

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СЕРДЮК АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 536.24

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ
ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ ЗЕРНОВИХ КОРМІВ НА БАЗІ РОТОРНО-
ПУЛЬСАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
14 «Електрична інженерія»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник
ГОРОБЕЦЬ Валерій Григорович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Сердюк А. М. Розробка електротехнічного комплексу для приготування рідких кормів на базі роторно-пульсаційних технологій.

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 «Електрична інженерія»). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2023.

У дисертації проведено дослідження, присвячені вирішенню науково-технічної задачі підвищення енергетичної ефективності роторно-пульсаційної установки у складі електротехнічного комплексу для приготування рідких кормів при застосуванні методу дискретно-імпульсного введення енергії.

Широко вживані технології приготування кормів при вирощуванні свійських тварин в агрохолдінгах та фермерських господарствах базуються на використанні сухих кормів. Основними апаратами для приготування таких кормів є молоткові дробарки різних конструкцій. Принцип отримання сухого корму в таких пристроях полягає у використанні технології ударного механізму, який подрібнює зернові компоненти кормової суміші. Основною метою в процесі виготовлення якісних кормів є отримання оптимальних розмірів кормових частинок для засвоєння в процесі годівлі тварин при мінімальних енергетичних витратах на одиницю кормової маси. Разом з тим, в молоткових дробарках отриманий сухий корм містить як великі фракції, так і пилоподібні фракції, які не відповідають відповідним стандартам, прийнятим при годівлі худоби. Це погіршує споживаність корму і призводить до перевитрат зернового матеріалу. Крім того, для молоткових дробарок характерним є значні питомі енергетичні витрати для приготування одиниці маси сухої кормової суміші.

Як показують дослідження і практичний досвід годівлі худоби вживання сухих кормів не є оптимальним для певних видів сільськогосподарських тварин (свиней, молодняка великої рогатої худоби, кіз, овець та інш.). Для

даних видів худоби найкращим за споживаністю та якістю виготовлення кормової продукції являється рідкий корм. Годівля сільськогосподарських тварин рідким кормом може призвести до зниження вертикальної передачі ентеропатогену молодняку, до того ж передача їх через їжу може покращувати екофізіологію кишечника та підвищити імунітет тварин. Встановлено, що спроби використовувати грануляцію корму при високих температурах в харчовій промисловості з метою скорочення ймовірності появи бактерії *Salmonella* в кормах тварин не призводить до зменшення числа випадків виникнення інфекцій, які викликані бактерією *Salmonella*. Встановлено, що раціон, який базується на використанні гранульованих кормів руйнує функцію бар'єру на поверхні шлунку. При поїданні свинями сипкого корму, він тривалий період часу залишається у шлунку, причому на *Salmonella* впливає молочна кислота у проксимальній частині шлунку. Наявна концентрація молочної кислоти та тривалість її дії є достатніми для того, щоб знищити *Salmonella*. При поїданні тваринами гранульованого корму їжа затримується в шлунку з меншою тривалістю часу і концентрація молочної кислоти в шлунку є значно нижчою. З проведених досліджень випливає, що рідкі корми сприятливо впливають на стан кишечника та знижують випадки виникнення бактерій *Salmonella* у сільськогосподарських тварин. Приготування рідкого корму шляхом розведення сухого корму рідиною крім вказаних вище недоліків потребує додаткових витрат енергії на підігрів рідких кормових сумішей в холодний період року. З метою досягнення найбільш ефективних параметрів технологічного процесу проведено поглиблений літературно-патентний аналіз існуючих технологій та апаратів для приготування рідких кормів.

Актуальним напрямком являється розробка нових конструкцій апаратів для приготування якісних рідких кормів на основі зернових сумішей, принцип роботи яких заснований на використанні технологій з меншими енерговитратами для отримання одиниці кормового продукту. До таких апаратів можна віднести роторно-пульсаційні, принцип роботи яких

заснований на методі дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Використання таких технологій дає можливість здійснювати процеси змішування, подрібнення, розчинення компонентів корму з одночасним нагріванням рідкої маси та ряді інших технологічних процесів. При приготуванні рідких кормів за допомогою даних агрегатів реалізуються основні механізми ДІВЕ, а саме: вплив турбулентності, пульсацій тиску, кавітації, зміни швидкості потоку рідини та інших гідродинамічних та термічних ефектів. За рахунок таких впливів досягаються більші значення щільності гідродинамічної та гідроакустичної енергії, а також локалізується значна частка потужності в потоці оброблюваної суміші.

Запропоновано електротехнічний комплекс для приготування високоякісних рідких зернових кормів на базі роторно-пульсаційних технологій, в якому робочими органами виступають коаксіально з'єднані ротор і статор, які мають на своїх бічних поверхнях отвори прямокутного профілю – пази. Проведено чисельне моделювання процесів гідродинаміки і тепломасопереносу в роторно-пульсаційному апараті з використанням технології ДІВЕ. При чисельних розрахунках задач гідродинаміки використовувався метод кінцевих елементів. В основі математичної моделі процесів тепломасопереносу в потоці рідкої суміші лежать рівняння Нав'є-Стокса та рівняння переносу енергії для конвективних течій. Оскільки режим течії рідкої зернової суміші є турбулентним, то в розрахунках використана стандартна модель турбулентності k- ϵ . 3D модель робочої камери виконано у програмному середовищі Solidworks, після чого її було передано до Ansys Fluent. В результаті чисельних розрахунків було отримано поля тисків, температур та швидкостей, які дали можливість визначити оптимальні геометричні розміри ротора і статора, величини зазору між ними та визначити кількість і розміри отворів прямокутного профілю, при яких процес обробки суміші буде найбільш ефективним. На основі розробленої імітаційної моделі в програмному середовищі Matlab Simulink встановлені закономірності перехідних процесів електропривода роторно-пульсаційної установки у складі

електротехнічного комплексу для приготування рідких зернових кормів, що дозволяють формувати умови запобігання виникненню можливих аварійних режимів роботи та зупинки технологічного процесу.

