідини були: постійна густина  $\rho_f = 997,7$  кг/м<sup>3</sup>, динамічна в'язкість  $\mu_f = 8,89 \cdot 10^{-4}$  Па·с, тиск насичення  $p_f = 2339$  Па, молекулярна маса  $M_f = 18$  кг/кмоль, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_f = 0,63$  Вт/(м·К), питома теплоємність  $C_f = 4182$  Дж/(кг·К). Газова фаза рідини мала такі характеристики: динамічна в'язкість  $\mu_g = 1,268 \cdot 10^{-5}$  Па·с, молекулярна маса  $M_g = 18$  кг/кмоль, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_g = 0,0253$  Вт/(м·К), питома теплоємність  $C_g = 1939$  Дж/(кг·К).

Сітка частини 3D-моделі області між робочими органами кавітаційного диспергатора-гомогенізатора в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+ зображена на рисунку 2.8.

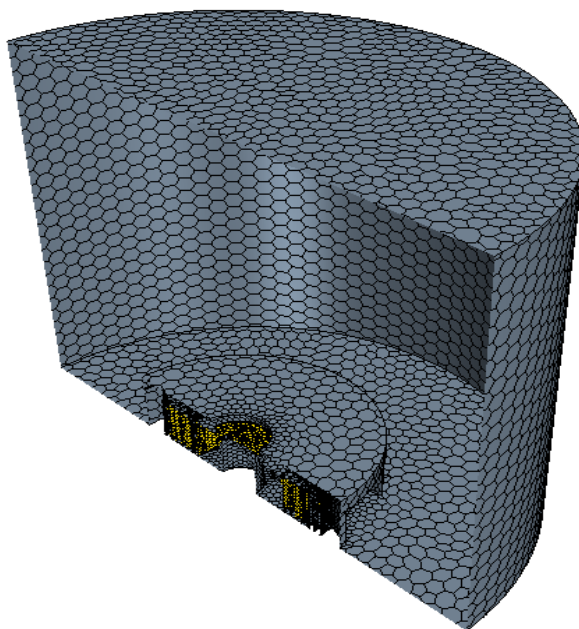


Рисунок 2.8 – Сітка частини 3D моделі області між робочими органами кавітаційного диспергатора-гомогенізатора в Simcenter Star-CCM+

Дослідження виконано шляхом планування чисельного експерименту для визначення впливу ключових параметрів на роботу кавітаційного диспергатора-гомогенізатора. Як основні фактори було обрано частоту обертання ротора  $n$ , діаметр вхідного отвору  $D_{in}$  та кількість резонаторів (отворів у статорі та роторі)  $N_{hole}$ . Для забезпечення достовірності результатів експерименту кожен фактор варіювався у визначених межах із відповідним кроком зміни. Детальні значення граничних параметрів та інтервалів варіювання наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Границі факторів та інтервали чисельного експерименту

Рівень	Частота обертання ротора $n$ , об/хв. ( $x_1$ )	Діаметр вхідного отвору в статорі $D_{in}$ , м ( $x_2$ )	Кількість резонаторів $N_{hole}$ ( $x_3$ )
Верхній (+1)	3000	0,06	48
Середній (0)	2250	0,05	32
Нижній (-1)	1500	0,04	16
Інтервал	750	0,01	16

Під час проведення чисельного моделювання для кожного варіанту дослідження було визначено такі ключові параметри:

- граничне значення швидкості руху рідинної фази суміші у вхідному отворі  $V_{in\ max}$  ;
- максимальну швидкість переміщення рідинної фази суміші в області дифузора  $V_{rot\ max}$  ;
- найбільше значення тиску рідинної фази суміші у вхідному отворі  $P_{in\ max}$  ;
- максимальний тиск рідинної фази суміші в зоні дифузора  $P_{rot\ max}$
- найнижче значення тиску рідинної фази суміші у дифузори  $P_{rot\ min}$  .

Отримані результати дали змогу оцінити гідродинамічні характеристики потоку, визначити критичні області виникнення кавітаційних явищ та встановити оптимальні режими роботи пристрою.

Дослідження кавітації у процесі подрібнення зерна в роторному диспергаторі-гомогенізаторі є необхідним для підвищення ефективності руйнування частинок, зменшення енергетичних витрат та покращення якості кінцевого продукту.

Кавітаційні імпульси створюють значні локальні навантаження, що сприяють руйнуванню зернових частинок не лише завдяки гідроудару, а й через внутрішнє напруження, спричинене різкими перепадами тиску. Це забезпечує більш інтенсивне та рівномірне диспергування матеріалу, що особливо важливо у виробництві кормів або біотехнологічних продуктів.

Також кавітація запобігає утворенню агломератів завдяки інтенсивним гідродинамічним процесам, що позитивно впливають на стабільність суспензії та однорідність кінцевого продукту. Додатково, використання кавітації дозволяє зменшити механічне навантаження на робочі органи обладнання, що знижує загальні енергетичні витрати та підвищує продуктивність диспергатора-гомогенізатора.

Таким чином, дослідження та оптимізація кавітаційних процесів є важливими для ефективного подрібнення зерна, що сприяє покращенню технологічних процесів та якості кінцевого продукту.

Якісним критерієм оцінки явища кавітації у розробленому обладнанні є максимальне і мінімальне число кавітації  $X_{\max}$  і  $X_{\min}$ , яке розраховується за формулами:

$$X_{\max} = \frac{2(P_{\text{rot max}} - P_s)}{\rho V_{\text{rot max}}}, \quad (2.28)$$

$$X_{\min} = \frac{2(P_{\text{rot min}} - P_s)}{\rho V_{\text{rot min}}}, \quad (2.29)$$

де  $\rho$  – щільність середовища, для води  $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$ ;  $V_{\text{rot}}$  – швидкість потоку в дифузори, м/с;  $P_s$  – тиск насичених парів рідини при певній температурі навколишнього середовища (для водяного пару  $P_s = 2314,4 \text{ Па}$ );  $P_{\text{rot}}$  – гідростатичний тиск набігаючого потоку, Па.

Кавітація виникає, при досягненні потоком граничної швидкості, коли тиск у потоці дорівнює тиску насичених парів. Цей момент називається граничним значенням критерію кавітації.

В залежності від величини  $X$  можна виділити чотири види потоків:

- докавітаційний – суцільний (однофазний) потік, коли  $X > 1$ ;
- кавітаційний – (двофазний) потік при  $X \approx 1$ ;
- плівковий – з чітким відділенням кавітаційної порожнини від суцільного потоку (плівкова кавітація) при  $X < 1$ ; – суперкавітаційний – при  $X \ll 1$ .

Продуктивність процесу диспергування визначається масовим потоком суміші, який розраховується за формулою:

$$Q \sim V_{in \max} D_{in}^2. \quad (2.30)$$

Зі зростанням показника  $Q$ , зростає маса суміші, яка обробляється за одиницю часу. Досягнення оптимальних конструктивно-режимних параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора стає можливим через підвищення продуктивності процесу диспергування при зниженні числа кавітації до мінімального рівня.

Процес моделювання здійснювався через поетапний перебір усіх рівнів факторів, що включав загальну кількість  $3^3 = 27$  експериментів, матриця яких наведена в таблиці додатку Б. Потім за допомогою програмного пакету Wolfram Cloud була розроблена модель регресії другого порядку для кожного з обраних критеріїв.

## 2.5 Результати чисельного моделювання

Розподіл швидкостей переміщення рідкої фази суміші в робочій камері роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора був отриманий за результатами чисельного моделювання (рисунок 2.9). Ця візуалізація підтверджує, що рідка фаза переміщується по всьому об'єму камери із середньою швидкістю 2,4 м/с. Висновком є те, що вся суміш всмоктується ротором через наскрізний отвір статора і проходить через дифузори та резонатори у системі ротор-статор, де відбувається процес диспергування.

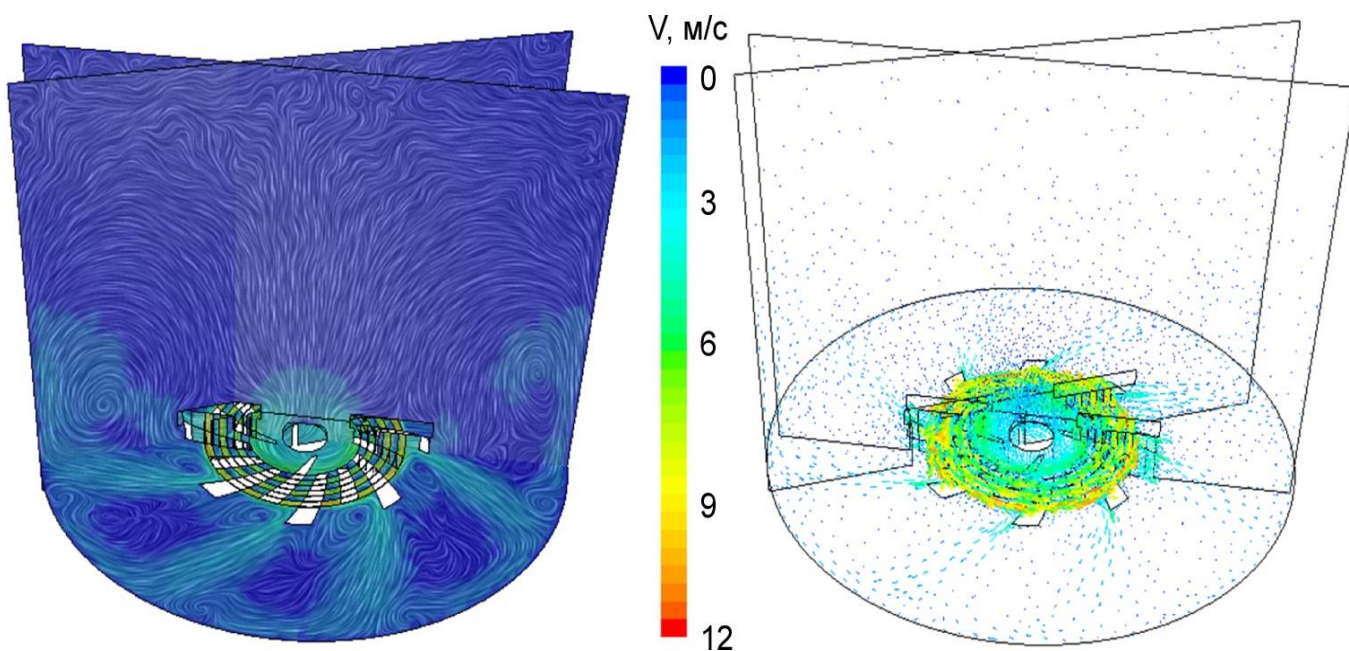


Рисунок 2.9 – Швидкості переміщення рідкої фази суміші в робочій камері роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

Розподіл і динаміка тиску в дифузорі роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора представлені на рисунку 2.10. Візуалізація демонструє, що середня різниця між максимальним і мінімальним значеннями тиску в дифузорі становить 90 кПа, при цьому зміна тиску відбувається за 0,004 с. Це дозволяє зробити висновок про виникнення в дифузорі явища гідравлічного удару, що сприяє процесу диспергування.

На рисунку 2.11 показано динаміку та розподіл концентрації газоподібної фази рідини в дифузорі роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора. Концентрація газоподібної фази рідини в дифузорі змінюється в межах від  $3,6$  до  $4,7 \cdot 10^{-3}$ . Це вказує на постійну присутність бульбашок газоподібної фази (пари) в цій зоні, а коливання концентрації свідчить про їх регулярне утворення і зникнення, що, в свою чергу, є свідченням явища кавітації.

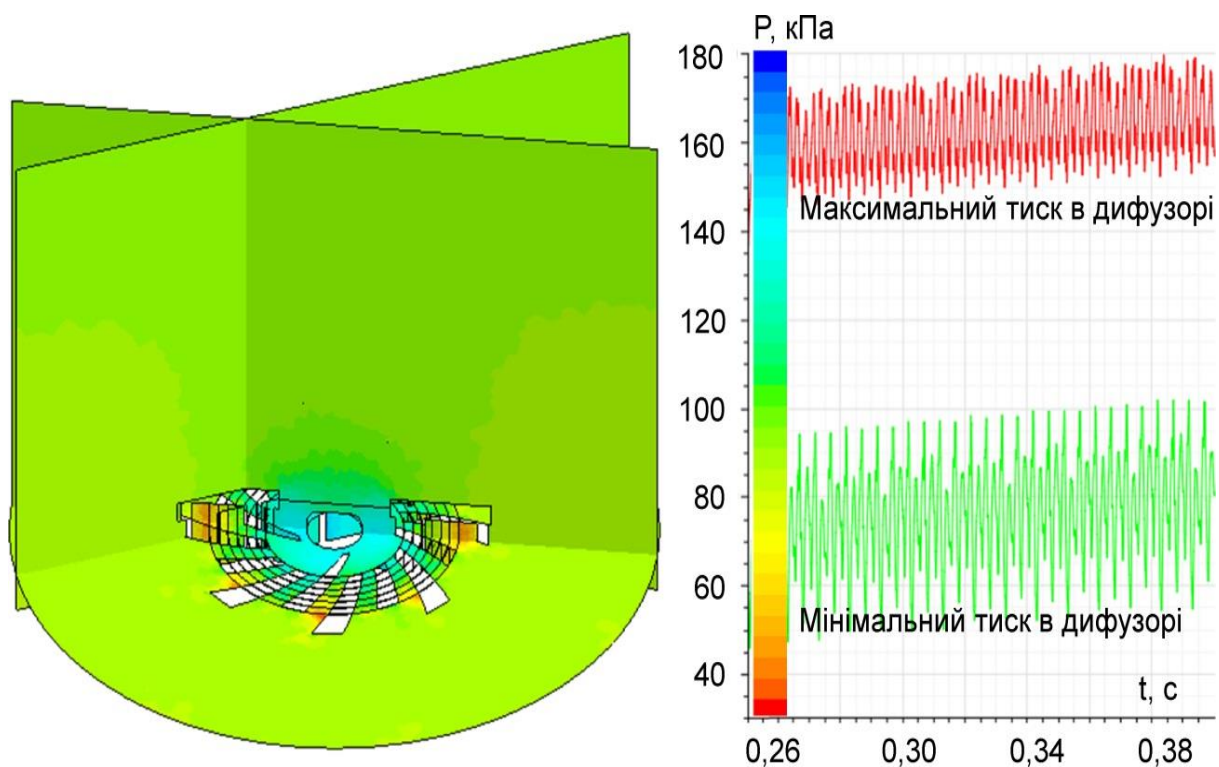


Рисунок 2.10 – Динаміка і розподіл тиску в дифузори роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

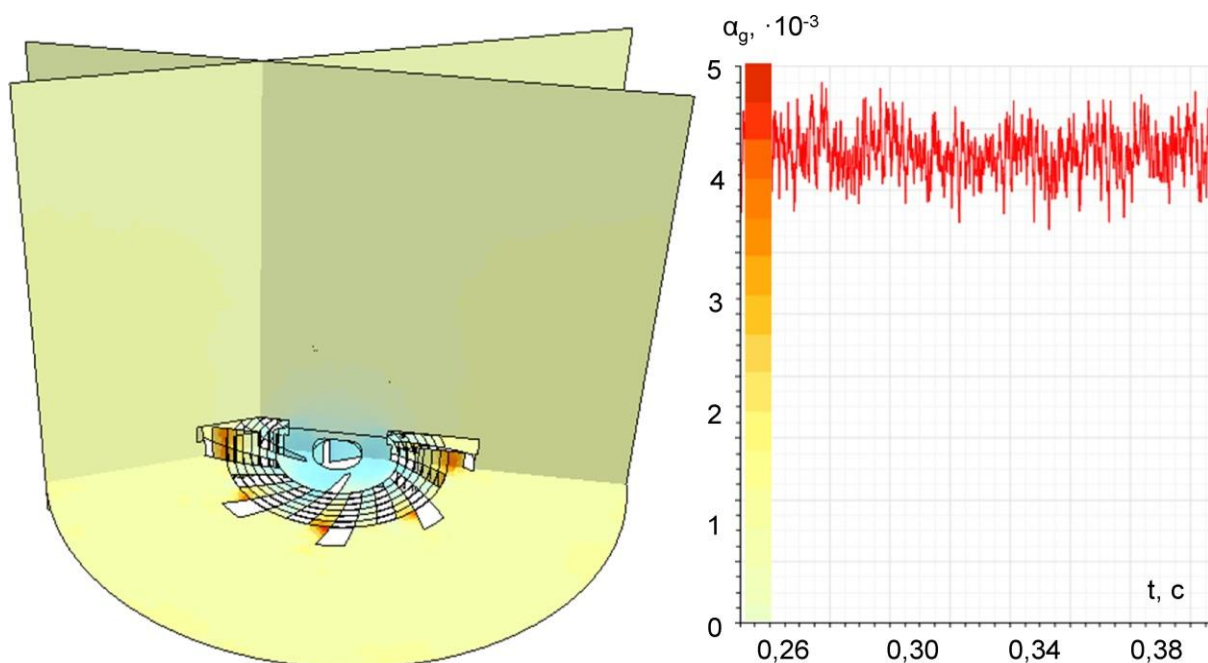


Рисунок 2.11 – Динаміка і розподіл концентрації газоподібної фази рідини в дифузори роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

Завдяки чисельному моделюванню та подальшій обробці отриманих результатів у програмному пакеті Wolfram Cloud було отримано залежність зміни максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі від досліджуваних факторів у закодованому вигляді

$$V_{in\ max} = 4,73 + 1,00333 x_1 + 6,45842 \cdot 10^{-16} x_1^2 + 1,09667 x_2 - 1,44106 \cdot 10^{-15} x_1 x_2 + 0,1 x_2^2 - 0,271667 x_3 - 0,01 x_1 x_3 - 0,0275 x_2 x_3 + 0,085 x_3^2. \quad (2.31)$$

Статистична обробка рівняння (2.31) представлена в табл. 2.2. Проаналізувавши дані з табл. 2.2, провели скорочення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стюдента, після цього, рівняння (2.31) було розкодовано. В результаті розкодування, отримано залежність зміни максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі від факторів досліджень

$$V_{in\ max} = -0,656 + 0,00133779 n + 15,1668 D_{in} + 1000 D_{in}^2 - 0,0296355 N_{hole} - 0,171876 D_{in} N_{hole} + 0,000332032 N_{hole}^2. \quad (2.32)$$

Таблиця 2.2 – Результати статистичної обробки рівняння (2.31) у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	4.73	0, 0 193 396	244, 576	$1, 36 495 \times 10^{-31}$
a10	1, 00 333	0, 00 895 249	112, 073	$7, 81 436 \times 10^{-26}$
a20	1, 09 667	0, 00 895 249	122, 499	$1, 7257 \times 10^{-26}$
a30	-0, 271 667	0, 00 895 249	-30, 3454	$3, 01 715 \times 10^{-16}$
a12	$-1, 44 106 \times 10^{-15}$	0, 0 109 645	$-1, 3143 \times 10^{-13}$	1
a13	-0, 01	0, 0 109 645	-0, 912 033	0, 374 504
a23	-0, 0275	0, 0 109 645	-2, 50 809	0, 0225 708
a11	$6, 45 842 \times 10^{-16}$	0, 0 155 062	$4, 16 507 \times 10^{-14}$	1
a22	0, 1	0, 0 155 062	6, 44 905	$5, 99 957 \times 10^{-6}$
a33	0, 085	0, 0 155 062	5, 48 169	0, 00 004 052

	DF	SS	MS
Model	10	677.191	67, 7191
Error	17	0, 024 525	0, 00 144 265
Uncorrected Total	27	677, 216	
Corrected Total	26	41. 235	

Оскільки обчислене значення  $F = 46848,43$  значно більше табличного значення  $F_{\text{табл}} = 3,59$ , то можна зробити висновок, що модель має статистично значущий вплив.

Максимальна швидкість переміщення рідкої фази в вхідному отворі  $V_{\text{in max}} = 7,3$  м/с досягається при  $n = 3000$  об/хв,  $D_{\text{in}} = 0,06$  м,  $N_{\text{hole}} = 16$ . Для побудови графічних інтерпретацій залежності (2.32) фактори досліджень були зафіксовані на зазначених рівнях і ці графіки зображені на рисунку 2.12.

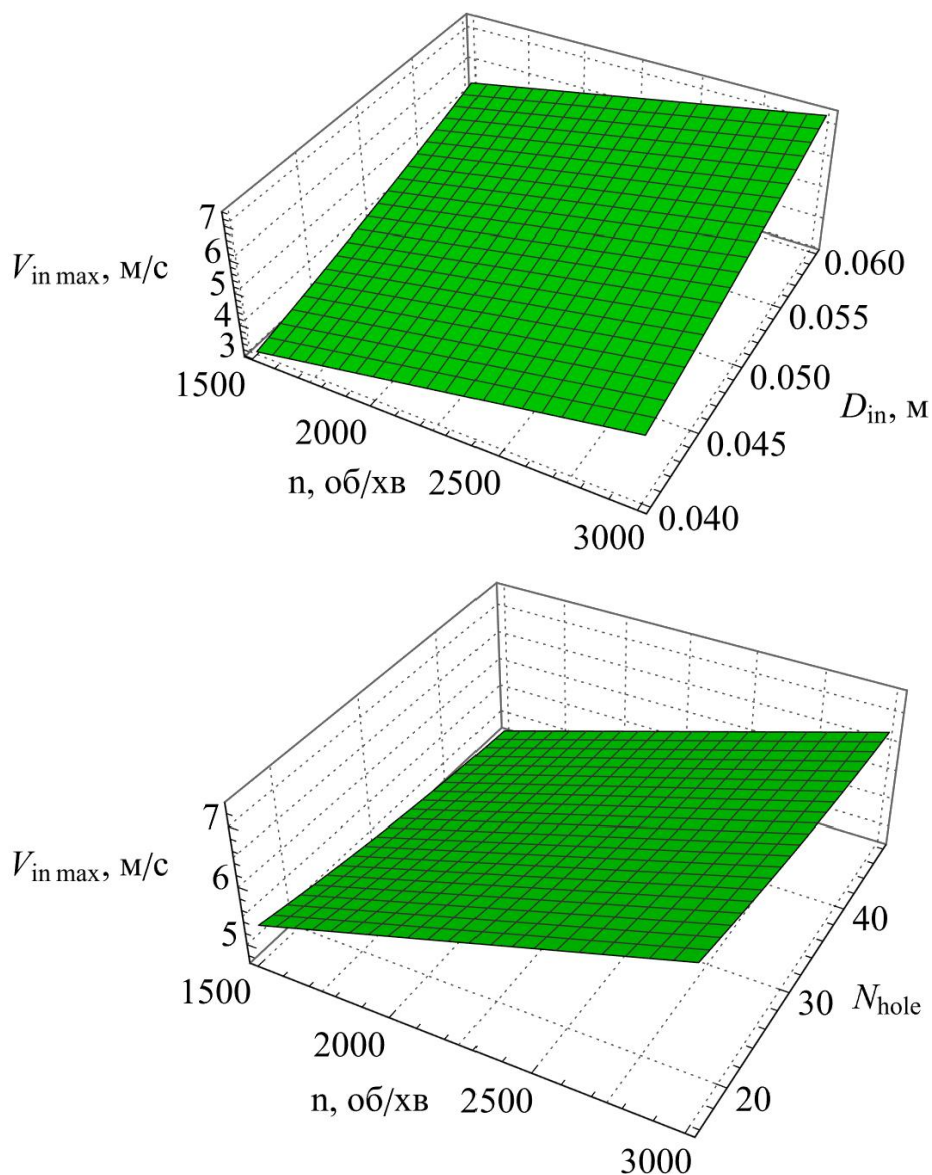


Рисунок 2.12 – Вплив частоти обертання ротора  $n$ , кількості резонаторів  $N_{\text{hole}}$  і діаметра вхідного отвору  $D_{\text{in}}$  на максимальну швидкості переміщення рідкої фази суміші у вхідному отворі  $V_{\text{in max}}$

Зі збільшенням частоти обертання ротора максимальна швидкість переміщення рідкої фази зростає, оскільки коефіцієнт при  $n$  у рівнянні додатний (0,00133778), що означає прямий вплив частоти обертання на швидкість. Це може бути пов'язано з тим, що більша частота обертання ротора підвищує енергію, що передається рідкій фазі, тим самим збільшуючи її швидкість. Максимальна швидкість переміщення також залежить від діаметра вхідного отвору. Зі збільшенням  $D_{in}$  значення  $V_{max}$  значно збільшується, що видно з додатних коефіцієнтів при  $D_{in}$  та  $D_{in}^2$ . Зокрема, коефіцієнт при  $D_{in}^2$  (1000) вказує на сильний квадратичний вплив діаметра вхідного отвору, що свідчить про те, що більший діаметр отвору дозволяє пропускати більший об'єм рідкої фази з більшою швидкістю. Кількість резонаторів має негативний вплив на максимальну швидкість переміщення рідкої фази. Це видно з негативних коефіцієнтів при  $N_{hole}$  та  $D_{in} \cdot N_{hole}$ . Збільшення кількості резонаторів зменшує швидкість, що може бути пов'язано з тим, що наявність резонаторів спричиняє додаткові перешкоди для руху рідкої фази, знижуючи її кінетичну енергію. Крім того, квадратичний термін  $N_{hole}^2$  має малий позитивний вплив, що вказує на те, що при дуже великій кількості резонаторів цей ефект може стати менш вираженим.

Після виконання чисельного моделювання та обробки отриманих результатів за допомогою програмного пакету Wolfram Cloud було визначено залежність зміни максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші в дифузорі від досліджуваних факторів у закодованому вигляді

$$\begin{aligned} V_{rot\ max} = & 17,2633 + 6,31667 x_1 - 1,51891 \cdot 10^{-14} x_1^2 + 0,178333 x_2 - \\ & - 2,8721 \cdot 10^{-15} x_1 x_2 + 0,135 x_2^2 + 2,33333 x_3 + 1,11 x_1 x_3 - \\ & - 0,1525 x_2 x_3 + 0,36 x_3^2. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Статистичну обробку рівняння (2.33) наведено в табл. 2.3. Після аналізу табл. 2.3 та застосування критерію Стюдента для виключення незначущих коефіцієнтів, а також розкодування рівняння (2.33), отримали залежність зміни максимальної швидкості переміщення рідкої фази суміші в дифузорі від досліджуваних факторів

$$\begin{aligned} V_{rot\ max} = & 0,855 + 0,0054623 n + 17,834 D_{in} - 0,15228 N_{hole} + \\ & + 0,000093 n N_{hole} + 0,0014063 N_{hole}^2. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Таблиця 2.3– Результати статистичної обробки рівняння (2.33)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	17, 2633	0, 164 711	104, 81	$2, 43 718 \times 10^{-25}$
a10	6, 31 667	0, 0762 462	82, 8457	$1, 31 798 \times 10^{-23}$
a20	0, 178 333	0, 0762 462	2, 33 891	0, 0318 103
a30	2, 33 333	0, 0762 462	30, 6026	$2, 6202 \times 10^{-16}$
a12	$-2, 8721 \times 10^{-15}$	0, 0933 821	$-3, 07 564 \times 10^{-14}$	1
a13	1, 11	0, 0933 821	11, 8866	$1, 16 332 \times 10^{-9}$
a23	-0, 1525	0, 0933 821	-1, 63 307	0, 120 836
a11	$-1, 51 891 \times 10^{-14}$	0, 132 062	$-1, 15 015 \times 10^{-13}$	1
a22	0, 135	0, 132 062	1, 02 225	0, 320 993
a33	0, 36	0, 132 062	2, 72 599	0, 0143 729

	DF	SS	MS
Model	10	9189, 91	918, 991
Error	17	1, 77 892	0, 104 643
Uncorrected Total	27	9191, 69	
Corrected Total	26	834, 508	

Максимальна швидкість переміщення рідкої фази суміші у дифузорі  $V_{\text{rot max}} = 27,5$  м/с досягається при значеннях  $n = 3000$  об/хв.,  $D_{\text{in}} = 0,06$  м,  $N_{\text{hole}} = 48$ . При фіксації факторів дослідження на цих рівнях були побудовані графічні інтерпретації залежності (2.34), що представлені на рисунок 3.8.

Оскільки обчислене значення  $F = 8782,15$  значно більше табличного значення  $F_{\text{табл}} = 3,59$ , то можна зробити висновок, що модель має статистично значущий вплив.

Залежність швидкості від частоти обертання є лінійною, з коефіцієнтом 0,00546222, що вказує на прямий вплив збільшення частоти обертання на максимальну швидкість рідкої фази. Тобто, при збільшенні частоти обертання, максимальна швидкість переміщення суміші зростає. Залежність швидкості від діаметра отвору також лінійна, з коефіцієнтом 17,8333. Це свідчить про значний вплив цього параметра, оскільки збільшення діаметра отвору призводить до збільшення максимального значення швидкості переміщення рідкої фази. Такий

ефект можна пояснити тим, що більший діаметр забезпечує більший простір для переміщення суміші.

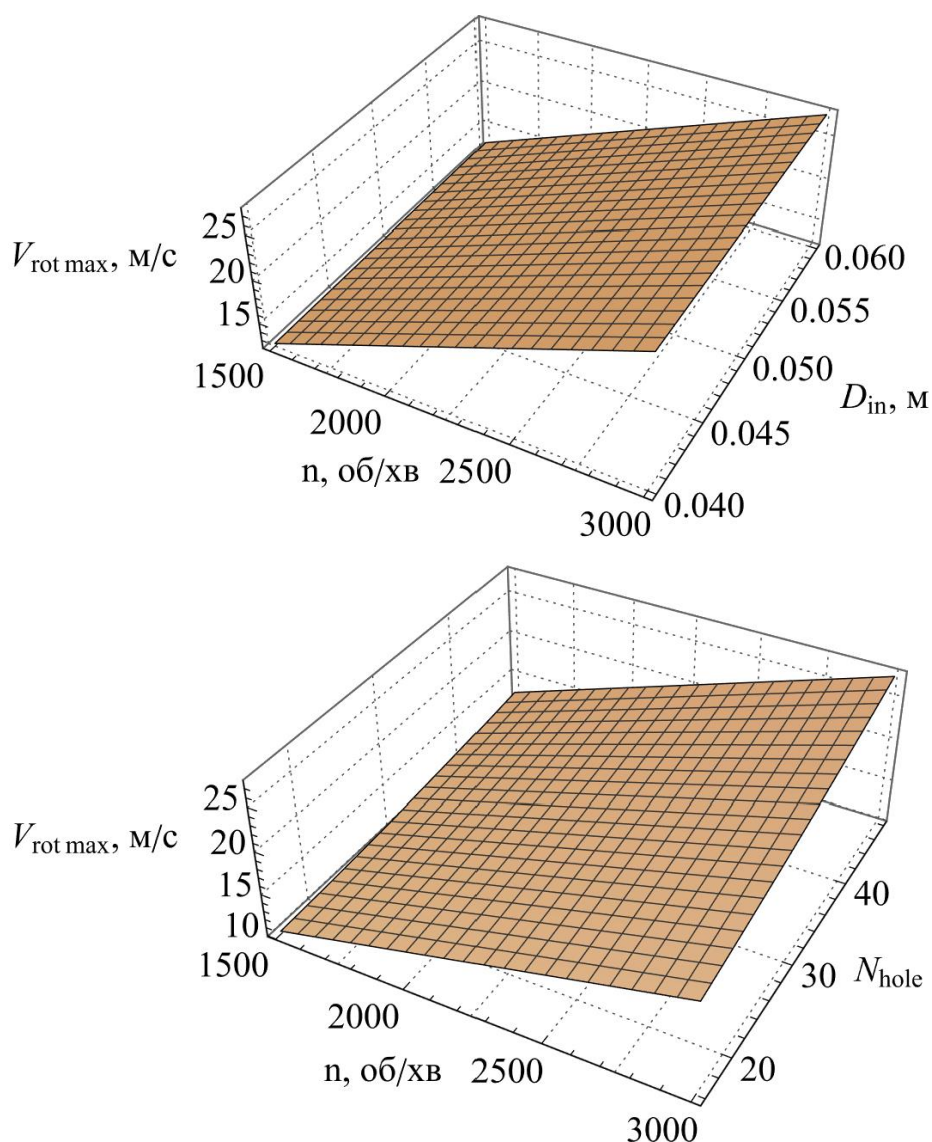


Рисунок 2.13 – Вплив частоти обертання ротора  $n$ , кількості резонаторів  $N_{hole}$  і діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  на максимальну швидкості переміщення рідкої фази суміші у дифузори  $V_{rot\ max}$

Вплив кількості резонаторів на максимальну швидкість є складнішим, оскільки він описується через кілька членів рівняння. Коефіцієнт – 0,152292 вказує на зменшення швидкості при збільшенні кількості резонаторів. Це може бути зумовлено додатковими втратами енергії через більшу кількість резонаторів, що можуть

створювати додаткові опори для переміщення рідкої фази. Однак взаємодія між частотою обертання ротора та кількістю резонаторів, яка представлена через член  $0.0000925 \cdot n \cdot N_{\text{hole}}$ , демонструє, що при певному поєднанні цих параметрів швидкість може збільшуватися. Додатково, квадратний термін  $0.00140625 \cdot N_{\text{hole}}^2$  свідчить про можливий експоненціальний ефект на швидкість при великих значеннях  $N_{\text{hole}}$ .

Внаслідок чисельного моделювання та подальшої обробки отриманих результатів за допомогою програмного пакету Wolfram Cloud було отримано залежність зміни значення максимального тиску рідкої фази суміші у вхідному отворі статора від факторів досліджень у закодованій формі.

$$P_{\text{in max}} = 124,652 + 15,6893 x_1 - 1,81162 x_1^2 + 5,4691 x_2 + 0,52486 x_1 x_2 - 0,32399 x_2^2 + 5,388 x_3 + 0,0406 x_1 x_3 + 1,2183 x_2 x_3 + 3,8825 x_3^2. \quad (2.35)$$

Статистичну обробку рівняння (2.35) наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати статистичної обробки рівняння (2.35) у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	124, 651	0, 666 684	186, 971	$1, 31 001 \times 10^{-29}$
a10	15, 6894	0, 308 615	50, 8382	$5, 14 025 \times 10^{-20}$
a20	5, 46 905	0, 308 615	17, 7213	$2, 13 958 \times 10^{-12}$
a30	5, 3878	0, 308 615	17, 458	$2, 72 515 \times 10^{-12}$
a12	0, 524 858	0, 377 974	1, 38 861	0, 182 879
a13	0, 040 55	0, 377 974	0, 107 282	0, 915 821
a23	1, 21 828	0, 377 974	3, 22 318	0, 0049 921
a11	-1, 81 164	0, 534 536	-3, 38 918	0, 00348 852
a22	-0, 323 984	0, 534 536	-0, 606 104	0, 552 454
a33	3, 88 243	0, 534 536	7, 26 317	$1, 3255 \times 10^{-6}$

	DF	SS	MS
Model	10	433 020,	43 302,
Error	17	29, 1443	1, 71 437
Uncorrected Total	27	433 049,	
Corrected Total	26	5652, 78	

Після аналізу даних таблиці 2.4, з урахуванням скорочення незначущих коефіцієнтів за допомогою критерію Стюдента та розкодування рівняння (2.35), ми

отримали остаточну залежність зміни максимального тиску рідкої фази суміші у вхідному отворі від досліджуваних факторів

$$P_{in\ max} = 50,868 + 0,035414 n - 3,2207 \cdot 10^{-6} n^2 + 303,25 D_{in} - 1,0146 N_{hole} + 7,6143 D_{in} N_{hole} + 0,015166 N_{hole}^2. \quad (2.36)$$

Оскільки обчислене значення  $F = 25258,25$  значно більше табличного значення  $F_{табл} = 3,59$ , то можна зробити висновок, що модель має статистично значущий вплив.

Максимальний тиск рідкої фази суміші у вхідному отворі  $P_{in\ max}$  досягає значення 154,4 кПа при умовах  $n = 3000$  об/хв.,  $D_{in} = 0,06$  м,  $N_{hole} = 48$ . При фіксації кожного з факторів на відповідному рівні були побудовані графічні інтерпретації залежності (2.36), які представлені на рисунок 2.14.

Збільшення частоти обертання ротора  $n$  позитивно впливає на тиск, оскільки більша швидкість обертання створює більшу енергію в системі, що веде до підвищення тиску. Однак вплив квадрату частоти  $n^2$  дозволяє спостерігати зменшення цієї величини на великих значеннях частоти, що свідчить про нееластичні ефекти чи інші фактори, що обмежують тиск при дуже високих швидкостях. Діаметр вхідного отвору  $D_{in}$  має значний позитивний вплив на максимальний тиск: зростання діаметра отвору призводить до збільшення площі, через яку проходить рідка фаза суміші, що сприяє підвищенню тиску. Крім того, існує взаємодія між діаметром вхідного отвору та кількістю резонаторів  $N_{hole}$ , що також позитивно впливає на тиск. Кількість резонаторів  $N_{hole}$  сама по собі має негативний вплив на тиск, але цей ефект частково компенсується їх взаємодією з діаметром отвору.

Після проведення чисельного моделювання та обробки отриманих результатів за допомогою програмного пакету Wolfram Cloud, була визначена залежність зміни максимального тиску рідкої фази суміші у дифузорі від факторів досліджень у закодованому вигляді

$$P_{rot\ max} = 171,86 + 19,351 x_1 - 3,9084 x_1^2 + 3,9825 x_2 - 0,35742 x_1 x_2 - 0,068403 x_2^2 + 6,156 x_3 + 0,0131 x_1 x_3 - 1,566 x_2 x_3 + 2,63 x_3^2. \quad (2.37)$$

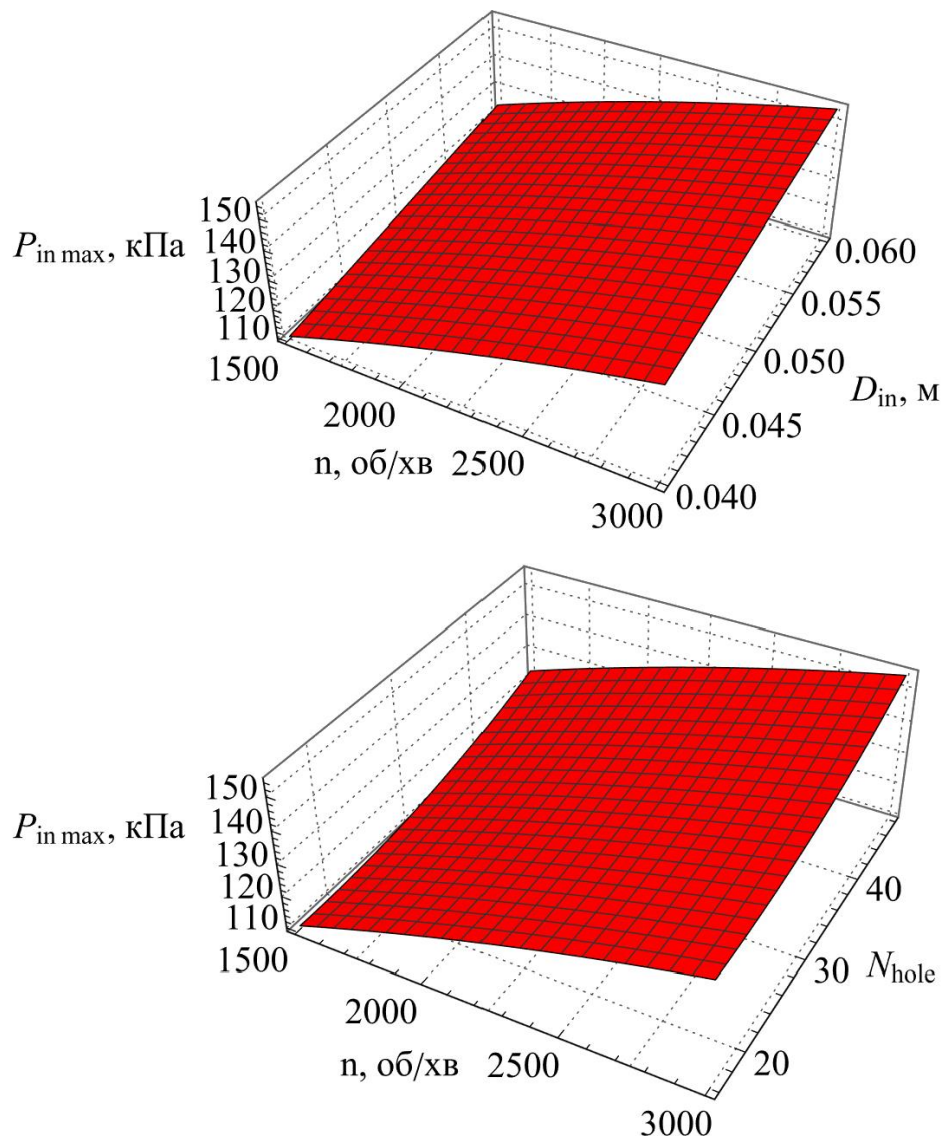


Рисунок 2.14 – Вплив частоти обертання ротора  $n$ , кількості резонаторів  $N_{hole}$  і діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  на максимальний тиск рідкої фази суміші у вхідному отворі  $P_{in\ max}$

Статистичну обробку рівняння (2.37) представлено в таблиці 2.5. В результаті проведеного аналізу таблиці 2.5, скорочення деяких незначущих коефіцієнтів за критерієм Стюдента та розкодування рівняння (2.37) отримали остаточну залежність зміни максимального тиску переміщення рідкої фази суміші у дифузори від досліджуваних факторів

$$P_{rot\ max} = 41,272 + 0,057069 n - 6,9483 \cdot 10^{-6} n^2 + 711,42 D_{in} + 0,21657 N_{hole} - 9,7865 D_{in} N_{hole} + 0,010274 N_{hole}^2. \quad (2.38)$$

Таблиця 2.5 – Результати статистичної обробки рівняння (2.37)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	54, 6321	0, 641 455	85, 169	$8, 24472 \times 10^{-24}$
a10	-19, 3513	0, 296 936	-65, 1699	$7, 69801 \times 10^{-22}$
a20	2, 097	0, 296 936	7, 06212	$1, 90842 \times 10^{-6}$
a30	-2, 45528	0, 296 936	-8, 26873	$2, 32092 \times 10^{-7}$
a12	0, 357417	0, 363 671	0, 982 803	0, 339 486
a13	-0, 0130833	0, 363 671	-0, 0359758	0, 971 721
a23	-0, 401844	0, 363 671	-1, 10497	0, 284 567
a11	3, 90839	0, 514 308	7, 59932	$7, 29443 \times 10^{-7}$
a22	0, 47866	0, 514 308	0, 930 687	0, 365 044
a33	-2, 22782	0, 514 308	-4, 33169	0, 000 453 011

	DF	SS	MS
Model	10	91 942, 9	9194, 29
Error	17	26, 9803	1, 58 708
Uncorrected Total	27	91 969, 9	
Corrected Total	26	7081, 42	

Оскільки обчислене значення  $F = 5793,21$  значно більше табличного значення  $F_{\text{табл}} = 3,59$ , то можна зробити висновок, що модель має статистично значущий вплив.