За результатами математичного моделювання було виготовлено експериментально-дослідну установку для приготування рідких зернових кормів. Суть даної технології полягає в тому, що в приймальному бункері зерно змішується з водою і обробляється в режимі рециркуляції переміщуючись між робочою камерою та бункером через трубопровід. При обробці середовища в РПА останнє піддається впливу основних механізмів ДІВЕ, що покращує диспергування, скорочує час обробки суміші та зменшує енергетичні витрати. За допомогою виготовленого експериментального зразка проведені експериментальні дослідження процесу обробки водозернових сумішей з різним складом зернових компонентів (пшениця, кукурудза, ячмінь) при різній концентрації твердої фракції (10, 20 і 30% від загальної маси корму). В ході експериментальних досліджень визначалися такі параметри як енергетичні витрати на виготовлення кормів, температура та в'язкість суміші, досліджувалася динаміка зміни гранулометричного складу суміші в різні моменти часу, досліджено режими роботи роторно-пульсаційної установки. Досліджено основні режими роботи двигуна електротехнічного комплексу і доведено, що використанням частотного перетворювача для зміни швидкості обертання робочих органів установки в процесі приготування рідкого корму дозволяє знизити енергетичні витрати на їх приготування на 7%. Аналізуючи результати досліджень встановлено, що обробку водозернового середовища слід проводити з використанням частотного перетворювача з метою зменшення енергетичних витрат на приготування одиниці кормової продукції при наступних параметрах: вміст твердої фази в суміші – 30%, швидкість обертання ротора установки – змінюється в процесі обробки від 3000 до 2400 об/хв, зазор між ротором і статором – 500 мкм, тривалість обробки водозернової суміші – 20 хв (або ж 25-30 циклів обробки); температура суміші – не більше 55°C, в'язкість – близько 2 Па·с. Дані параметри являються

оптимальними з точки зору отримання необхідного гранулометричного складу виготовлених кормів при мінімальних затратах електричної енергії на їх приготування.

Проведений порівняльний аналіз хімічного та біологічного складу виготовленого рідкого зернового корму за допомогою розробленого електротехнічного комплексу з кормом, який виготовлений за допомогою існуючих технологій. В результаті встановлено, що рідкий зерновий корм, виготовлений за допомогою розробленої технології має на 15 % вищі поживні характеристики ніж корм, який виготовлений за існуючою технологією виробництва кормів для свійських тварин.

Аналіз економічної ефективності застосування електротехнічного комплексу в технології приготування рідких зернових кормів показав, що запропонована технологія дозволяє зменшити витрати електричної енергії на 25-30 %, при цьому отриманий в процесі виготовлення рідкий корм має на 15% більшу поживну та енергетичну цінність, ніж корм, приготований за існуючою технологією. Річний економічний ефект від вигодовування однієї сотні свиней складає близько 103 тис. гривень. Визначені переваги розробленої технології приготування високоякісних рідких зернових кормів: безперервність процесу виробництва; зменшення часу та споживаної енергії на приготування рідких зернових кормів; можливість отримання багатокомпонентних кормових сумішей різного складу без попереднього подрібнення; здійснення декількох стадій технологічного процесу в одному апараті.

За результатами дисертаційного дослідження вирішено задачу підвищення енергетичної ефективності роторно-пульсаційної установки у складі електротехнічного комплексу для приготування високоякісних рідких кормів при застосуванні методу дискретно-імпульсного введення енергії. Технічну новизну розробленого електротехнічного комплексу та способу приготування рідкого водозернового корму підтверджено патентом на корисну модель.

Розроблена технологія на базі роторно-пульсаційного апарату може бути використана на фермерських господарствах та агрокомплексах при виготовленні високоякісних рідких зернових кормів з підвищеними поживними характеристиками для згодовування більшості видів сільськогосподарських тварин (ВРХ, свиней, кіз, овець тощо) при мінімальних енергетичних витратах на їх приготування.

Ключові слова: роторно-пульсаційний апарат, гетерогенне середовище, асинхронний двигун, рідкий зерновий корм, частотний перетворювач, тепломасообмін, чисельне моделювання, дискретно-імпульсне введення енергії, споживана енергія.

ANNOTATION

Serdiuk A. M. Development of an electrotechnical complex for the preparation of liquid feed based on rotary-pulsation technologies. Qualifying Scientific Work on Manuscript Rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics" (14 "Electrical Engineering"). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2023.

In the dissertation, research was carried out, devoted to solving the scientific and technical problem of increasing the energy efficiency of a rotary-pulsation unit as part of an electrotechnical complex for the preparation of liquid feed when applying the method of discrete-pulse energy input.