Максимальне значення тиску рідкої фази суміші у дифузорі, яке становить 154,4 кПа, досягається при параметрах  $n = 3000$  об/хв,  $D_{\text{in}} = 0,06$  м та  $N_{\text{hole}} = 48$ . Для фіксованих на цих рівнях значень факторів досліджень були побудовані графічні інтерпретації залежності (2.38), які зображені на рисунок 2.15.

Відповідно до рівняння, максимальний тиск зростає з підвищенням частоти обертання ротора  $n$ , що викликає збільшення кінетичної енергії потоку рідкої фази, а отже і тиску. Однак, вплив квадратичної залежності від  $n$ , який визначається терміном  $-6,94825 \times 10^{-6} n^2$ , вказує на наявність зменшення тиску при великих значеннях частоти обертання. Це може бути результатом нееластичних ефектів або інших факторів, які обмежують подальше підвищення тиску при великих значеннях  $n$ . Діаметр вхідного отвору  $D_{\text{in}}$  також позитивно впливає на максимальний тиск. Збільшення діаметра отвору призводить до збільшення площі, через яку проходить рідина, що сприяє зростанню тиску в системі. Крім того, існує взаємодія між

діаметром вхідного отвору і кількістю резонаторів  $N_{\text{hole}}$ , яка також позитивно впливає на значення тиску. Цей взаємний ефект можна пояснити тим, що резонатори можуть підвищувати ефективність енергетичних процесів у системі, зокрема, стабілізуючи потік рідини і створюючи додаткові коливання, що впливають на підвищення тиску. Кількість резонаторів  $N_{\text{hole}}$  сама по собі має позитивний вплив на максимальний тиск, що видно з додаткового доданка  $0,216568 N_{\text{hole}}$ . Однак цей ефект частково зменшується через негативну взаємодію між діаметром отвору та кількістю резонаторів, яка відображена в терміні  $-9,78644 D_{\text{in}} N_{\text{hole}}$ . Крім того, квадратна залежність від кількості резонаторів, визначена терміном  $0,0102735 N_{\text{hole}}^2$ , свідчить про те, що при великій кількості резонаторів тиск продовжує зростати, хоча і з меншою інтенсивністю.

Внаслідок проведеного чисельного моделювання та обробки отриманих результатів за допомогою програмного забезпечення Wolfram Cloud було визначено залежність зміни мінімального тиску переміщення рідкої фази суміші в дифузорі від факторів дослідження у закодованому вигляді

$$P_{\text{rot min}} = 53,3358 - 20,2957 x_1 + 2,96394 x_1^2 + 1,81922 x_2 + 1,19075 x_1 x_2 + 2,86755 x_2^2 - 1,23306 x_3 - 0,263083 x_1 x_3 - 0,151844 x_2 x_3 - 1,0056 x_3^2. \quad (2.39)$$

Статистична обробка рівняння (2.39) наведена в табл. 2.6. В результаті аналізу цієї таблиці, а також відповідного скорочення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стюдента і розкодування рівняння (2.39), отримали залежність зміни мінімального тиску переміщення рідкої фази суміші в дифузорі від досліджуваних факторів

$$P_{\text{rot min}} = 203,491 - 0,0507725 n + 5,26923 \cdot 10^{-6} n^2 - 2685,63 D_{\text{in}} + 28675,5 D_{\text{in}}^2. \quad (2.40)$$

Оскільки обчислене значення  $F = 993,25$  значно більше табличного значення  $F_{\text{табл}} = 3,59$ , то можна зробити висновок, що модель має статистично значущий вплив.

При  $n = 3000$  об/хв,  $D_{\text{in}} = 0,06$  м мінімальний рівень тиску рідкої фази суміші в дифузорі становить 37,2 кПа. Графічні інтерпретації залежності (2.40) були побудовані на рисунок 2.15, при цьому фактори досліджень фіксувалися на зазначених рівнях почергово.

Зі збільшенням частоти обертання ротора  $n$ , мінімальний тиск зменшується, оскільки значення коефіцієнта при  $n$  є від'ємним. Це вказує на те, що більша

швидкість обертання ротора спричиняє зниження тиску, ймовірно через зміну динаміки рідкої фази та взаємодії з іншими елементами системи. Квадратичний член при  $n^2$  вказує на те, що ефект зміни частоти обертання не є лінійним, а проявляється як зменшення мінімального тиску на великих значеннях частоти обертання, що може бути наслідком нееластичних чи втратних ефектів при дуже високих обертах. Діаметр вхідного отвору  $D_{in}$  має значний негативний вплив на мінімальний тиск, оскільки коефіцієнт при  $D_{in}$  є від'ємним. Збільшення діаметра отвору призводить до зменшення тиску, ймовірно, через зміну розподілу швидкостей рідкої фази та зменшення опору потоку при більших площах перетину. Однак, квадратний член при  $D_{in}^2$  вказує на те, що ефект зміни діаметра не є лінійним. Збільшення діаметра вхідного отвору призводить до значного підвищення мінімального тиску, особливо на великих значеннях діаметра, що свідчить про важливу роль геометричних характеристик отвору у регулюванні потоку рідкої фази.

Таблиця 2.6 – Результати статистичної обробки рівняння (2.39)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	53, 3358	1, 56 623	34, 0537	$4, 37 984 \times 10^{-17}$
a10	-20, 2957	0, 725 021	-27, 9933	$1, 15 924 \times 10^{-15}$
a20	1, 81 922	0, 725 021	2, 50 919	0, 0225 198
a30	-1, 23 306	0, 725 021	-1, 70 072	0, 107 214
a12	1, 19 075	0, 887 966	1, 34 099	0, 197 569
a13	-0, 263 083	0, 887 966	-0, 296 276	0, 770 608
a23	-0, 151 844	0, 887 966	-0, 171 002	0, 866 241
a11	2, 96 394	1, 25 577	2, 36 025	0, 030 475
a22	2, 86 755	1, 25 577	2, 28 349	0, 0355 378
a33	-1, 0056	1, 25 577	-0, 800 782	0, 434 307

	DF	SS	MS
Model	10	93 980, 3	9398, 03
Error	17	160, 851	9, 46 181
Uncorrected Total	27	94 141, 1	
Corrected Total	26	7788, 52	

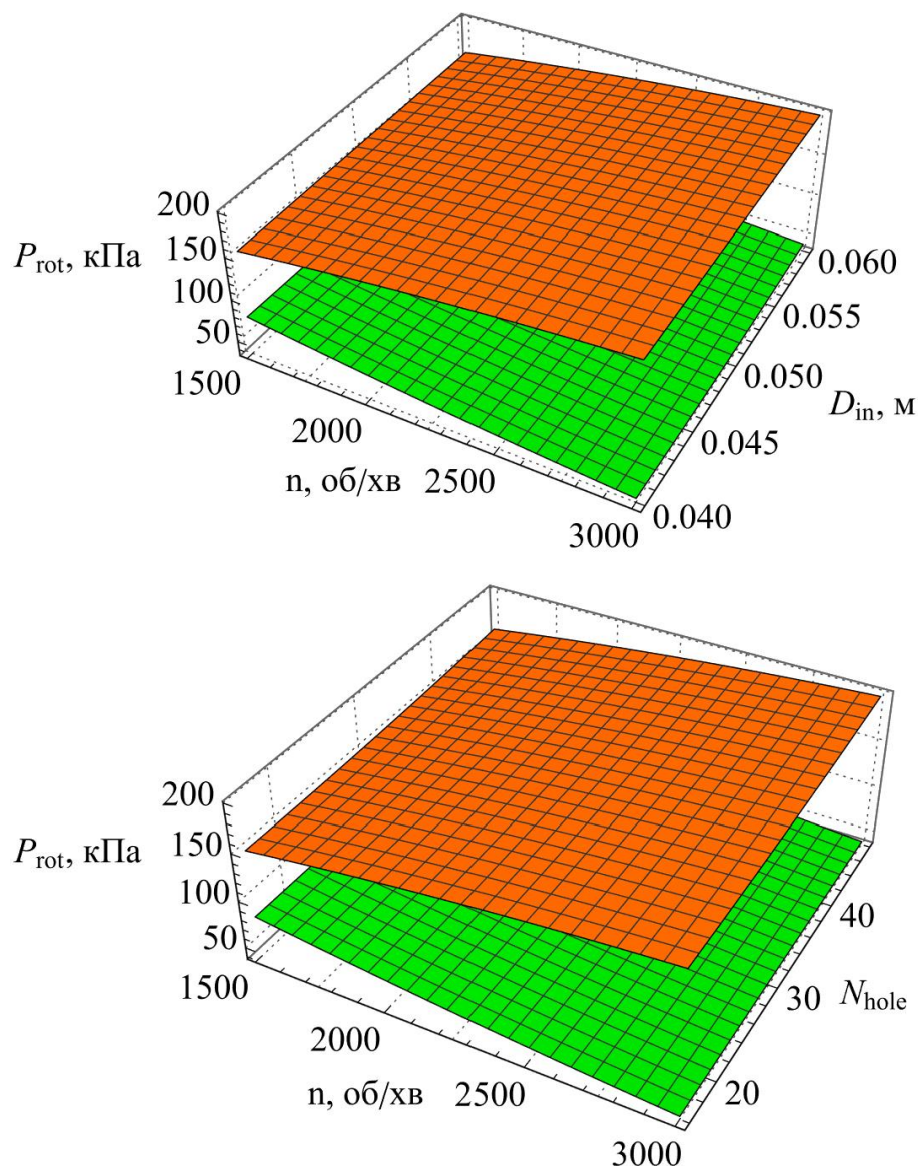


Рисунок 2.15 – Вплив частоти обертання ротора  $n$ , кількості резонаторів  $N_{hole}$  і діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  на максимальний  $P_{in\ max}$  і мінімальний  $P_{in\ min}$  тиски рідкої фази суміші у дифузори

Після проведення обчислень для визначення максимального та мінімального значень числа кавітації за формулами (2.28) і (2.29) вдалося отримати відповідні рівняння регресії, які відображають залежність цих параметрів від факторів досліджень

$$X_{max} = 1,11064 - 0,848984 x_1 + 0,387658 x_1^2 - 0,00531554 x_2 + \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned}
& + 0,0106042 x_1 x_2 - 0,0352261 x_2^2 - 0,287053 x_3 + 0,136147 x_1 x_3 + \\
& \quad + 0,0234448 x_2 x_3 + 0,0760888 x_3^2, \\
X_{\min} & = 0,326981 - 0,545781 x_1 + 0,320963 x_1^2 - 0,00803421 x_2 + \\
& + 0,0211817 x_1 x_2 + 0,00582858 x_2^2 - 0,140631 x_3 + 0,119906 x_1 x_3 + \\
& \quad + 0,00788234 x_2 x_3 + 0,0326018 x_3^2.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Статистична обробка рівнянь (2.41) і (2.42) наведені в табл. 2.7–2.8. В результаті аналізу цих таблиць, а також відповідного скорочення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стюдента і подальшого розкодування рівнянь (2.41) і (2.42), отримуємо остаточну залежність максимального та мінімального значень числа кавітації від досліджуваних факторів

$$\begin{aligned}
X_{\max} & = 8,84186 - 0,0045963 n + 6,8917 \cdot 10^{-7} n^2 - \\
& - 0,0624906 N_{\text{hole}} + 0,0000113456 n N_{\text{hole}} + 0,000297222 N_{\text{hole}}^2,
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
X_{\min} & = 5,85369 - 0,00361516 n + 5,70601 \cdot 10^{-7} n^2 - \\
& - 0,0312719 N_{\text{hole}} + 9,99218 \cdot 10^{-6} n N_{\text{hole}}.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Оскільки обчислене значення  $F(X_{\max}) = 1200,98$  і  $F(X_{\min}) = 607,54$  значно більше табличного значення  $F_{\text{табл}} = 3,59$ , то можна зробити висновок, що модель має статистично значущий вплив.

Максимальне та мінімальне значення числа кавітації залежать від частоти обертання ротора, діаметра вхідного отвору та кількості резонаторів, що можна пояснити з точки зору фізики процесу. Збільшення частоти обертання ротора п спричиняє зниження як максимального, так і мінімального значень числа кавітації через збільшення енергії потоку та зростання динамічного тиску, що сприяє кавітаційному ефекту. Однак квадратичний член  $n^2$  частково компенсує цей ефект, сповільнюючи спадання чисел кавітації при високих частотах. Кількість резонаторів  $N_{\text{hole}}$  також чинить вплив: зі зростанням  $N_{\text{hole}}$  обидва показники кавітації знижуються, оскільки збільшення кількості резонаторів змінює характер гідродинамічного потоку, сприяючи інтенсивнішому утворенню кавітаційних порожнин. Взаємодія між частотою обертання та кількістю резонаторів впливає на мінімальне та максимальне значення числа кавітації, зокрема, наявність додаткового множника  $n \cdot N_{\text{hole}}$  свідчить про комбінований вплив цих факторів, що визначає інтенсивність кавітації в потоці.

Таким чином, ці залежності описують складний взаємозв'язок між параметрами системи та процесами утворення кавітації у потоці рідкої фази суміші.

Таблиця 2.7 – Результати статистичної обробки рівняння (2.41)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	1, 11 064	0, 0383 908	28, 9299	$6, 69 774 \times 10^{-16}$
a10	-0, 848 984	0, 0177 715	-47, 7722	$1, 46 964 \times 10^{-19}$
a20	-0, 00 531 554	0, 0177 715	-0, 299 105	0, 768 486
a30	-0, 287 053	0, 0177 715	-16, 1525	$9, 51 263 \times 10^{-12}$
a12	0, 0106 042	0, 0217 655	0, 487 203	0, 632 337
a13	0, 136 147	0, 0217 655	6, 25 516	$8, 71 085 \times 10^{-6}$
a23	0, 0234 448	0, 0217 655	1, 07 715	0, 296 461
a11	0, 387 658	0, 0307 811	12, 594	$4, 78 831 \times 10^{-10}$
a22	-0, 0352 261	0, 0307 811	-1, 14 441	0, 268 313
a33	0, 0760 888	0, 0307 811	2, 47 193	0, 0243 026

	DF	SS	MS
Model	10	68, 2742	6, 82 742
Error	17	0, 0966 428	0, 00 568 487
Uncorrected Total	27	68, 3708	
Corrected Total	26	15, 7285	

При частоті обертання ротора  $n = 2747$  об/хв та кількості резонаторів  $N_{\text{hole}} = 48$ , значення числа кавітації досягають своїх меж: мінімальне становить  $X_{\text{min}} = 0,04$ , а максимальне –  $X_{\text{max}} = 0,45$ . Такий режим відповідає явищу плівкової кавітації, коли кавітаційна порожнина відокремлюється від основного потоку рідини у стійкому режимі. При цьому зміна діаметра вхідного отвору  $D_{\text{in}}$  не впливає на отримані значення числа кавітації. Візуалізація залежностей (2.41)–(2.42) у вигляді графічних інтерпретацій представлена на рисунок 2.16, де послідовно фіксувалися окремі фактори дослідження.

Отримані результати свідчать про те, що частота обертання ротора та кількість резонаторів є визначальними параметрами, які впливають на інтенсивність кавітаційного процесу. Зростання частоти обертання сприяє збільшенню швидкості

поток, що призводить до зміни тиску та активізації кавітації. Водночас більша кількість резонаторів може сприяти утворенню більш стабільних кавітаційних порожнин за рахунок локальних змін швидкості потоку. Відсутність впливу діаметра вхідного отвору на число кавітації може бути пов'язана зі збереженням загального режиму обтікання рідиною конструктивних елементів системи, що підтверджує важливість саме динамічних параметрів потоку.

Таблиця 2.8 – Результати статистичної обробки рівняння (2.42)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	0, 326 981	0, 0254 595	12, 8432	$3, 53 649 \times 10^{-10}$
a10	-0, 545 781	0, 0117 854	-46, 3097	$2, 48 375 \times 10^{-19}$
a20	-0, 00803 421	0, 0117 854	-0, 681 706	0, 504 607
a30	-0, 140 631	0, 0117 854	-11, 9326	$1, 09 669 \times 10^{-9}$
a12	0, 0211 817	0, 0144 342	1, 46 747	0, 160 506
a13	0, 119 906	0, 0144 342	8, 30 711	$2, 17 724 \times 10^{-7}$
a23	0, 00788 234	0, 0144 342	0, 546 089	0, 5921
a11	0, 320 963	0, 020 413	15, 7235	$1, 46 289 \times 10^{-11}$
a22	0, 00582 858	0, 020 413	0, 285 533	0, 778 686
a33	0, 0326 018	0, 020 413	1, 59 711	0, 128 661

	DF	SS	MS
Model	10	15, 1895	1, 51 895
Error	17	0, 0425 024	0, 00250 014
Uncorrected Total	27	15, 232	
Corrected Total	26	6, 56478	

Враховуючи формулу (2.30) і (2.32) отримуємо характерну залежність продуктивності диспергатора без врахування абсолютних значень, яка представлена на рисунку 2.17. Умова максимізації цього показника дає можливість визначити діаметр вхідного отвору  $D_{in} = 0,06$  м.

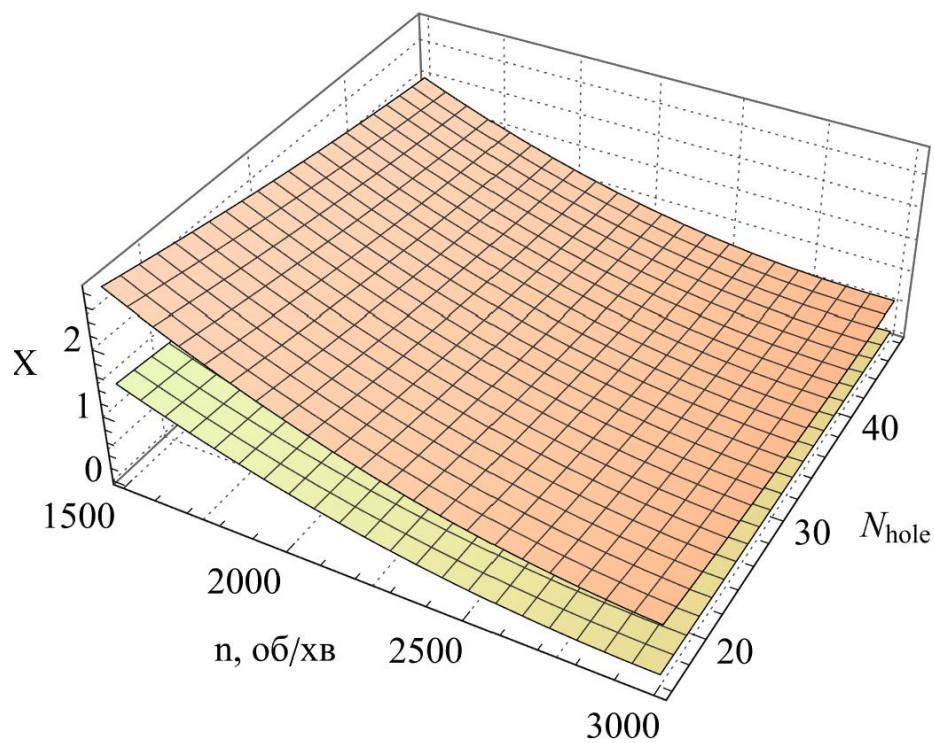
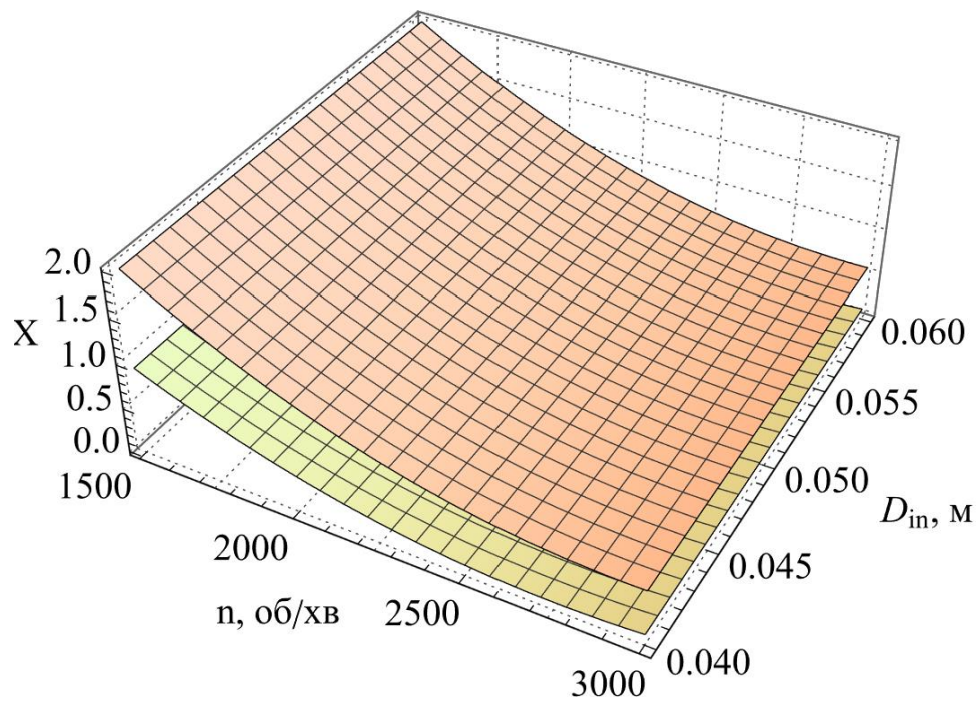


Рисунок 2.16 – Вплив частоти обертання ротора  $n$ , кількості резонаторів  $N_{hole}$  і діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  на максимальне і мінімальне числи кавітації  $X_{max}$ ,  $X_{min}$

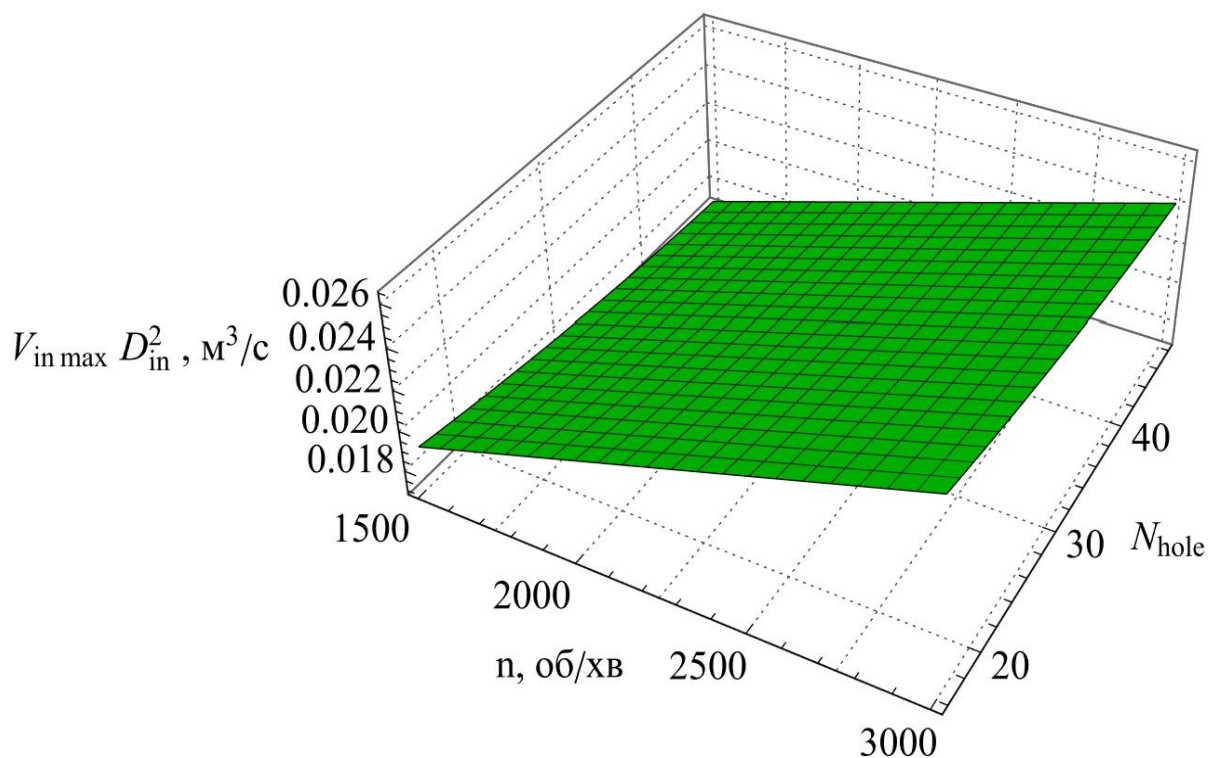
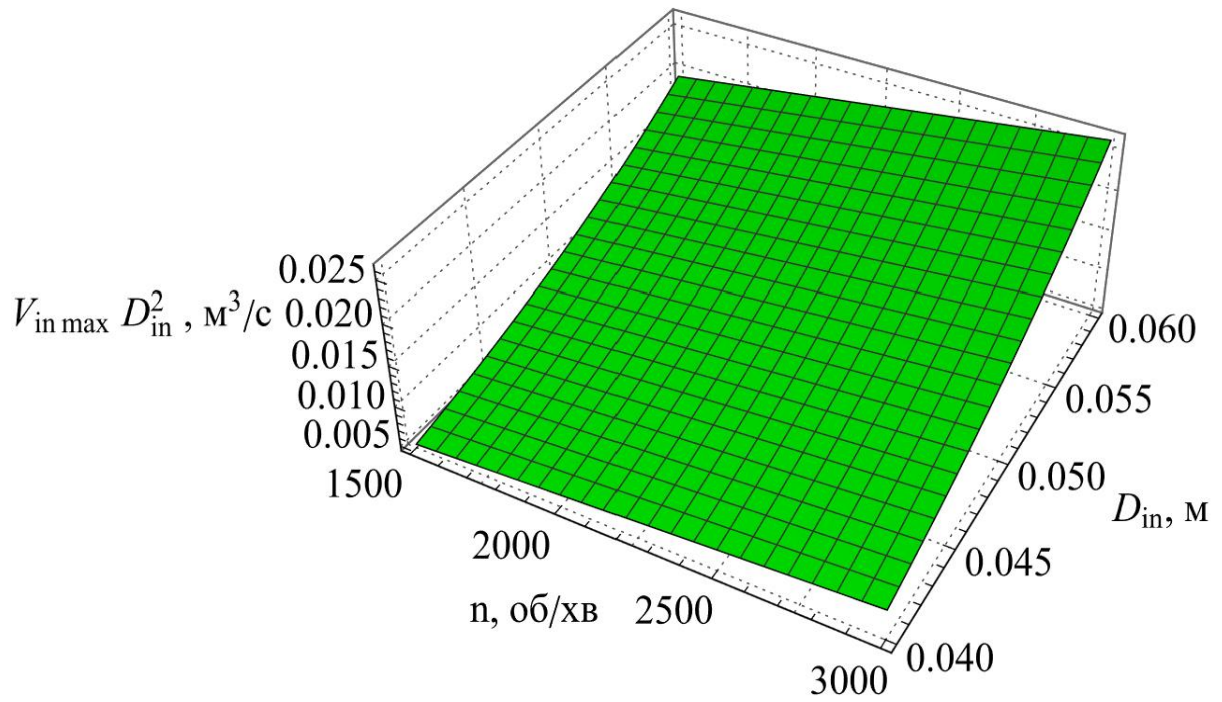


Рисунок 2.17 – Характерна залежність продуктивності диспергатора від частоти обертання ротора  $n$ , кількості резонаторів  $N_{hole}$  і діаметра вхідного отвору  $D_{in}$

## 2.6 Висновки до розділу

1. Розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що складається з електродвигуна, підшипникового вузла, вала з лопатками та резонаторами ротора, статора з наскрізним отвором і дифузорами, вхідних патрубків для подачі сипких і рідких компонентів, вихідного патрубка, кришки та робочої камери. Особливістю конструкції є те, що при поєднанні конфузоров ротора та резонаторів статора утворюються лопаті, форма яких повторює кривизну робочого колеса відцентрового насоса.

2. У процесі теоретичних досліджень була створена методика визначення ключових параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, зокрема кількості отворів у роторі  $k_p$  та статорі  $k_c$ , ширини отвору  $z$  у роторі та статорі, а також довжини кола  $i$ , де відбувається їхнє зіткнення. Встановлено, що значення кількості отворів у роторі та статорі має варіюватися в межах від 16 до 48. На основі теорії Жуговського, яка описує гідравлічний удар, було розроблено методику для визначення швидкості руху суміші в отворах і каналах кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що дозволило розрахувати його потужність і продуктивність. Згідно з отриманими розрахунками, продуктивність кавітаційного диспергатора-гомогенізатора досягає 50 кг/год, а його потужність – до 2,1 кВт.

4. Чисельне моделювання, проведене за допомогою програмного пакету Simcenter Star-CCM+, засвідчило, що у запропонованому роторному кавітаційному диспергаторі-гомогенізаторі відбуваються процеси кавітаційного диспергування та гомогенізації. Аналіз отриманих даних щодо розподілу тиску, швидкісної динаміки рідкої фази та концентрації газоподібної фази рідини у дифузори підтвердив ефективність запропонованої конструкції. Це свідчить про доцільність подальших досліджень, спрямованих на визначення оптимальних параметрів її функціонування.

5. Чисельне моделювання роботи роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора дозволило визначити залежності мінімальної ( $\min$ ) та максимальної ( $\max$ ) швидкості руху рідкої фази суміші як у дифузори ( $V_{rot}$ ), так і у вхідному отворі

( $V_{in}$ ) від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  і кількості резонаторів  $N_{hole}$ . При значеннях  $n = 3000$  об/хв,  $D_{in} = 0,06$  м і  $N_{hole} = 16$  максимальна швидкість суміші у вхідному отворі  $V_{in\ max}$  досягає 7,3 м/с. У той же час у дифузорі найвище значення швидкості  $V_{rot\ max}$ , яке становить 27,5 м/с, спостерігається за тих самих умов частоти та діаметра отвору, але за  $N_{hole} = 48$ .

6. За результатами чисельного моделювання отримані залежності мінімального ( $\min$ ) і максимального ( $\max$ ) тиску рідкої фази суміші у дифузорі ( $P_{rot}$ ) та у вхідному отворі ( $P_{in}$ ) від параметрів частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  і кількості резонаторів  $N_{hole}$  також були визначені. Найвище значення тиску рідкої фази у вхідному отворі  $P_{in\ max}$  становить 154,4 кПа, так само як і у дифузорі  $P_{rot\ max}$ , що спостерігається за умов  $n = 3000$  об/хв,  $D_{in} = 0,06$  м,  $N_{hole} = 48$ .

7. Максимальне та мінімальне значення числа кавітації  $X_{\max}$  і  $X_{\min}$ , які залежать від кількості резонаторів  $N_{hole}$ , діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  та частоти обертання ротора  $n$ , розглядаються як основний критерій якісної оцінки кавітаційного процесу в досліджуваному обладнанні. При частоті обертання ротора  $n = 2747$  об/хв та кількості резонаторів  $N_{hole} = 48$ , значення числа кавітації досягають своїх меж: мінімальне становить  $X_{\min} = 0,04$ , а максимальне –  $X_{\max} = 0,45$ . Такий режим відповідає явищу плівкової кавітації, коли кавітаційна порожнина відокремлюється від основного потоку рідини у стійкому режимі. Умовою максимізації продуктивності диспергатора дає можливість визначити діаметр вхідного отвору  $D_{in} = 0,06$  м.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [147, 148, 149].

## **3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА РІДКИХ КОРМІВ**

### **3.1 Мета і програма експериментальних досліджень**

Метою експериментальних досліджень є перевірка роботи кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів та емпіричне обґрунтування його раціональних конструктивно-технологічних параметрів. Це дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу приготування рідких кормів та забезпечити їх необхідну якість.

Програмою досліджень передбачено виконання низки ключових завдань:

1. Розробка та виготовлення експериментального зразка – на цьому етапі досліджень було запроектовано і виготовлено експериментальний зразок кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, а також сформовано та укомплектовано спеціалізований стенд для випробувань.

2. Розробка методики досліджень – етап, який передбачав розроблення алгоритму експериментальних досліджень, який враховував усі основні фактори, що можуть впливати на якість кінцевого продукту та ефективність робочого процесу.

3. Дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів – зокрема, визначався вплив таких параметрів, як частота обертання ротора, діаметр вхідного отвору статора, об'єм вихідної суміші, а також температура і в'язкість кінцевого продукту.

4. Статистична обробка отриманих даних – після проведення серії експериментів здійснювалася обробка результатів з використанням сучасних статистичних методів та програмних засобів, що дозволило оцінити достовірність отриманих залежностей.

5. Визначення оптимальних параметрів роботи – фінальний етап, який спрямований на визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів роботи пристрою, що забезпечують максимальну продуктивність і мінімальні енергетичні витрати.

### 3.2 Проектування і виготовлення експериментального зразка обладнання

Перед початком досліджень було запроєктовано і виготовлено експериментальний зразок кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, призначений для виробництва гомогенних, напіврідких кормосумішей (рідких кормів) підвищеної засвоюваності.

Розробка експериментального зразка кавітаційного диспергатора-гомогенізатора була проведена базуючись на результатах попередніх теоретичних досліджень і на результатах чисельного моделювання фізичних процесів кавітаційно-диспергаційної обробки біологічно-активних кормових компонентів у рідкому середовищі (розділ 2). Виготовлено конструкторську документацію для виготовлення експериментального зразку кавітаційного диспергатора-гомогенізатора (додаток В). 3D модель експериментального зразку кавітаційного диспергатора-гомогенізатора та складальні моделі ротора, статора і валу наведена на рис. 3.1.

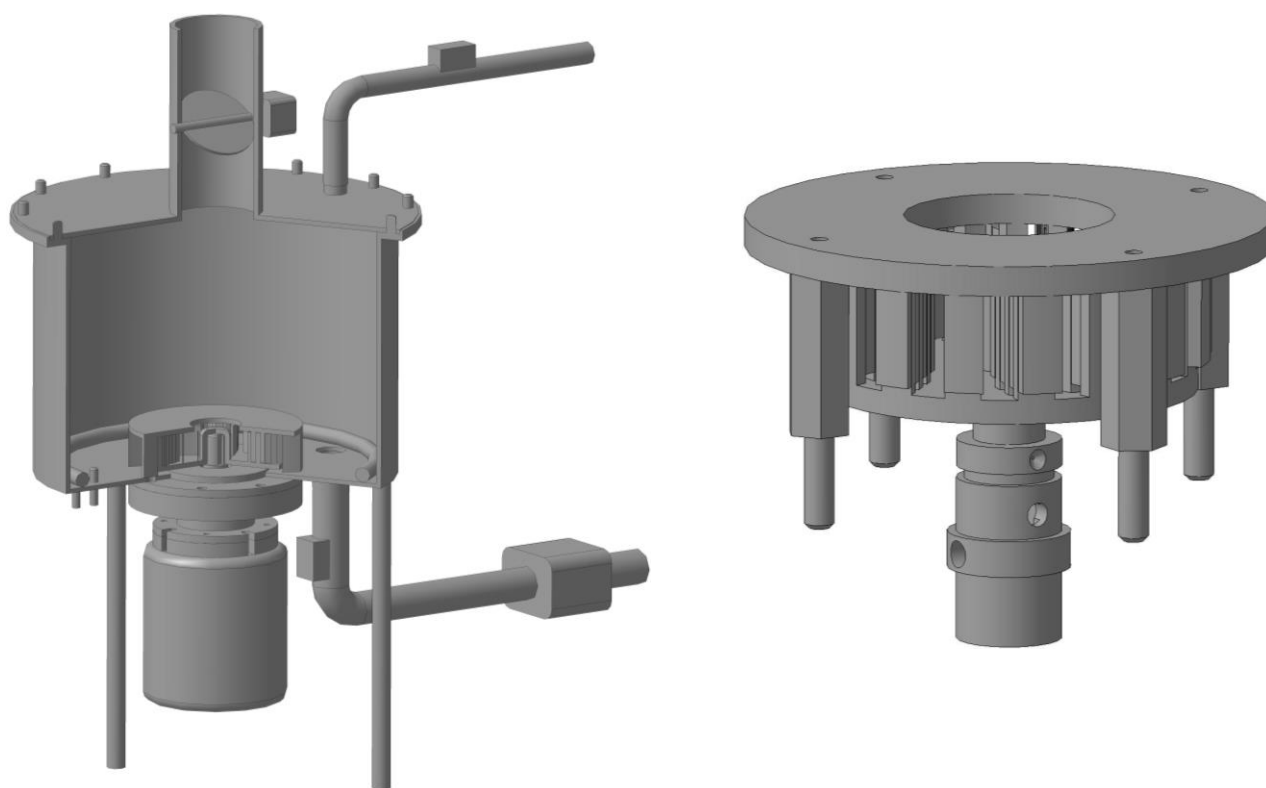


Рисунок 3.1 – 3D модель експериментального зразку кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

Було виготовлено експериментальний зразок кавітаційного диспергатора-гомогенізатора для проведення випробувань. Виготовлення робочих органів (ротора і статора) відбулось на спеціалізованому фрезерному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК). Процес виготовлення наведений на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Процес виготовлення на фрезерному верстаті з ЧПК ротора і статора кавітаційного диспергатора-гомогенізатора

Експериментальний зразок кавітаційного диспергатора-гомогенізатора у зібраному вигляді показано на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Експериментальний зразок кавітаційного диспергатора-гомогенізатора у зібраному вигляді

### 3.3 Створення експериментального стенду і налаштування додаткового обладнання

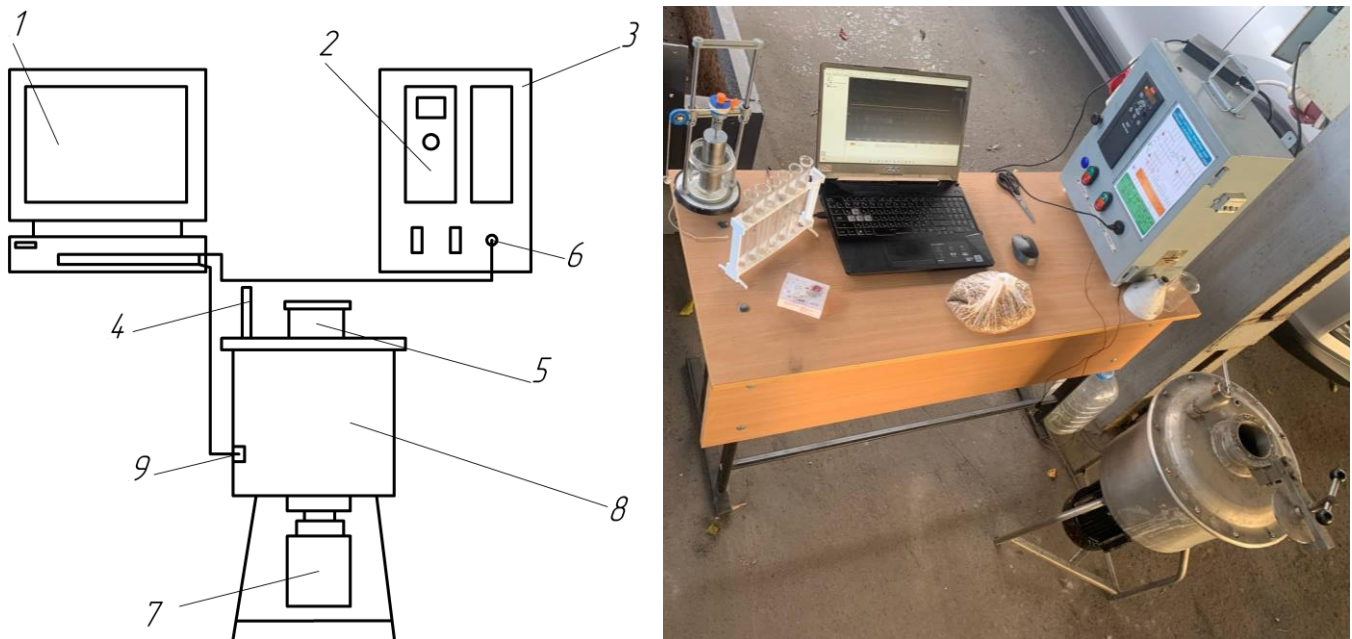
Експериментальні дослідження, проводились на роторному кавітаційному диспергаторі-гомогенізаторі рідких кормів для свиней, мали на меті визначити ефективність процесу гомогенізації та диспергування двокомпонентної суміші, що складалася з води та сипкої складової. В якості сипкої складової використовувались 3 зернових культури, а саме: ячмінь, пшениця і соя. Використання саме таких зернових культур обумовлене їх високою поживною цінністю та добрим засвоєнням у свинарстві, а також здатністю утворювати стійкі суспензії при механічній обробці. Перед початком експерименту була проведена ретельна підготовка як самого обладнання, так і вихідних компонентів, щоб забезпечити точність отриманих результатів. Дослідний стенд зображений на рисунку 3.4.