Widely used technologies for the preparation of fodder when raising domestic animals in agroholdings and farms are based on the use of dry fodder. Hammer crushers of various designs are the main devices for preparing such fodder. The principle of obtaining dry fodder in such devices is to use the technology of an impact mechanism, which grinds the grain components of the fodder mixture. The main goal in the process of manufacturing high-quality fodder is to obtain optimal sizes of fodder particles for assimilation in the process of feeding animals with minimal energy costs per unit of fodder mass. At the same time, the dry fodder

obtained in hammer crushers contains both large fractions and dust-like fractions that do not meet the relevant standards adopted for livestock feeding. This worsens feed consumption and leads to overspending of grain material. In addition, hammer crushers are characterized by significant specific energy consumption for the preparation of a unit mass of dry fodder mixture.

Research and practical experience of livestock feeding show that the use of dry fodder is not optimal for certain types of farm animals (pigs, young cattle, goats, sheep, etc.). For these types of livestock, liquid feed is the best in terms of consumption and production quality of fodder products. Feeding farm animals with liquid feed can lead to a decrease in the vertical transmission of enteropathogens to young animals, in addition, their transmission through food can improve the intestinal ecophysiology and increase the immunity of animals. It has been established that attempts to use feed granulation at high temperatures in the food industry in order to reduce the probability of the appearance of *Salmonella* bacteria in animal feed does not lead to a decrease in the number of cases of infections caused by *Salmonella* bacteria. It has been established that a diet based on the use of granulated feed destroys the function of the barrier on the surface of the stomach. When pigs eat loose feed, it remains in the stomach for a long time, and *Salmonella* is affected by lactic acid in the proximal part of the stomach. The concentration of lactic acid present and the duration of its action are sufficient to kill *Salmonella*. When animals eat granulated feed, food stays in the stomach for a shorter time and the concentration of lactic acid in the stomach is much lower. Research shows that liquid feed has a beneficial effect on the condition of the intestines and reduces the occurrence of *Salmonella* bacteria in farm. Preparation of liquid fodder by diluting dry fodder with liquid, in addition to the above-mentioned disadvantages, requires additional energy expenditure for heating liquid fodder mixtures in the cold period of the year. In order to achieve the most effective parameters of the technological process, an in-depth literature and patent analysis of existing technologies and devices for the preparation of liquid feed was carried out.

The current direction is the development of new designs of devices for preparing high-quality liquid feed based on grain mixtures, the principle of operation of which is based on the use of technologies with lower energy consumption for obtaining a unit of feed product. Such devices include rotary-pulsation ones, the principle of which is based on the method of discrete-pulse energy input (DPEI). The use of such technologies makes it possible to carry out the processes of mixing, grinding, dissolving feed components with simultaneous heating of the liquid mass and a number of other technological processes. When preparing liquid feed with the help of these units, the main mechanisms of DPEI are implemented, namely: the influence of turbulence, pressure pulsations, cavitation, changes in the speed of liquid flow and other hydrodynamic and thermal effects. Due to such influences, higher hydrodynamic and hydroacoustic energy density values are achieved, and a significant portion of the power is localized in the flow of the processed mixture.

An electrotechnological complex for the preparation of high-quality liquid grain fodder based on rotary-pulsation technologies is proposed, in which the working bodies are the coaxially connected rotor and stator, which have rectangular profile holes on their side surfaces - grooves. Numerical modeling of the processes of hydrodynamics and heat and mass transfer in a rotary-pulsation apparatus using the DPEI technology was carried out. The finite element method was used for numerical calculations of hydrodynamics problems. The mathematical model of heat and mass transfer processes in the flow of a liquid mixture is based on the Navier-Stokes equation and the energy transfer equation for convective currents. Since the flow regime of the liquid grain mixture is turbulent, the standard k - ε turbulence model was used in the calculations. The 3D model of the working chamber was made in the Solidworks software environment, after which it was transferred to Ansys Fluent. As a result of numerical calculations, the fields of pressures, temperatures and speeds were obtained, which made it possible to determine the optimal geometric dimensions of the rotor and stator, the size of the gap between them, and to determine the number and sizes of the holes of a rectangular profile, at which the process of processing the mixture will be most effective. On the basis of the

developed simulation model in the Matlab Simulink software environment, the regularities of the transient processes of the electric drive of the rotary-pulsation unit as part of the electrotechnical complex for the preparation of liquid grain fodder are established, which make it possible to form conditions for preventing the occurrence of possible emergency modes of operation and stopping the technological process.