Першим етапом підготовки стало калібрування вимірювальних пристроїв, які використовувалися для контролю параметрів експерименту. Проведено калібрування термістора NTC MF52A 3950 10k, який має діапазон вимірюваних температурах в межах від  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$  з використанням ртутного термометра (похибка –  $0,1^{\circ}\text{C}$ ), шляхом їх одночасного занурення в ємність з нагрітою водою. Калібрувальна крива термістора наведена на рисунок 3.5.

Наступним етапом була перевірена точність регулювання частотного перетворювача Danfos Micro Drive FC-051 у складі блока керування (рисунок 3.6), що регулює оберти ротора, завдяки безконтактному тахометру Venetech GM8905.

Безконтактний тахометр Venetech GM8905 – вимірювальний прилад, призначений для визначення швидкості обертання різних механізмів без необхідності фізичного контакту з рухомими частинами. Він використовує лазерну технологію для фіксації відбитого сигналу, що забезпечує високу точність вимірювань та зручність використання. Пристрій підтримує широкий діапазон вимірювань, що становить 2,5–99999 об/хв (RPM), дозволяючи застосовувати його для аналізу роботи електродвигунів, насосів, вентиляторів, шківів, конвеєрних стрічок та інших обертових механізмів. Висока точність вимірювання становить  $\pm 0,05\%$ , що гарантує

надійні результати навіть у складних умовах експлуатації.



1 – персональний комп’ютер із програмним забезпеченням МСТ-10; 2 – частотний регулятор Danfos Micro Drive FC-05; 3 – блок керування електродвигуном, обладнаний захистом від перенавантаження; 4 – горловина для завантаження рідких компонентів суміші; 5 – горловина для завантаження сипких компонентів суміші; 6 – інтерфейс RS-485 для зв’язку із персональним комп’ютером; 7 – трифазний асинхронний електродвигун; 8 – роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор; 9 – термістор NTC MF52A 3950 10k

Рисунок 3.1 – Дослідний стенд роторний диспергатор-гомогенізатор рідких кормів для свиней

Danfoss Micro Drive FC-051 (рис. 3.6) – це перетворювач частоти, розроблений для керування електродвигунами змінного струму. Він підтримує роботу з трифазними асинхронними двигунами та забезпечує ефективне керування швидкістю обертання, що дозволяє зменшити енергоспоживання та підвищити продуктивність обладнання. Перетворювач частоти працює з вхідною напругою 380–480 В, та підтримує частотний діапазон від 0 до 200 Гц. Вихідна частота може регулюватися в широкому діапазоні, що забезпечує точне налаштування швидкості двигуна

відповідно до вимог технологічного процесу. Потужність пристрою варіюється від 0,18 до 7,2 кВт, що робить його придатним для застосування з різними електродвигунами.

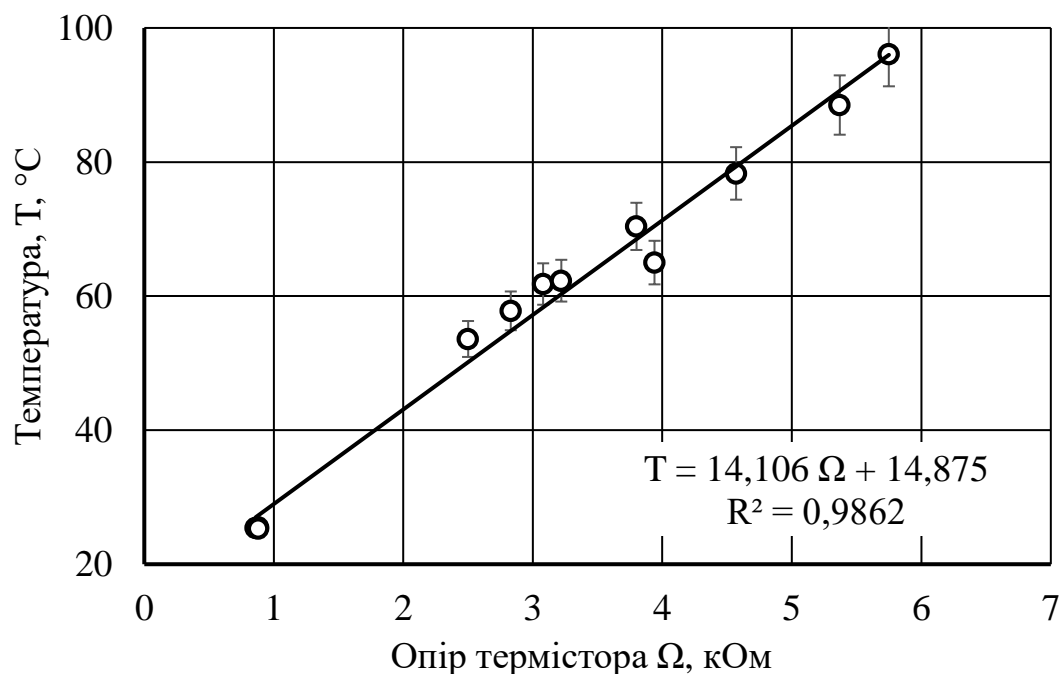


Рисунок 3.5 – Калібрувальна крива термістора NTC MF52A 3950 10k

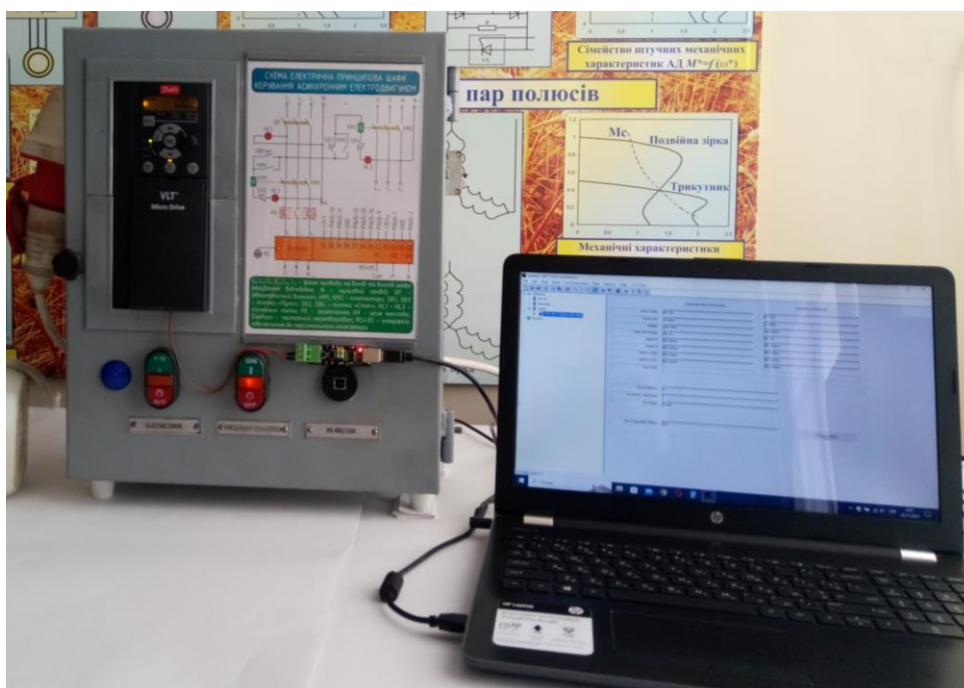


Рисунок 3.6 – Блок керування на основі частотного регулятора Danfoss Micro Drive FC-051

Частотний регулятор підключений до живлення за допомогою спеціальної шафи керування, в середині якої встановлена два електромагнітних пускача із захистом від перенавантаження. Схема шафи керування приведена на рисунку 3.8. Інтерфейс керування включає вбудовану панель з LED-дисплеєм і клавіатурою, що дозволяє швидко налаштувати параметри.

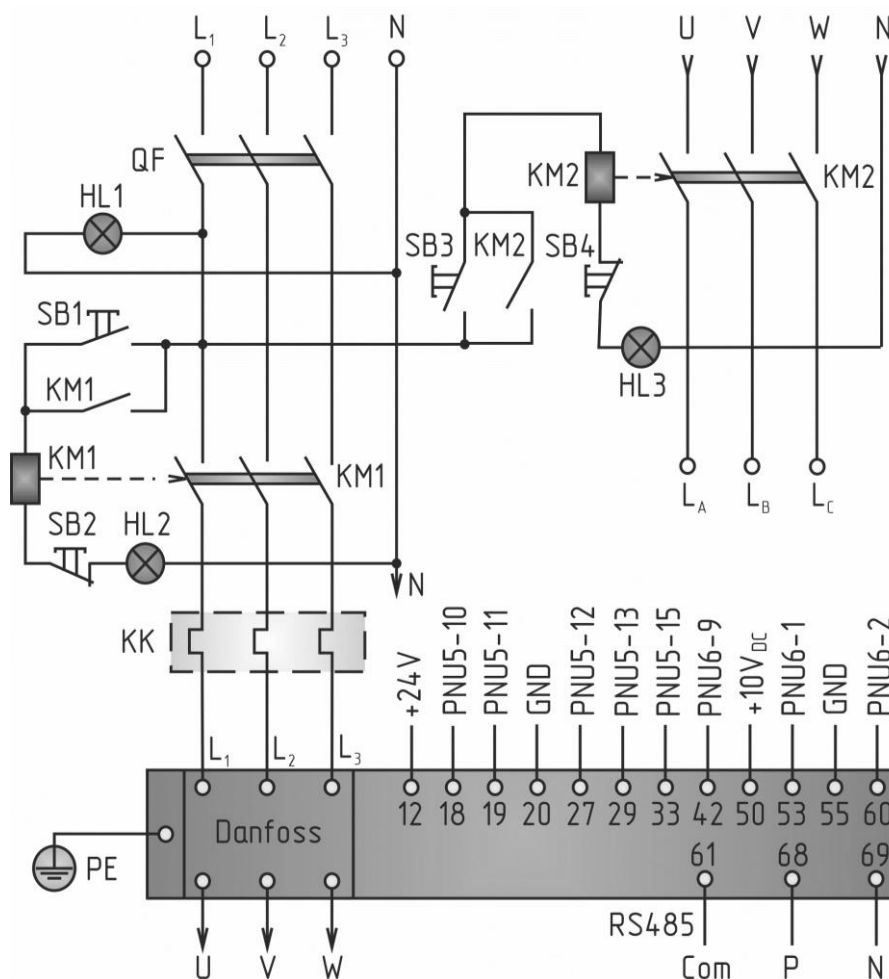


Рисунок 3.8 – Електрична схема підключення частотного регулятора Danfoss Micro Drive FC-051

Наступним етапом було налаштування програмного забезпечення МСТ10, зображеного на рисунку 3.9 що відповідало за зчитування даних з частотного перетворювача Danfoss Micro Drive FC-051 у реальному часі. На екран комп'ютера було виведено два канали даних з частотного перетворювача, на екран виводились дані в реальному часі щодо частоти змінного струму і потужності, що споживається

електродвигуном привода диспергатора-Гомогенізатора.

Untitled - MCT 10 Set-up Software

File Edit View Insert Communication Tools Options Help v5.70.6852

ID	Name	Setup 1	Setup 2	Unit
003	Regional Settings	[0] International	[0] International	
004	Operating State at Power-up (...)	[1] Forced stop, ref...	[1] Forced stop, ref...	
010	Active Set-up	[1] Set-up 1	[1] Set-up 1	
011	Edit Set-up	[1] Set-up 1	[1] Set-up 1	
012	Link Setups	[20] Linked	[20] Linked	
031	Custom Readout Min Value	0.00	0.00	
032	Custom Readout Max Value	100.00	100.00	
040	[Hand on] Key on LCP	[1] Enabled	[1] Enabled	
041	[Off / Reset] Key on LCP	[1] Enable All	[1] Enable All	
042	[Auto on] Key on LCP	[1] Enabled	[1] Enabled	
050	LCP Copy	[0] No copy	[0] No copy	
051	Set-up Copy	[0] No copy	[0] No copy	
060	Main/Quick Menu Password	0	0	
061	Access to Main/Quick Menu ...	[0] Full access	[0] Full access	
100	Configuration Mode	[0] Speed open loop	[0] Speed open loop	
101	Motor Control Principle	[1] VVC+	[1] VVC+	
103	Torque Characteristics	[0] Constant torque	[0] Constant torque	
105	Hand Mode Configuration	[2] As mode par 1-00	[2] As mode par 1-00	
120	Motor Power	[13] 4.00 kW - 5.40Hp	[13] 4.00 kW - 5.40Hp	kW
122	Motor Voltage	400	400	V
123	Motor Frequency	50	50	Hz
124	Motor Current	1.20	1.20	A
125	Motor Nominal Speed	1365	1365	rpm
129	Automatic Motor Tuning (AMT)	[0] Off	[0] Off	
130	Stator Resistance (Rs)	6.50	6.50	ohm
133	Stator Leakage Reactance (X1)	19.23	19.23	ohm
135	Main Reactance (Xh)	480.76	480.76	ohm
150	Motor Magnetisation at Zero ...	100	100	%
152	Min Speed Normal Magnetisi...	0.0	0.0	Hz
155.0	U/f Characteristic - U	0	0	V
155.1	U/f Characteristic - I	0	0	V

For Help, press F1

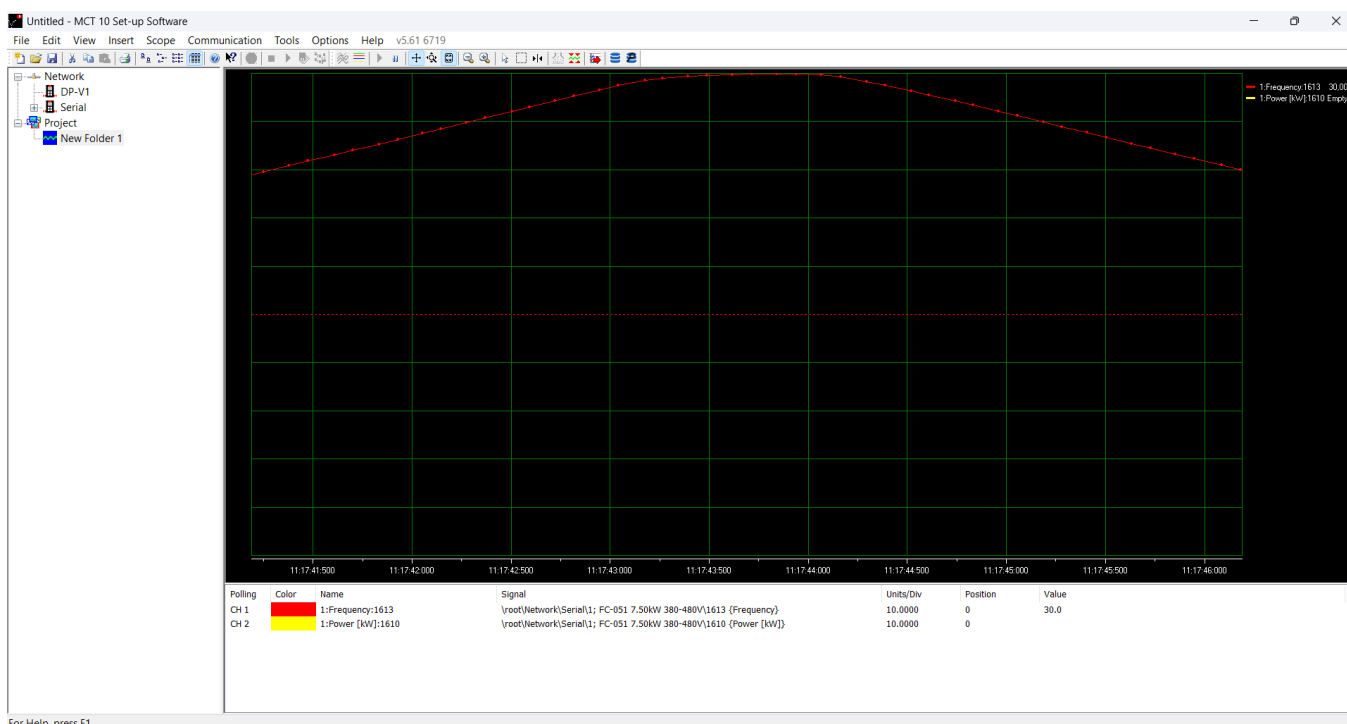


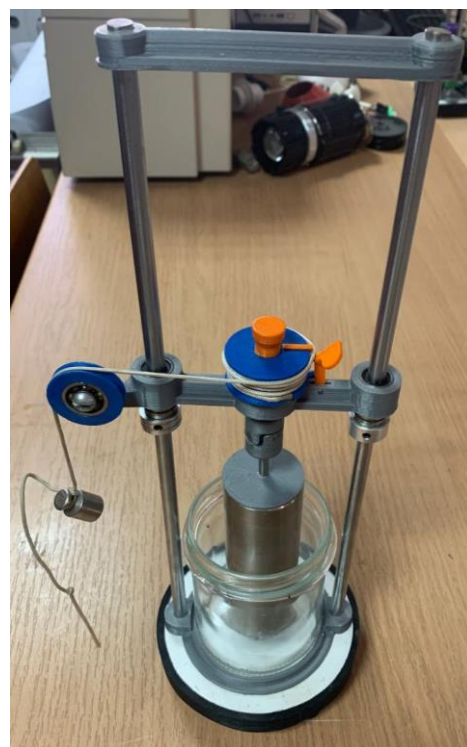
Рисунок 3.9 – Програмне забезпечення MCT-10

Наступним етапом було калібрування ротаційного віскозиметра (рис. 3.10, а),

власного виготовлення. Калібрування відбувалось за допомогою кулькового віскозиметра (рис. 3.10, б), який використовувався для аналізу в'язкості суміші. Для калібрування було обрано 4 речовини, зі заздалегідь відомою кінематичною в'язкістю, а саме ATF (Automatic Transmission Fluid), автомобільне мастило для двигунів 10w40, індустриальне мастило I-40, соняшкову олію. Всі речовини проходили вимірювання при однаковій температурі у 40°C. Далі еталонні речовини пройшли вимірювання в'язкості на ротаційному віскозиметрі власного виготовлення.



а



б

Рисунок 3.10 – Ротаційний віскозиметр власного виготовлення (а) і кульковий віскозиметр (б)

Вимірювання на розробленому ротаційному віскозиметрі відбувалось методом вимірювання часу розкручування циліндра зануреного у рідину. В верхній частині приладу підвішено обертовий циліндр, який занурювався у рідину на визначену глибину. На барабан приєднаний до обертового циліндра намотаний шнур, до якого підвішено вантаж. Коли починається відлік часу, знімається фіксація з обертового

барабану і він починає прокручуватись під дією сили що діє на навантажений шнур. Циліндр розкручується завжди на однакову кількість обертів, після досягнення кінцевої точки обертання, відлік часу завершується.

Після калібрування віскозиметра на еталонних речовинах із заздалегідь відомою кінематичною в'язкістю була отримана крива калібрування і математична залежність, зображена на рис. 3.11.

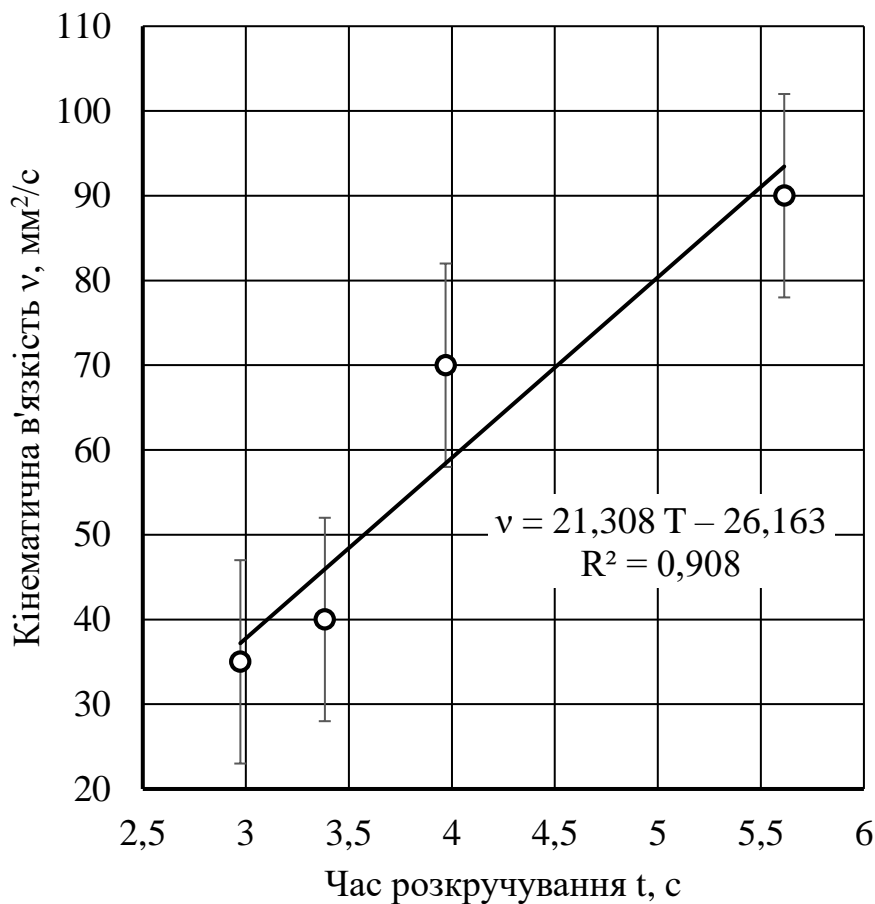


Рисунок 3.11 – Крива калібрування віскозиметра за еталонними величинами

Наступним кроком стало підготування сировини. Сировина була попередньо очищена від домішок та механічних включень, після чого проводилося визначення його початкової вологості за допомогою вологоміра Radwag MA 110.R, зображеного на рисунку 3.12. Вологомір Radwag MA 110.R – це високоточний лабораторний прилад для визначення вологості матеріалів, має максимальне навантаження 110 г, що дозволяє аналізувати різні зразки з високою точністю. Дискретність вимірювання

становить 0,1 мг, що забезпечує високу точність визначення вмісту вологи навіть у складних дослідженнях. Пристрій оснащений інфрачервоною системою нагріву, яка підтримує широкий діапазон температур від 40°C до 160°C, з можливістю точного регулювання з кроком 1°C. Завдяки цьому можна підбирати оптимальні параметри сушіння для різних матеріалів, що особливо важливо для чутливих зразків, які можуть змінювати свої властивості при перегріві. Розмір сушильної камери адаптований для роботи з різними матеріалами, а тензометричний датчик гарантує стабільність зважування, забезпечуючи точність вимірювань до 0,01% вологості. Інтерфейс пристрою включає цифровий дисплей з інтуїтивним меню, що полегшує керування та налаштування режимів роботи.



Рисунок 3.12 – Вологомір Radwag MA 110.R

Вологість зерна становила  $7,6 \pm 0,9$  %, що дозволяло визначити точне співвідношення води та сухої речовини у готовій суміші. Для приготування дослідного зразка було вибрано співвідношення води до зернової маси 6,75:1, що

забезпечувало концентрацію сухої речовини на рівні  $12 \pm 0,9$  %. Загальна маса дослідної суміші складала 5 кг, з яких 0,65 кг припадало на зернову складову, а решта 4,35 кг – на воду.

Фракційний склад (0–0,5 мм)  $k_{fr}$  визначався з використанням ситового класифікатора з розміром сит 1 мм, 1,5 мм, 2 мм. В ході процесу приготування кормової суміші, через кожні 10 хв з суміші відбирались проби для визначення фракційного складу. Проба розміщувалась в ситах, які були розташовані від найменшого до найбільшого діаметру отвору, таким чином щоб найбільш подрібнені частини опустились до самого низу. Після відбирання проб на лабораторних вагах ТВЕ-0,3 зважувався вміст кожного з сит. Фракційний склад визначався у відсотковому співвідношенні відносно величини проби, яка відбиралась. Процес зважування сит зображений на рис. 3.13.



Рисунок 3.13 – Процес визначення фракційного складу (0–0,5 мм)  $k_{fr}$

Показник розшарованості суміші ( $i_d$ , %) визначали шляхом відстоювання зразка суміші у пробірці протягом 5 годин, з подальшим розрахунком відношення абсолютного значення різниці вмісту заповненого у верхній і нижній частині

ущільненої складової. При  $i_d = 0\%$  – немає розшарованості, а при  $i_d = 100\%$  – повна розшарованість.



Рисунок 3.14 – Відстоювання суміші для визначення показника розшарованості  $i_d$

Дослідження розміру часток проводились за допомогою лабораторного мікроскопа Violam ЛОМО С-11 який є ефективним інструментом для аналізу розміру часток у гомогенній суміші, оскільки дозволяє отримати зображення частинок, оцінити їхній розмір та рівномірність розподілу в рідкому середовищі. Перед аналізом проводилась підготовка зразка, що включає відбір досліджуваної суміші, нанесення краплі на чисте предметне скло з використанням покривного скла для рівномірного розподілу частинок. Перед початком дослідження мікроскоп Violam ЛОМО С-11 (рисунок 3.15) налаштовували, вибираючи відповідне збільшення та коригуючи освітлення. Після цього проводили оцінку морфології частинок, що давало змогу визначити рівень гомогенізації.

Дослідження стабільності суміші здійснювалось шляхом порівняння характеристик частинок одразу після гомогенізації та через певний проміжок часу. Мікроскопічний аналіз дозволяє визначити реальні розміри частинок, оцінити рівномірність розподілу дисперсної фази, встановити ефективність гомогенізації та

дослідити стабільність отриманої суміші.

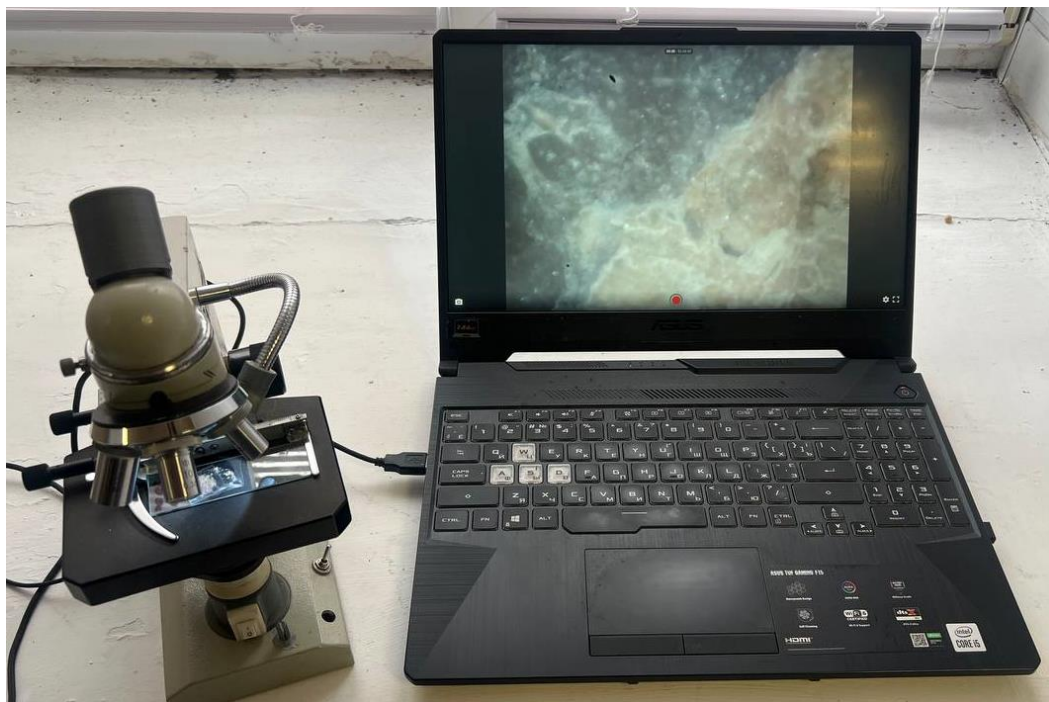


Рисунок 3.15 – Лабораторний мікроскоп Violan ЛОМО С-11

### 3.4 Методика експериментальних досліджень

Процес проведення експериментальних досліджень наведено на рис. 3.16.



Рисунок 3.16 – Процес проведення експериментальних досліджень

Конструкція експериментального зразка гомогенізатора-диспергатора та використання обладнання стенду передбачало можливість зміни конструктивно-технологічних параметрів і вимірювання показників робочого процесу: діаметр вхідного отвору статора  $D_{in}$  від  $0,04 \pm 0,001$  м до  $0,07 \pm 0,001$  м за рахунок зміни фланців; частота обертання ротора  $n$  від 0 об/хв до  $3000 \pm 1$  об/хв за допомогою частотного перетворювача; об'єм завантажених компонентів  $V$  до  $0,34$  м<sup>3</sup>; динаміку температури суміші в ємності гомогенізатора-диспергатора за допомогою датчика температури від  $0$  °С до  $100 \pm 0,1$  °С із відтвореністю 0,5 с; динаміку потужності асинхронного електродвигуна гомогенізатора-диспергатора за допомогою частотного перетворювача Danfoss Micro Drive FC-051 від 0 кВт до  $2,00 \pm 0,01$  кВт із відтвореністю 0,5 с.

На основі проведеного чисельного моделювання та аналізу літературних джерел для проведення експериментальних досліджень пресу було відібрано три фактори, які найбільш вагомо впливають на робочий процес і обрано їх натуральні значення на нульовому рівні та рівні їх варіювання. Інтервали і рівні варіювання факторів при проведенні досліджень наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Рівні і інтервали варіювання факторів при проведенні експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора рідких кормів

Рівні і інтервали варіювання	Кодоване значення	Фактори і їх позначення		
		Частота обертання ротора $n$ , об/хв	Діаметр вхідного отвору статора $D_{in}$ , м	Час роботи $t$ , с
Верхній рівень	+ 1	3000	0.06	1800
Основний рівень	0	2250	0.05	1200
Нижній рівень	- 1	1500	0.04	600
Інтервал варіювання	$\Delta$	750	0.01	600

В якості критеріїв оптимізації було прийнято: вміст частинок розміром 0–0,5 мм в суміші ( $k_{fr}$ , %); показник розшарованості суміші ( $i_d$ , %); температура суміші в кінці процесу ( $T$ , °С); кінематична в'язкість суміші ( $\nu$ , %); споживаної потужність електродвигуна ( $N$ , кВт); витрати енергії ( $E$ , МДж); питомі витрати енергії ( $E_Q$ , МДж/кг). Вміст частинок розміром 0–0,5 мм в суміші ( $k_{fr}$ , %) визначали шляхом

розділення її на фракції на лабораторних решетах і подальшого зважування на електронних вагах.

Витрати енергії ( $E$ , МДж) розраховувалися, як добуток споживаної потужності електродвигуна і тривалості роботи обладнання. Питомі витрати енергії ( $E_Q$ , МДж/кг) визначали, як відношення потужності, що споживається до продуктивності кавітаційного гомогенізатора-диспергатора із урахуванням вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші. Продуктивність кавітаційного гомогенізатора-диспергатора ( $Q$ , кг/год) визначали, як відношення маси вихідної суміші до часу роботи.

Для визначення впливу кожного з факторів на критерії оптимізації процесу приготування рідкого корму проведені дослідження за матрицею D-оптимального плану Бокса-Бенкіна другого порядку для трьох факторів із загальною кількістю дослідів – 15. Кожен дослід проводився у триразовій повторності.

### 3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних

Для забезпечення достовірності та точності отриманих експериментальних результатів була застосована комплексна методика статистичної обробки даних. Вона включала в себе перевірку відповідності результатів нормальному розподілу, визначення впливу технологічних факторів, а також оцінку достовірності отриманих залежностей.

Експерименти по визначенню режимних параметрів обладнання проводились з використанням методики планування багатofакторного експерименту, яка дозволила визначити математичні моделі процесів у вигляді рівнянь регресії (полінома) другого порядку:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2, \quad (3.1)$$

де  $x_i$  – закодоване значення фактору, який змінюється в межах від  $-1$  до  $+1$ ;  $y$  – значення критерію досліджень;  $a_{ij}$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Основне завдання регресійного аналізу полягає у визначенні коефіцієнтів рівняння регресії за допомогою методу найменших квадратів на основі результатів заздалегідь спланованого експерименту, за умови дотримання вимог регресійного

аналізу.

Середнє арифметичне значення отриманих результатів обчислюється за формулою:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_n X_i \quad (3.2)$$

де  $\bar{X}$  – середнє значення вибірки;  $X_i$  – окремі значення вимірюваної величини;  $n$  – кількість експериментальних вимірювань.

Середнє квадратичне відхилення обчислюється за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (3.3)$$

де  $S$  – середнє квадратичне відхилення.

Середня помилка середнього значення визначається за формулою:

$$\bar{S}_x = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

де  $\bar{S}_x$  – середня помилка середнього значення.

Значимість коефіцієнтів регресії перевіряється за допомогою визначення довірчого інтервалу для коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт регресії враховується значимим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу, який визначається за  $t$ -критерієм Стюдента. Критерій Стюдента визначається за формулою:

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\bar{S}_{x1}^2 + \bar{S}_{x2}^2}} \quad (3.5)$$

де  $t$  – значення критерію Стюдента;  $\bar{X}_1, \bar{X}_2$  – середні значення двох порівнюваних вибірок;  $\bar{S}_{x1}^2, \bar{S}_{x2}^2$  – середні помилки середнього значення для кожної вибірки.

Отримане значення критерію  $t$  порівнюється з табличним значенням. Якщо  $t > t_{\alpha f}$ , гіпотеза про відсутність значущих відмінностей між вибірками відхиляється, і робиться висновок про статистично значущу різницю між порівнюваними середніми значеннями.

Умови однорідності дослідів припускають приблизно однаковий вплив

помилки за усіма точками у плані досліду. Для перевірки відтворення дослідів, які виконувалися у трикратній повторності, використовують критерій Кохрена.

Перевірка однорідності дисперсій передбачає обчислення частки максимальної дисперсії серед усіх дисперсій, яке потім порівнюється з критичним значенням  $G(p, m, f)$ :

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_i s_i^2} \quad (3.6)$$

де  $S_{\max}^2$  – максимальна дисперсія з усіх вибірок;  $s_i^2$  – дисперсія  $i$ -ої вибірки;  $f$  – кількість ступенів свободи кожної дисперсії,  $m$  – кількість дисперсій,  $p$  – довірча ймовірність.

Адекватність отриманих моделей перевірялась за допомогою критерію Фішера.  $F$ -критерій Фішера є параметричним критерієм і використовується для порівняння дисперсій двох варіаційних рядів. Емпіричне значення критерію обчислюється за формулою:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad (3.7)$$

де  $\sigma_1^2$  – більша дисперсія,  $\sigma_2^2$  – менша дисперсія розглядуваних варіаційних рядів.

Методика статистичної обробки експериментальних даних дозволила з високою точністю оцінити вплив основних факторів на ефективність процесу гомогенізації. Отримані моделі були перевірені на адекватність та використані для вибору оптимальних режимів роботи обладнання. Завдяки застосуванню комплексного підходу до аналізу даних вдалося підвищити точність та достовірність отриманих висновків, що є важливим для практичного використання результатів у виробництві.

Обробка результатів проведених досліджень за методом факторного планування експерименту виконується з використанням програмних пакетів Microsoft Excel і Wolfram Cloud.

### 3.6 Висновки до розділу

1. Було розглянуто методологічні аспекти проведення експериментальних досліджень роботи диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, включаючи

постановку завдань, організацію лабораторних випробувань, експериментальні процедури та методику обробки отриманих даних.

2. Розроблено програму експериментальних випробувань, що включала проектування та виготовлення експериментального зразка, визначення впливу ключових параметрів на якість кінцевого продукту, статистичну обробку результатів та визначення оптимальних умов роботи пристрою.

3. Для забезпечення точності та відтворюваності експериментів було розроблено детальну методику лабораторних досліджень. Вона передбачала підготовку робочої суміші, налаштування обладнання, проведення серії експериментів із визначенням впливу технологічних параметрів, а також подальший аналіз отриманих результатів. У ході досліджень використовувалися сучасні методи оцінювання ефективності процесу гомогенізації, зокрема визначення щільності суміші, її в'язкості, розміру частинок та рівня осадження.

4. Було розроблено комплексний підхід до проведення експериментальних випробувань, який включав визначення конструктивно-технологічних параметрів, що впливають на якість процесу гомогенізації. Ключові змінні параметри – частота обертання ротора, діаметр вхідного отвору статора та тривалість роботи пристрою – змінювалися в трьох рівнях, що дозволило встановити залежність ефективності роботи від досліджуваних факторів. Вимірювання проводилися за допомогою високоточних приладів та контролювалися спеціалізованим програмним забезпеченням.

5. Для обґрунтування достовірності отриманих результатів застосовувалися сучасні методи статистичного аналізу, включаючи перевірку нормальності розподілу даних, аналіз однорідності дисперсій за критерієм Кохрена, оцінку значущості факторів за критерієм Фішера та побудову математичних моделей залежності вихідних параметрів від технологічних умов. Отримані рівняння регресії дозволили визначити оптимальні режими роботи диспергатора-гомогенізатора.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [150, 151, 152, 153].

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КАВІТАЦІЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА-ГОМОГЕНІЗАТОРА РІДКИХ КОРМІВ

### 4.1 Вплив конструктивно-технологічних параметрів диспергатора-гомогенізатора на якість кормової суміші

Процес експериментальних досліджень представлено на рис. 4.1, де зображено експериментальну установку, умови проведення досліджень та основні технологічні етапи. Результати експериментальних досліджень були систематизовані та зведені в таблицю додатка Г. Аналіз отриманих даних дозволяє визначити раціональні параметри роботи диспергатора-гомогенізатора для досягнення найкращих показників ефективності приготування рідких кормів для свиней.



Рисунок 4.1 – Процес експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів

Обробка отриманих результатів у програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм  $k_{fr}$  від досліджуваних факторів у закодованому вигляді:

– для пшениці:

$$k_{fr} = 81,9778 + 8,125 x_1 - 0,688889 x_1^2 - 1,625 x_2 - 0,05 x_1 x_2 - 3,28889 x_2^2 + 4,0 x_3 - 1,35 x_1 x_3 + 0,5 x_2 x_3 - 2,28889 x_3^2; \quad (4.1)$$

– для ячменя:

$$k_{fr} = 80,2333 + 10,0812 x_1 - 0,797917 x_1^2 - 0,54375 x_2 - 0,0875 x_1 x_2 - 3,14792 x_2^2 + 4,7875 x_3 - 1,3 x_1 x_3 + 0,85 x_2 x_3 - 1,66042 x_3^2; \quad (4.2)$$

– для сої:

$$k_{fr} = 84,4333 + 6,975 x_1 - 0,641667 x_1^2 - 3,5875 x_2 - 0,175 x_1 x_2 - 3,31667 x_2^2 + 2,87917 x_3 - 1,64167 x_1 x_3 + 0,5 x_2 x_3 - 3,38333 x_3^2. \quad (4.3)$$

Статистична обробка рівнянь (4.1)–(4.3) представлені в табл. 4.1–4.3. Аналіз даних, виконаний за критерієм Кохрена, показує, що на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні:  $G_{(4.1)} = 0,0973$ ,  $G_{(4.2)} = 0,1318$ ,  $G_{(4.3)} = 0,1029$ , що менше за табличне значення  $G_{(0,05;2;15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для кожного з представлених вище рівнянь  $F_{(4.1)} = 30627,9$ ,  $F_{(4.2)} = 1421,5$ ,  $F_{(4.3)} = 3686,9$  більше за табличне значення  $F_{(0,05;8;30)} = 2,27$ , що свідчить про відхилення нульової гіпотези. Тому можна стверджувати про адекватність розрахованих залежностей.

У результаті обробки даних експериментальних досліджень отримані остаточні (після відхилення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стьюдента) рівняння регресії другого порядку для вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші:

– для пшениці:

$$k_{fr} = - 47,95 + 3126,39 D_{in} - 32888,9 D_{in}^2 - 1,22469 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0199444 n - 0,00009 t n + 0,860278 t - 0,00572222 t^2; \quad (4.4)$$

– для ячменя:

$$k_{fr} = - 38,2833 + 3147,92 D_{in} - 31479,2 D_{in}^2 + 0,0134417 n + 0,239375 t; \quad (4.5)$$

– для сої:

$$k_{fr} = - 30,6125 + 2957,92 D_{in} - 33166,7 D_{in}^2 + 0,0136778 n - 0,000109444 t n + 1,06688 t - 0,00845833 t^2. \quad (4.6)$$

Таблиця 4.1 – Результати статистичної обробки рівняння (4.1)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	81, 9778	0, 318 988	256, 994	$1, 69 286 \times 10^{-11}$
a10	8, 125	0, 195 339	41, 5943	$1, 51 512 \times 10^{-7}$
a20	-1, 625	0, 195 339	-8, 31 886	0, 000 410 196
a30	4,	0, 195 339	20, 4772	$5, 13 946 \times 10^{-6}$
a12	-0, 05	0, 276 251	-0, 180 995	0, 86 348
a13	-1, 35	0, 276 251	-4, 88 685	0, 00 452 591
a23	0, 5	0, 276 251	1, 80 995	0, 130 081
a11	-0, 688 889	0, 287 532	-2, 39 587	0, 0 619 361
a22	-3, 28 889	0, 287 532	-11, 4384	0, 0 000 894 463
a33	-2, 28 889	0, 287 532	-7, 96 048	0, 000 504 482
		DF SS	MS	
Model		10 93 494, 5	9349, 45	
Error		5 1, 5263	0, 305 259	
Uncorrected Total		15 93 496,		
Corrected Total		14 742, 725		

Таблиця 4.2 – Результати статистичної обробки рівняння (4.2)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	80, 2333	1, 45 713	55, 0625	$3, 73 673 \times 10^{-8}$
a10	10, 0812	0, 892 308	11, 2979	0, 0000 949 567
a20	-0, 54 375	0, 892 308	-0, 609 375	0, 568 901
a30	4, 7875	0, 892 308	5, 3653	0, 00 302 626
a12	-0, 0875	1, 26 191	-0, 0693 391	0, 947 407
a13	-1, 3	1, 26 191	-1, 03 018	0, 350 157
a23	0, 85	1, 26 191	0, 67 358	0, 530 454
a11	-0, 797 917	1, 31 344	-0, 607 501	0, 570 049
a22	-3, 14 792	1, 31 344	-2, 39 669	0, 0 618 733
a33	-1, 66 042	1, 31 344	-1, 26 417	0, 261 896
		DF SS	MS	
Model		10 90 551, 3	9055, 13	
Error		5 31, 8485	6, 36 971	
Uncorrected Total		15 90 583, 1		
Corrected Total		14 1085, 14		

Таблиця 4.3 – Результати статистичної обробки рівняння (4.3)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	84, 4333	0, 940 774	89, 7488	$3, 25 524 \times 10^{-9}$
a10	6, 975	0, 576 104	12, 1072	0, 0000 678 979
a20	-3, 5875	0, 576 104	-6, 22 717	0, 0015 623
a30	2, 87917	0, 576 104	4, 99 765	0, 00411 298
a12	-0, 175	0, 814 734	-0, 214 794	0, 838 414
a13	-1, 64 167	0, 814 734	-2, 01 497	0, 10 001
a23	0, 5	0, 814 734	0, 613 697	0, 566 258
a11	-0, 641 667	0, 848 002	-0, 75 668	0, 483 351
a22	-3, 31 667	0, 848 002	-3, 91 115	0, 0112 819
a33	-3, 38 333	0, 848 002	-3, 98 977	0, 0104 289

	DF	SS	MS
Model	10	97 894, 1	9789, 41
Error	5	13, 2758	2, 65 517
Uncorrected Total	15	97907, 4	
Corrected Total	14	660, 724	

Графічна інтерпретація залежностей (4.4)–(4.6) представлено на рис. 4.2.

Максимізація показника вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$  відбувається при збільшенні частоти обертання робочих органів  $n$  і зменшенні діаметру вхідного отвору  $D_{in}$ . При цьому при подрібненні різних культур залежність відрізняється. При подрібненні пшениці, показник  $k_{fr}$  зростає з максимальним кутом при збільшенні частоти обертання робочих органів  $n$  практично лінійно. Максимальне значення показника  $k_{fr}$  при подрібненні пшениці, ячменю і сою досягається з діаметром отвору 0,048 м, 0,049 м і 0,045 м відповідно. Зі всіма видами культур з якими проводились дослідження, показник  $k_{fr}$  набуває максимального значення при досягненні найбільшої частоти обертання  $n$ . Цікавим є вплив тривалості роботи обладнання  $t$ . Після досягнення максимальних значень показника  $k_{fr}$  (при 51,2 хв для пшениці, 60 хв для ячменю і 44,7 хв для сої) спостерігається вирівнювання кривої залежності та навіть невелике її зменшення. Це пояснюється досягненням критичного значення вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$ .

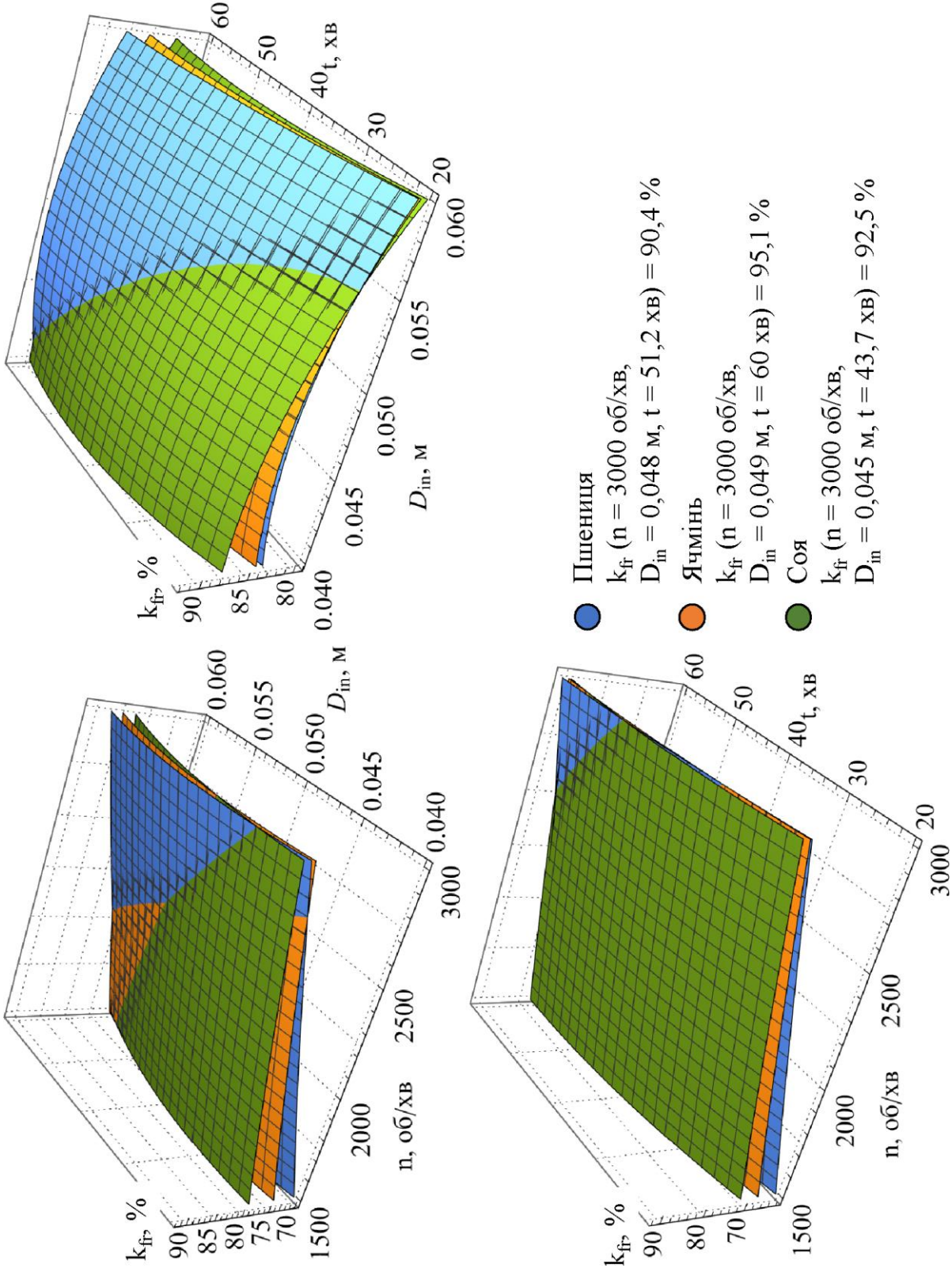


Рисунок 4.2 – Залежності зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$

Аналіз отриманих результатів за допомогою програмного середовища Wolfram Cloud дав змогу визначити рівняння регресії другого порядку, яке описує зміну показника розшарованості суміші  $i_d$  залежно від досліджуваних факторів у закодованій формі:

– для пшениці:

$$i_d = 6,36667 - 2,5 x_1 + 7,05417 x_1^2 - 0,1875 x_2 + 0,15 x_1 x_2 - 0,120833 x_2^2 - 2,3375 x_3 + 0,4 x_1 x_3 + 0,075 x_2 x_3 + 0,429167 x_3^2; \quad (4.7)$$

– для ячменя:

$$i_d = 7,90395 - 3,07917 x_1 + 7,11886 x_1^2 - 1,05 x_2 + 0,183333 x_1 x_2 - 0,489476 x_2^2 - 2,9875 x_3 + 0,241667 x_1 x_3 - 0,033333 x_2 x_3 + 0,118857 x_3^2; \quad (4.8)$$

– для сої:

$$i_d = 8,74444 - 3,75833 x_1 + 6,90694 x_1^2 - 1,8125 x_2 + 0,0666667 x_1 x_2 - 0,934722 x_2^2 - 3,4875 x_3 + 0,233333 x_1 x_3 - 0,0916667 x_2 x_3 - 0,468056 x_3^2. \quad (4.9)$$

Рівняння (4.7)–(4.9) були піддані статистичній обробці, результати якої наведені в табл. 4.4–4.6. Перевірка даних за критерієм Кохрена підтвердила однорідність дисперсій на рівні довірчої ймовірності 95 %, оскільки отримані значення  $G_{(4.7)} = 0,1361$ ,  $G_{(4.8)} = 0,1513$ ,  $G_{(4.9)} = 0,1157$  є меншими за табличне значення  $G_{(0,05;2;15)} = 0,3346$ . Оцінка критерію Фішера для наведених рівнянь дала такі результати:  $F_{(4.7)} = 256,8$ ,  $F_{(4.8)} = 741,6$ ,  $F_{(4.9)} = 800,6$ , що перевищує табличне значення  $F_{(0,05;8;30)} = 2,27$ , що підтверджує відхилення нульової гіпотези. Відповідно, можна зробити висновок про адекватність отриманих залежностей.

Після аналізу даних експериментальних досліджень та відкидання незначущих коефіцієнтів за критерієм Стьюдента було сформульовано остаточне рівняння регресії другого порядку для показника розшарованості суміші  $i_d$ :

– для пшениці:

$$i_d = 82,0292 - 0,0597667 n + 0,0000125407 n^2 - 0,116875 t; \quad (4.10)$$

– для ячменя:

$$i_d = 80,1993 + 384,476 D_{in} - 4894,76 D_{in}^2 - 0,0610564 n + 0,0000126557 n^2 - 0,149375 t; \quad (4.11)$$

– для сої:

$$i_d = 72,9792 + 753,472 D_{in} - 9347,22 D_{in}^2 - 0,0602667 n + 0,000012279 n^2 - 0,0807639 t - 0,00117014 t^2. \quad (4.12)$$

Таблиця 4.4 – Результати статистичної обробки рівняння (4.7)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	6, 36 667	0, 492 556	12, 9258	0, 000 493 816
a10	-2, 5	0, 301 628	-8, 28 837	0, 000 417 352
a20	-0, 1875	0, 301 628	-0, 621 628	0, 561 429
a30	-2, 3375	0, 301 628	-7, 74962	0, 000 571 983
a12	0, 15	0, 426 566	0, 351 646	0, 739 438
a13	0, 4	0, 426 566	0, 937 722	0, 391 437
a23	0, 075	0, 426 566	0, 175 823	0, 867 332
a11	7, 05 417	0, 443 984	15, 8883	0, 000 179 743
a22	-0, 120 833	0, 443 984	-0, 272 157	0, 796 382
a33	0, 429 167	0, 443 984	0, 966 627	0, 378 126

	DF	SS	MS
Model	10	1869, 42	186, 942
Error	5	3, 63 917	0, 727 833
Uncorrected Total	15	1873, 06	
Corrected Total	14	283, 769	

Таблиця 4.5 – Результати статистичної обробки рівняння (4.8)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	7, 90 395	0, 323 803	24, 4098	$2, 15 132 \times 10^{-6}$
a10	-3, 07 917	0, 198 288	-15, 5288	0, 000 201 146
a20	-1, 05	0, 198 288	-5, 29 533	0, 0032 043
a30	-2, 9875	0, 198 288	-15, 0665	0, 000 233 325
a12	0, 183 333	0, 280 421	0, 653 778	0, 542 124
a13	0, 241 667	0, 280 421	0, 861 799	0, 428 185
a23	-0, 0333 333	0, 280 421	-0, 118 869	0, 910 007
a11	7, 11 886	0, 291 872	24, 3904	$2, 15 984 \times 10^{-6}$
a22	-0, 489 476	0, 291 872	-1, 67 703	0, 154 382
a33	0, 118 857	0, 291 872	0, 407 224	0, 700 692

	DF	SS	MS
Model	10	2332, 82	233, 282
Error	5	1, 57 272	0, 314 544
Uncorrected Total	15	2334, 39	
Corrected Total	14	349, 6	

Таблиця 4.6 – Результати статистичної обробки рівняння (4.9)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	8, 74 444	0, 320 696	27, 2671	$1, 24 128 \times 10^{-6}$
a10	-3, 75 833	0, 196 385	-19, 1376	$7, 18 206 \times 10^{-6}$
a20	-1, 8125	0, 196 385	-9, 22 931	0, 000 250 798
a30	-3, 4875	0, 196 385	-17, 7585	0, 0000 103 904
a12	0, 0666 667	0, 277 731	0, 240 041	0, 819 829
a13	0, 233 333	0, 277 731	0, 840 143	0, 439 143
a23	-0, 0916 667	0, 277 731	-0, 330 056	0, 754 737
a11	6, 90 694	0, 289 071	23, 8936	$2, 39 211 \times 10^{-6}$
a22	-0, 934 722	0, 289 071	-3, 23 354	0, 0231 147
a33	-0, 468 056	0, 289 071	-1, 61 917	0, 166 335

	DF	SS	MS
Model	10	2470, 3	247, 03
Error	5	1, 54269	0, 308 537
Uncorrected Total	15	2471, 85	
Corrected Total	14	425, 511	

Показник розшарованості суміші  $i_d$  отриманого в ході експерименту починає суттєво зменшуватись при збільшенні частоти обертання  $n$ , досягаючи найнижчого показника при 2382 об/хв (пшениця), 2412 об/хв (ячмінь), 2454 об/хв (соя), при збільшенні частоти обертання далі цих меж, спостерігається незначний зростання показника розшарованості. Це свідчить про те, що для кожного виду матеріалу існує оптимальна частота обертання, за якої досягається найкраще змішування. Перевищення цієї частоти може призводити до порушення рівномірності розподілу частинок через надмірний вплив відцентрових сил.

Так само розшарованість суміші  $i_d$  залежить і від часу роботи обладнання. Найнижчий показник розшарованості маємо в діапазоні часу від 50 до 60 хв, при зменшенні часу змішування показник розшарованості збільшується, приблизно на 10–12 %. Діаметр вхідного отвору  $D_{in}$  на показник  $i_d$  практично не впливає. Найменше значення показника розшарованості суміші  $i_d$  знаходиться в межах 1,53–3,81 % в залежності від виду вхідного матеріалу.

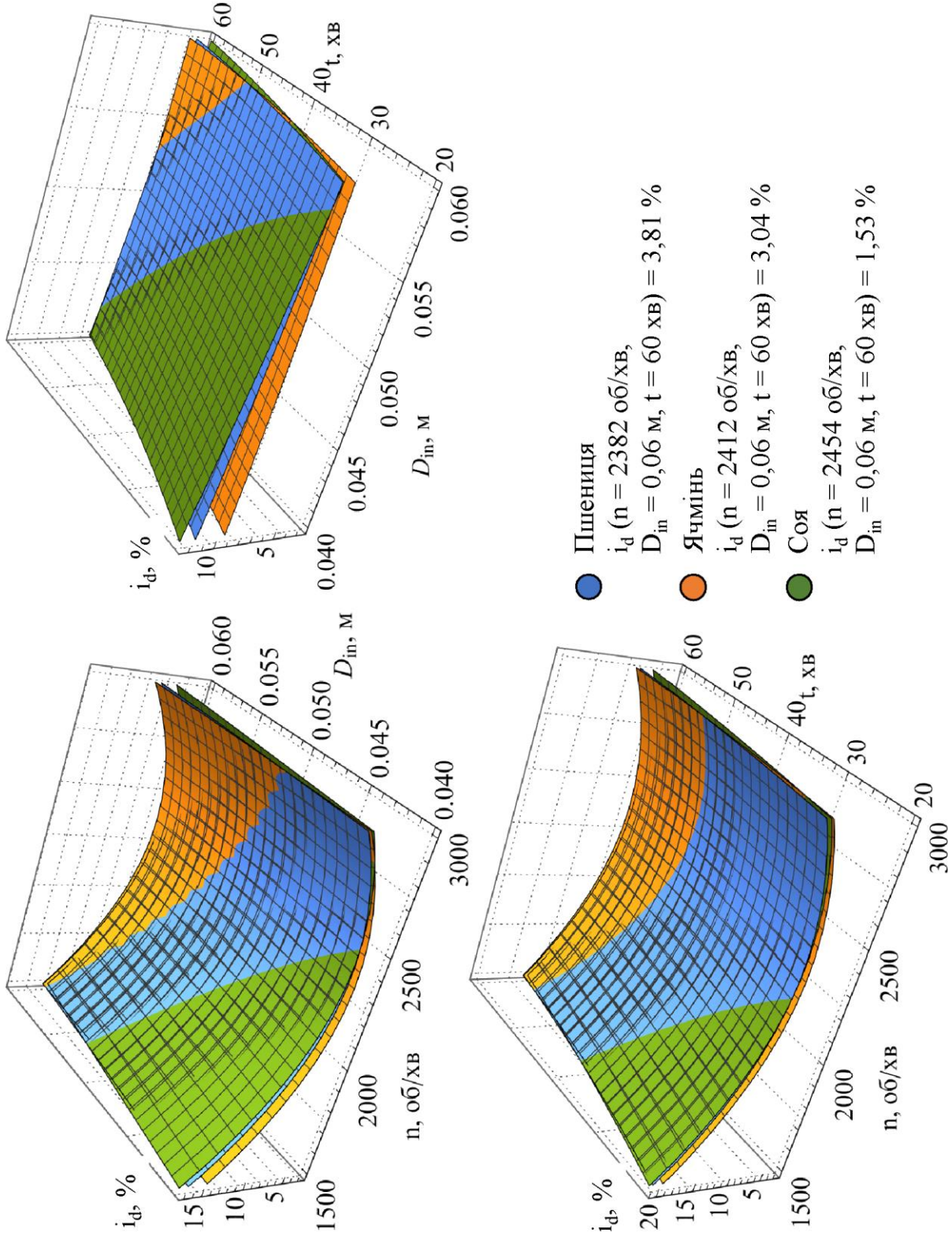


Рисунок 4.3 – Залежності зміни показника розшарованості суміші  $i_d$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$

Рівняння регресії другого порядку, що описує зміну температури суміші в кінці процесу  $T$  залежно від досліджуваних факторів у закодованій формі, було отримано завдяки обробці результатів у програмному пакеті Wolfram Cloud:

– для пшениці:

$$T = 53,685 + 12,1838 x_1 - 2,93812 x_1^2 - 0,73625 x_2 - 0,02375 x_1 x_2 - 0,088125 x_2^2 + 10,5925 x_3 + 7,24375 x_1 x_3 - 0,26125 x_2 x_3 - 4,88563 x_3^2; \quad (4.13)$$

– для ячменя:

$$T = 55,9072 + 10,0463 x_1 - 3,61174 x_1^2 + 3,98875 x_2 - 0,62375 x_1 x_2 - 0,186736 x_2^2 + 9,705 x_3 + 7,91875 x_1 x_3 - 0,21125 x_2 x_3 - 5,20924 x_3^2; \quad (4.14)$$

– для сої:

$$T = 50,3683 + 14,4212 x_1 - 2,65479 x_1^2 + 2,71375 x_2 + 0,05125 x_1 x_2 + 0,970208 x_2^2 + 10,455 x_3 + 7,79375 x_1 x_3 - 0,28625 x_2 x_3 - 2,85229 x_3^2. \quad (4.15)$$

У табл. 4.7–4.9 представлені результати статистичної обробки рівнянь (4.13)–(4.15). Виконаний за критерієм Кохрена аналіз даних показав, що дисперсії є однорідними на 95 % рівні довірчої ймовірності:  $G_{(4.13)} = 0,1335$ ,  $G_{(4.14)} = 0,1337$ ,  $G_{(4.15)} = 0,1320$ , що менше за табличне значення  $G_{(0,05;2;15)} = 0,3346$ . Для кожного з рівнянь значення критерію Фішера виявились більшими за табличне:  $F_{(4.13)} = 510,2$ ,  $F_{(4.14)} = 272,3$ ,  $F_{(4.15)} = 767,9$ , що підтверджує відхилення нульової гіпотези. Отже, можна зробити висновок про адекватність розрахованих залежностей.

Після виконання обробки даних експериментальних досліджень та відкидання незначущих коефіцієнтів за допомогою критерію Стьюдента, були отримані остаточні рівняння регресії другого порядку для температури суміші в кінці процесу (рис. 4.4):

– для пшениці:

$$T = -6,57437 - 5,22333 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,020433 n + 0,0004829 t n + 0,42018 t - 0,01221 t^2; \quad (4.16)$$

– для ячменя:

$$T = -19,4153 + 398,875 D_{in} - 6,4208 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0211722 n + 0,0005279 t n + 0,339285 t - 0,0130231 t^2; \quad (4.17)$$

– для сої:

$$T = -15,914 + 271,375 D_{in} - 4,71963 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0196833 n + 0,00051958 t n - 0,0758542 t - 0,00713073 t^2. \quad (4.18)$$

Таблиця 4.7 – Результати статистичної обробки рівняння (4.13)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	53, 685	1, 59 884	33, 5775	$4, 40 495 \times 10^{-7}$
a10	12, 1838	0, 979 083	12, 444	0, 0000 594 167
a20	-0, 73 625	0, 979 083	-0, 751 979	0, 485 934
a30	10, 5925	0, 979 083	10, 8188	0, 000 117 072
a12	-0, 02 375	1, 38 463	-0, 0171 526	0, 986 978
a13	7, 24 375	1, 38 463	5, 23 153	0, 00 337 745
a23	-0, 26 125	1, 38 463	-0, 188 678	0, 857 764
a11	-2, 93 812	1, 44 117	-2, 03 871	0, 0970 286
a22	-0, 088 125	1, 44 117	-0, 0611 482	0, 95 361
a33	-4, 88 563	1, 44 117	-3, 39 004	0, 0194 605

	DF	SS	MS
Model	10	39 115, 3	3911, 53
Error	5	38, 3442	7, 66 883
Uncorrected Total	15	39 153, 6	
Corrected Total	14	2451, 35	

Таблиця 4.8 – Результати статистичної обробки рівняння (4.14)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	55, 9072	2, 24 702	24, 8806	$1, 95 666 \times 10^{-6}$
a10	10, 0463	1, 37 602	7, 30 097	0, 000 754 816
a20	3, 98 875	1, 37 602	2, 89 877	0, 0338 392
a30	9, 705	1, 37 602	7, 05 297	0, 000 885 468
a12	-0, 62 375	1, 94 598	-0, 320 533	0, 761 527
a13	7, 91 875	1, 94 598	4, 06 929	0, 0096 407
a23	-0, 21 125	1, 94 598	-0, 108 557	0, 917 776
a11	-3, 61 174	2, 02 544	-1, 78 319	0, 134 641
a22	-0, 186 736	2, 02 544	-0, 0921 954	0, 930 123
a33	-5, 20 924	2, 02 544	-2, 5719	0, 0499 198

	DF	SS	MS
Model	10	41 252, 9	4125, 29
Error	5	75, 7367	15, 1473
Uncorrected Total	15	41 328, 6	
Corrected Total	14	2155, 72	

Таблиця 4.9 – Результати статистичної обробки рівняння (4.15)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	50,3683	1,27388	39,5393	$1,95069 \times 10^{-7}$
a10	14,4212	0,78089	18,4867	$8,52102 \times 10^{-6}$
a20	2,71375	0,78089	3,47877	0,0176821
a30	10,455	0,78089	13,4023	0,000041385
a12	0,05125	1,10321	0,0464552	0,964746
a13	7,79375	1,10321	7,06459	0,000878778
a23	-0,28625	1,10321	-0,259469	0,805618
a11	-2,65479	1,14826	-2,31201	0,0687346
a22	0,970208	1,14826	0,844937	0,436698
a33	-2,85229	1,14826	-2,48401	0,0555673

	DF	SS	MS
Model	10	37385,6	3738,56
Error	5	24,3416	4,86832
Uncorrected Total	15	37409,9	
Corrected Total	14	2923,81	

Температура суміші  $T$  під час процесу приготування рідкого корму має значну залежність від часу роботи обладнання  $t$ . Таким чином при збільшенні тривалості процесу  $t$  з 40 хв до 60 хв, маємо зростання температури  $T$  з  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Прогнозуючи подальшу зміну температури  $T$  можна стверджувати про її стабілізацію на певному рівні ( $75,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  для пшениці,  $78,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  для ячменя,  $80,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  для сої). Також підвищення частоти обертання ротора  $n$  призводить до збільшення температури  $T$ , що пояснюється підвищенням інтенсивності процесу подрібнення і кавітації. Спостерігається незначна відмінність температури суміші  $T$  в середині робочої камери установки для різних матеріалів. Діаметр отвору  $D_{in}$  практично не впливає на зміну температури суміші  $T$ . Залежність температури суміші  $T$  від часу роботи обладнання  $t$  свідчить про важливість контролю за тривалістю процесу для досягнення бажаного температурного режиму. Після стабілізації температури на певному рівні, подальші зміни в параметрах процесу не впливають на її значення суттєво. Однак підвищення частоти обертання ротора  $n$  сприяє кращому тепловідведенню завдяки збільшеній інтенсивності механічних процесів, таких як подрібнення та кавітація, що, в свою чергу, призводить до підвищення температури суміші.

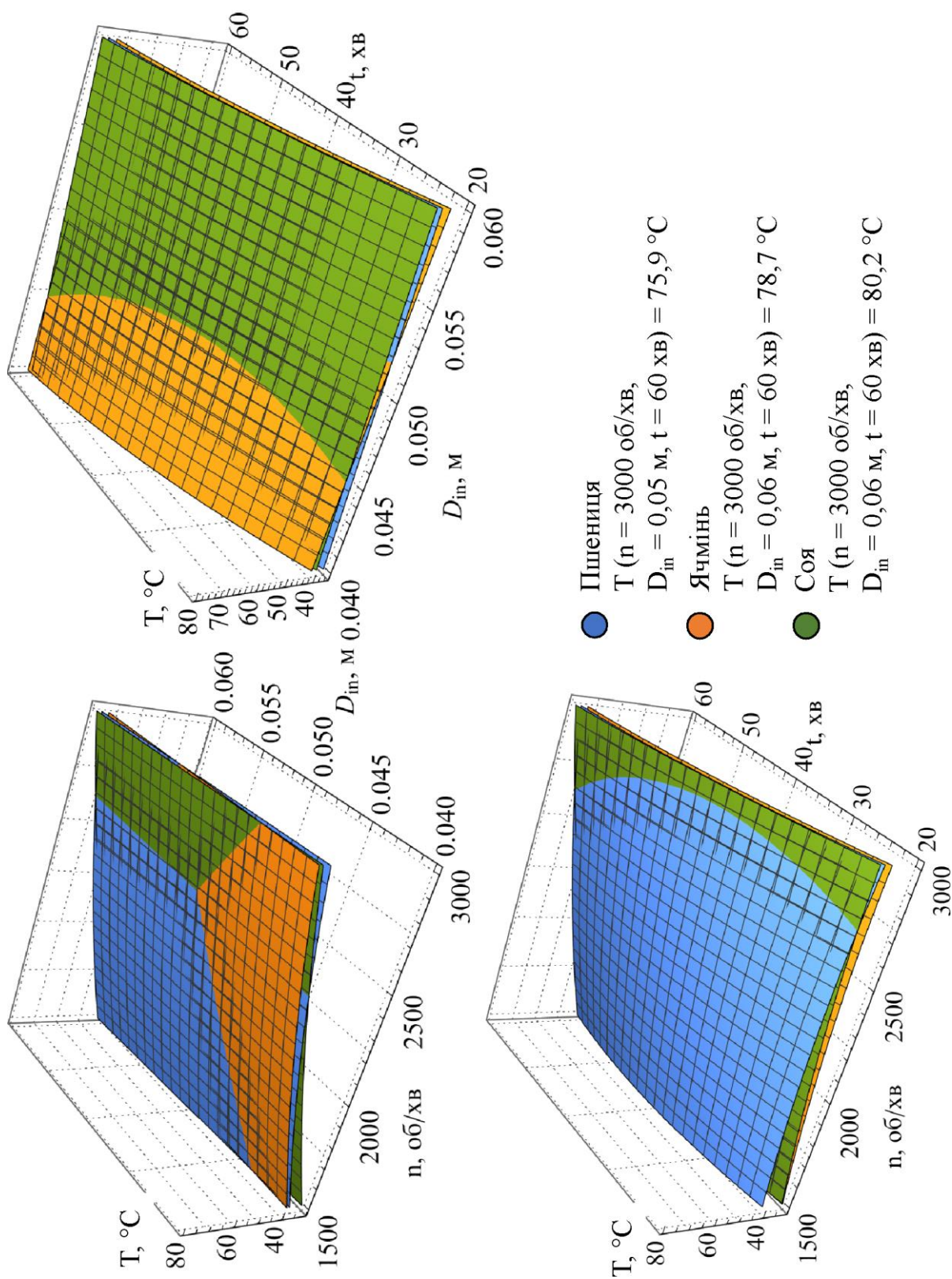


Рисунок 4.4 – Залежності зміни температури суміші Т від частоти обертання ротора n, діаметра вхідного отвору статора D<sub>in</sub> і часу роботи обладнання t

Ще одним важливим показником була кінематична в'язкість кінцевого продукту. Обробка отриманих результатів у програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку зміни кінематичної в'язкості  $v$  від досліджуваних факторів у закодованому вигляді:

– для пшениці:

$$v = 81,5 - 16,0 x_1 + 0,9625 x_1^2 + 3,0 x_2 + 0,475 x_1 x_2 + 5,6625 x_2^2 - 8,375 x_3 + 2,325 x_1 x_3 - 1,125 x_2 x_3 + 4,1625 x_3^2; \quad (4.19)$$

– для ячменя:

$$v = 70,1 - 15,05 x_1 + 0,975 x_1^2 + 0,9125 x_2 + 0,625 x_1 x_2 + 5,75 x_2^2 - 7,0625 x_3 + 2,325 x_1 x_3 - 2,4 x_2 x_3 + 1,4 x_3^2; \quad (4.20)$$

– для сої:

$$v = 58,2 - 10,4 x_1 + 0,3625 x_1^2 + 5,1875 x_2 + 0,15 x_1 x_2 + 3,3875 x_2^2 - 3,9375 x_3 + 2,2 x_1 x_3 - 1,025 x_2 x_3 + 3,3375 x_3^2. \quad (4.21)$$

Таблиці 4.10–4.12 містять статистичну обробку рівнянь (4.19)–(4.21). Згідно з аналізом, проведеним за критерієм Кохрена, на рівні довірчої ймовірності 95 % дисперсії є однорідними:  $G_{(4.19)} = 0,1163$ ,  $G_{(4.20)} = 0,1121$ ,  $G_{(4.21)} = 0,1165$ , що менше за табличне значення  $G_{(0,05;2;15)} = 0,3346$ . Критерій Фішера для кожного з наведених рівнянь має значення:  $F_{(4.19)} = 15610,1$ ,  $F_{(4.20)} = 9611,5$ ,  $F_{(4.21)} = 3362,5$ , що перевищує табличне значення  $F_{(0,05;8;30)} = 2,27$ , що вказує на відхилення нульової гіпотези. Таким чином, можна зробити висновок про адекватність розрахованих залежностей. Остаточні рівняння регресії другого порядку для кінематичної в'язкості  $v$  в суміші були отримані в результаті обробки даних експериментальних досліджень (після відхилення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стьюдента):

– для пшениці:

$$v = 307,95 + 56625,0 D_{in}^2 + 1,71111 \cdot 10^{-6} n^2 + D_{in} (- 5280,0 + 0,0633333 n - 5,625 t) + n (- 0,0384 + 0,000155 t) - 1,31875 t + 0,0104062 t^2; \quad (4.22)$$

– для ячменя:

$$v = 282,262 + 57500,0 D_{in}^2 + 1,73333 \cdot 10^{-6} n^2 + D_{in} (- 5366,25 + 0,0833333 n - 12, t) + n (- 0,0382333 + 0,000155 t) - 0,381875 t + 0,0035 t^2; \quad (4.23)$$

– для сої:

$$v = 177,837 + 33875,0 D_{in}^2 + 6,444 \cdot 10^{-7} n^2 + D_{in} (- 2708,75 + 0,02 n - 5,125 t) + n (- 0,0236333 + 0,000146667 t) - 0,938125 t + 0,00834375 t^2. \quad (4.24)$$

Таблиця 4.10 – Результати статистичної обробки рівняння (4.19)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	81, 5	0, 5	163,	$1, 64 889 \times 10^{-10}$
a10	-16,	0, 306 186	-52, 2558	$4, 8521 \times 10^{-8}$
a20	3,	0, 306 186	9, 79 796	0, 000 188 511
a30	-8, 375	0, 306 186	-27, 3526	$1, 22 211 \times 10^{-6}$
a12	0, 475	0, 433 013	1, 09 697	0, 322 655
a13	2, 325	0, 433 013	5, 36 936	0, 00 301 629
a23	-1, 125	0, 433 013	-2, 59 808	0, 0483 619
a11	0, 9625	0, 450 694	2, 1356	0, 0857 942
a22	5, 6625	0, 450 694	12, 564	0, 000 056 707
a33	4, 1625	0, 450 694	9, 23 576	0, 000 249 966

	DF	SS	MS
Model	10	117 076,	11 707, 6
Error	5	3, 75	0, 75
Uncorrected Total	15	117 080,	
Corrected Total	14	2882, 7	

Таблиця 4.11 – Результати статистичної обробки рівняння (4.20)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	70, 1	0, 544 518	128, 738	$5, 36 407 \times 10^{-10}$
a10	-15, 05	0, 333 448	-45, 1345	$1, 00 804 \times 10^{-7}$
a20	0, 9125	0, 333 448	2, 73 656	0, 0409 593
a30	-7, 0625	0, 333 448	-21, 1802	$4, 34 845 \times 10^{-6}$
a12	0, 625	0, 471 567	1, 32 537	0, 242 378
a13	2, 325	0, 471 567	4, 93 038	0, 00 435 819
a23	-2, 4	0, 471 567	-5, 08 942	0, 00 380 401
a11	0, 975	0, 490 822	1, 98 646	0, 103 718
a22	5, 75	0, 490 822	11, 715	0, 000 0796 644
a33	1, 4	0, 490 822	2, 85 236	0, 0357 249

	DF	SS	MS
Model	10	85 495,	8549, 5
Error	5	4, 4475	0, 8895
Uncorrected Total	15	85 499, 5	
Corrected Total	14	2394, 67	

Таблиця 4.12 – Результати статистичної обробки рівняння (4.20)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	58, 2	0, 765 615	76, 0173	$7, 4634 \times 10^{-9}$
a10	-10, 4	0, 468 842	-22, 1823	$3, 45 826 \times 10^{-6}$
a20	5, 1875	0, 468 842	11, 0645	0, 000 105 043
a30	-3, 9375	0, 468 842	-8, 39 836	0, 000 392 215
a12	0, 15	0, 663 042	0, 22 623	0, 82 998
a13	2, 2	0, 663 042	3, 31 804	0, 0210 536
a23	-1, 025	0, 663 042	-1, 5459	0, 182 793
a11	0, 3625	0, 690 116	0, 525 274	0, 621 844
a22	3, 3875	0, 690 116	4, 90 859	0, 0044 412
a33	3, 3375	0, 690 116	4, 83 614	0, 00473 092

	DF	SS	MS
Model	10	58 928, 6	5892, 86
Error	5	8, 7925	1, 7585
Uncorrected Total	15	58 937, 4	
Corrected Total	14	1314, 62	

Графічна інтерпретація залежностей (4.22)–(4.24) представлено на рис. 4.5. Аналіз рівнянь регресії для кінематичної в'язкості  $\nu$  у сумішах пшениці, ячменю та сої показує, що найбільший вплив має діаметр вхідного отвору статора ( $D_{in}$ ): з його зростанням в'язкість значно підвищується, особливо для пшениці й ячменю. Це пояснюється зниженням турбулентності та ефективності перемішування при більшому  $D_{in}$ . У сої вплив  $D_{in}$  менший через м'якшу структуру зерна. Частота обертання ротора ( $n$ ) впливає слабше, але також сприяє зростанню в'язкості, зокрема за рахунок аерації та зсувних деформацій. Для сої цей вплив мінімальний, оскільки її структура легко руйнується навіть при низьких обертах. Час роботи обладнання ( $t$ ) здебільшого сприяє зменшенню в'язкості: у пшениці й ячменю через подрібнення й гідратацію з утворенням більш текучої маси. У сої спостерігається зростання в'язкості на пізніх етапах через емульгування жирів і набухання білків. Таким чином, фізика процесу пов'язана з впливом геометрії, механічної енергії та тривалості обробки на структуру суміші, причому характер цих змін залежить від властивостей конкретної культури.