According to the results of mathematical modeling, an experimental experimental unit for the preparation of liquid grain fodder was manufactured. The essence of this technology is that in the receiving hopper, the grain is mixed with water and processed in recirculation mode, moving between the working chamber and the hopper through the pipeline. When processing the environment in RPA, the latter is affected by the main mechanisms of DPEI, which improves dispersion, shortens the time of processing the mixture and reduces energy costs. With the help of the manufactured experimental sample, experimental studies of the process of processing grain-water mixtures with different composition of grain components (wheat, corn, barley) at different concentrations of solid fractions (10, 20 and 30% of the total weight of feed) were carried out. In the course of experimental studies, such parameters as energy costs for the production of feed, temperature and viscosity of the mixture were determined, the dynamics of changes in the granulometric composition of the mixture at different moments of time were studied, and the operating modes of the rotary-pulsation unit were investigated. The main modes of operation of the engine of the electrical engineering complex were studied and it was proved that the use of a frequency converter to change the speed of rotation of the working bodies of the installation in the process of preparing liquid feed allows to reduce energy costs for their preparation by 7%. Analyzing the results of the research, it was found that the processing of the water grain environment should be carried out using a frequency converter in order to reduce energy costs for the preparation of a unit of fodder products with the following parameters: the content of the solid phase in the mixture is 30%, the speed of rotation of the rotor of the installation varies during the processing from 3000 to 2400 rpm, the gap between the rotor and the stator is 500 μm , the duration of processing the water-grain mixture

is 20 minutes (or 25-30 processing cycles); the temperature of the mixture is no more than 55°C, the viscosity is about 2 Pa·s. These parameters are the most optimal from the point of view of obtaining the necessary granulometric composition of the manufactured fodder with minimal expenditure of electrical energy for their preparation.

A comparative analysis of the chemical and biological composition of liquid grain fodder produced using the developed electrotechnical complex with fodder produced using existing technologies was carried out. As a result, it was established that the liquid grain feed produced using the developed technology has 15% higher nutritional characteristics than the feed produced according to the existing technology of production of fodder for domestic animals.

The analysis of the economic efficiency of the use of an electrotechnical complex in the technology of preparing liquid grain fodder showed that the proposed technology allows reducing the consumption of electrical energy by 25-30%, while the liquid fodder obtained in the manufacturing process has 15% more nutritional and energy value than fodder prepared according to the existing technology. The annual economic effect of feeding one hundred pigs is about 103 thousand hryvnias. The advantages of the developed technology for the preparation of high-quality liquid grain fodder are determined: continuity of the production process; reduction of time and energy consumption for the preparation of liquid grain feed; the possibility of obtaining multi-component feed mixtures of different composition without preliminary grinding; implementation of several stages of the technological process in one device.

According to the results of the dissertation research, the problem of increasing the energy efficiency of the rotary-pulsation plant as part of the electrotechnical complex for the preparation of high-quality liquid feed using the method of discrete-pulse energy input was solved. The technical novelty of the developed electrotechnical complex and the method of preparation of liquid grain fodder is confirmed by a patent for a useful model. The developed technology based on the rotary-pulsation device can be used on farms and agricultural complexes in the

production of high-quality liquid grain feed with increased nutritional characteristics for feeding most types of agricultural animals (cattle, pigs, goats, sheep, etc.) with minimal energy costs for their preparation.

Key words: rotary-pulsation apparatus, heterogeneous environment, asynchronous motor, liquid grain feed, frequency converter, heat and mass exchange, numerical modeling, discrete-pulse energy input, consumed energy.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. 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. *(Здобувачем проведено дослідження використання методу дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційних технологіях для приготування рідких кормів, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*
2. 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. *(Здобувачем проведено 3D моделювання процесів тепломасопереносу та гідродинаміки в переробній камері роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких кормів, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*
3. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження залежності споживаної енергії роторно-пульсаційної установки від зміни в'язкості та температури суміші в процесі її обробки, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*
4. 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. *(Здобувачем проведено*

експериментальні дослідження зміни енергетичних характеристик роторно-пульсаційної установки при обробці різних видів зернового компоненту, зроблено висновки і підготовлено статтю до друку).

5. 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. *(Здобувачем проведено дослідження перехідних процесів при пуску роторно-пульсаційної установки з використанням частотного перетворювача, зроблено висновки, подано статтю до друку).*

Статті у наукових виданнях іншої держави

6. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження залежності зміни гранулометричного складу кормової суміші та її температури від кількості циклів обробки та швидкості обертання ротора установки, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

Монографії

7. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження виготовлення рідких зернових кормів за допомогою нового електротехнічного комплексу на базі роторно-пульсаційних технологій з використанням методу ДІВЕ).*

Патенти України на винахід та корисні моделі

8. Горобець В. Г., Антипов Є. О., Троханяк В. І., **Сердюк А. М.** Роторно-пульсаційний апарат для приготування рідких кормів: патент на корисну модель №142713 Україна, МПК (2020.01), B02C 7/18 (2006.01), B02C 9/00.

дата подання заявки 11.12.2019; дата публ. 25.06.2020. Бюл. № 12, 5 с. *(Здобувачем проведений літературно-патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих технологій для приготування кормів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

Тези наукових доповідей

9. Горобець В. Г., **Сердюк А. М.** Роторно-пульсаційні апарати для приготування рідких зернових кормів. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: VIII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20-24 травня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 120-121. *(Здобувачем вивчено питання розробки та побудови роторно-пульсаційної установки для приготування високоякісних рідких зернових кормів, узагальнено та систематизовано результати).*

10. Горобець В. Г., Троханяк В. І., **Сердюк А. М.** Дослідження процесів тепломасопереносу в роторно-пульсаційних апаратах для приготування кормових сумішей методами чисельного моделювання. Збірник тез конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»: V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року. С. 153-155. *(Здобувачем проведено чисельне моделювання процесів тепломасопереносу в робочій камері установки, узагальнено і систематизовано результати).*

11. Gorobets V. G., Trokanyak V. I., **Serdiuk A. M.** Numerical simulation of the processes of the preparation of liquid grain feed with the use of rotor-pulsation technologies. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: IX Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 19-22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 151-152. *(Здобувачем вивчено питання методики проведення експериментальних*

досліджень приготування рідких кормів в роторно-пульсаційному апараті, узагальнено та систематизовано результати).

12. Gorobets V., Trokhaniak V., Antypov E, **Serdiuk A.** Investigation of preparation processes of liquid feed mixtures in rotary pulsating apparatus. Conference Programme II International Scientific Conference Ecocomfort and Current Issues of Civil Engineering. Lviv, September 16-18, 2020. P. 120. *(Здобувачем обґрунтовано розробку нового електротехнічного комплексу для приготування рідких зернових кормів на базі роторно-пульсаційних технологій, узагальнено і систематизовано результати)*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АПАРАТИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ СУХИХ ТА РІДКИХ КОРМОВИХ СУМІШЕЙ. МЕХАНІЗМИ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ ОБРОБЦІ РІДКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ.....	26
1.1. Суть процесів подрібнення продукту	26
1.2. Класифікація дробарок	30
1.3. Аналіз конструктивних особливостей дробарок для виготовлення зернових кормів.....	46
1.4. Метод дискретно-імпульсного введення енергії в рідких гетерогенних системах	57
Висновки по розділу 1	62
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТУ. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В РПА	63
2.1. Конструктивні особливості існуючих РПА та їх використання в різних галузях промисловості.....	63
2.2. Розробка роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів.....	71
2.3. Чисельне моделювання процесів гідродинаміки і теплопереносу в роторно-пульсаційному апараті	76
2.3.1. Розробка 3D моделі роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких кормів.....	76
2.3.2. Побудова 3D сітки в Ansys Fluent Meshing	79
2.3.3. Математичне моделювання процесів гідродинаміки в РПА	84
2.3.4. Результати чисельного моделювання в РПА.....	90
Висновки по розділу 2	95
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТУ	97
3.1. Вибір електричного обладнання для приводу роторно-пульсаційної установки	97
3.1.1. Вибір електричного двигуна	99
3.1.2. Дослідження перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна РПА в програмному пакеті Matlab	104
3.1.3. Схема керування асинхронним двигуном роторно-пульсаційної установки	120
3.1.4. Вибір пускозахисної апаратури електродвигуна	122
3.2. Обладнання для вимірювання енергетичних, теплових та напірно-витратних характеристик РПА.....	127
3.3. Обладнання для подачі сировини та вивантаження готової продукції	130
Висновки по розділу 3	133
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РІДКИХ ЗЕРНОВИХ КОРМІВ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ.....	134

4.1. Конструкція та принцип роботи експериментально-дослідної установки	134
4.2. Експериментальні дослідження процесів приготування рідких зернових кормів за допомогою РПА	142
4.2.1. Визначення гранулометричного складу кормової суміші.....	143
4.2.2. Дослідження енергетичних характеристик РПА при виготовленні рідких зернових кормів	149
4.2.3. Дослідження зміни температури при обробці кормової сировини	166
4.3. Використання частотного перетворювача для зменшення споживаної енергії в процесі приготування рідких зернових кормів	171
Висновки по розділу 4.....	179
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ ..	181
5.1. Існуюча технологія та устаткування для виготовлення рідкого зернового корму	181
5.2. Запропонована технологія та устаткування для виготовлення рідкого зернового корму	185
5.3. Економічна та енергетична ефективність розробленої технології для приготування рідких зернових кормів.....	189
Висновки по розділу 5.....	192
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	194
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	197
ДОДАТКИ.....	207

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Тваринництво – особлива галузь сільського господарства як в нашій країні, так і у всьому світі, оскільки вона забезпечує населення продуктами харчування. Одними з основних напрямків розвитку галузі є підвищення якості вироблених продуктів та суттєве збільшення обсягів виробництва всіх видів тваринницької продукції. Особливу роль в досягненні поставлених цілей відіграє виготовлення та згодовування тваринам високоякісних кормів. В даний час основою раціону сільськогосподарської худоби є зернові культури, які являються концентрованими джерелами вітамінів та поживних речовин. При годуванні худоби потрібно використовувати повноцінний комбікорм, який збалансований за основними елементами харчування, мікроелементами та вітамінами. Даний корм на 25-30% ефективніший в порівнянні з монокормом, для приготування якого береться лише одна культура зернофуражу. Такий комбікорм обумовлює повноцінний ріст та продуктивність тварини при мінімальній витраті кормів на одиницю отриманої продукції [1, 2].

Процеси приготування кормів пов'язані з рядом операцій, направлених на переробку зернової сировини. Значний вплив на якість процесу переробки та ступінь засвоєння корму організмом тварин має подрібнення вихідної продукції. Існуючі пристрої, призначені для виробництва кормів, в переважній більшості використовують технологію приготування твердих кормових сумішей. Приготування сухих кормів не є оптимальним для певних видів сільськогосподарських тварин. Це стосується свиней, молодняка ВРХ, кіз, овець та інших. Для даних видів худоби кращим за споживаністю та якістю виготовлення кормової продукції при вирощуванні сільськогосподарських тварин являється рідкий корм. У тваринницькій промисловості основними машинами для приготування кормів являються пристрої, що використовують технологію ударного механізму (молоткові дробарки, шнекові механізми тощо) [3]. При подрібненні в них компонентів комбікорму отримують

продукт, в якому є фракції, розміри яких переважають оптимальний розмір для засвоювання тваринами, що обумовлене недостатнім подрібненням твердих часток корму. Крім того наявний значний вміст пилоподібної фракції, що погіршує якість корму. Використання молоткового подрібнення зернових кормів потребує значних витрат електричної енергії. При приготуванні рідких кормів традиційними методами в зимовий період року необхідно використовувати додаткове обладнання та витратити електроенергію для підігрівання такого корму.