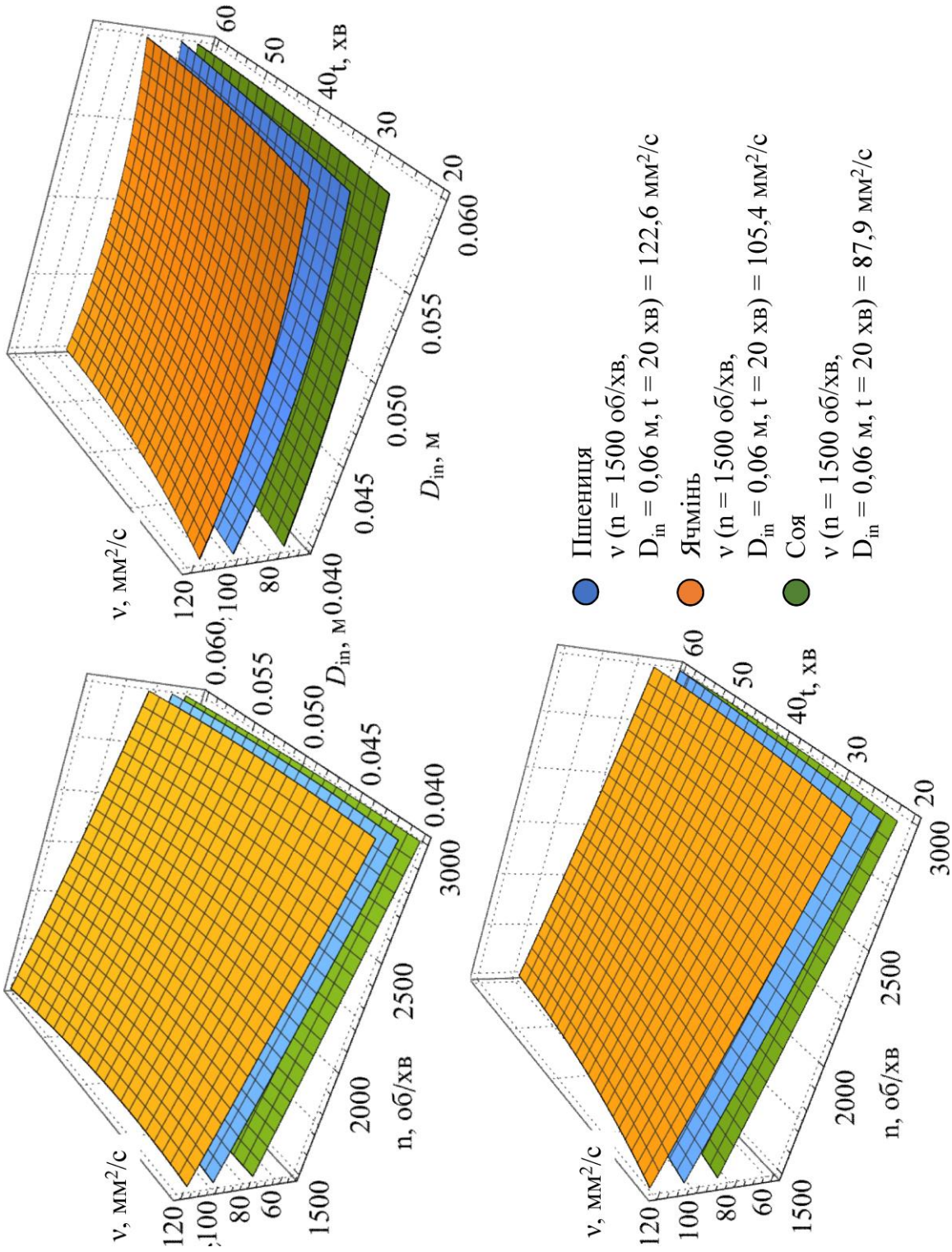


Рисунок 4.5 – Залежності кінематичної в'язкості  $v$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$

Проводились дослідження зразків отриманої суміші на лабораторному мікроскопі Violam Ломо С-11. Проби для дослідження на лабораторному мікроскопі відбирались регулярно, після кожного досліду з трьох довільних місць суміші. Проби розміщувались на лабораторному склі і притискалися покривним склом, барвник для контрастності не використовувався. На рисунку 4.6 зображено знімок з мікроскопа, на якому видно розмір подрібнених частинок у отриманій суміші при показнику частоти обертання ротора  $n$  на рівні 1500 об/хв. При цьому ціна поділки вимірювальної шкали 0,1 мм. Порівнюючи подрібнені часточки зі шкалою бачимо що розмір частинок не перевищує 1мм, що задовольняє зоотехнічним вимогам до рідких кормів.

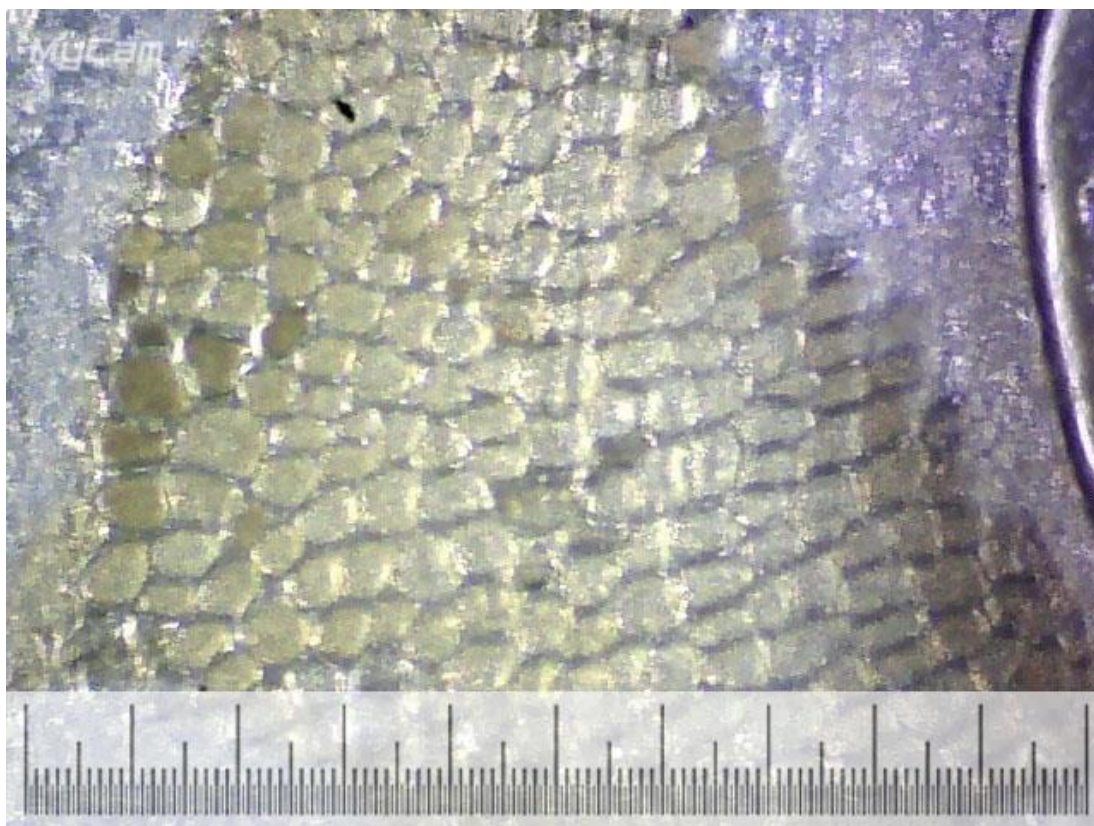


Рисунок 4.6 – Дослідження кормової суміші при  $n = 3000$  об/хв на лабораторному мікроскопі Violam Ломо С-11

При дослідженні на лабораторному мікроскопі Violam Ломо С-11 проби взятої при підвищенні показника частоти обертання ротора  $n$  до рівня 3000 об/хв бачимо

суттєву зміну розміру подрібнених частинок, тобто збільшення ступені подрібнення. Дослідження проби при частоті обертання ротора  $n$  на рівні 3000 об/хв.

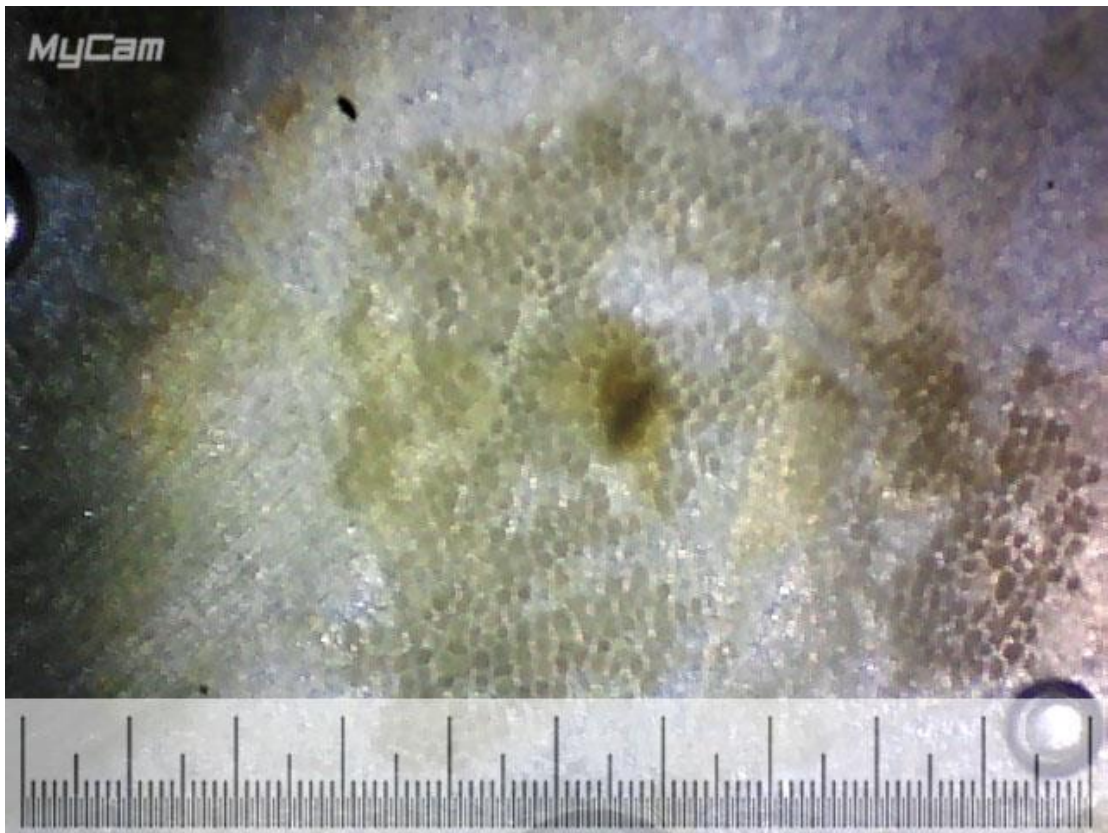


Рисунок 4.7 – Дослідження кормової суміші при  $n = 3000$  об/хв на лабораторному мікроскопі Violam Ломо С-11

Тут спостерігається значне зниження розміру частинок, тобто збільшення ступеня подрібнення що буде позитивно впливати на показник дисперсності кормової суміші.

При збільшенні показників часу роботи обладнання  $t$  і частоти обертання ротора  $n$ , відбувається суттєве збільшення показника фракційного складу  $k_f$  (0-0.5мм) тобто кормова суміш стає більш однорідною за рахунок збільшення ступеню подрібнення твердої фракції корму. Окрім цього при збільшенні показника часу роботи обладнання  $t$  відбувається суттєве зменшення показника розшарованості суміші  $i_d$ .

## 4.2 Вплив конструктивно-технологічних параметрів на енергоефективність процесу приготування кормів

У програмному пакеті Wolfram Cloud обробка отриманих результатів дозволила отримати рівняння регресії другого порядку зміни потужності, що споживається електродвигуна кавітаційного диспергатора-гомогенізатора  $N$  від досліджуваних факторів у закодованому вигляді:

– для пшениці:

$$N = 1,00215 + 0,345 x_1 + 0,0849259 x_1^2 + 0,1155 x_2 + 0,092 x_1 x_2 - 0,00207407 x_2^2 - 0,21775 x_3 - 0,059 x_1 x_3 + 0,0045 x_2 x_3 + 0,0624259 x_3^2; \quad (4.25)$$

– для ячменя:

$$N = 1,29467 + 0,344542 x_1 + 0,0582083 x_1^2 + 0,108 x_2 + 0,0761667 x_1 x_2 - 0,0847083 x_2^2 - 0,185375 x_3 - 0,066916 x_1 x_3 - 0,00966 x_2 x_3 - 0,0357917 x_3^2; \quad (4.26)$$

– для сої:

$$N = 0,693667 + 0,359 x_1 + 0,0951667 x_1^2 + 0,116375 x_2 + 0,10325 x_1 x_2 + 0,0564167 x_2^2 - 0,217792 x_3 - 0,0110833 x_1 x_3 - 0,018 x_2 x_3 + 0,171583 x_3^2. \quad (4.27)$$

У таблицях 4.13–4.15 представлено статистичну обробку рівнянь (4.25)–(4.27). За критерієм Кохрена, аналіз даних показує, що дисперсії є однорідними на рівні довірчої ймовірності 95%:  $G_{(4.25)} = 0,1349$ ,  $G_{(4.26)} = 0,1160$ ,  $G_{(4.27)} = 0,1031$ , що менше за табличне значення  $G_{(0,05;2;15)} = 0,3346$ . Критерій Фішера для кожного з наведених рівнянь має значення  $F_{(4.25)} = 1159,9$ ,  $F_{(4.26)} = 1409,5$ ,  $F_{(4.27)} = 1159,9$ , що більше за табличне значення  $F_{(0,05;8;30)} = 2,27$ , що вказує на відхилення нульової гіпотези. Отже, можна зробити висновок про адекватність розрахованих залежностей.

Після відсіювання незначущих коефіцієнтів за допомогою критерію Стьюдента у результаті обробки даних експериментальних досліджень було отримано остаточні рівняння регресії другого порядку для потужності, що споживається електродвигуна кавітаційного диспергатора-гомогенізатора:

– для пшениці:

$$N = 1,86519 - 16,05 D_{in} + 0,0122667 n D_{in} + 1,50979 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0006754 n - 3,93333 \cdot 10^{-6} t n - 0,0145227 t + 0,000156065 t^2; \quad (4.28)$$

– для ячменя:

$$N = -1,00087 - 847,083 D_{in}^2 + 1,0348 \cdot 10^{-7} n^2 + 74,5917 D_{in} + 0,010156 n D_{in} - 0,04833 t D_{in} - 0,00033561 n - 4,461 \cdot 10^{-6} t n + 0,0103438 t - 0,000089479 t^2; \quad (4.29)$$

– для сої:

$$N = 0,156708 + 11,6375 D_{in} + 0,000478667 n - 0,0452062 t + 0,000428958 t. \quad (4.30)$$

Таблиця 4.13 – Результати статистичної обробки рівняння (4.25) у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	1, 00 215	0, 0 233 723	42, 8776	1, 30 204 × 10 <sup>-7</sup>
a10	0, 345	0, 0 143 126	24, 1047	2, 28 991 × 10 <sup>-6</sup>
a20	0, 1155	0, 0 143 126	8, 06 984	0, 000 473 212
a30	-0, 21 775	0, 0 143 126	-15, 2139	0, 0000 222 435
a12	0, 092	0, 020 241	4, 54 523	0, 00 613 924
a13	-0, 059	0, 020 241	-2, 91 488	0, 0332 109
a23	0, 0045	0, 020 241	0, 222 321	0, 83 286
a11	0, 0849 259	0, 0210 675	4, 03 113	0, 01 001
a22	-0, 00 207 407	0, 0210 675	-0, 098 449	0, 925 401
a33	0, 0624 259	0, 0210 675	2, 96 314	0, 0314 049

	DF	SS	MS
Model	10	19, 0089	1, 90 089
Error	5	0, 00 819 397	0, 00 163 879
Uncorrected Total	15	19, 0171	
Corrected Total	14	1, 53 312	

Графічне відображення цих залежностей (4.28)–(4.30) представлено на рис. 4.8.

Мінімізація споживаної потужності  $N$  досягається при зменшенні частоти обертання ротора до 1500 об/хв, а також при збільшенні часу змішування до 60 хв. Спостерігається залежність споживаної потужності  $N$  від діаметру вхідного отвору у статорі диспергатора-гомогенізатора  $D_{in}$ . Так при використанні статора з діаметром вхідного отвору 0.040 м спостерігається найменше значення потужності, що споживається  $N$ , а при збільшенні діаметру вхідного отвору в статорі установки отвору з 0,040 м до 0,060 м, потужність, що споживається збільшується приблизно на 0,43–0,51 кВт.

Таблиця 4.14 – Результати статистичної обробки рівняння (4.26)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	1, 29 467	0, 0244 474	52, 9572	$4, 53 963 \times 10^{-8}$
a10	0, 344 542	0, 0149 709	23, 0141	$2, 88 132 \times 10^{-6}$
a20	0, 108	0, 0149 709	7, 21 399	0, 000 797 864
a30	-0, 185 375	0, 0149 709	-12, 3823	0, 0000 608 711
a12	0, 0761 667	0, 0211 721	3, 59 751	0, 0155 842
a13	-0, 0669 167	0, 0211 721	-3, 16 061	0, 025 078
a23	-0, 00966 667	0, 0211 721	-0, 456 576	0, 667 125
a11	0, 0582 083	0, 0220 366	2, 64 144	0, 0458 966
a22	-0, 0847 083	0, 0220 366	-3, 84 398	0, 0120 747
a33	-0, 0357 917	0, 0220 366	-1, 62 419	0, 165 263

	DF	SS	MS
Model	10	25, 2744	2, 52 744
Error	5	0, 00896 514	0, 00179 303
Uncorrected Total	15	25, 2833	
Corrected Total	14	1, 41 469	

Таблиця 4.15 – Результати статистичної обробки рівняння (4.27)  
у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	1, 00 215	0, 0233 723	42, 8776	$1, 30 204 \times 10^{-7}$
a10	0, 345	0, 0143 126	24, 1047	$2, 28 991 \times 10^{-6}$
a20	0, 1155	0, 0143 126	8, 06 984	0, 000 473 212
a30	-0, 21 775	0, 0143 126	-15, 2139	0, 0000 222 435
a12	0, 092	0, 020 241	4, 54 523	0, 00613 924
a13	-0, 059	0, 020 241	-2, 91 488	0, 0332 109
a23	0, 0045	0, 020 241	0, 222 321	0, 83 286
a11	0, 0849 259	0, 0210 675	4, 03 113	0, 01 001
a22	-0, 00207 407	0, 0210 675	-0, 098 449	0, 925 401
a33	0, 0624 259	0, 0210 675	2, 96 314	0, 0314 049

	DF	SS	MS
Model	10	19, 0089	1, 90 089
Error	5	0, 00819 397	0, 00163 879
Uncorrected Total	15	19, 0171	
Corrected Total	14	1, 53 312	

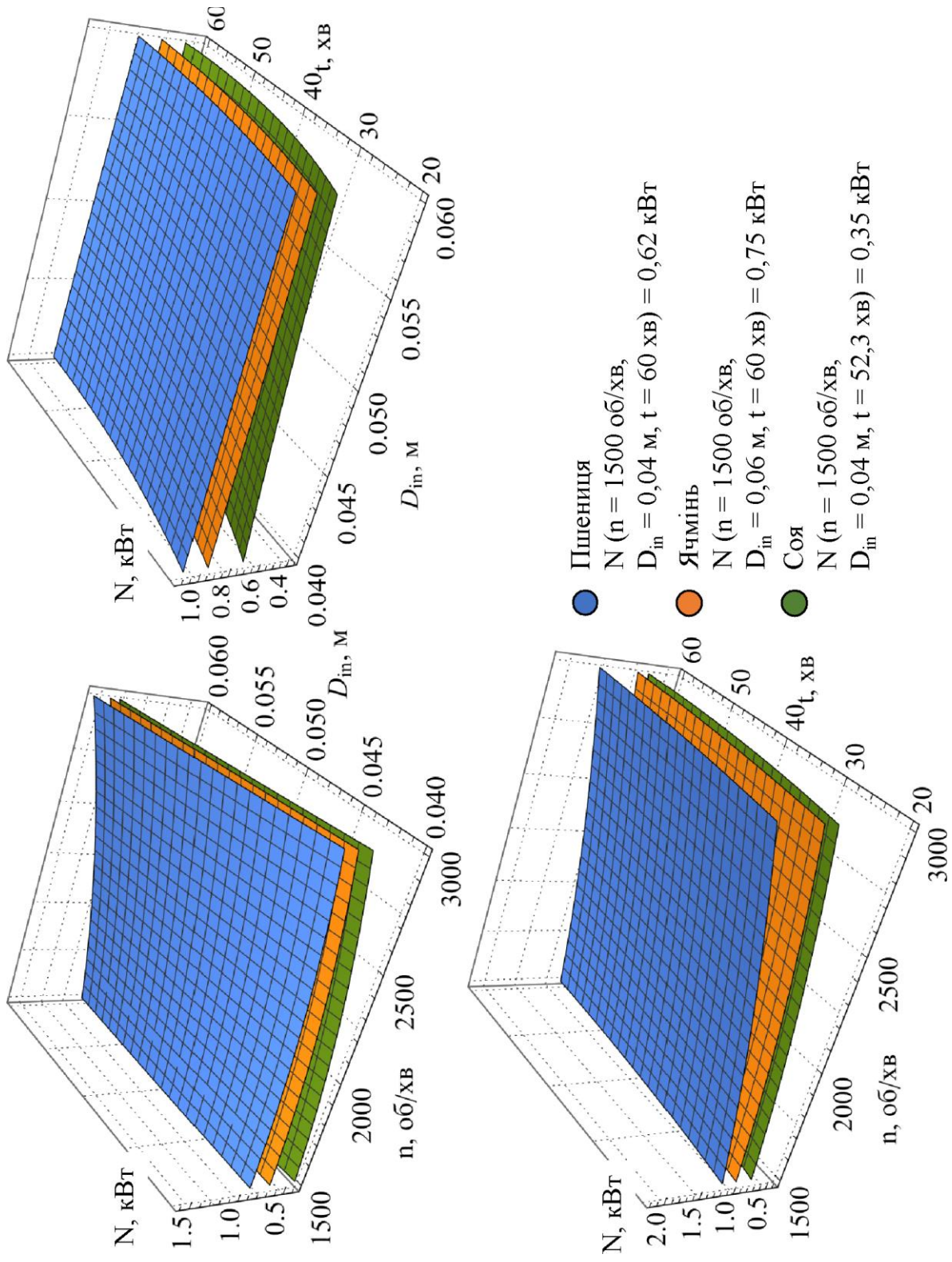


Рисунок 4.8 – Залежності зміни споживаної потужності електродвигуна  $N$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору стагора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$

В залежності від застосування різних культур: при подрібненні пшениці, потужність, що споживається набуває найменшого значення, при подрібненні сої і ячменю потужність, що споживається зростає приблизно на 15,2–17,5 %. При подрібненні пшениці, потужність, що споживається електродвигуном обладнання набуває найвищого серед приведених значень і лежить в діапазоні від 0,62 кВт до 1,51 кВт. Це обумовлено фізико-механічними властивостями зерна різних культур, такими як щільність, розмір і міцність руйнування.

Отримання рівнянь регресії другого порядку зміни витрат енергії  $E$  від досліджуваних факторів у закодованому вигляді стало можливим завдяки обробці отриманих результатів у програмному пакеті Wolfram Cloud:

– для пшениці:

$$E = 2,638 + 0,89325 x_1 + 0,2647 x_1^2 + 0,29535 x_2 + 0,246 x_1 x_2 + 0,0535 x_2^2 + 1,1556 x_3 + 0,3717 x_1 x_3 + 0,1275 x_2 x_3 - 0,053 x_3^2; \quad (4.31)$$

– для ячменя:

$$E = 3,35013 + 0,89725 x_1 + 0,125833 x_1^2 + 0,2914 x_2 + 0,2207 x_1 x_2 - 0,115867 x_2^2 + 1,35075 x_3 + 0,3758 x_1 x_3 + 0,0991 x_2 x_3 - 0,287167 x_3^2; \quad (4.32)$$

– для сої:

$$E = 2,65533 + 0,93065 x_1 + 0,271783 x_1^2 + 0,3551 x_2 + 0,2504 x_1 x_2 + 0,0444833 x_2^2 + 0,93725 x_3 + 0,4297 x_1 x_3 + 0,155 x_2 x_3 + 0,0143833 x_3^2. \quad (4.33)$$

У табл. 4.16–4.18 представлені результати статистичної обробки рівнянь (4.31)–(4.33). Дані, проаналізовані за критерієм Кохрена, свідчать, що дисперсії є однорідними на рівні довірчої ймовірності 95%:  $G_{(4.31)} = 0,0973$ ,  $G_{(4.32)} = 0,1318$ ,  $G_{(4.33)} = 0,1029$ , що є меншим за табличне значення  $G(0,05;2;15) = 0,3346$ . Для кожного з наведених рівнянь значення критерію Фішера становлять:  $F_{(4.31)} = 879,6$ ,  $F_{(4.32)} = 545,1$ ,  $F_{(4.33)} = 99,5$ , що перевищує табличне значення  $F_{(0,05;8;30)} = 2,27$ , а це підтверджує відхилення нульової гіпотези. Отже, розраховані залежності можна вважати адекватними.

Після проведення аналізу даних експериментальних досліджень та відкидання незначущих коефіцієнтів за допомогою критерію Стьюдента, були отримані кінцеві рівняння регресії другого порядку для витрат енергії:

– для пшениці:

$$E = 5,7478 + 4,70578 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0035578 n + 0,00002478 t n - 69,765 D_{in} + 0,0328 n D_{in} + 0,6375 t D_{in} - 0,02985 t; \quad (4.34)$$

– для ячменя:

$$E = -0,916517 - 37,07 D_{in} + 0,0294267 n D_{in} - 0,00127713 n + 0,0000250533 t n + 0,0686008 t - 0,000717917 t^2; \quad (4.35)$$

– для сої:

$$E = -1,20842 + 35,51 D_{in} + 0,000095 n + 0,0000286467 t n - 0,0175925 t. \quad (4.36)$$

Графічне представлення цих залежностей (4.34)–(4.36) наведено на рис. 4.9.

Таблиця 4.16 – Результати статистичної обробки рівняння (4.31) у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	2, 638	0, 0714 683	36, 9115	$2, 74 845 \times 10^{-7}$
a10	0, 89 325	0, 0437 652	20, 41	$5, 22 371 \times 10^{-6}$
a20	0, 29 535	0, 0437 652	6, 74 851	0, 00 108 433
a30	1, 1556	0, 0437 652	26, 4045	$1, 45 633 \times 10^{-6}$
a12	0, 246	0, 0618 934	3, 97 458	0, 0105 878
a13	0, 3717	0, 0618 934	6, 00 549	0, 0018 386
a23	0, 1275	0, 0618 934	2, 05 999	0, 0944 339
a11	0, 2647	0, 0644 207	4, 10 893	0, 00927 355
a22	0, 0535	0, 0644 207	0, 830 479	0, 444 101
a33	-0, 053	0, 0644 207	-0, 822 717	0, 448 113

	DF	SS	MS
Model	10	134, 788	13, 4788
Error	5	0, 0766 158	0, 0153 232
Uncorrected Total	15	134, 864	
Corrected Total	14	18, 9849	

Показник витрати енергії  $E$  на виконання процесу залежить від таких факторів, як час роботи обладнання  $t$ , частота обертання  $n$  та діаметру вхідного отвору у статорі  $D_{in}$  роторного диспергатора-гомогенізатора. Спостерігається значне зростання витрати енергії  $E$  від 0,9 МДж до 6,1 МДж при збільшенні часу змішування з 20 хв до 60 хв, при цьому зростання має лінійний характер.

Таблиця 4.17 – Результати статистичної обробки рівняння (4.32)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	3, 35 013	0, 103 952	32, 2278	$5, 40 358 \times 10^{-7}$
a10	0, 89 725	0, 0 636 572	14, 095	0, 0 000 323 468
a20	0, 2914	0, 0 636 572	4, 57 765	0, 00 596 023
a30	1, 35 075	0, 0 636 572	21, 2191	$4, 30 909 \times 10^{-6}$
a12	0, 2207	0, 0 900 248	2, 45 155	0, 0 578 263
a13	0, 3758	0, 0 900 248	4, 1744	0, 00 870 189
a23	0, 0991	0, 0 900 248	1, 10 081	0, 321 131
a11	0, 125 833	0, 0 937 008	1, 34 293	0, 237 031
a22	-0, 115 867	0, 0 937 008	-1, 23 656	0, 271 164
a33	-0, 287 167	0, 0 937 008	-3, 06 472	0, 0 279 513

	DF	SS	MS
Model	10	176, 762	17, 6762
Error	5	0, 162 089	0, 0324 179
Uncorrected Total	15	176, 924	
Corrected Total	14	23, 1035	

Таблиця 4.18 – Результати статистичної обробки рівняння (4.33)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	2, 65 533	0, 213 932	12, 412	0, 0 000 601 655
a10	0, 93 065	0, 131 006	7, 10 387	0, 000 856 597
a20	0, 3551	0, 131 006	2, 71 056	0, 0422 478
a30	0, 93 725	0, 131 006	7, 15 425	0, 000 829 112
a12	0, 2504	0, 18 527	1, 35 154	0, 23 445
a13	0, 4297	0, 18 527	2, 31 931	0, 068 112
a23	0, 155	0, 18 527	0, 836 615	0, 440 948
a11	0, 271 783	0, 192 836	1, 4094	0, 217 772
a22	0, 0444 833	0, 192 836	0, 23 068	0, 826 705
a33	0, 0143 833	0, 192 836	0, 0745 886	0, 943 434

	DF	SS	MS
Model	10	136, 602	13, 6602
Error	5	0, 686 503	0, 137 301
Uncorrected Total	15	137, 288	
Corrected Total	14	17, 0122	

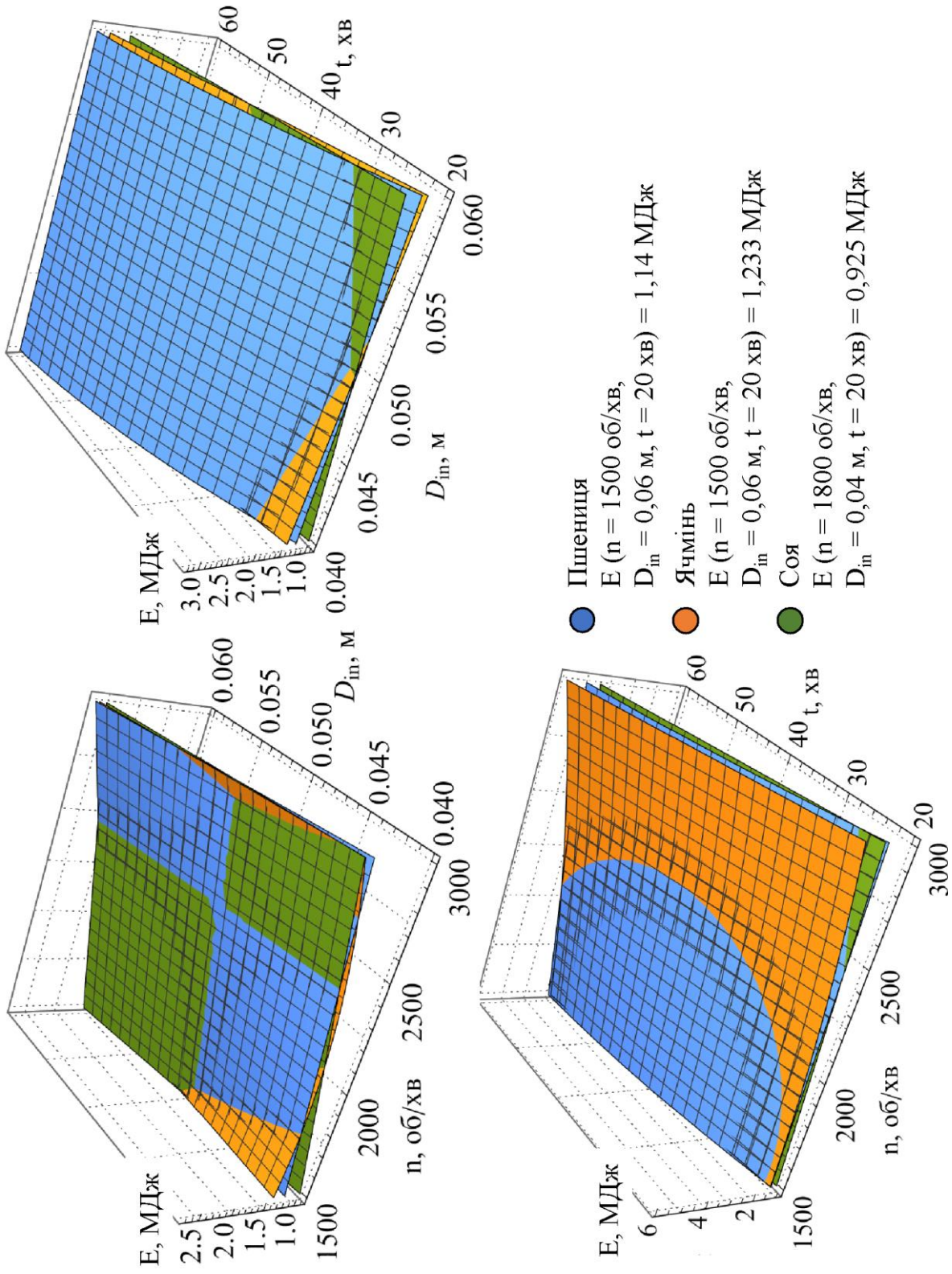


Рисунок 4.9 – Залежності зміни витрат енергії  $E$  на виконання процесу від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$

Відносно цього збільшення витрати енергії  $E$  від зміни діаметру вхідного отвору  $D_{in}$  у статорі майже не спостерігається. Додатково виникає залежність витрати енергії  $E$  від частоти обертання ротора  $n$  установки. При цьому при збільшенні частоти обертання з 1500 об/хв до 3000 об/хв відбувається зростання показника витрати енергії з 0,9 МДж до 1,8 МДж при 20 хв роботи обладнання. Це обумовлено збільшенням циркуляції рідини в процесі диспергації і, витікаючи з цього, збільшенням навантаження на електродвигун приводу установки.

### 4.3 Раціоналізація конструктивно-технологічних параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів

Для обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора розраховані значення питомих витрати енергії  $E_Q$  для кожного дослідження. Отримані результати були оброблені у програмному пакеті Wolfram Cloud, що дозволило визначити відповідного рівняння регресії другого порядку:

– для пшениці:

$$E_Q = 2,638 + 0,89325 x_1 + 0,2647 x_1^2 + 0,29535 x_2 + 0,246 x_1 x_2 + 0,0535 x_2^2 + 1,1556 x_3 + 0,3717 x_1 x_3 + 0,1275 x_2 x_3 - 0,053 x_3^2; \quad (4.36)$$

– для ячменя:

$$E_Q = 3,35013 + 0,89725 x_1 + 0,125833 x_1^2 + 0,2914 x_2 + 0,2207 x_1 x_2 - 0,115867 x_2^2 + 1,35075 x_3 + 0,3758 x_1 x_3 + 0,0991 x_2 x_3 - 0,287167 x_3^2; \quad (4.37)$$

– для сої:

$$E_Q = 2,65533 + 0,93065 x_1 + 0,271783 x_1^2 + 0,3551 x_2 + 0,2504 x_1 x_2 + 0,0444833 x_2^2 + 0,93725 x_3 + 0,4297 x_1 x_3 + 0,155 x_2 x_3 + 0,0143833 x_3^2. \quad (4.38)$$

У табл. 4.19–4.21 наведені результати статистичної обробки рівнянь (4.36)–(4.38). Аналіз даних за критерієм Кохрена підтверджує, що дисперсії є однорідними на рівні довірчої ймовірності 95%:  $G_{(4.36)} = 0,2097$ ,  $G_{(4.37)} = 0,2412$ ,  $G_{(4.38)} = 0,3139$ , що є меншим за табличне значення  $G_{(0,05;2;15)} = 0,3346$ . Для кожного з наведених рівнянь значення критерію Фішера становлять:  $F_{(4.36)} = 879,6$ ,  $F_{(4.37)} = 545,2$ ,  $F_{(4.38)} = 99,4$ , що перевищує табличне

значення  $F_{(0,05;8;30)} = 2,27$ , а це вказує на відхилення нульової гіпотези. Таким чином, можна зробити висновок про адекватність отриманих залежностей.

Провівши обробку одержаних даних - отримано залежність у вигляді рівняння регресії другого порядку питомих витрати енергії  $E_Q$  від факторів досліджень з урахуванням відхилених незначущих коефіцієнтів за критерієм Стьюдента:

– для пшениці:

$$E_Q = 2,13427 + 380,642 D_{in}^2 + 9,1278 \cdot 10^{-8} n^2 - 0,00073436 n + 4,209 \cdot 10^{-6} t n - 50,9548 D_{in} + 0,00678296 n D_{in} + 0,134669 t D_{in} - 0,00460813 t; \quad (4.39)$$

– для ячменя:

$$E_Q = -0,745819 + 6,89807 D_{in} + 0,00014967 n + 0,0269918 t - 0,000169362 t^2; \quad (4.40)$$

– для сої:

$$E_Q = -0,267809 + 10,535 D_{in} - 0,0000278195 n + 5,7824 \cdot 10^{-6} t n - 0,003647 t. \quad (4.41)$$

Таблиця 4.19 – Результати статистичної обробки рівняння (4.36)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	2, 638	0, 0714 683	36, 9115	2, 74 845 $\times 10^{-7}$
a10	0, 89 325	0, 0437 652	20, 41	5, 22 371 $\times 10^{-6}$
a20	0, 29 535	0, 0437 652	6, 74 851	0, 00 108 433
a30	1, 1556	0, 0437 652	26, 4045	1, 45 633 $\times 10^{-6}$
a12	0, 246	0, 0618 934	3, 97 458	0, 0 105 878
a13	0, 3717	0, 0618 934	6, 00 549	0, 0018 386
a23	0, 1275	0, 0618 934	2, 05 999	0, 0944 339
a11	0, 2647	0, 0644 207	4, 10 893	0, 00927 355
a22	0, 0535	0, 0644 207	0, 830 479	0, 444 101
a33	-0, 053	0, 0644 207	-0, 822 717	0, 448 113

	DF	SS	MS
Model	10	134, 788	13, 4788
Error	5	0, 0766 158	0, 0153 232
Uncorrected Total	15	134, 864	
Corrected Total	14	18, 9849	

Мінімізуючи питомі витрати енергії  $E_Q$  при умові дотримання показника розшарованості суміші  $i_d < 5\%$  побудовано графічну інтерпретацію залежностей (4.36)–(4.38) з урахуванням (4.10)–(4.12) на рисунок 4.10.

Таблиця 4.20 – Результати статистичної обробки рівняння (4.37)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	3, 35 013	0, 103 952	32, 2278	$5, 40 358 \times 10^{-7}$
a10	0, 89 725	0, 0636 572	14, 095	0, 0000 323 468
a20	0, 2914	0, 0636 572	4, 57 765	0, 00 596 023
a30	1, 35 075	0, 0636 572	21, 2191	$4, 30 909 \times 10^{-6}$
a12	0, 2207	0, 0900 248	2, 45 155	0, 0578 263
a13	0, 3758	0, 0900 248	4, 1744	0, 00 870 189
a23	0, 0991	0, 0900 248	1, 10 081	0, 321 131
a11	0, 125 833	0, 0937 008	1, 34 293	0, 237 031
a22	-0, 115 867	0, 0937 008	-1, 23 656	0, 271 164
a33	-0, 287 167	0, 0937 008	-3, 06 472	0, 0279 513

	DF	SS	MS
Model	10	176, 762	17, 6762
Error	5	0, 162 089	0, 0324 179
Uncorrected Total	15	176, 924	
Corrected Total	14	23, 1035	

Таблиця 4.21 – Результати статистичної обробки рівняння (4.38)

у програмному пакеті Wolfram Cloud

	Estimate	Standard Error	t-Statistic	P-Value
a00	2, 65 533	0, 213 932	12, 412	0, 0000 601 655
a10	0, 93 065	0, 131 006	7, 10 387	0, 000 856 597
a20	0, 3551	0, 131 006	2, 71 056	0, 0422 478
a30	0, 93 725	0, 131 006	7, 15 425	0, 000 829 112
a12	0, 2504	0, 18 527	1, 35 154	0, 23 445
a13	0, 4297	0, 18 527	2, 31 931	0, 068 112
a23	0, 155	0, 18 527	0, 836 615	0, 440 948
a11	0, 271 783	0, 192 836	1, 4094	0, 217 772
a22	0, 0444 833	0, 192 836	0, 23 068	0, 826 705
a33	0, 0143 833	0, 192 836	0, 0745 886	0, 943 434

	DF	SS	MS
Model	10	136, 602	13, 6602
Error	5	0, 686 503	0, 137 301
Uncorrected Total	15	137, 288	
Corrected Total	14	17, 0122	

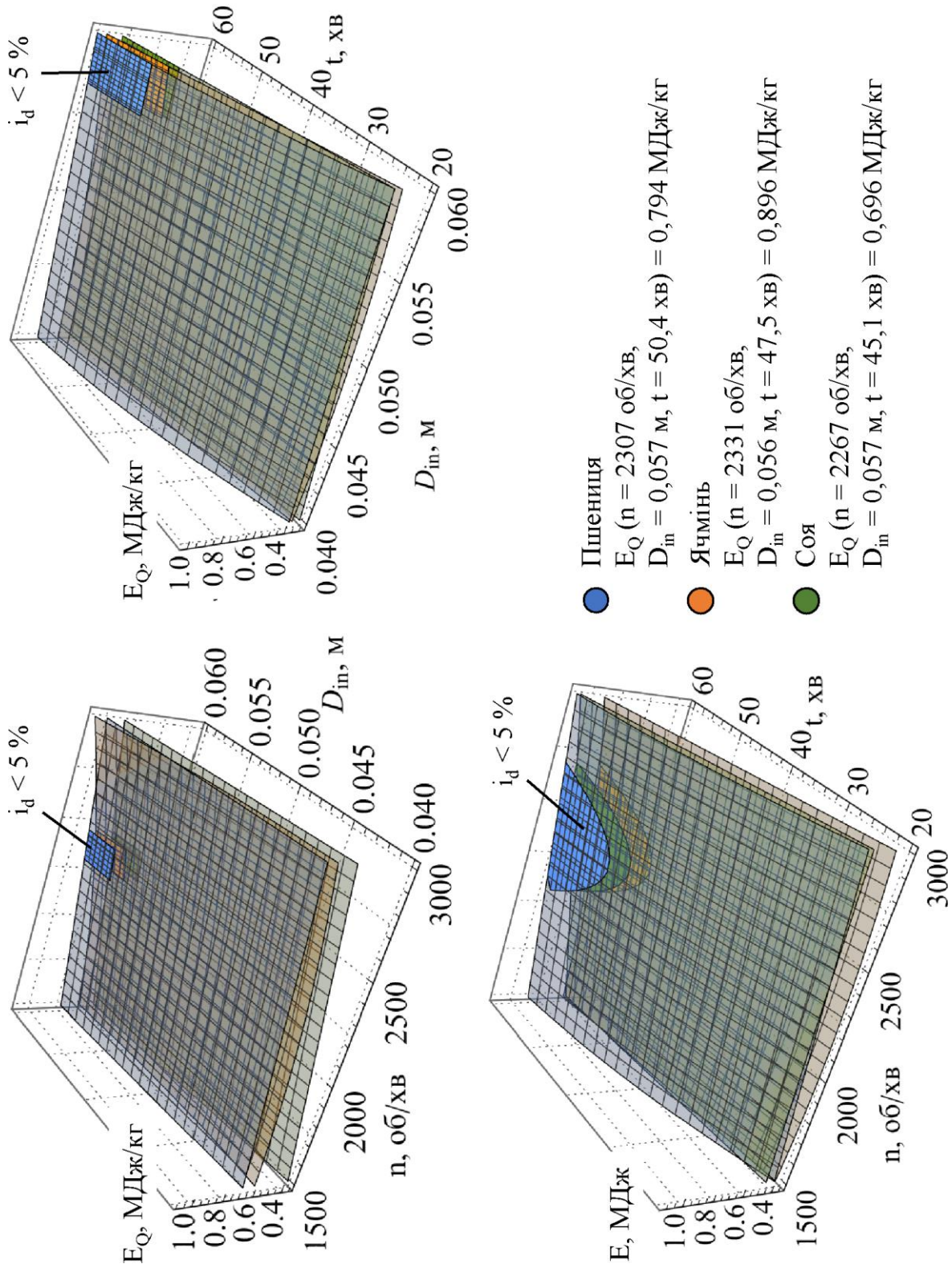


Рисунок 4.10 – Залежності питомих витрат енергії  $E_Q$  на виконання процесу від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$

Мінімізація питомих витрати енергії  $E_Q$  при умові, що показник розшарованості  $i_d < 5 \%$  відбувається при зменшенні діаметру вхідного отвору у статорі  $D_{in}$  диспергатора-гомогенізатора до розміру 0,056–0,057 м, що обумовлено зменшенням потоку рідини в середині установки. При цьому можна спостерігати залежність питомих витрати енергії і від частоти обертання ротору, таким чином, що при збільшенні частоти обертання ротору  $n$  з 1500 об/хв до 3000 об/хв відбувається зростання питомих витрати енергії  $E_Q$  в межах 0.5 МДж/кг.

Однак при  $i_d < 5 \%$  раціональна частота обертання  $n$  для різного вхідного матеріалу знаходиться в межах 2267–2331 об/хв. Більш значний вплив на питому витрату енергії має час роботи обладнання  $t$ . Так при збільшенні часу роботи обладнання  $t$  з 20 хв до 60 хв, показник питомих витрат енергії  $E_Q$  зростає приблизно на 0,8 МДж/кг при сталій частоті обертання  $n$ .

При умові  $i_d < 5 \%$  і  $E_Q \rightarrow \min$  спостерігається раціональне значення час роботи обладнання  $t$  для різного вхідного матеріалу в межах 45,1–50,4 хв. Спостерігається незначна зміна показника питомої витрати потужності  $E_Q$  в залежності від виду зернових культур що використовуються під час експерименту, таким чином найменші питомі витрати енергії спостерігаються при використанні сої – 0,696 МДж/кг, при використанні пшениці – 0,794 МДж/кг і при використанні ячменю – 0,896 МДж/кг. При цьому раціональне значення частоти обертання ротора  $n$  повинна бути в межах 2267–2431 об/хв, а діаметр вхідного отвору статора  $D_{in}$  в межах 0,057–0,060 м.

#### 4.4 Висновки до розділу

1. В ході експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів встановлені залежності для пшениці, ячменю та сої у вигляді рівнянь регресії другого порядку зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$  (4.4)–(4.6), показника розшарованості суміші  $i_d$  (4.10)–(4.12), температури суміші в кінці процесу  $T$  (4.16)–(4.18), кінематичної в'язкості  $\nu$  (4.22)–(4.24) від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи

обладнання  $t$ . Застосування критеріїв Кохрена та Фішера дозволило підтвердити адекватність отриманих рівнянь регресії. Збільшення показника частоти обертання ротора  $n$  має позитивний вплив на якість подрібнення сипкого матеріалу під час приготування кормової суміші. Зі зростання частоти обертання ротора показник фракційного складу  $k_{fr}$  (0-0,5) збільшується. Показник розшарованості суміші  $i_d$  помітно зменшується при збільшенні показника частоти обертання ротора  $n$ .

2. В ході експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів встановлені залежності для пшениці, ячменю та сої у вигляді рівнянь регресії другого порядку зміни потужності, що споживається  $N$  (4.28)–(4.30), витрат енергії  $E$  (4.34)–(4.36), питомих витрати енергії  $E_Q$  (4.39)–(4.41) від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$ . Застосування критеріїв Кохрена та Фішера дозволило підтвердити адекватність отриманих рівнянь регресії. Контроль зміни параметра потужності, що споживається дав змогу визначити оптимальні режими роботи установки, завдяки тому що потужність, що споживається помітно зменшувалась при досягненні певних величин показника фракційного складу  $k_{fr}$  і показника розшарованості суміші  $i_d$ . Зміна показника діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$  мали значний вплив на показник питомих витрати енергії  $E_Q$  завдяки визначенню цих залежностей вдалось визначити оптимальні параметри роботи диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней.

3. Дослідження готової суміші на лабораторному мікроскопі дозволило визначити вплив показників частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$  на показник фракційного складу  $k_{fr}$ . Завдяки дослідженню було визначено при яких показниках частоти обертання ротора  $n$ , відбувається найбільше подрібнення зернової складової кормової суміші і на яких показниках однорідність найбільша.

4. Дослідження показника температури суміші  $T$  під час всього процесу приготування в режимі реального часу дали змогу спостерігати за дотриманням оптимальних умов для приготування кормових сумішей, переконатись що температура не була перевищена. Дослідження показника кінематичної в'язкості  $v$

проводилось для визначення основних фізичних показників суміші, які будуть впливати на ефективність процесу роздачі кормів мобільними або стаціонарними роздавачами.

5. Аналізуючи отримані залежності встановлено, що при умові, коли показник розшарованості суміші  $i_d$  менше 5 %, вміст частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$  є максимальним, питомі витрати енергії  $E_Q$  мають бути мінімізовані, спостерігається оптимальне значення часу роботи обладнання  $t$  для різних типів вхідного матеріалу в межах 45,1–50,4 хв. Також спостерігається незначна зміна показника питомої витрати енергії  $E_Q$  залежно від типу зернових культур, які використовуються під час експерименту. Найменші питомі витрати енергії спостерігаються при використанні сої – 0,696 МДж/кг, пшениці – 0,794 МДж/кг і ячменю – 0,896 МДж/кг. При цьому раціональне значення частоти обертання ротора  $n$  повинна бути в межах 2267–2431 об/хв, а діаметр вхідного отвору статора  $D_{in}$  в межах 0,057–0,060 м.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [154, 155].

## 5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1 Розробка автоматизованої системи керування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів

Згідно розділу 2.1 процес кавітаційного диспергування та гомогенізації рідких кормів складається із простих технологічних операції, послідовність виконання яких має забезпечити блок автоматичного керування. Система автоматичного керування таким процесом може бути реалізована на основі:

- промислових контролерів;
- мікропроцесорних систем;
- мікропрограмних автоматів з жорсткою логікою.

Створення програм для реалізації системи керування у перших двох випадках можливо виконати на мовах програмування верхнього рівня за попередньо розробленим алгоритмом. Проте розробку програм можна суттєво пришвидшити і полегшити, якщо використовувати мову програмування логічних операцій LD (Ladder Diagram) для промислових контролерів або вбудовані функції Case та Switch при програмуванні на мові C++ для мікропроцесорних систем. Практична реалізація даних можливостей потребує попередньої розробки графа автомата Мура або Мілі дискретної системи керування. Варто також зазначити, що проектування мікропрограмного автомата з жорсткою логікою можливо лише за наявності графа автомата.

Графи автоматів Мура та Мілі не мають суттєвих відмінностей і легко перетворюються один в одного. При їх проектуванні необхідно скласти алфавіти станів, входів та виходів. Алфавіт станів є природним відображенням процесів, що відбуваються в технологічному апараті, коли як алфавіт входів – відображає можливості системи контролю виконання окремих операцій і умов переходу до наступної операції. Алфавіт виходів надає можливість оператору слідкувати за поточними операціями.

В таблиці 5.1 подані стани графа автомата Мура, в яких може перебувати роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор під час кавітаційного диспергування та гомогенізації рідких кормів у продовж одного циклу роботи. Граф-автомат має 15 станів, які відповідають простим операціям, що були розглянуті раніше.

Таблиця 5.1 – Алфавіт станів кінцевого автомата

№	Стан	Проста операція
1	A <sub>0</sub>	Диспергатор-гомогенізатор зупинений, технологічний процес не відбувається
2	A <sub>1</sub>	Кран подачі рідкого компонента відкривається
3	A <sub>2</sub>	Рідкий компонент рухається у завантажувальну ємність
4	A <sub>3</sub>	Кран подачі рідкого компонента закривається, рух рідкого компонента до завантажувальної ємності припиняється
5	A <sub>4</sub>	Заслінка у входному патрубку для сипких компонентів відкривається на кут $\alpha$
6	A <sub>5</sub>	Відлік часу $t_c$ руху сипкого компонента до завантажувальної ємності
7	A <sub>6</sub>	Заслінка у входному патрубку для сипких компонентів закривається
8	A <sub>7</sub>	Асинхронний електродвигун вмикається, нагрівач вмикається
9	A <sub>8</sub>	Нагрівач вимикається
10	A <sub>9</sub>	Процес диспергування
11	A <sub>10</sub>	Асинхронний електродвигун зупиняється
12	A <sub>11</sub>	Кран вивантаження готової суміші відкривається
13	A <sub>12</sub>	Насос вивантаження готової суміші запускається
14	A <sub>13</sub>	Вивантажується готова суміш
15	A <sub>14</sub>	Насос вивантаження готової суміші зупиняється, кран вивантаження готової суміші закривається

В таблиці 5.2 подано перелік входів, які забезпечують перехід системи до наступному стану.

Таблиця 5.2 – Алфавіт входів кінцевого автомата Мура

№	Вхід	Назва вхідного впливу
1	X <sub>1</sub>	Пуск системи автоматичного керування
2	X <sub>2</sub>	Зупинення системи автоматичного керування
3	X <sub>3</sub>	Кран подачі рідкого компонента не відкрився
4	$\bar{X}_3$	Кран подачі рідкого компонента відкрився

№	Вхід	Назва вхідного впливу
5	$X_4$	Об'єм рідкого компоненту у завантажувальній ємності $V < V_p$
6	$\bar{X}_4$	Об'єм рідкого компоненту у завантажувальній ємності $V > V_p$
7	$X_5$	Кран подачі рідкого компоненту не закрився
8	$\bar{X}_5$	Кран подачі рідкого компоненту закрився
9	$X_6$	Заслінка у вхідному патрубку для сипких компонентів не повернулась на кут $\alpha$
10	$\bar{X}_6$	Заслінка у вхідному патрубку для сипких компонентів повернулась на кут $\alpha$
11	$X_7$	Час руху сипкового компоненту до завантажувальної ємності $t < t_c$
12	$\bar{X}_7$	Час руху сипкового компоненту до завантажувальної ємності $t > t_c$
13	$X_8$	Заслінка у вхідному патрубку для сипких компонентів не закрилась
14	$\bar{X}_8$	Заслінка у вхідному патрубку для сипких компонентів закрилась
15	$X_9$	Асинхронний електродвигун не запустився
16	$\bar{X}_9$	Асинхронний електродвигун запустився
17	$X_{10}$	Нагрівач не увімкнувся
18	$\bar{X}_{10}$	Нагрівач увімкнувся
19	$X_{11}$	Температура суміші у завантажувальній ємності $T < T_c$ (рівняння (4.16)–(4.17))
20	$\bar{X}_{11}$	Температура суміші у завантажувальній ємності $T > T_c$ (рівняння (4.16)–(4.17))
21	$X_{12}$	Поточна потужність асинхронного електродвигуна $N > \text{const}$ (рівняння (4.28)–(4.30))
22	$\bar{X}_{12}$	Поточна потужність асинхронного електродвигуна $N < \text{const}$ (рівняння (4.28)–(4.30))
23	$X_{13}$	Асинхронний електродвигун не зупинився
24	$\bar{X}_{13}$	Асинхронний електродвигун зупинився
25	$X_{14}$	Кран вивантаження готової суміші не відкрився
26	$\bar{X}_{14}$	Кран вивантаження готової суміші відкрився
27	$X_{15}$	Насос вивантаження готової суміші не запустився
28	$\bar{X}_{15}$	Насос вивантаження готової суміші запустився
29	$X_{16}$	Суміш не вивантажилася
30	$\bar{X}_{16}$	Суміш вивантажилася
31	$X_{17}$	Насос вивантаження готової суміші не зупиняється
32	$\bar{X}_{17}$	Насос вивантаження готової суміші зупиняється
33	$X_{18}$	Кран вивантаження готової суміші не закрився
34	$\bar{X}_{18}$	Кран вивантаження готової суміші закрився

Алфавіт виходів автомата Мура дискретної системи автоматичного керування роторним кавітаційним диспергатором-гомогенізатором повторює алфавіт станів. У

продовж одного циклу кавітаційного диспергування та гомогенізації рідких кормів назви станів відображаються на панелі індикації блока керування, що надає можливість оператору слідкувати за процесами, які відбуваються в середині технологічного апарату.

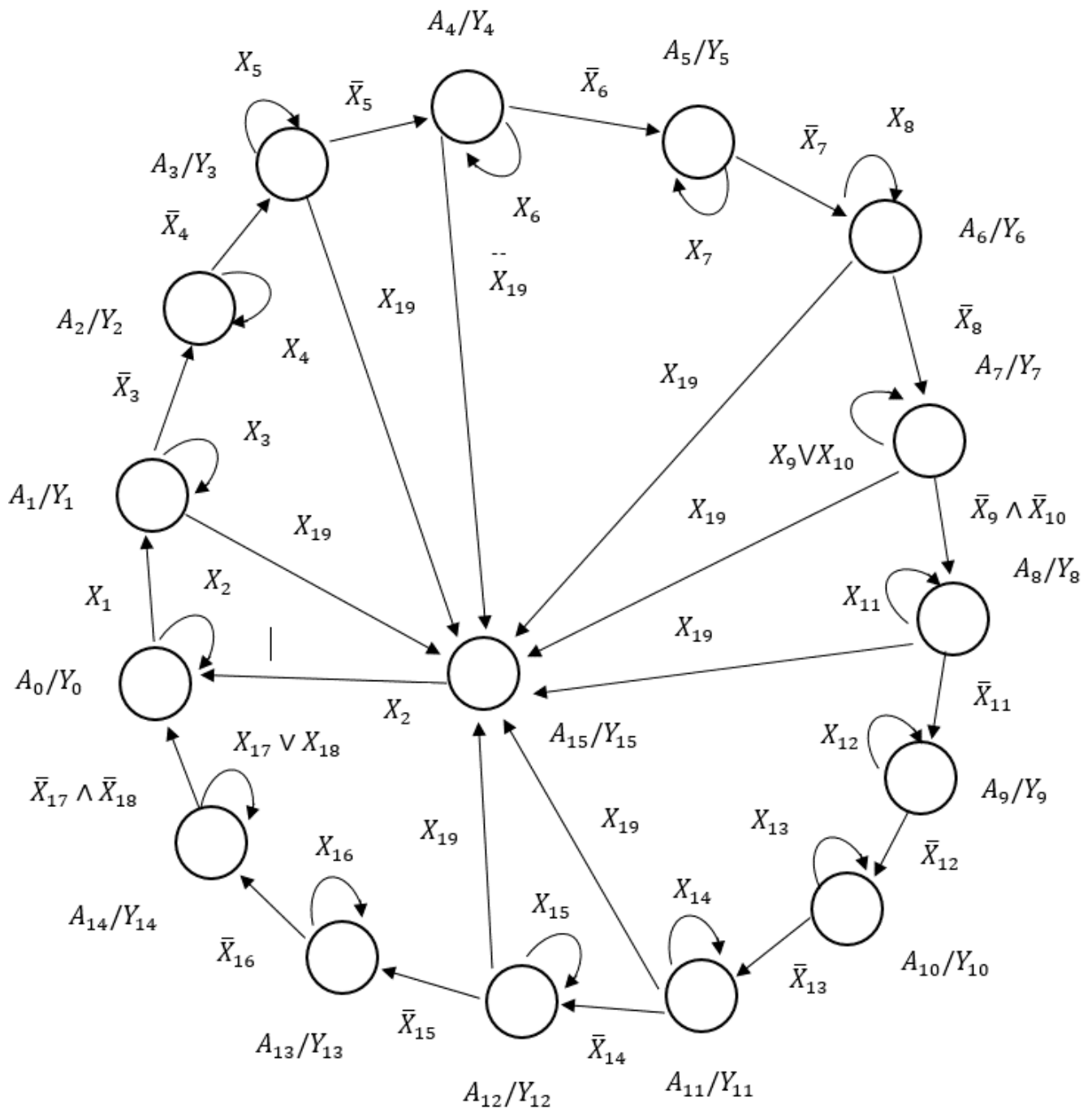


Рисунок 5.1 – Граф станів кінцевого автомата

Граф станів кінцевого автомата Мура системи керування роторним кавітаційним диспергатором-гомогенізатором показаний на рисунку 5.1 На даному рисунку показані також стан «нетиповий результат операції»  $A_{15}$ , вхід «некоректне завершення операції»  $X_{19}$  та вихід «потрібне втручання оператора»  $Y_{15}$ . Дані елементи відображають можливі збої в роботі технологічного апарату. В подальшому при проектуванні дискретної системи автоматичного керування необхідно розглянути можливі збої більш детально та визначити реакцію системи автоматичного керування на кожен із них.

## **5.2 Виробничі випробування диспергатора-гомогенізатора рідких кормів**

Виробничі випробування були проведені на базі фермерського господарства «Моніка» (ЄДРПОУ 37901619, Україна, 51040, Дніпропетровська обл., Дніпровський р-н, с. Могилів, вул. Староселівська, буд. 51А) представлені на рис. 5.2. Під час випробувань досліджувався технологічний процес гомогенізації рідких кормів для свиней із застосуванням дослідного зразка розробленого обладнання. Випробування засвідчили, що пристрій стабільно забезпечує продуктивність на рівні 27–35 кг/год, при цьому середня потужність, що споживається складає лише 1,1 кВт, що свідчить про його високу енергоефективність. За результатами вимірювань, вміст твердих частинок у межах 0–0,5 мм у готовому кормі склав 90,4–92,5 %, що є показником високого ступеня диспергування, а кінематична в'язкість корму залишалася стабільною в межах 68–75 мм<sup>2</sup>/с. Такі параметри забезпечують оптимальну структуру рідкої кормової суміші, що сприяє її легкому споживанню, кращому засвоєнню та рівномірному розподілу поживних речовин.

Оцінка ефективності роботи обладнання у виробничих умовах підтвердила, що застосування розробленого роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора дозволяє підвищити якість кінцевого продукту і значно зменшити витрати енергії та трудові ресурси, зменшити кількість втрат сировини, а також скоротити час обробки кормів (додаток Е).



Рисунок 5.2 – Виробничі випробування роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней

При проведенні випробувань (рис. 5.2) з впливу комплексного застосування рідкого корму рослинного походження, отриманого з використанням диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, в годівлі поросят при відлученні були отримані наступні основні результати (табл. 5.3). Дані табл. 5.3 підтверджують факт суттєвого випереджального зростання поросят, пов'язаний із комплексним застосуванням диспергованого гомогенізованого рідкого корму. Поросята дослідної групи

характеризувались вирівняною живою масою 17,4–18,8 кг, порівняно з контролем 14,8–17,0 кг. Вони перевищували контроль за живою масою віком 60 днів на 10,33%. Збільшився рівень середньодобових приростів в групі на 18,22%, в середньому він склав 356 г/гол, порівняно з контролем – 291 г/гол у сутки.

Відхід поголів'я на фоні застосування диспергованого гомогенізованого рідкого корму був відсутнім. Поросята після відлучення від свиноматок набагато легше переходили на споживання диспергованого гомогенізованого рідкого корму порівняно з контрольною групою яка споживала сухий комбікорм. Повністю виключається прояв та вплив після від'ємного та кормового стресу на подальше зростання молодняку (табл. 5.4).

Таблиця 5.3 – Порівняння приросту живої маси поросят при відлученні

Показники	Групи		
	Контрольна	Дослідна	% до контролю
Кількість голів у групі	20	20	–
Жива маса поросят у 28 днів, кг	7,75	7,70	0,65
Жива маса поросят у 60 днів, кг	16,50	18,40	10,33
Абсолютний приріст, кг	8,75	10,70	–
Середньодобовий приріст поросят, г	291,67	356,67	18,22

Таблиця 5.4 – Ефективність годування поросят після відлучення диспергованим гомогенізованим рідким кормом

Показники	Групи	
	Контрольна	Дослідна
Кількість поросят на кінець досліду, гол.	20	20
Тривалість досліду, днів	30	30
Отримано приросту, кг	175	214
Отримано додаткового приросту, кг	–	39

На основі отриманих результатів встановлено, що поросята дослідної групи проявляли кращу кормову активність, активніше споживали корм і воду. Це призвело до суттєвого зменшення рівня захворюваності на діарею серед молодняку. Комплексне використання диспергованого та гомогенізованого рідкого корму позитивно вплинуло на стан здоров'я поросят, завдяки чому поживні речовини

раціонів через здорові органи і тканини більш повно реалізовували продуктивний потенціал тварин.

Дані щодо економічної ефективності комплексного застосування диспергованого гомогенізованого рідкого корму на організм поросят на дорощуванні представлені в таблиці 5.5.

За результатами проведених досліджень встановлено наступне, що комплексне використання диспергованого гомогенізованого рідкого корму рослинного походження при відлученні забезпечило випереджувальні темпи росту поросят. У 60-денному віці середня жива маса поросят дослідної групи досягла 18,4 кг, що на 10,33 % більше порівняно з контролем (16,5 кг). Середньодобовий приріст живої маси збільшився на 18,22 % та становив 356 г/голову на добу проти 291 г/голову у контрольній групі. Водночас молодняк дослідної групи характеризувався більш вирівняною масою тіла (діапазон 17,4–18,8 кг проти 14,8–17,0 кг у контролі), що свідчить про більш рівномірний розвиток поросят.

Таблиця 5.5 – Економічна ефективність використання диспергованого гомогенізованого рідкого корму для відгодівлі поросят після відлучення

Показники	Групи тварин	
	Контрольна	Дослідна
Кількість поросят на початок дослідю, гол.	20	20
Кількість поросят в кінці дослідю, гол.	20	20
Тривалість дослідю, днів	30	30
Отримано приросту за період дослідю, кг	175	214
Отримано додаткового приросту, кг	–	39
Собівартість 1 кг приросту живої маси, грн	63,1	
Собівартість отриманого приросту, грн	11042,5	13503,4
Середня вартість реалізації живої маси молодняку грн/кг	85,0	
Виручка від умовної реалізації молодняку, грн	14875	18119
Отриманий прибуток від виробництва, грн	3832,5	4686,6
Додатковий прибуток, грн	–	854,1

Поросята, які отримували рідкий корм, легше адаптувалися до годівлі після відлучення, що дозволило повністю уникнути після відлученого та кормового стресу. Випадків відходу молодняку в дослідній групі не зафіксовано. Крім того, у поросят

дослідної групи спостерігалось суттєве зниження захворюваності на діарею порівняно з контролем. Покращена кормова поведінка (поросята охочіше споживали корм і воду) сприяла підтриманню здорового фізіологічного стану, що забезпечило ефективнішу реалізацію їхнього продуктивного потенціалу.

Прирости живої маси за період дослідю. За 30-денний період дорощування після відлучення загальний приріст живої маси поросят у дослідній групі становив 214 кг на групу (20 голів), тоді як у контрольній – 175 кг. Додатковий приріст ваги завдяки використанню диспергованому гомогенізованому рідкого корму склав 39 кг на групу за дослідний період, тобто майже 1,95 кг на одну голову більше ніж результат контролю. Це підтверджує підвищену продуктивність вирощування поросят за рахунок застосування рідкого раціону. При цьому витрати кормів на 1 кг приросту залишалися на рівні контролю (близько 63,1 грн), що вказує на збереження ефективності кормовикористання при більш інтенсивному рості.

Поліпшення приростів і збереженості тварин забезпечило підвищення економічних показників виробництва. За умов реалізації отриманого приросту живої маси поросят за ціною 85,0 грн/кг дослідна група забезпечила умовну виручку 18119 грн, що перевищує показник контролю (14875 грн). Собівартість отриманого приросту в обох групах була близькою 63,1 грн/кг, однак за рахунок більшої маси приросту прибуток у дослідній групі досяг 4686,6 грн, тоді як у контрольній – 3832,5 грн. Додатковий прибуток від застосування рідкого корму склав 854,1 грн за 30 днів вирощування (приблизно +22% до прибутку контрольної технології).

Залежність між типом годівлі та продуктивністю. Встановлено пряму залежність між використанням диспергованого гомогенізованого рідкого корму при відлученні та підвищенням продуктивності поросят. Застосування диспергованого гомогенізованого рідкого рослинного корму в раціонах відлучених поросят привело до збільшення приростів живої маси без підвищення витрат корму на одиницю продукції, що у комплексі забезпечило вищу продуктивність вирощування та економічну доцільність технології.

### 5.3 Впровадження результатів досліджень

Впроваджено результати дисертації в освітній процес кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету при викладанні навчальної дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія». У межах навчального курсу було реалізовано практичну роботу «Механізація подрібнення концентрованих кормів», метою якої є вивчення конструкції, принципу дії та особливостей технологічного процесу машин для подрібнення концентрованих кормів, а також засвоєння методики розрахунку їх основних параметрів. Матеріальним забезпеченням для проведення цієї роботи виступає дослідний зразок створеного диспергатора-гомогенізатора у відповідності до положень дисертації. Зазначений пристрій використовується у навчальному процесі для ознайомлення студентів із сучасними технічними рішеннями у сфері механізації процесів підготовки рідких кормів у тваринництві (додаток Д)

В 2021 році проєкт розробки роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней було представлено на обласному конкурсі проєктів «Молоді вчені – Дніпропетровщині», проєкт увійшов в ТОП-10 і отримав грант у розмірі 36017,79 грн, який було використано на виробництво окремих частин дослідного зразка (додаток Л).

Результати науково-технічної роботи впроваджено та використано у виробничій діяльності підприємства ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» (ЄДРПОУ 36841800, Дніпропетровська обл., м. Дніпро, вул. Бердянська, буд. 3а). ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» отримало комплект конструкторської документації, а також конструктивно-технологічну схему роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів, розробленого в межах дисертаційного дослідження. На основі одержаних матеріалів підприємство виявило зацікавленість у виготовленні дослідної партії роторних кавітаційних диспергаторів-гомогенізаторів у кількості п'яти одиниць для проведення виробничих випробувань із подальшим

впровадженням у серійне виробництво (додаток Ж).

Здійснено впровадження результатів науково-технічної роботи на виробництві Приватного підприємства «Агромех плюс» (код ЄДРПОУ 35740275, м. Дніпро, Донецьке шосе, буд. 7, кв. 59). Впровадження результатів відбулося в межах співпраці між Дніпровським державним аграрно-економічним університетом та ПП «Агромех плюс». ПП «Агромех плюс» отримало повний комплект конструкторської та технічної документації, а також експериментальний зразок кавітаційного диспергатора-гомогенізатора. Цей пристрій призначений для приготування рідких харчових продуктів і кормів. Він був розроблений на основі результатів науково-дослідної роботи БМ-14/2020 «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки дослідної сировини й біологічно цінної харчової продукції і кормової добавки», що виконувалась у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті згідно з № ДР 0120U100322 (додаток К). Отримана підприємством конструкторська та технічна документація буде використана для виготовлення дослідних зразків зазначеного обладнання з метою проведення подальших дослідно-виробничих випробувань. Зразки дадуть змогу апробувати технічні рішення у реальних виробничих умовах, з подальшим можливим впровадженням у серійне виробництво (додаток И)

#### **5.4 Техніко-економічна ефективність**

Розрахунок техніко-економічної ефективності впровадження роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней виконано у порівнянні із двома базовими установками: роторний кавітаційний диспергатор РКД (ЗНДЦМТ ІМА АПВ НААН, м. Запоріжжя) і гомогенізатором (STS Group, м. Дніпро). Для порівняння було обрано методикау ДСТУ 4397:2005 [156]. Показники і коефіцієнти для розрахунку витрат на електроенергію, амортизацію, технічне обслуговування і ремонт, оплату праці прийняті згідно відомостей вказаних в літературних джерелах [157, 158, 159, 160, 161]. Об'єктом дослідження стала свиноферма із поголів'ям свиней 800 гол., 25% з яких, знаходяться на дорощуванні

(200 гол.). Рідкі корми, виготовленні за допомогою кавітаційного роторного диспергатора-гомогенізатора слугували заміником молока для поросят на дорощуванні.

Як видно з таблиці 5.6, роторний кавітаційний диспергатор РКД ЗНДЦМТ ІМА АПВ НААН, другий – промисловий проточний гомогенізатор STS Group, третій – експериментальна розробка на основі роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора. Всі три технології працюють у порційному режимі з різною тривалістю циклу, об'ємом змішування та конструктивними особливостями.

Таблиця 5.6 – Показники економічної ефективності впровадження

Показник	РКД ЗНДЦМТ ІМА АПВ НААН (I)	Проточний гомогенізатор STS Group (II)	Роторний кавітаційний диспергатор- гомогенізатор	
			(I)	(II)
Поголів'я свиней, гол.	200	200	200	
Добова потреба, кг	2	2	2	
Річна потреба, кг	730	730	730	
Потреба корму по фермі, кг	146000	146000	146000	
Річний наробіток, год.	4380	3893,33	4055,55	
Маса порції, кг	20	30	18	
Продуктивність, кг/год.	33,33	37,5	36	
Потужність, що споживається, кВт	3,2	4	1,1	
Тривалість роботи, год.	0,6	0,8	0,5	
Потужність спожита за рік, кВт·год	14016	15573,33	4461,11	
Персонал, люд.	1	1	1	
Вартість машини, грн	96000	120000	140000	
Затрати на оплату праці, грн	574656,00	510805,33	532088,89	
Затрати на електроенергію, грн	60549,12	67276,8	19272	
Затрати на амортизацію, грн	17280	21600	25200	
Затрати на ремонт і ТО, грн	2880	3600	4200	
Загальні втрати, грн	655365,12	603282,13	580760,89	
Питомі втрати, грн/кг	4,48	4,13	3,97	
			(I)	(II)
Додаткові капіталовкладення, грн	–	–	44000	20000
Економічний ефект, грн	–	–	74604	22521
Питомий економічний ефект, грн/кг	–	–	0,51	0,15
Строк окупності додаткових капіталовкладень, рік	–	–	0,58	0,88

Щодо тривалості процесу, розроблена установка виявилася найшвидшою: цикл приготування порції становив лише 0,5 години, тоді як у РКД – 0,6 години, а у STS – 0,8 години. При цьому продуктивність нової установки досягла 36 кг/год, що лише незначно поступається STS (37,5 кг/год) і на 8% перевищує показник варіанта РКД (33,3 кг/год). Це дозволяє стверджувати, що за умови меншого об'єму порції розроблене обладнання демонструє високу швидкість і загальну продуктивність на рівні промислового обладнання.

У плані енергоефективності розроблене обладнання виявилася беззаперечним лідером. Потужність, що споживається становила лише 1,1 кВт, тоді як у STS – 4,0 кВт, а у РКД – 3,2 кВт. Річні витрати електроенергії при виробництві 146 т корму склали лише 4461 кВт·год, що на понад 10 тис. кВт·год менше порівняно з базовим варіантом РКД і більш як на 11 тис. менше, ніж у STS. У перерахунку на 1 т корму це становить лише 30,5 кВт·год/т, тоді як у інших технологій – понад 96 та 107 кВт·год/т відповідно. Таким чином, розроблене обладнання забезпечує трикратне зниження енерговитрат, що є ключовим економічним фактором.

У частині економіки розроблене обладнання також виявилось найефективнішою. Попри дещо вищу вартість придбання (140 тис. грн проти 96 тис. у РКД і 120 тис. у STS), загальні річні витрати на приготування корму виявилися найменшими – 580,76 тис. грн, тоді як у РКД – 655,37 тис. грн, а у STS – 603,28 тис. грн. Відповідно, собівартість 1 кг корму за новою технологією склала 3,978 грн, що на 11,4% менше, ніж у РКД (4,489 грн) і на 3,7% менше, ніж у STS (4,132 грн). Річна економія становить 74,6 тис. грн при переході з РКД і 22,5 тис. грн – з STS.

Окупність розробленого обладнання при переході з РКД становить лише 0,59 року, тобто менше семи місяців. Навіть у разі переходу зі STS термін окупності не перевищує 0,89 року. Основу економічного ефекту становить зниження витрат на електроенергію, а також зменшення трудових витрат за рахунок коротшого циклу і стабільної продуктивності. Часткове збільшення витрат на амортизацію компенсується загальною економією.

Розроблений роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор

продемонстрував комплексні переваги за всіма ключовими показниками. Він забезпечує найнижчі енергетичні та експлуатаційні витрати, найвищу якість корму, стабільність процесу і швидке повернення інвестицій. Отже, його впровадження є технічно та економічно доцільним, оскільки дозволяє підвищити ефективність фермерського господарства, знизити собівартість продукції свинарства та підвищити її конкурентоспроможність на ринку.

## 5.5 Висновки до розділу

1. Розроблено дискретну систему автоматичного керування кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів на основі графа кінцевого автомата (рис. 5.1), який включає 15 станів на основі автомата Мура. Система керування дає змогу реалізувати процес приготування рідких кормів у автоматичному режимі з мінімальним втручанням оператора.

2. Проведена виробнича перевірка дослідного роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора на базі фермерського господарства «Моніка» підтвердила його ефективність у реальних умовах. Пристрій стабільно забезпечує продуктивність на рівні 27–35 кг/год при середній потужності, що споживається 1,1 кВт, що свідчить про високу енергоефективність. Отримана рідка кормова суміш характеризується високим ступенем диспергування (90–92 % часток розміром <0,5 мм) та стабільною в'язкістю (68–75 мм<sup>2</sup>/с), забезпечуючи однорідну структуру корму для легкого споживання і засвоєння.

3. Випробування двох технологій годівлі поросят після відлучення (контрольна – годування сухими кормами; дослідна – годування диспергованими гомогенізованими рідкими кормами) показали підвищення продуктивності та економічну ефективність дослідної технології в порівнянні із контролем. Поросята дослідної групи у 60-денному віці мали середню живу масу 18,4 кг, що на 10,33 % більше порівняно з контролем (16,5 кг), а середньодобовий приріст живої маси зріс на 18,22% (356 г/гол. проти 292 г у контролі). Молодняк дослідної групи відзначався більш вирівняною масою тіла (17,4–18,8 кг проти 14,8–17,0 кг у контролі),

відсутністю випадків падежу та нижчим рівнем захворюваності на діарею, що свідчить про зниження післявідлучного стресу. За 30 діб дослідного періоду сумарний приріст живої маси у дослідній групі склав 214 кг на 20 голів, тоді як у контрольній – 175 кг; додаткові 39 кг приросту (1,95 кг на голову) забезпечили приріст виручки від реалізації на 3 244 грн (за ціною 85 грн/кг) та збільшення прибутку на 854,1 грн (+22% до контролю). При цьому собівартість 1 кг приросту залишилася на рівні контролю (63 грн/кг), тобто підвищення продуктивності досягнуто без зростання витрат кормів на одиницю продукції.