Основною метою в процесі виготовлення якісних кормів є отримання оптимальних розмірів кормових частинок для засвоєння в процесі годівлі ВРХ при мінімальних енергетичних витратах на одиницю кормової маси. Розвиток енергозберігаючих технологій, які можуть відповідати сучасним вимогам по виробництву кормової продукції для сільськогосподарських тварин, базується на розробці нових концепцій, проведенні комплексних науково-дослідних робіт, детальному вивченні сутності фізико-хімічних явищ, що визначають можливість цілеспрямованого керування технологічним процесом. Тому актуальною темою являється розробка нових конструкцій апаратів для приготування рідких кормів на основі зернових сумішей, принцип роботи яких заснований на використанні технологій з меншими енерговитратами для отримання одиниці кормового продукту.

Розробка нових апаратів з високим ступенем впливу на оброблюване середовище є основною умовою по підвищенню якості зернової кормової продукції, що в свою чергу зумовлює підвищення продуктивності та зниження енергетичних витрат на виконання технологічних процесів. До таких апаратів можна віднести роторно-пульсаційні апарати (РПА), принцип роботи яких заснований на методі дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Використання таких технологій дає можливість здійснювати процеси змішування, подрібнення, розчинення компонентів корму з одночасним нагріванням рідкої маси та ряді інших технологічних процесів. При приготуванні рідких кормів за допомогою даних агрегатів реалізуються

основні механізми ДІВЕ, а саме: вплив турбулентності, пульсації тиску, кавітація, зміну швидкості потоку рідини та інші гідродинамічні та термічні ефекти. За рахунок таких впливів досягаються більші значення щільності гідродинамічної та гідроакустичної енергії, а також локалізується значна частка потужності в потоці оброблюваної суміші.

Чисельне та експериментальне дослідження процесів приготування рідких зернових кормів за допомогою РПА потребує більш поглибленого вивчення в майбутньому. Актуальною задачею являється дослідження впливу механізмів дискретно - імпульсного введення енергії, що використовується в роторно-пульсаційних апаратах, а також розробка та удосконалення конструктивних елементів даного апарату для приготування кормів більш високої якості. Отримані дані дозволять в майбутньому використовувати їх для інтенсифікації технологічного процесу приготування рідких зернових кормів для згодовування сільськогосподарським тваринам.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Експериментальні і теоретичні дослідження, які представлені в даній дисертаційній роботі проводилися в лабораторії кафедри теплоенергетики науково-навчального інституту енергетики, автоматики та енергозбереження Національного університету біоресурсів та природокористування України. Основні результати роботи було отримано при виконанні науково-дослідної роботи на тему «Розробка нового способу приготування кормів з використанням роторно-пульсаційних апаратів для підвищення якості кормової продукції» (2019-2020 рр, НДР № 110/10), в якій здобувач приймав участь як співвиконавець.

Мета та задачі дослідження. Метою є розробка нового електротехнологічного комплексу на базі роторно-пульсаційних технологій для приготування високоякісних рідких зернових кормів, які мають покращені споживчі характеристики при менших енергетичних затратах на їх приготування в порівнянні з існуючою технологією.

Для досягнення даної мети було поставлено наступні завдання:

- Провести літературно-патентний пошук існуючих технологій та конструкцій установок для приготування сухих та рідких зернових кормів для сільськогосподарських тварин, визначити їх основні переваги та недоліки.
- Розробити експериментально-дослідну установку для приготування рідких зернових кормів, яка базується на використанні методу дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційних технологіях.
- Провести чисельне моделювання процесів гідродинаміки та тепломасопереносу в робочій камері РПА в процесі приготування рідкого зернового корму для визначення геометричних розмірів основних робочих вузлів установки, необхідних для конструювання роторно-пульсаційного апарату.
- Розробити електротехнічний комплекс для приготування рідких кормів та провести математичне моделювання основних його компонентів з метою забезпечення стабільної та безаварійної роботи роторно-пульсаційного апарату.
- За допомогою виготовленого експериментального зразка роторно-пульсаційного апарату провести дослідження по виготовленню рідких зернових кормів з покращеними харчовими характеристиками для сільськогосподарської худоби. Дослідити вплив зміни теплових, механічних та напірно-витратних характеристик на якість виготовленого корму та енергозатратність в процесі його виготовлення.
- Дослідити ефект використання частотного перетворювача в електротехнічному комплексі з метою зменшення споживаної енергії в процесі виготовлення рідких зернових кормів.
- Виконати дослідження фізико-хімічного складу та споживчих якостей отриманого корму для визначення його переваг порівняно з кормами, отриманими з використанням існуючих технологій.

- Розробити нову технологію приготування рідких зернових кормів, яка базується на застосуванні методу дискретно-імпульсного вводу енергії в роторно-пульсаційних апаратах. Провести порівняльний аналіз економічної ефективності розробленої технології з уже існуючими.

Об'єкт дослідження – процеси, які відбуваються при приготуванні рідких водозернових кормів з покращеними споживчими характеристиками за допомогою роторно-пульсаційних технологій.

Предмет дослідження – розробка нової конструкції електротехнічного комплексу на базі роторно-пульсаційних технологій для приготування рідких зернових кормів, дослідження режимів роботи установки та вивчення процесів тепломасопереносу, які відбуваються в апаратах досліджуваного типу.

Методи дослідження – для вирішення поставленої мети було використано різноманітні методики комп'ютерного, чисельного та математичного моделювання з використанням емпіричних та експериментально-теоретичних рівнів дослідження. Експериментальні дослідження процесів приготування рідких зернових кормів проводились за допомогою розробленої роторно-пульсаційної установки із застосуванням попереднього планування експерименту. Обробка результатів проведених експериментів виконувалась з використанням табличного, статистичного та графоаналітичного аналізів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Розроблено нову технологію та устаткування для приготування високоякісних рідких зернових кормів, яка базується на використанні електротехнічного комплексу та методу дискретно-імпульсного введення енергії при обробці гетерогенного середовища з метою зменшення енергетичних витрат на виготовлення одиниці кормової продукції.
- Вперше розроблено 3D модель переробної камери та здійснено чисельне моделювання процесів гідродинаміки і тепломасопереносу, що відбуваються в ній, на основі методу

кінцевих елементів з використанням рівнянь Нав'є-Стокса та моделі турбулентності в таких програмних забезпеченнях як ANSYS Fluent та Solidworks. На основі отриманих результатів було визначено оптимальні геометричні розміри основних вузлів роторно-пульсаційного апарату.

- Вперше на основі розробленої імітаційної моделі встановлені закономірності перехідних процесів електропривода роторно-пульсаційної установки у складі електротехнічного комплексу для приготування рідких зернових кормів, що дозволяють формувати умови запобігання виникненню можливих аварійних режимів роботи та зупинки технологічного процесу.
- Вперше було досліджено режими роботи двигуна роторно-пульсаційної установки для приготування рідких зернових кормів. Науково доведено, що використання частотного перетворювача дозволяє знизити споживання електричної енергії на 7% за рахунок зміни швидкості обертання ротора РПА в процесі обробки гетерогенного середовища.

Практична значимість отриманих результатів. Розроблено та сконструйовано новий електротехнічний комплекс для виготовлення високоякісних рідких зернових кормів для сільськогосподарських тварин, який базується на використанні методу дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційних апаратах.

Розроблено методику чисельного моделювання процесів гідравліки та тепломасопереносу в робочих каналах роторно-пульсаційної установки в процесі виготовлення високодисперсних зернових кормів для годування свійським тваринам з використанням рівнянь Нав'є-Стокса, рівняння енергії та рівнянь турбулентного переносу.

Особистий внесок здобувача. До дисертаційної роботи увійшли наукові результати досліджень, отриманих особисто здобувачем. Розроблено нову концепцію та виготовлено експериментально-дослідну установку для

приготування рідких зернових кормів на базі роторно-пульсаційних технологій з використанням методу дискретно-імпульсного введення енергії. За допомогою даної установки було проведено ряд експериментальних досліджень для визначення оптимального гранулометричного складу рідкої кормової суміші при мінімальних енергетичних затратах на її виготовлення. Безпосередньо здобувачем було: [4] – проведено літературно-патентний аналіз існуючих установок для виготовлення рідких кормів з метою виявлення головних недоліків таких апаратів; проведено розрахунок та вибір основного та допоміжного обладнання для забезпечення стабільної та безаварійної роботи роторно-пульсаційної установки; [5, 6] – сконструйовано новий електротехнологічний комплекс для приготування рідких кормів для сільськогосподарської худоби на базі роторно-пульсаційних технологій; [7] – розроблено імітаційну модель установки в програмному пакеті Matlab Simulink та встановлені закономірності перехідних процесів електропривода роторно-пульсаційної установки у складі електротехнічного комплексу для приготування рідких зернових кормів, що дозволяють формувати умови запобігання виникненню можливих аварійних режимів роботи та зупинки технологічного процесу; [8] – проведено експериментальні дослідження виготовлення рідких зернових кормів за допомогою розробленого агрегату; У колективних публікаціях із співавторами: [9] – проведено чисельне моделювання процесів гідродинаміки та тепломасопереносу в робочих органах системи ротор-статор роторно-пульсаційної установки в програмних пакетах ANSYS Fluent та Solidworks, на основі яких були отримані поля тисків, швидкостей та температур в робочій камері апарату при обробці водозернового середовища. За результатами виконаних робіт було запропоновано нову, більш ефективну технологію та устаткування для приготування рідких зернових кормів. Проведено аналіз економічної ефективності розробленої установки, яка здатна виготовляти корми вищої якості з покращеними фізико-хімічними характеристиками для свійських тварин у порівнянні з існуючими технологіями.