4. Результати досліджень впроваджені в освітній процес ДДАЕУ при викладанні навчальної дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія». Результати науково-технічної роботи впроваджено та використано у виробничій діяльності підприємства ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» і ПП «Агромех плюс» у вигляді комплектів конструкторської документації на роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор рідких кормів.

5. У результаті техніко-економічного розрахунку встановлено, що розроблений роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор, при використанні на свинофермі (200 голів на дорощуванні) з річною потребою корму 146 т, забезпечує економічний ефект у 22 521 грн порівняно з проточним гомогенізатором STS Group і 74 604 грн – порівняно з роторним кавітаційним диспергатором РКД. При цьому питомий економічний ефект становить 0,15 грн/кг (STS) і 0,51 грн/кг (РКД), а строк окупності – 0,88 року (STS) і 0,58 року (РКД).

## ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано науково-технічне завдання підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних рідких кормів для свиней шляхом удосконалення конструкції роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора та обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

На основі проведених досліджень сформульовано такі висновки:

1. Розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що складається з електродвигуна, підшипникового вузла, вала з лопатками та резонаторами ротора, статора з наскрізним отвором і дифузорами, вхідних патрубків для подачі сипких і рідких компонентів, вихідного патрубка, кришки та робочої камери. Особливістю конструкції є те, що при поєднанні конфузоров ротора та резонаторів статора утворюються лопаті, форма яких повторює кривизну робочого колеса відцентрового насоса. Періодичне високошвидкісне поєднання конфузоров ротора та резонаторів статора породжує кавітацію, яка додатково забезпечення подрібнення компонентів рідкого корму.

2. Створено фізико-математичну модель гідродинамічного руху компонентів рідкої кормової суміші в роторному диспергаторі-гомогенізаторі з урахуванням його конструктивних і режимних параметрів. У процесі теоретичних досліджень була створена методика визначення ключових параметрів кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, зокрема кількості отворів у роторі  $k_p$  та статорі  $k_c$ , ширини отвору  $z$  у роторі та статорі, а також довжини кола  $i$ , де відбувається їхнє зіткнення. Встановлено, що значення кількості отворів у роторі та статорі має варіюватися в межах від 16 до 48. На основі теорії Жуговського, яка описує гідравлічний удар, було розроблено методику для визначення швидкості руху суміші в отворах і каналах кавітаційного диспергатора-гомогенізатора, що дозволило розрахувати його потужність і продуктивність.

3. Чисельне моделювання роботи роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора дозволило визначити залежності мінімальних ( $\min$ ) та максимальних

(max) швидкостей руху рідкої фази суміші та тисків як у дифузори ( $V_{rot}$ ,  $P_{rot}$ ), так і у вхідному отворі ( $V_{in}$ ,  $P_{in}$ ) від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  і кількості резонаторів  $N_{hole}$ . При значеннях  $n = 3000$  об/хв,  $D_{in} = 0,06$  м і  $N_{hole} = 16$  максимальна швидкість суміші у вхідному отворі  $V_{in\ max}$  досягає 7,3 м/с. У той же час у дифузори найвище значення швидкості  $V_{rot\ max}$ , яке становить 27,5 м/с, спостерігається за тих самих умов частоти та діаметра отвору, але за  $N_{hole} = 48$ . Найвище значення тиску рідкої фази у вхідному отворі  $P_{in\ max}$  становить 154,4 кПа, так само як і у дифузори  $P_{rot\ max}$ , що спостерігається за умов  $n = 3000$  об/хв,  $D_{in} = 0,06$  м,  $N_{hole} = 48$ . Максимальне та мінімальне значення числа кавітації  $X_{max}$  і  $X_{min}$ , які залежать від кількості резонаторів  $N_{hole}$ , діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  та частоти обертання ротора  $n$ , розглядаються як основний критерій якісної оцінки кавітаційного процесу в досліджуваному обладнанні. При частоті обертання ротора  $n = 2747$  об/хв та кількості резонаторів  $N_{hole} = 48$ , значення числа кавітації досягають своїх меж: мінімальне становить  $X_{min} = 0,04$ , а максимальне –  $X_{max} = 0,45$ . Такий режим відповідає явищу плівкової кавітації, коли кавітаційна порожнина відокремлюється від основного потоку рідини у стійкому режимі. Умовою максимізації продуктивності диспергатора дає можливість визначити діаметр вхідного отвору  $D_{in} = 0,06$  м.

4. В ході експериментальних досліджень кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів встановлені залежності для пшениці, ячменю та сої у вигляді рівнянь регресії другого порядку зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$  (4.4)–(4.6), показника розшарованості суміші  $i_d$  (4.10)–(4.12), температури суміші в кінці процесу  $T$  (4.16)–(4.18), кінематичної в'язкості  $\nu$  (4.22)–(4.24), потужності, що споживається  $N$  (4.28)–(4.30), витрат енергії  $E$  (4.34)–(4.36), питомих витрати енергії  $E_Q$  (4.39)–(4.41) від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  і часу роботи обладнання  $t$ . Застосування критеріїв Кохрена та Фішера дозволило підтвердити адекватність отриманих рівнянь регресії. Аналізуючи отримані залежності встановлено, що при умові, коли показник розшарованості суміші  $i_d$  менше 5 %, вміст частинок розміром 0–0,5 мм в суміші  $k_{fr}$  є максимальним, питомі витрати енергії  $E_Q$  мають бути мінімізовані, спостерігається оптимальне значення часу роботи обладнання  $t$  для різних типів вхідного матеріалу в межах 45,1–

50,4 хв. Найменші питомі витрати енергії  $E_Q$  спостерігаються при використанні сої – 0,696 МДж/кг, пшениці – 0,794 МДж/кг і ячменю – 0,896 МДж/кг. При цьому раціональне значення частоти обертання ротора  $n$  повинна бути в межах 2267–2431 об/хв, а діаметр вхідного отвору статора  $D_{in}$  в межах 0,057–0,060 м.

5. Розроблено дискретну систему автоматичного керування кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів на основі графа кінцевого автомата (рис. 5.1), який включає 15 станів на основі автомата Мура. Система керування дає змогу реалізувати процес приготування рідких кормів у автоматичному режимі з мінімальним втручанням оператора. Проведена виробнича перевірка дослідного роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора підтвердила його ефективність у реальних умовах. Пристрій стабільно забезпечує продуктивність на рівні 27–35 кг/год при середній потужності, що споживається 1,1 кВт, що свідчить про високу енергоефективність. Отримана рідка кормова суміш характеризується високим ступенем диспергування (90–92 % часток розміром  $<0,5$  мм) та стабільною в'язкістю (68–75 мм<sup>2</sup>/с), забезпечуючи однорідну структуру корму для легкого споживання і засвоєння.

6. У результаті техніко-економічного розрахунку встановлено, що розроблений роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор, при використанні на свинофермі (200 голів на дорощуванні) з річною потребою корму 146 т, забезпечує економічний ефект у 22 521 грн порівняно з проточним гомогенізатором STS Group і 74 604 грн – порівняно з роторним кавітаційним диспергатором РКД. При цьому питомий економічний ефект становить 0,15 грн/кг (STS) і 0,51 грн/кг (РКД), а строк окупності – 0,88 року (STS) і 0,58 року (РКД).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Данилів, В. Б. (2008). Розвиток свинарства на індустріальній основі. *Економіка АПК*, (10(168)), 16–25.
2. Іванов, В. О., & Волощук, В. М. (2013). *Біологія свиней*. Полтава: Техсервіс, 195–198.
3. Комалова, І. (2010). Корисний досвід австрійського свинаря. *Agroexpert*, (8–9(25–26)), 43–45.
4. Нові технології для відгодівлі і розведення свиней. (н.д.). *Agroexpert*. <https://agroexpert.ua/novi-tehnologii-dla-vidgodivli-i-rozvedenna-svinei/>
5. Повод, М. Г. (2014). Вплив технологічних особливостей на відгодівельні показники свиней. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Тваринництво*, (2(2)), 194–200.
6. Понд, У. Дж., & Хаупт, К. А. (1983). *Біологія свині*. (Пер. з англ. В. В. Попов). М.: Колос.
7. Столюк, В. (2010). Нові підходи в годівлі свиней. *Ефективне свинарство*, (4), 33–35.
8. Фермерське господарство «Бастіон» освоює нові технології. (н.д.). *Пропозиція – Головний журнал з питань агробізнесу*. <http://propozitsiya.com/ua/fermerske-gospodarstvobastion-osvoyuie-novi-tehnologiyi>
9. Affentranger, P., Gerwig, C., Seewer, G. J. F., & Schwörer, D. (1996). Growth and carcass characteristics as well as meat and fat quality of three types of pigs under different feeding regimes. *Livestock Production Science*, 45, 187–196. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(96\)00011-5](https://doi.org/10.1016/0301-6226(96)00011-5)
10. Chae, B. J., Han, I. K., Kim, J. H., & Yang, C. J. (1997). Effects of Feed Processing and Feeding Methods on Growth and Carcass Traits for Growing-Finishing Pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 10(2), 164–169.
11. Бублик О. Зміна годівлі свиней із сухої на рідку заощаджує до 12% кормів. *Agrotimes. Тваринництво*. Електронний ресурс URL: <https://agrotimes.ua/tvarinnitstvo/zmina-godivli-svinej-iz-suhoyi-na-ridku-zaoshchadzhue-do-12-kormiv/>

12. Хомут О. І., Рудик М. І., & Гулай О. М. (2021). Залежність відгодівельних якостей свиней американського походження від різного типу годівлі. *ResearchGate*. <http://dx.doi.org/10.32845/bsnau.lvst.2021.4.21>

13. Дергун, Р. Акцент на годівлі. *Agrotimes*. *Тваринництво*. <https://agrotimes.ua/article/pravylna-organizacziya-racziyonu-svunej/>.

14. Повод, М. Г., Михалко, О. Г., Шпетний, М. Б., & Опара, В. О. (2021). Продуктивні якості відгодівельного молодняка свиней за різного рівня протеїну в раціоні. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Тваринництво*, (3(46)), 78–83.

15. Agostini, P. S., Gasa, J., Manzanilla, E. G., da Silva, C. A., & de Blas, C. (2013). Descriptive study of production factors affecting performance traits in growing-finishing pigs in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 11(2), 371–381. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013112-3011>

16. Brooks, P. H. (2003). Liquid feeding as a means to promote pig health. In *Proceedings of the 3rd London Swine Conference: Maintaining Your Competitive Edge* (pp. 83–103). London, UK, April 9–10.

17. Choct, M. A., Selby, E. A. D. B., Cadogan, D. J., & Campbell, R. G. (2004). Effect of liquid to feed ratio, steeping time, and enzyme supplementation on the performance of weaner pigs. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55, 247–252. <https://doi.org/10.1071/AR03106>

18. de Lange, C. F. M., Zhu, C. H., & Niven, S. J. (2007). Effective application of enzymes and microbes to enhance the nutritional value of pig feed ingredients: A case for liquid feeding. *Alltech Symposium*. May 22–23, Lexington, Kentucky, USA, pp. 33–40.

19. Hein, T. (2021). Different water-to-feed ratios in growing-finishing pigs. *All About Feed*. <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-processing/different-water-to-feed-ratios-in-growing-finishing-pigs/>.

20. Hong, J. S., Jin, S. S., Jung, S. W., Fang, L. H., & Kim, Y. Y. (2016). Evaluation of dry feeding and liquid feeding to lactating sows under high-temperature environment. *Journal of Animal Science and Technology*, 58, 36. <https://doi.org/10.1186/s40781-016-0118-0>

21. Jo, Y. Y., Choi, M. J., Chung, W. L., Hong, J. S., Lim, J. S., & Kim, Y. Y. (2021). Effects of feed form and particle size on growth performance, nutrient digestibility, carcass characteristics, and gastric health in growing-finishing pigs. *Animal Bioscience*, 34(6), 1061–1069. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0777>
22. DeVries, T. J., Von Keyserlingk, M. A. G., & Weary, D. M. (2004). Effect of feeding space on the inter-cow distance, aggression, and feeding behavior of free-stall housed lactating dairy cows. *Journal of dairy science*, 87(5), 1432-1438.
23. Tangorra, F. M., & Calcante, A. (2018). Energy consumption and technical-economic analysis of an automatic feeding system for dairy farms: Results from a field test. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(4), 228-232.
24. Phillips, C. J. C., & Rind, M. I. (2001). The effects of frequency of feeding a total mixed ration on the production and behavior of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 84(9), 1979-1987.
25. Lawlor, P., & O' Meara, F. (2018). Comparison of dry, wet/dry and wet feeding for finisher pigs. *Pig Development Department*.
26. Middelkoop, A., Choudhury, R., Gerrits, W. J. J., Kemp, B., Kleerebezem, M., & Bolhuis, J. E. (2020). Effects of creep feed provision on behavior and performance of piglets around weaning. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 879. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.520035>
27. Niemi, J.K., Sevin-Aimonen, M.L., Pietola, K. and Stalder, K.J., 2010. The value of precision feeding technologies for grows “finish swine”, *Livestock Science*, Vol. 129, issues 1-3, pp 13–23, <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.12.006>.
28. Reese, D. E., Thaler, R. C., Brumm, M. C., Lewis, A. J., Mille, P. S., & Libal, G. W. (n.d.). *Swine nutrition guide*. Nebraska and South Dakota.
29. Pierozan, C.R., Agostini, P., & Gasa, J. (2016). Factors affecting daily feed intake and feed conversion rates of pigs in feeding houses: A company case study. *Porcine Health Management*, 2, 7. <https://doi.org/10.1186/s40813-016-0023-4>
30. Pomar, C., & Remus, A. (2019). Precision pig feeding: A breakthrough toward sustainability. *Animal Frontiers*, 9(2), 52–59. <https://doi.org/10.1093/af/vfz006>

31. Simonsson, A. (2006). *Feed and nutritional requirements for pigs*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Animal Nutrition and Management. Report 266, 24.
32. Quiniou, N., Courboulay, V., Goues, T., Le Roux, A., & Chevillon, P. (2013). Incidence des conditions d'élevage sur les performances de croissance, les caractéristiques de carcasse et le risque d'odeur des porcs mâles entiers. *J. Rech. Porc*, 45, 57-62.
33. Needham, T., Hoffman, L. C., & Gous, R. M. (2017). Growth responses of entire and immunocastrated male pigs to dietary protein with and without ractopamine hydrochloride. *Animal*, 11(9), 1482-1487.
34. Simonsson, A. (2006). *Feed and nutritional requirements for pigs*. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Animal Nutrition and Management. Report 266, 24.
35. Huber, L., Squires, E. J., & de Lange, C. F. M. (2013). Dynamics of nitrogen retention in entire male pigs immunized against gonadotropin-releasing hormone. *Journal of Animal Science*, 91(10), 4817-4825.
36. Moore, K. L., Mullan, B. P., Campbell, R. G., & Kim, J. C. (2012). The response of entire male and female pigs from 20 to 100-kg liveweight to dietary available lysine. *Animal Production Science*, 53(1), 67-74.
37. Zamaratskaia, G., & Squires, E. J. (2009). Biochemical, nutritional and genetic effects on boar taint in entire male pigs. *Animal*, 3(11), 1508-1521.
38. Sol, C., Castillejos, L., López-Vergé, S., Muns, R., & Gasa, J. (2019). Effects of the feed: water mixing proportion on diet digestibility of growing pigs. *Animals*, 9, 791. <https://doi.org/10.3390/ani9100791>
39. Van Winsen, R.L., Urlings, B.A.P., Lipman, L.J.A., Snijders, J.M.A., Keuzenkamp, D., Verheijden, J.H.M., & Van Knapen, F. (2001). Effect of fermented feed on the microbial population of the gastrointestinal tracts of pigs. *Applied and Environmental Microbiology*, 67, 3071–3076. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.3071-3076.2001>
40. Inbarr, J., & Ogle, R. B. (1988). Effect of enzyme treatment of piglet feeds on performance and post weaning diarrhoea.

41. Davoudkhani, M., Mahé, F., Dourmad, J. Y., Gohin, A., Darrigrand, E., & Garcia-Launay, F. (2020). Economic optimization of feeding and shipping strategies in pig-fattening using an individual-based model. *Agricultural Systems*, 184, 102899.

42. Amornthewaphat, N. (2001). Feeder design (dry and wet/dry) and grain processing technology (grinding, pelleting, and expanding) on the performance of finishing pigs. Kansas State University.

43. Blavi, L., Solà-Oriol, D., Llonch, P., López-Vergé, S., Martín-Orúe, S. M., & Pérez, J. F. (2021). Management and feeding strategies in early life to increase piglet performance and welfare around weaning: A review. *Animals*, 11(2), 302.

44. Noblet, J., & Van Milgen, J. (2004). Energy value of pig feeds: Effect of pig body weight and energy evaluation system. *Journal of Animal Science*, 82(suppl\_13), E229-E238.

45. Solà-Oriol, D., & Gasa, J. (2017). Feeding strategies in pig production: Sows and their piglets. *Animal feed Science and technology*, 233, 34-52.

46. Pomar, C., Hauschild, L., Zhang, G. H., Pomar, J., & Lovatto, P. A. (2009). Applying precision feeding techniques in growing-finishing pig operations. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38, 226-237.

47. Gaillard, C., Brossard, L., & Dourmad, J. Y. (2020). Improvement of feed and nutrient efficiency in pig production through precision feeding. *Animal Feed Science and Technology*, 268, 114611.

48. Choct, M., Selby, E. A. D., Cadogan, D. J., & Campbell, R. G. (2004). Effects of particle size, processing, and dry or liquid feeding on performance of piglets. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(2), 237-245.

49. Brooks, P. H., Moran, C. A., Beal, J. D., Demeckova, V., & Campbell, A. (2001). Liquid feeding for the young piglet. In *The weaner pig: nutrition and management. Proceedings of a British Society of Animal Science Occasional Meeting, University of Nottingham, UK, September 2000* (pp. 153-178). Wallingford UK: CABI Publishing.

50. Vázquez, N.A., Barragán, H.B., Aguila, N.C.V., Brenner, E.G., Dávila, F.S., Trejo, A.M., & Ramírez, M.C. (2021). Effect of wet feeding of finishing pigs on production

performance, carcass composition, and meat quality. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(2), 370–385. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i2.5582>

51. Bee, G., Chevillon, P., & Bonneau, M. (2015). Entire male pig production in Europe. *Animal Production Science*, 55(12), 1347-1359.

52. Lebret, B. (2008). Effects of feeding and rearing systems on growth, carcass composition and meat quality in pigs. *Animal*, 2(10), 1548-1558.

53. Lebret, B., Juin, H., Noblet, J., & Bonneau, M. (2001). The effects of two methods of increasing age at slaughter on carcass and muscle traits and meat sensory quality in pigs. *Animal Science*, 72(1), 87-94.

54. Ібатуллін, І.І., Мельничук, Д.О., & Богданов, Г.О. (2007). *Годівля сільськогосподарських тварин*. Вінниця: Нова Книга.

55. Дурст, Л., & Вітман, М. (2006). *Годівля сільськогосподарських тварин: Навч. посібник*. Пер. з нім. / За ред. І.І. Ібатулліна та Г. Штрюбеля. Київ: Фенікс.

56. Нові консерванти і технології кормів. (2004). М.Ф. Кулик, В.Ф. Петриченко, Т.В. Засуха та ін. Вінниця: ПП “Видавництво “Тезис”.

57. Україна. Кабінет Міністрів. (2007). Положення про державну реєстрацію ветеринарних препаратів, кормових добавок, преміксів та готових кормів / затв. Постановою КМУ від 21 листопада 2007 р. № 1349. *Офіційний вісник України*, № 89, Ст. 3273.

58. Кіщак, І.Т. (2005). Організаційно-правові заходи становлення регульованого ринку кормових ресурсів. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2(30), 39–45.

59. Литвиненко, О.А., Некоз, О.І., Немирович, П.М., & Кіндрат, З. (1999). *Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості*. Київ: РВЦ УДУХТ.

60. Devi, V., & Khanam, S. (2019). Comparative study of different extraction processes for hemp (*Cannabis sativa*) seed oil considering physical, chemical, and industrial-scale economic aspects. *Journal of Cleaner Production*, 207, 645–657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.036>

61. Шевченко, І., Шацький, В., & Махмудов, І. (2009). Сучасні технології забезпечення тваринництва екологічно чистими кормами. *Агро перспектива*, 11(107), 74–78. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>

62. Zhang, Y., & Zeng, Q. (2022). Hydrodynamic cavitation induced fabrication of soy protein isolate-polyphenol complexes. *Food Chemistry*, 375, 131861. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131861>

63. Chae, B. J. (2000). Impacts of Wet Feeding of Diets on Growth and Carcass Traits in Pigs. *Journal of Applied Animal Research*, 17(1), 81–96. <https://doi.org/10.1080/09712119.2000.9706293>

64. Yang, J. S., Lee, J. H., Ko, T. G., Kim, T. B., Chae, B. J., Kim, Y. Y., & Han, I. K. (2001, September 1). Effects of Wet Feeding of Processed Diets on Performance, Morphological Changes in the Small Intestine and Nutrient Digestibility in Weaned Pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. Asian Australasian Association of Animal Production Societies. <https://doi.org/10.5713/ajas.2001.1308>

65. Tishchenko O., Luhovyi S., Povod M., Mykhalko O., Verbelchuk T., Verbelchuk S., Koberniuk V. (2023). The efficiency of raising piglets under different systems of their feeding. *Scientific Papers. Series "Management, Economic Engineering in Agriculture and rural development"*, Vol. 23, issue 4.

66. Алієв Е. Б., Луц П. М., Верета В. В. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми роторно-кавітаційного диспергатора кормосумішей. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф.*, 21 листопада 2019 року, Ніжин, 2019, С. 15–23.

67. Роторний гомогенізатор: пат. 65406 Україна: B01F 7/00 (2006), B01F 13/06 (2006.01). / Долінський А. А., Басок Б.І., Кравченко Ю. С., Гартвіг А.П., Коба А. Р., Піроженко І. А. № 2003087330; заявл. 04.08.2003; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1, 3 с.

68. Hielscher Ultrasonics. (n.d.). *Ultrasonic homogenizers (sonicators)*. <https://homogenizers.net/collections/sonic-homogenizers-sonicators>

69. Cadence Design Systems. (n.d.). *Rotor-stator homogenizers: Widely used mechanical homogenizers*. <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2023-rotor-stator-homogenizers-widely-used-mechanical-homogenizers>

70. Wikipedia contributors. (n.d.). *High-shear mixer*. In Wikipedia, from [https://en.wikipedia.org/wiki/High-shear\\_mixer](https://en.wikipedia.org/wiki/High-shear_mixer)

71. Nedbailo, A., Ivanytsky, G., Tselen, B. Y., Radchenko, N., Gozhenko, L., & Shchepkin, V. (2023). Application of a pulsating dispersor as a hydrodynamic cavitation reactor for preparation of coal water fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 45(1), 28-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.4>

72. Obodovych, O. M., Tselen, B. Y., Pereiaslavl'tseva, O. O., & Stepanova, O. E. (2024). Cavitation technologies and new heat and mass exchange equipment – A prospective direction for the preparation of hydrocarbon fuel. *Technologies and Thermophysics of Power Engineering*, 3, Article 10. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.10>

73. Petrova, Z., Paziuk, V., & Petrov, A. (2020). Technology for producing humic substances from peat. *Engineering, Energy, Transport of Agro-Industrial Complex*, 4(111), 55–60. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-4-6>

74. Aliiev, E., Aliieva, O., & Maliehin, R. Technical and technological provision of complex waste processing of plant raw oil cultures in food for organic animals. *Scientific Horizons*, 2020, № 07(92), P. 112–119. URL: <https://doi.org/10.33249/2663–2144–2020–92–7–112–119>

75. Целієн Б. Й., Гоженко Л. П., Радченко Н. Л., Іваницький Г. К. Використання ефектів кавітації в екстракційних процесах // Наукові праці Одеського національного технологічного університету. – 2021. – № 84(1). – С. 92–95. – DOI: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1876>

76. GlobeCore. (n.d.). *Processing of peat in a vortex layer apparatus for the production of humic fertilizers*. <https://globecore.ua/obrobka-torfu-na-aparati-vyhrovogo-sharu-dlya-vyrobnyctva-guminovyh-dobryv.html>

77. Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2008). Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Current Science*, 94(6), 748–756. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>

78. Obodovych, O. M., Tselen, B. Y., Pereiaslavl'tseva, O. O., & Stepanova, O. E. (2024). Cavitation technologies and new heat and mass exchange equipment – A prospective direction for the preparation of hydrocarbon fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46(3), 91–102. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.10>

79. Кормоготувальні агрегати серії АКГСМ "Мрія" нового покоління. Технологія відгодівлі тварин ферментованим висококалорійним, противірусним кормом: навч. посіб. / Микола Борисович Соляник, Віктор Федорович Коваленко, Тетяна Іванівна Нежлукченко. – Херсон: Олді-Плюс, 2018. – 185 с.: іл., табл. – (Нові технології в тваринництві).

80. Skryl, I.I., & Kovalchuk, A.N. Cavitation technology and equipment for the production of liquid feed. *Materials of the international correspondence scientific conference "Problems of modern agricultural science"*, October 15, 2011, Krasnoyarsk, KGAU, 2011. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>

81. Aliyev, E.B., Mykolenko, S.Yu., Yaropud, V.M., & Mal'gin, R.D. Establishment of the constructive and technological scheme of the cavitation disperser-homogenizer of the silskogospodarskoy syruin of the roslin walking on the forages. *Technology, energy, transport of the agro-industrial complex*, 2020, № 2 (109), С. 5-15. <https://doi.org/10.1134/S0012500807030056>

82. Shevchenko, I.A., Pavlichenko, V.M., Likhodid, V.V., & Zabudchenko, V.M. Analysis of the design of technical equipment for the production of high-quality feeds. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник КНТУ "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин"*, Вип. 43. Ч. I. Кіровоград: КНТУ, 2013, С. 179–184. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>

83. Minzanova, S. T., Mironov, V. F., Sosnina, N. A., & Vyshtakalyuk, A. B. (2000–2012). Technological aspects of obtaining feed additives from amaranth. Institute of Organic and Physical Chemistry named after A. E. Arbuzov, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 2000–2012. <https://doi.org/10.1134/S0012500807030056>

84. Григоренко С. М., Тимошенко С. В. Дослідження процесу подрібнення кормів у роторно-пульсаційних апаратах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017 (183) – С. 56–62.

85. Badve, M. P., Alpar, T., Pandit, A. B., & Gogate, P. R. (2013). Modeling of cavitation as an advanced wastewater treatment technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 302–310. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2012.705094>

86. Шевченко І.А., Павліченко В.М., Лиходід В.В., & Забудченко В.М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва вологих високозасвоєваних кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 2013, Вип. 43, ч. І, С. 180–184.

87. Патент 65406 Україна: МПК В01F 7/00, В01F 13/06 (2006). Долінський А.А., Басок Б.І., Кравченко Ю.С., Гартвіг А.П., Коба А.Р., Піроженко І.А. № 2003087330; заявл. 04.08.2003; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.

88. Патент на корисну модель 97802 Україна: МПК В01F 7/00 (2015.01). Лиходід В.В., Забудченко В.М., Луц П.М., Доруда С.О., Лисенко Д.М. № u201410048; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

89. Eggl, M. F., & Schmid, P. J. (2022). Mixing by stirring: Optimizing shapes and strategies. *Physical Review Fluids*, 7(7), 073904. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.7.073904>

90. Роторний кавітаційний диспергатор: пат. 97802 Україна: (2015.01) В01F 7/00. / Лиходід В.В., Забудченко В.М., Луц П.М., Доруда С.О., Лисенко Д.М. № u 201410048; заявл. 12.09.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7, 6 с.

91. Ковальов О.О., Лебідь М.Р. Теоретичні основи диспергування в щільному гомогенізаторі молока. *Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 80-річчю з дня народження ректора університету. Харків: ХДУХТ, 2018. С. 327–328.

92. Пат. на корисну модель 70499 Україна: МПК В02С9/02 / Голубєв О.В., Григорян К.Г.; заявник і власник ТОВ "Укр Еко-Хліб". – № u201115128; заявл. 21.12.2011; опубл. 11.06.2012, бюл. № 11/2012.

93. Banaszek, C. (n.d.). *Ways to Optimize Solid-Liquid Mixing*. Chemical Online. <https://www.chemicalonline.com/doc/ways-to-optimize-solid-liquid-mixing-0004>

94. Zhang, Y., Wang, Y., & Li, X. (2023). *Optimized Design of Solid–Liquid Dual-Impeller Mixing Systems for Enhanced Homogeneity and Energy Efficiency*. *ACS Omega*, 8(5), 12345–12356. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05762>

95. Kozicki, C., & Carlson, C. (2023). *Optimizing the Solid and Liquid Blending Process in Continuous Mixers*. Chemical Processing. <https://www.chemicalprocessing.com/powder-solids/article/33005040/optimizing-the-solid-and-liquid-blending-process-in-continuous-mixers>

96. Eggl, M. F., & Schmid, P. J. (2021). *Mixing by Stirring: Optimizing Shapes and Strategies*. arXiv preprint arXiv:2108.07064. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07064>

97. Eggl, M. F., & Schmid, P. J. (2019). *Mixing Enhancement in Binary Fluids Using Optimized Stirring Strategies*. arXiv preprint arXiv:1911.10760. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.448>

98. Ferreira, V. O., Blais, B., & Lopes, G. C. (2024). *CFD-DEM Study of Mixing in a Monodispersed Solid-Liquid Fluidized Bed*. arXiv preprint arXiv:2406.15674. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.15674>

99. Charles Ross & Son Company. (2012). *Ways to optimize solid-liquid mixing* [White paper]. Retrieved April 6, 2025, from [https://vertassets.blob.core.windows.net/download/28946880/28946880-f428-4a0f-b1ce-a06700709732/optimizesolid\\_liquidmixing.pdf](https://vertassets.blob.core.windows.net/download/28946880/28946880-f428-4a0f-b1ce-a06700709732/optimizesolid_liquidmixing.pdf)

100. Опейда Й., Швайка О. Глосарій термінів з хімії. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. Донецьк: «Вебер», 2008. 758 с. ISBN 978-966-335-206-0.

101. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. *Кавитация*. М.: Мир, 1974. 678 с.

102. Шевченко І.А., Павліченко В.М., Лиходід В.В., Забудченко В.М. Аналіз конструкцій технічних засобів для виробництва високозасвоєваних кормів. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник КНТУ «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин», 2013, Вип. 43, ч. I, С. 179–184.

103. Antonuk A. P. Technology for the production of protein-vitamin-mineral feed additives from food and processing industry waste. Materials of the international conference "Innovative ways of pig farming development in Russia" ("Pig Farming – 2011"). International Industrial Academy, November 14-16, 2011, Pishepromizdat, 2011.

104. Karl A., Kusters S.E., Pratsinis S.G., Thoma D.M., Smith D.M. Energy-size reduction laws for ultrasonic fragmentation. *Powder Technology*, 1994, Volume 80, Issue 3, pp. 253–263. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(94\)02852-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(94)02852-4)

105. Taha A., Ahmed E., Ismaiel A., Ashokkumar M., Xu X., Pan S., Hu H. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, Vol. 105, pp. 363–377. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.024>

106. Modarres-Gheisari S.M.M., Gavagsaz-Ghoachani R., Malaki M., Safarpour P., Zandi M. Ultrasonic nano-emulsification – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, Vol. 52, pp. 88–105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.11.005>

107. Batchelor, G. K. (2000). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521098175.

108. Cherpitskii, S. N., Tarshis, M. Y., Korolev, L. V., & Kapranova, A. B. (2020). An investigation of the process of mixing of bulk materials in a drum-blade mixer. *Chemical and Petroleum Engineering*, 56(1–2), 3–10. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00731-w>

109. Бакалов, В. В. (2013). *Змішувачі для сипких матеріалів і методи оцінювання якості суміші*. Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет. ISBN 978-966-7496-44-9

110. Лошицький, П. П., & Ніколов, М. О. (n.d.). *Моделювання біофізичних процесів. Вступ до синергетики*. Харків: НТУ «ХПІ». ISBN 978-966-622-614-6

111. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. (2023). *Нафтогазова енергетика: Збірник наукових праць* (Вип. 2(38)). <https://nung.edu.ua/sites/default/files/2023-12/Нафтогазова%20енергетика%202023.pdf>

112. Яременко, В. А. (2023). *Математичне моделювання процесів диспергування в технологіях агропромислового комплексу* (Магістерська дисертація, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»).

113. Шпильовий, Л. В. (2011). *Технологічні основи автоматизації процесу згущення на збагачувальних фабриках* [Монографія]. Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ. ISBN 978-966-317-087-9

114. Gorobets V. G., Serdiuk A. M. Rotor-pulsating apparatus for the preparation of liquid feeds on the grain basis. *Energy and Automation*. 2018. № 6 P. 51-157. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.05.015>

115. Cherpitskii, S. N., Tarshis, M. Y., Korolev, L. V., & Kapranova, A. B. (2020). An investigation of the process of mixing of bulk materials in a drum-blade mixer. *Chemical and Petroleum Engineering*, 56(1–2), 3–10. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00731-w>

116. Wikipedia contributors. (n.d.). *Markov decision process*. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved April 14, 2025, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Markov\\_decision\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Markov_decision_process)

117. Gorobets V. G., Trokhaniak V. I., Serdiuk A. M. Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer processes in rotor-pulsing apparatus for preparation of liquid feed. *Energy and Automation*. 2019. № 5, P. 22-29.

118. Горобець В. Г., Ободович О. М., Троханяк В. І., Сердюк А. М. Роторно-пульсаційні апарати для приготування рідких зернових кормів. *Енергетика і автоматика*. 2020. №5, С. 15-31.

119. Горобець В. Г., Сердюк А. М. Експериментальне дослідження процесів приготування рідких зернових кормів в роторно-пульсаційному апараті. *Енергетика і автоматика*. 2022. №4, С. 74-85.

120. Горобець В. Г., Сердюк А. М. Дослідження пускових характеристик асинхронного двигуна для привода роторно-пульсаційного апарата з використанням частотного перетворювача. *Енергетика і автоматика*. 2023. №1, С. 122-135.

121. Gorobets V., Trokhaniak V., Antypov E, Serdiuk A. Investigation of Preparation Processes of Liquid Feed Mixtures in Rotary Pulsating Apparatus. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. 100 LNCE, P. 118-126. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_15)

122. Ободович О. М., Горобець В. Г., Лимар А. Ю., Троханяк В. І., Антипов Є. О., Сердюк А. М. Роторно-пульсаційні апарати для приготування рідких зернових кормів: монографія. Київ: КОМПРИНТ. 2021. 185 с.

123. Уминський, С., Яковенко, А., Москалюк, І., Королькова, М., & ін. (2023, травень). Технологія отримання рідких кормів з застосуванням гідродинамічного

обладнання. *Аграрний вісник Причорномор'я*, 106, стаття 15.  
<https://doi.org/10.37000/abbsl.2023.106.15>

124. Ковальчук, О. В., & Ковальчук, В. П. 2019, Вип. 2(72), С. 56–60 (2022). Застосування ефектів гідродинамічної кавітації в харчовій промисловості. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: Збірник наукових праць, (1), 45–50. <http://dx.doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2402>.

125. Голубев О.В., Григорян К.Г. Результати експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора для рідких кормів. *Науковий вісник Луцького національного технічного університету*, 2023, № 2(58), С. 45–52.

126. Ковальчук О.В., Ковальчук В.П. Використання кавітаційної обробки в харчовій і переробній промисловості. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 2018, Т. 24, № 6, С. 123–128.

127. Patil S. S., Pandit A. B. Cavitation: A novel technique for making stable nano-suspensions // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2007. Vol. 14, Issue 5. P. 519–530. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.10.007.

128. Cherpitskii, S. N., Tarshis, M. Y., Korolev, L. V., & Kapranova, A. B. (2020). An investigation of the process of mixing of bulk materials in a drum-blade mixer. *Chemical and Petroleum Engineering*, 56(1–2), 3–10. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00731-w>

129. Makarenko, N. A., Makarova, N. A., & Nikitina, O. V. (2022). *Tekhnologicheskie aspekty proizvodstva protertykh mass bez sakhara na osnove plodovogo i yagodnogo syrya altayskogo assortimenta* [Technological aspects of producing sugar-free puréed masses based on Altai fruit and berry raw materials]. ResearchGate. <http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.012>

130. Krupenin, P. Yu. (2016). Opyt primeneniya tekhnologii kavitatsionnogo dispergirovaniya dlya obrabotki plyushchenogo konservirovannogo zerna kukuruzy [Experience of applying cavitation dispersion technology for processing preserved crushed corn grain]. In *Akademicheskaya nauka – problemy i dostizheniya: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (pp. 136–138). North Charleston, USA.

131. Самойчук, К. О. (2018). *Розвиток наукових основ гідродинамічного диспергування молочних емульсій* (Докторська дисертація, Таврійський державний агротехнологічний університет; Харківський державний університет харчування та торгівлі).

132. Самойчук К.О., Ковальов О.О. Експериментальні дослідження струминного гомогенізатора з роздільним подаванням жирової фази // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла ТуганБарановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 42–46.

133. Гвоздєв О.В., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. праць / Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган–Барановського, 2012. Вип. 28. С. 294–299.

134. Anton Paar. (n.d.). *The influence of particles on suspension rheology*. Anton Paar Wiki from <https://wiki.anton-paar.com/en/the-influence-of-particles-on-suspension-rheology/>

135. Anton Paar. (n.d.). Particle size in the food industry. *Anton Paar Wiki*. <https://wiki.anton-paar.com/en/particle-size-in-the-food-industry/>

136. Pharmapproach. (n.d.). Factors affecting rheology of a suspension. *Pharmapproach.com*. <https://www.pharmapproach.com/factors-affecting-rheology-of-a-suspensions/>

137. Aouad, O., & Renaud, A. (2017). Experimental investigation of rheological behavior of sediment-laden flows. *Water*, 9(7), 474. <https://doi.org/10.3390/w9070474>

138. Costa, A. (2005). Viscosity of high crystal content melts: Dependence on solid fraction. *Geophysical Research Letters*, 32(L22308). <https://doi.org/10.1029/2005GL024303>

139. Briceño, M. (2000). Rheology of suspensions and emulsions. In F. Nielloud & G. Marti-Mestres (Eds.), *Pharmaceutical emulsions and suspensions* (pp. 557–607). New York, NY: Marcel Dekker Inc.

140. Garsia, F. M. (2017). Dependence of sediment suspension viscosity on solid concentration: A simple general equation. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.3390/w9070474>

141. Krieger, I. M., & Dougherty, T. J. (1959). A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Physics Letters A*, 223(5–6), 333–336. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(96\)00479-3](https://doi.org/10.1016/0375-9601(96)00479-3)

142. Dai, J. (2017). *Suspension rheology: Experimental and modeling study* (Master's thesis, DePaul University). Via Sapientiae. <https://via.library.depaul.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1072&context=etd>

143. Barnes, H. A. (2015). Review of the rheology of filled viscoelastic systems: Solid–liquid dispersions. *Powder Technology*, 284, 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.044>

144. Алієв, Е. Б., & Малєгін, Р. Д. (2020). Ефективність впровадження технології годівлі тварин кормами після кавітаційної обробки. У XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Найновите научни постижения – 2020» (т. 3, с. 39–41). Софія: Бял ГРАД-БГ ОДД.

145. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А., Алієва, О. Ю., Малєгін, Р. Д., Лупко, К. О., Лінко, М. О., Гезь, Я. В., & Безугла, Л. С. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія (Е. Б. Алієв, Ред.). ЛІРА. ISBN 978-966-981-687-0

146. Алієв, Е. Б., Алієва, О. Ю., & Малєгін, Р. Д. (2020). Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва. *Наукові горизонти*, 07(92), 112–119. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-112-119>

147. Алієв, Е. Б., Дудін, В. Ю., Алієва, О. Ю., & Малєгін, Р. Д. (2021). Патент України на корисну модель № 147500. Роторний кавітаційний диспергатор-

гомогенізатор. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет. Заявка № u202008225, заявл. 22.12.2020, опубл. 12.05.2021, Бюл. № 19.

148. Алієв, Е. Б., Дудін, В. Ю., Алієва, О. Ю., & Малегін, Р. Д. (2020). Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора рідких кормів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, (21), 33–40. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>

149. Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2020). Обґрунтування доцільності використання диспергаторів рідких кормів. У XXI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (с. 7). Харків: ХНТУСГ.

150. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Яропуд, В. М., & Малегін, Р. Д. (2020). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. Техніка, енергетика, транспорт АПК, (2), 5–15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>

151. Aliiev, E., Maliehin, R., Ivliev, V., & Aliieva, O. (2021). Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed. *Scientific Horizons*, 24(2), 16–26. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26)

152. Алієв, Е. Б., Алієва, О. Ю., & Малегін, Р. Д. (2020). Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження. У IV Міжнародній науково-практичній конференції «Біоенергетичні системи» (с. 76–79). Житомир: ПНУ.

153. Алієв, Е., Малегін, Р., & Алієва, О. (2022). Етапи розробки гомогенізатора-диспергатора рідких кормів. У Всеукраїнській науково-практичній конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (с. 40–41). Кропивницький: ЦНТУ.

154. Малегін, Р. Д. (2024). Аналіз динамічних характеристик рідкої фази суміші у дифузорі диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней. У III Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (ч. 1, с. 173–176). Дніпро: ДДАЕУ.

155. Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2024). Результати експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора рідких кормів для свиней. *Сільськогосподарські машини*, (50), 48–60. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1334>

156. Держспоживстандарт України. (2005). *ДСТУ 4397:2005. Надійність техніки. Терміни та визначення*. Київ: Держспоживстандарт України.

157. Pasko, M. V. (2022). Otsinka potentsiinykh trudovykh resursiv rehioniv Ukrainy [Assessment of potential labor resources in the regions of Ukraine]. *Visnyk Uzhhorods'koho natsional'noho universytetu. Seriya: Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo*, 43, 34–39. [http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/43\\_2022ua/5.pdf](http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/43_2022ua/5.pdf). DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2022-43-3>

158. SmartFin. (2024, December 15). *Rozrakhunok zarobitnoyi platy u 2025 rotsi* [Salary calculation in 2025]. <https://smartfin.ua/page/rozrakhunok-zarobitnoyi-platy-u-2025-rotsi>

159. Верховна Рада України. (2023). *Податковий кодекс України* (станом на 01.01.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>

160. Міністерство фінансів України. (2020, 29 грудня). *Наказ №1213: Про затвердження Методичних рекомендацій з бухгалтерського обліку основних засобів*. Retrieved April 21, 2025, from <https://ips.ligazakon.net/document/MF03270>

161. БУХОБЛІК. (n.d.). *Технічне обслуговування, ремонт і збереження основних засобів (орендованих)*. <https://www.buhoblik.org.ua/nalogi/nalog-na-pribyl/1219-texchnne-obslugovuvannya-remont-zberezhennya-osnovnix-zasobv-orendovanix.html>

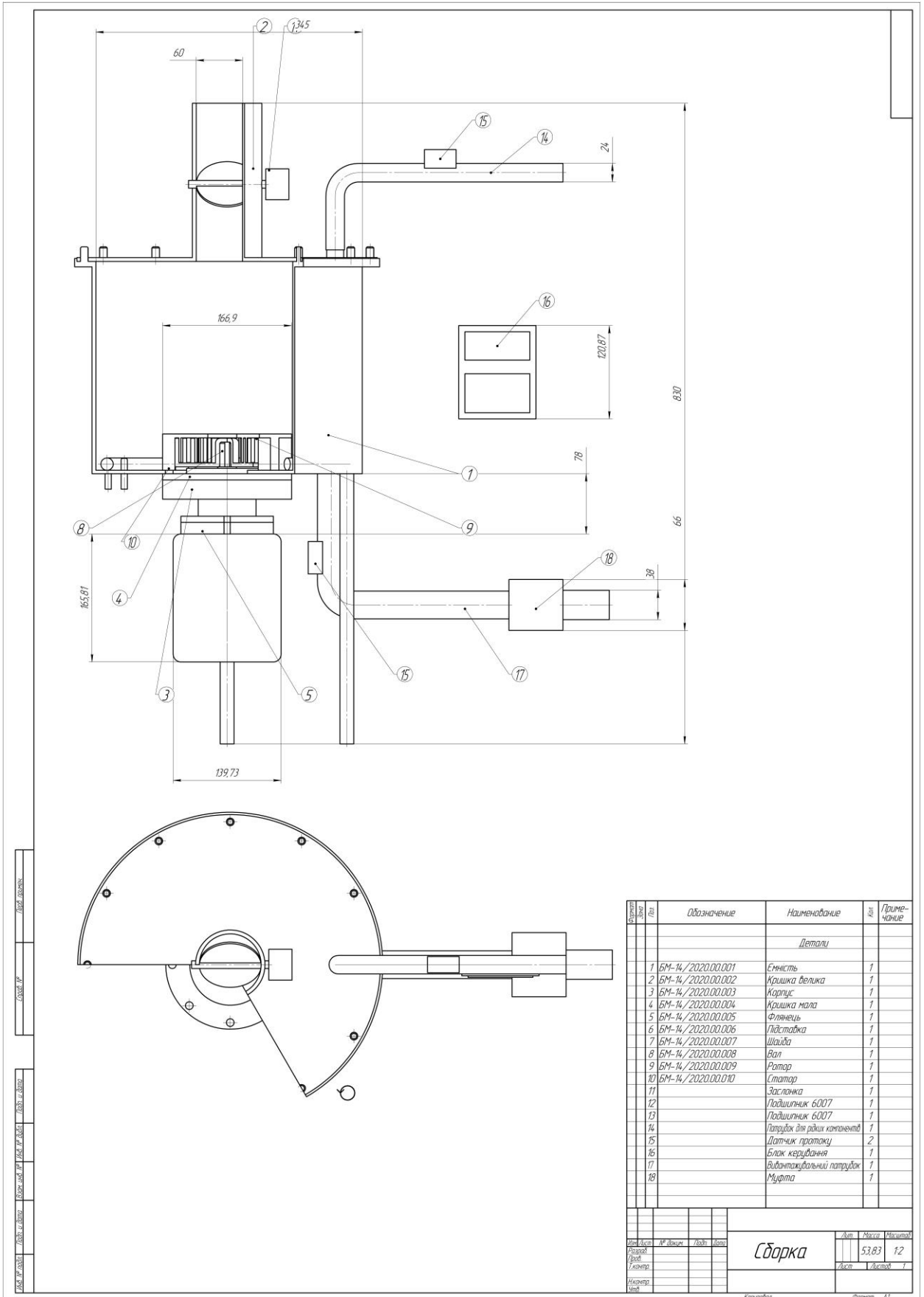
## Додаток А

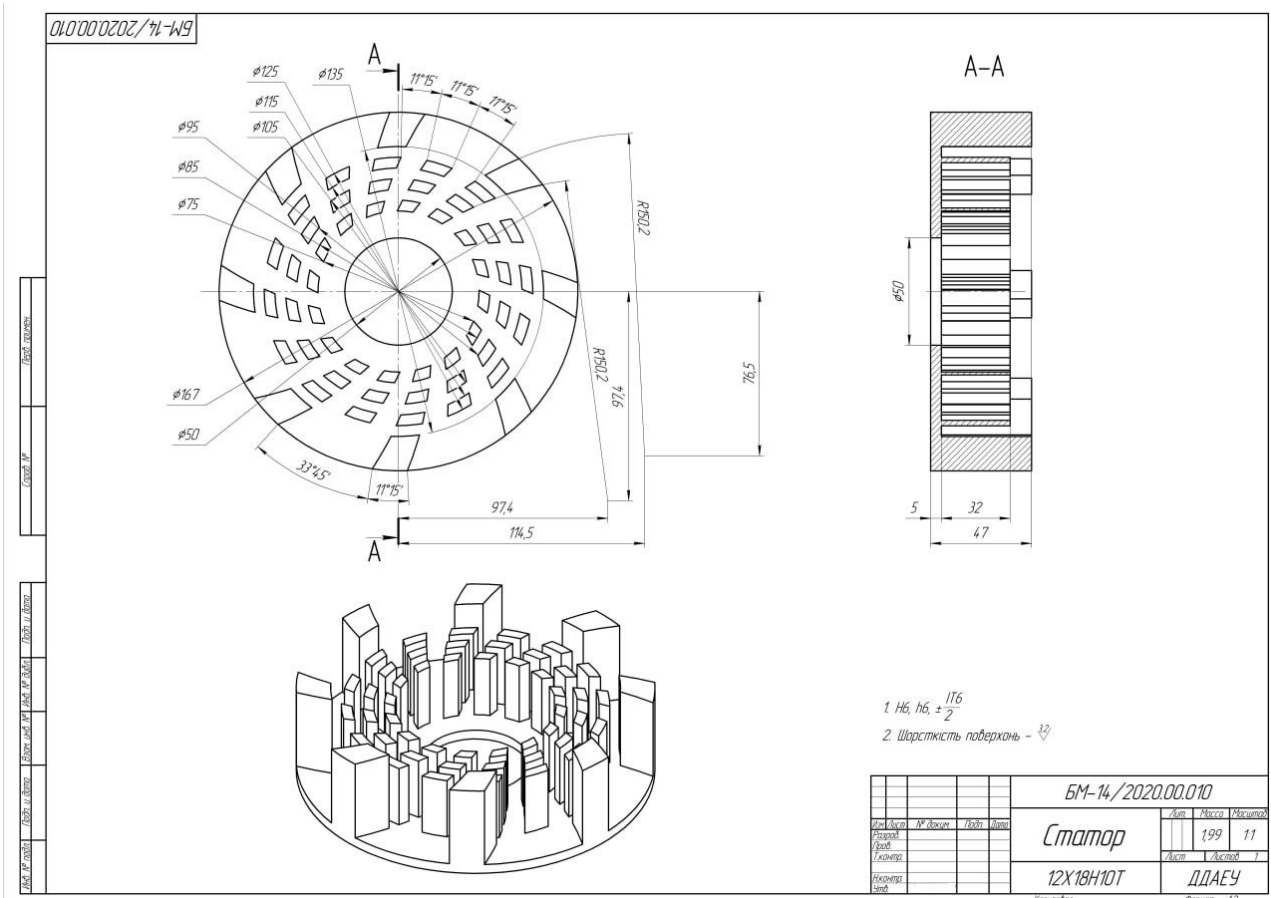
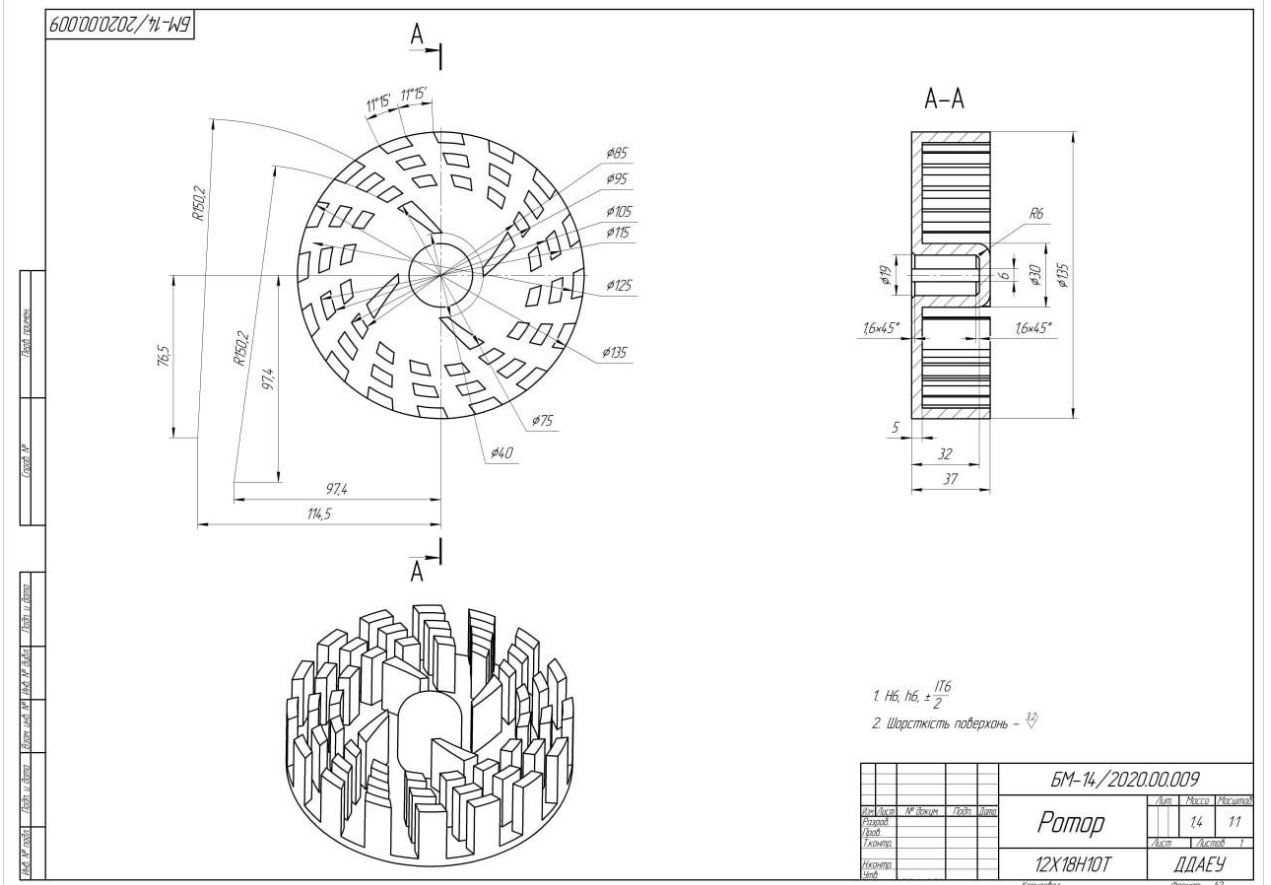


## Додаток Б

№	n, об/хв	D <sub>in</sub> , м	N <sub>hole</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	V <sub>inmax</sub> , м/с	V <sub>rotmax</sub> , м/с	P <sub>maxin</sub> , кПа	P <sub>maxrot</sub> , кПа	P <sub>minrot</sub> , кПа	X <sub>max</sub>	X <sub>min</sub>
1	1500	0,04	16	-1	-1	-1	3,08	9,72	101,7	140,7	75,9	2,93	1,56
2	1500	0,04	32	-1	-1	0	2,69	11,36	102,9	144,0	75,6	2,20	1,14
3	1500	0,04	48	-1	-1	1	2,59	12,35	108,7	154,4	82,7	1,99	1,05
4	1500	0,05	16	-1	0	-1	4,08	9,75	105,1	144,2	77,8	2,98	1,59
5	1500	0,05	32	-1	0	0	3,67	11,37	106,9	149,4	77,9	2,28	1,17
6	1500	0,05	48	-1	0	1	3,6	12,44	116,2	156,9	74,1	2,00	0,93
7	1500	0,06	16	-1	1	-1	5,33	10,41	109,8	151,4	80,5	2,75	1,44
8	1500	0,06	32	-1	1	0	4,88	11,66	110,6	152,8	80,5	2,21	1,15
9	1500	0,06	48	-1	1	1	4,73	12,43	123,9	159,1	75,4	2,03	0,95
10	2250	0,04	16	0	-1	-1	4,07	15,14	117,8	161,8	58,8	1,39	0,49
11	2250	0,04	32	0	-1	0	3,74	17,25	119,9	165,4	54,2	1,10	0,35
12	2250	0,04	48	0	-1	1	3,56	19,99	127,1	178,7	48,4	0,88	0,23
13	2250	0,05	16	0	0	-1	5,07	15,17	122,5	168,3	53,7	1,44	0,45
14	2250	0,05	32	0	0	0	4,72	17,26	125,1	172,6	51,7	1,14	0,33
15	2250	0,05	48	0	0	1	4,57	20,08	135,7	182,1	48,9	0,89	0,23
16	2250	0,06	16	0	1	-1	6,32	15,83	127,8	172,7	59,1	1,36	0,45
17	2250	0,06	32	0	1	0	5,93	17,55	129,8	176,3	57,1	1,13	0,36
18	2250	0,06	48	0	1	1	5,7	20,07	137,4	184,2	59,3	0,90	0,28
19	3000	0,04	16	1	-1	-1	5,06	20,56	132,0	180,8	35,8	0,84	0,16
20	3000	0,04	32	1	-1	0	4,79	23,14	132,9	182,2	37,4	0,67	0,13
21	3000	0,04	48	1	-1	1	4,53	27,63	139,2	194,7	32,4	0,50	0,08
22	3000	0,05	16	1	0	-1	6,06	20,59	136,7	182,5	32,5	0,85	0,14
23	3000	0,05	32	1	0	0	5,77	23,15	138,1	186,9	40,4	0,69	0,14
24	3000	0,05	48	1	0	1	5,54	27,72	147,8	196,3	34,7	0,50	0,08
25	3000	0,06	16	1	1	-1	7,31	21,25	142,0	188,9	42,9	0,83	0,18
26	3000	0,06	32	1	1	0	6,98	23,44	142,8	193,3	40,1	0,70	0,14
27	3000	0,06	48	1	1	1	6,67	27,71	156,5	195,5	39,0	0,50	0,10

Додаток В





## Додаток Г

№	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	n, об/хв	D <sub>n</sub> , м	t, хв	k <sub>fr</sub> (пшениця), %			k <sub>fr</sub> (ячмінь), %			k <sub>fr</sub> (соя), %		
							0–	0,5–	1,0–	0–	0,5–	1,0–	0–	0,5–	1,0–
							0,5 мм	1,0 мм	1,5 мм	0,5 мм	1,0 мм	1,5 мм	0,5 мм	1,0 мм	1,5 мм
1	-1	-1	-1	1500	0,04	20	64,1	32,8	3,1	58,9	37,8	3,3	70,9	26,1	3,0
2	-1	-1	0	1500	0,04	40	71,7	26,7	1,6	66,7	31,4	1,9	76,9	21,7	1,4
3	-1	-1	1	1500	0,04	60	73,8	24,1	2,1	69,7	27,7	2,6	78,8	18,7	2,5
4	-1	0	-1	1500	0,05	20	65,4	31,2	3,4	61,6	34,8	3,6	69,2	27,4	3,4
5	-1	0	0	1500	0,05	40	72,9	24,7	2,4	69,6	27,9	2,5	75,4	22,6	2,0
6	-1	0	1	1500	0,05	60	76,1	22,0	1,9	73,7	24,2	2,2	78,6	19,3	2,0
7	-1	1	-1	1500	0,06	20	61,6	35,2	3,2	57,9	38,6	3,5	63,4	33,6	3,0
8	-1	1	0	1500	0,06	40	68,3	29,0	2,7	65,9	31,1	3,0	69,1	28,2	2,7
9	-1	1	1	1500	0,06	60	71,9	25,9	2,2	71,3	26,4	2,3	70,5	27,2	2,3
10	0	-1	-1	2250	0,04	20	74,4	24,2	1,4	72,1	26,5	1,5	78,7	19,9	1,4
11	0	-1	0	2250	0,04	40	79,5	19,5	1,0	77,1	21,6	1,4	84,9	13,9	1,2
12	0	-1	1	2250	0,04	60	81,4	17,9	0,7	80,1	19,0	0,9	83,0	16,5	0,5
13	0	0	-1	2250	0,05	20	76,4	21,3	2,3	72,8	24,3	2,9	79,4	18,2	2,4
14	0	0	0	2250	0,05	40	81,5	16,8	1,7	79,3	18,5	2,2	84,2	13,8	2,0
15	0	0	1	2250	0,05	60	83,8	15,3	0,9	84,3	14,8	1,0	83,3	15,9	0,8
16	0	1	-1	2250	0,06	20	70,4	27,2	2,4	69,1	28,4	2,5	71,4	26,6	1,9
17	0	1	0	2250	0,06	40	77,2	21,5	1,3	76,6	21,8	1,6	76,6	22,2	1,1
18	0	1	1	2250	0,06	60	79,4	19,3	1,3	80,5	18,1	1,4	77,8	21,1	1,1
19	1	-1	-1	3000	0,04	20	84,3	15,3	0,4	83,3	16,2	0,6	87,8	11,8	0,4
20	1	-1	0	3000	0,04	40	87,8	11,8	0,4	86,9	12,4	0,7	92,2	7,6	0,2
21	1	-1	1	3000	0,04	60	88,9	9,8	1,3	90,6	8,1	1,4	90,3	8,4	1,3
22	1	0	-1	3000	0,05	20	84,6	14,7	0,7	84,5	14,5	1,0	85,5	13,6	0,9
23	1	0	0	3000	0,05	40	88,3	11,0	0,7	89,8	9,5	0,8	88,6	10,9	0,6
24	1	0	1	3000	0,05	60	89,9	9,5	0,6	91,4	7,7	1,0	88,3	10,9	0,7
25	1	1	-1	3000	0,06	20	80,3	18,6	1,1	80,8	17,9	1,3	78,8	20,2	1,0
26	1	1	0	3000	0,06	40	84,2	14,6	1,2	85,8	12,8	1,4	83,7	15,4	0,9
27	1	1	1	3000	0,06	60	86,3	13,1	0,6	87,8	11,1	1,1	83,6	15,6	0,8

№	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Т, °С			i <sub>d</sub> , %			ν, мм <sup>2</sup> /с		
				Пшениця	Ячмінь	Соя	Пшениця	Ячмінь	Соя	Пшениця	Ячмінь	Соя
1	-1	-1	-1	33,3	34,0	25,9	19,2	22,4	24,4	116,3	102,2	75,7
2	-1	-1	0	37,8	35,3	30,6	15,9	18,9	20,4	102,1	92,0	67,7
3	-1	-1	1	38,8	36,5	30,3	14,1	16,6	18,2	96,4	84,0	66,4
4	-1	0	-1	32,5	38,3	29,5	18,9	21,1	22,3	113,2	97,1	77,7
5	-1	0	0	36,4	40,7	33,6	15,6	17,3	17,6	99,2	87,6	68,4
6	-1	0	1	38,1	40,6	33,2	13,9	15,3	15,5	92,3	78,5	65,1
7	-1	1	-1	32,2	41,8	33,2	18,5	20,3	21,0	120,8	104,7	87,4
8	-1	1	0	35,9	44,0	36,1	15,6	16,4	16,7	105,9	91,2	78,8
9	-1	1	1	37,5	44,8	39,1	13,6	13,2	12,7	98,2	81,6	75,7
10	0	-1	-1	37,8	35,7	34,3	9,7	11,8	12,9	95,2	80,4	63,0
11	0	-1	0	54,5	52,5	47,8	6,5	8,4	9,7	84,0	73,4	55,7
12	0	-1	1	60,6	56,8	57,4	4,4	5,3	5,5	80,2	70,9	57,5
13	0	0	-1	37,1	37,8	34,9	9,2	11,5	13,3	90,2	81,8	65,5
14	0	0	0	53,5	56,2	51,1	6,3	8,2	9,0	81,5	70,1	58,2
15	0	0	1	59,7	60,6	59,3	4,1	3,7	3,0	74,4	63,1	56,0
16	0	1	-1	37,3	44,6	40,1	8,8	9,9	9,4	104,7	88,4	74,4
17	0	1	0	53,1	57,2	55,5	5,9	6,2	5,7	89,1	76,1	67,6
18	0	1	1	59,1	64,9	62,1	3,8	3,2	1,6	85,2	69,3	64,8
19	1	-1	-1	40,0	35,2	38,1	13,2	15,1	15,8	75,9	64,6	50,3
20	1	-1	0	65,5	61,5	61,2	10,7	12,3	12,6	69,4	61,2	44,8
21	1	-1	1	74,8	69,7	72,8	9,8	9,9	8,9	66,2	52,7	45,6
22	1	0	-1	39,1	37,7	40,9	13,0	14,5	14,4	76,3	61,8	54,3
23	1	0	0	63,9	64,8	65,2	10,4	10,2	9,4	66,4	54,9	48,2
24	1	0	1	73,7	71,7	75,8	9,6	9,7	8,6	64,7	52,5	50,5
25	1	1	-1	38,5	41,1	44,7	13,6	14,3	13,5	84,4	69,3	64,3
26	1	1	0	63,5	67,7	66,9	11,0	10,5	9,2	75,1	62,9	56,5
27	1	1	1	73,2	75,9	78,5	10,0	10,0	8,5	72,9	58,8	59,1

№	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	N, кВт			E, МДж			E <sub>Q</sub> , МДж/кг		
				Пшениця	Ячмінь	Соя	Пшениця	Ячмінь	Соя	Пшениця	Ячмінь	Соя
1	-1	-1	-1	0,902	1,036	0,644	1,082	1,243	0,773	0,302	0,377	0,195
2	-1	-1	0	0,722	0,903	0,500	1,949	2,326	1,373	0,485	0,623	0,319
3	-1	-1	1	0,591	0,900	0,231	2,658	3,406	1,650	0,643	0,873	0,374
4	-1	0	-1	0,952	1,066	0,774	1,142	1,279	0,929	0,312	0,371	0,240
5	-1	0	0	0,761	0,855	0,636	2,056	2,304	1,692	0,504	0,591	0,401
6	-1	0	1	0,623	0,823	0,308	2,803	3,292	2,061	0,658	0,798	0,468
7	-1	1	-1	0,995	1,175	0,857	1,194	1,410	1,028	0,346	0,435	0,290
8	-1	1	0	0,792	1,001	0,594	2,144	2,612	1,741	0,561	0,708	0,450
9	-1	1	1	0,659	0,815	0,533	2,935	3,590	2,380	0,729	0,899	0,603
10	0	-1	-1	1,175	1,256	1,012	1,410	1,508	1,215	0,338	0,374	0,276
11	0	-1	0	0,894	1,123	0,540	2,483	2,855	1,863	0,558	0,662	0,392
12	0	-1	1	0,742	0,911	0,666	3,373	3,948	2,662	0,740	0,881	0,572
13	0	0	-1	1,271	1,603	1,061	1,525	1,923	1,274	0,356	0,472	0,287
14	0	0	0	0,994	1,295	0,707	2,718	3,477	2,122	0,596	0,783	0,450
15	0	0	1	0,844	0,966	0,739	3,731	4,636	3,008	0,795	0,983	0,645
16	0	1	-1	1,374	1,457	1,214	1,649	1,748	1,456	0,418	0,452	0,364
17	0	1	0	1,102	1,291	0,928	2,971	3,298	2,570	0,687	0,769	0,599
18	0	1	1	0,959	1,073	0,795	4,122	4,585	3,524	0,927	1,017	0,809
19	1	-1	-1	1,536	1,673	1,361	1,843	2,008	1,633	0,390	0,431	0,332
20	1	-1	0	1,194	1,383	0,890	3,276	3,667	2,702	0,666	0,754	0,523
21	1	-1	1	1,038	1,118	0,844	4,522	5,009	3,714	0,908	0,988	0,735
22	1	0	-1	1,794	1,945	1,635	2,153	2,334	1,962	0,454	0,493	0,410
23	1	0	0	1,394	1,495	1,251	3,826	4,129	3,464	0,774	0,821	0,698
24	1	0	1	1,229	1,435	1,125	5,300	5,850	4,814	1,053	1,144	0,973
25	1	1	-1	2,081	2,243	1,996	2,497	2,692	2,395	0,555	0,595	0,542
26	1	1	0	1,632	1,786	1,397	4,456	4,835	4,071	0,945	1,007	0,869
27	1	1	1	1,442	1,726	1,289	6,186	6,906	5,618	1,280	1,405	1,200

## Додаток Д

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор – проректор з навчальної роботи Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ),  
канд. с.-г. наук, проф.

М.П. Дмитро ОНОПРИСНКО

«12» вересня 2024 р.

### А К Т

**про використання результатів дисертації  
на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії  
Малегіна Романа Дмитровича  
«Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней»  
у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ**

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А. М. та членів – завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін В. Ю., професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри тракторів і сільськогосподарських машин Теслюк Г.В. підтверджує впровадження науково-практичних результатів за дисертаційною роботою на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії аспіранта Малегіна Романа Дмитровича «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней» у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ і констатує

– аспірантом Малегіним Р.Д. впроваджено в курс дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Агроінженерія» спеціальності 208 Агроінженерія наступне: практична робота «Механізація подрібнення концентрованих кормів». Мета роботи – вивчити конструкцію та робочий процес машин для подрібнення концентрованих кормів та методику розрахунку параметрів. Матеріальне забезпечення – роторний диспергатор-гомогенізатор, який розроблений і створений Малегіним Р.Д. у відповідності до дисертаційної роботи.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ,  
д-р наук з держ. управ., проф.

Андрій ПУГАЧ

Члени комісії:

завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ,  
канд. техн. наук, доц.


Володимир ДУДІН

канд. техн. наук, доцент,  
в.о. завідувача кафедри тракторів і сільськогосподарських машин.

Геннадій ТЕСЛЮК

## Додаток Е

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Проректор з наукової та інноваційної діяльності  
Дніпровського державного аграрно-економічного  
університету д. е. т. н., проф.

«»  
Юрій ТКАЛІЧ  
2025р.



**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Фермерського господарства  
«Моніка»  
Віталій МОНЯ  
2025р.



**АКТ**  
**про виробничі випробування роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней**

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), здобувач третього «освітньо-наукового» рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Малегін Роман Дмитрович, науковий керівник професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослідн. Алієв Ельчин Бахтияр огли, завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін Володимир Юрійович, з однієї сторони, і представник Фермерського господарства «Моніка» (ЄДРПОУ 37901619, Україна, 51040, Дніпропетровська обл., Дніпровський р-н, село Могилів, вул. Староселівська, будинок 51А) директор Моня Віталій Миколайович, з другої сторони, склали цей акт про те, що в умовах Фермерського господарства «Моніка» проводились виробничі випробування роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней з обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами.

В результаті випробування встановлено, що роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор рідких кормів для свиней виконує технологічний процес гомогенізації рідких кормів з продуктивністю 27-35 кг/год, при цьому середня споживана потужність складає 1,1 кВт. Вміст у готовому рідкому кормі частинок твердої речовини розміром 0-0,5 мм., на рівні 90,4-92,5% і кінематична в'язкість рідкого корму на рівні 68-75 мм<sup>2</sup>/с.

Встановлено, що використання роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами дозволяє виконувати технологічний процес гомогенізації рідких кормів більш ефективно.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

**Від ДДАЕУ**


завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц.

«» Володимир ДУДІН

професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. доц.

«» Ельчин АЛІЄВ

здобувач третього «освітньо-наукового» рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

«» Роман МАЛІЄГІН

**Від Фермерського господарства «Моніка»**  
директор Фермерського господарства

«» Віталій МОНЯ

## Додаток Ж

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), д-р с.-г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ

м.п.



## ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО»

Євгеній НОСЕНКО

м.п.



## А К Т

**про впровадження/використання результатів науково-дослідної роботи**


Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які виконані здобувачем третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Малегіним Романом Дмитровичем під керівництвом професора кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету, д-р техн. наук, старшого дослідника Алієва Ельчина Бахтияра Огли впроваджені та використані на виробництві ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» (ЄДРПОУ 36841800, Дніпропетровська обл., місто Дніпро, вул. Бердянська, буд. 3а). Підприємство ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО», в особі директора Носенко Євгенія Олеговича, отримало конструкторську та технічну документацію на роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор рідких кормів, який розроблено у відповідності дисертації на здобуття наукового ступеня доктор філософії за темою «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней».

Підприємство ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО» зацікавлене у виготовленні дослідної партії роторного кавітаційного диспергатора-гомогенізатора кормів у кількості 5 одиниць для виробничих випробувань і серійного виробництва.


Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ДДАЕУ

Професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ,  
д-р. техн. наук, старш. дослідн.

 Ельчин АЛІЄВ

Здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

 Роман МАЛЄГІН

« 18 » листопада 2024р.

Від ТОВ «ДОНСПЕЦМОНТАЖ-АГРО»

Головний інженер

 Андрій ЗОЛОТОПУП

« 18 » листопада 2024р.

## Додаток И

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАБУ), д-р с.-г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ

«15» листопада 2022 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор Приватного підприємства «Агромех плюс»

Борис ПОТЕРУХА

«15» листопада 2022 р.

**А К Т**

**про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи**

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, яка була виконана професором кафедри інжинірингу технічних систем Алієвим Е. і асистентом кафедри інжинірингу технічних систем Малегіним Р. впроваджені і використані на виробництві Приватного підприємства «Агромех плюс» (ЄДРПОУ 35740275, м. Дніпро, Донецьке шосе, буд. 7, кв. 59).

Приватним підприємством «Агромех Плюс» в особі заступника директора Дніпровського Г.І. отримало конструкторську та технічну документацію на виготовлення експериментального зразка кавітаційного диспергатор-гомогенізатора для приготування рідких харчових продуктів і кормів, який розроблено згідно науково-дослідної роботи БМ-14/2020 «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки» (№ ДР 0120U100322) в ДДАЕУ.

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

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

**Від ІОК-НААН**

Професор кафедри інжинірингу технічних систем

Ельчин АЛІЄВ

Асистент кафедри інжинірингу технічних систем

Роман МАЛЄГІН

**Від ПП «Агромех плюс»**

Заступник директора

Дніпровський Г.І.

## Додаток К

УДК 631.563

№ держреєстрації № 0120U100322

Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ)  
49000, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної  
діяльності ДДАЕУ,  
доктор с.-г. наук, проф.,

Юрій ТКАЛІЧ

8.12.2022



ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ  
БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У БІОЛОГІЧНО  
ЦІННІ ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ І КОРМОВІ ДОБАВКИ  
(остаточний)

Начальник відділу науки та інновацій  
ДДАЕУ, канд. хім. наук, доц.

8.12.2022

Андрій ТОКАР

Керівник НДР  
канд. техн. наук, доц.

8.12.2022

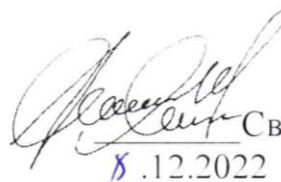
Світлана МИКОЛЕНКО

2022

Рукопис закінчено 8 грудня 2022 р.  
Результати роботи розглянуто науково-технічною радою ДДАЕУ,  
протокол від 8 грудня 2022 р. № 3

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,  
провідний науковий співробітник,  
канд. техн. наук, доц.



Світлана МИКОЛЕНКО

8.12.2022

(вступ, розділи  
4.1, 4.2, 6, 7,  
висновки)

Відповідальний виконавець:  
старший науковий співробітник,  
канд. техн. наук



Наталія СОВА

8.12.2022

(розділи 1.3, 2.1-  
2.5, висновки)

Виконавці:  
Провідний науковий співробітник,  
д-р техн. наук, старш. дослід.

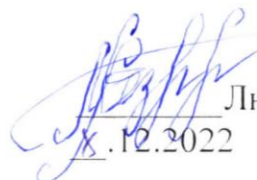


Ельчин АЛІЄВ

8.12.2022

(розділи 2.6, 3, 4.1-  
4.2, висновки)

Провідний науковий співробітник,  
канд. наук з держ. упр., доц.

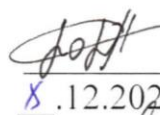


Людмила БЕЗУГЛА

8.12.2022

(розділ 1.1, 1.2,  
висновки)

Старший науковий співробітник,  
канд. техн. наук

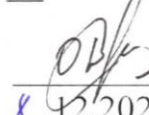


Денис ДОЛГІХ

8.12.2022

(розділ 3.2)

Науковий співробітник

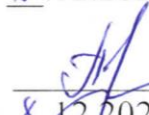


Ольга АЛІЄВА

8.12.2022

(розділи 3.2, 4.1,  
4.2)

Науковий співробітник

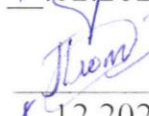


Ольга ПІДДУБЦЕВА

8.12.2022

(розділи 6.1, 6.2)

Науковий співробітник

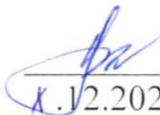


Любов ПЛОТКА

8.12.2022

(розділи 6.3, 6.4)

Молодший науковий співробітник




Яна ГЕЗЬ

8.12.2022

(розділ 3.5)

Молодший науковий співробітник




Дмитро ТИМЧАК


8.12.2022

(розділ 5)

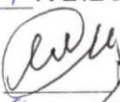
Молодший науковий співробітник

  
Крістіна ХУДАЙБЕРДІЄВА  
8.12.2022 (розділи 6.4, 6.5)

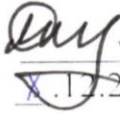
Молодший науковий співробітник

  
Кристина ЛУПКО  
8.12.2022 (розділи 3.1, 4.3)

Молодший науковий співробітник

  
Микола ЛІНКО  
8.12.2022 (розділ 3.4)

Технік

  
Роман МАЛЄГІН  
8.12.2022 (розділи 2.6, 3.3)

## Додаток Л



## Додаток М

## Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування:*

1. Алієв Е.Б., Дудін В.Ю., Алієва О.Ю., **Малєгін Р. Д.** Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора рідких кормів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* № 21. 2020. С. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>. – **категорія Б** (Здобувачу належить розробка 3д моделі для моделювання)

2. Алієв Е.Б., Алієва О.Ю., **Малєгін Р.Д.** Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва. *Наукові горизонти.* 2020. № 07 (92). С. 112–19. DOI: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-112-119>. – **категорія А, Scopus** (Здобувачу належить один із запропонованих способів переробки рослинної сировини)

3. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Яропуд В.М., **Малєгін Р.Д.** Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК.* 2020. № 2 (109). С. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>. – **категорія Б** (Здобувачу належить розробка технології наповнення ємності та виведення готового продукту)

4. Aliiev E., **Maliehin R.**, Ivliev V., Aliieva O. Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed. *Scientific Horizons.* 2021. 24 (2). P. 16–26. DOI: [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26) – **категорія А, Scopus** (Здобувачу належить розробка 3д моделі для моделювання)

5. Алієв Е.Б., **Малєгін Р.Д.** Результати експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора рідких кормів для свиней. Сільськогосподарські

машини. 2024. 50: 48–60. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1334> – **категорія Б** (Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень)

***Розділи монографії:***

6. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., **Малєгін Р. Д.**, Лупко К. О., Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 2022. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0 (Здобувачу належать розділ «3.3. Кавітаційний диспергатор-гомогенізатор для приготування рідких харчових продуктів і кормів»).

***Патент України на корисну модель:***

7. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Алієва О. Ю., **Малєгін Р. Д.** Патент України на корисну модель 147500, МПК (2006) B01F 7/00, B01F 13/06 (2006.01). Роторний кавітаційний диспергатор-гомогенізатор. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u202008225. Заявл. 22.12.2020. Опубл. 12.05.2021, бюл. № 19. (Здобувачу належить розробка конструктивної схеми установки)

***Тези і матеріали конференцій:***

8. Алієв Е.Б., Алієва О.Ю., **Малєгін Р.Д.** Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження. Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» (29 травня 2020 р.). Житомир: ПНУ. 2020. С. 76–79. (Здобувачу належить моделювання процесу кавітації)

9. Алієв Е.Б., **Малєгін Р.Д.** Обґрунтування доцільності використання диспергаторів рідких кормів. Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2020

р.). Харків: ХНТУСГ, 2020. С. 7. *(Здобувачу належить обґрунтування ефективності рідкої годівлі)*

10. Алієв Е.Б., **Малєгін Р.Д.** Ефективність впровадження технології годівлі тварин кормами після кавітаційної обробки. Матеріали XVI міжнародна научна практична конференція «Найновітє научни постиження – 2020» (15–22 март 2020 г.). Volume 3. Софія «Бял ГРАД-БГ ОДД». 2020. С. 39–41. *(Здобувачу належить обґрунтування ефективності кавітаційної обробки)*

11. Алієв Е., **Малєгін Р.**, Алієва О. Етапи розробки гомогенізатора-диспергатора рідких кормів. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (14–16 травня 2022 р.). Кропивницький: ЦНТУ. 2022. С. 40–41. *(Здобувачу належить розробка конструкторської документації)*

12. **Малєгін Р.Д.** Аналіз динамічних характеристик рідкої фази суміші у дифузори диспергатора-гомогенізатора рідких кормів для свиней. 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. 173–176.

#### ***Депонований звіт:***

13. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгих Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., Лупко К., Лінко М., **Малєгін Р.** Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322 *(Здобувачу належать розділ 2.6, 3.3 і висновки).*