Апробація результатів дисертації. Головні положення проведених досліджень були презентовані, обговорені та ухвалені на: щорічних кафедральних засіданнях ННІ Е,А і Е Національного університету біоресурсів та природокористування України(2019-2022рр.); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (м. Київ, 20-24 травня 2019 року); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Професійний розвиток та формування конкурентоспроможності сучасного фахівця» (м. Ніжин, 23 травня 2019 року); V Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій пам'яті професора В. М. Синькова (м. Київ, 19 грудня 2019 року); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування» (м. Київ, 19-22 травня 2020 року); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики», присвяченій 100-річчю професора Б. Х. Драганова (м. Київ, 10-11 грудня 2020 року); II Міжнародній науковій конференції «Ecosomfort and Current Issues of Civil Engineering» (м. Львів, 16-18 вересня 2020 року); V Міжнародній науково-технічній конференції «Modern Power Systems and Units» (м. Краків, 19-21 травня 2021 року).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені у 12 наукових працях, з яких 5 – статті у фахових виданнях; 1 – стаття у закордонному науковому виданні, що входить до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 4 – тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій; 1 – монографія. Отримано патент на корисну модель роторно-пульсаційної установки.

Обсяг та структура дисертації. Загальний обсяг дисертації – 212 сторінок друкованого тексту, яка складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних літературних джерел, що мають 104 найменування, з яких 29 іноземною мовою. Дисертація містить 74 рисунки, 14 таблиць та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1

АПАРАТИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ СУХИХ ТА РІДКИХ КОРМОВИХ СУМІШЕЙ. МЕХАНІЗМИ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ ОБРОБЦІ РІДКИХ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ

1.1. Суть процесів подрібнення продукту

Подрібнюванням називають процес поділу твердого (або умовно твердого) тіла на частинки, що здійснюється шляхом механічного впливу.

Для того щоб зменшити розміри твердої сировини, необхідно здійснити роботу і подолати сили взаємного притягання молекул. Внаслідок прикладання зовнішньої сили тіло руйнується, причому сумарна площа поверхонь, які при цьому утворюються, значно перевищує поверхню вихідного матеріалу. Це створює передумови для інтенсифікації теплових, дифузійних та біохімічних процесів, у яких бере участь тверда фаза.

Процеси подрібнювання різного роду сировини та матеріалів широко застосовуються у різних галузях харчової промисловості. Подрібнюють зерно, солод, сіль, цукор, сухарі, горіхи, какао-боби, какао-крупку, олійне насіння, картопля та інші овочі, фрукти, м'ясо, цукеркові та тістові маси тощо [10].

Процес подрібнення застосовується для доведення кормової сировини (та інших матеріалів) до необхідної крупності вихідного матеріалу, необхідного гранулометричного складу або заданого ступеня розкриття зерна.

Основною характеристикою подрібнювання є ступінь подрібнювання – це відношення розмірів максимальних шматочків вхідного матеріалу (D_{MAX}) до розмірів максимальних шматочків вихідного продукту (d_{max}).

$$i = D_{MAX} / d_{max} \quad (1.1)$$

Ступінь подрібнення показує, у скільки разів зменшився розмір шматочків при подрібненні вхідної сировини.

У сучасній техніці ступінь подрібнення визначають також як відношення сумарної поверхні частинок вхідного продукту $S_{вх}$ до сумарної поверхні частинок вихідного матеріалу $S_{вих}$:

$$i = S_{\text{вх}} / S_{\text{вих}} \quad (1.2)$$

Шматки матеріалу до і після подрібнювання звичайно не мають правильної форми. Тому на практиці розміри шматків визначають через розміри отворів сит, через які просівають сипкий матеріал до і після подрібнювання.

Залежно від крупності вихідного матеріалу і подрібненого продукту, виділяють такі стадії подрібнення:

- 1-ша стадія – крупне;
- 2-га стадія – середнє;
- 3-я стадія – дрібне;
- 4-а стадія – тонке;
- 5-а стадія – надтонке(колоїдне).

На практиці часто дрібне, тонке та колоїдне подрібнювання здійснюється у водному середовищі, яке виключає пилоутворення і сприяє легшому вивантаженню подрібненого продукту з установки.

Залежно від напрямку, точки прикладання та тривалості дії зовнішніх сил, які здійснюють подрібнювання тіл, розрізняють такі основні способи подрібнювання: роздавлювання, розколювання, розламування, розтирання, розбивання, розривання, різання, розпилювання.

Під час роздавлювання під дією навантаження, створюваного силою P на натискну плиту, матеріал деформується по всьому об'єму. Коли внутрішнє напруження в ньому перевищить межу міцності на стиск, він руйнується. При цьому утворюються частини різного розміру та форми.

Процес розколювання здійснюється створенням великих концентрацій навантажень у місцях контакту матеріалу з клиноподібним робочим елементом, на який діє сила P . Спосіб розколювання досконаліший порівняно з роздавлюванням, оскільки дає можливість регулювати розмір одержуваних частинок.

Процес розламування здійснюється під впливом згинальних сил P . Під час розтирання тіло подрібнюється під впливом стискальних, розтягувальних

та зрізувальних сил, утворюється дрібний порошкоподібний продукт. Процес використовується в тонкому і колоїдному помелах.

Під час подрібнювання розбиванням тіло розпадається на частинки під дією динамічного навантаження. У випадку сконцентрованого навантаження створюється ефект, схожий на той, який має місце під час розколювання, а в разі розподілу зусиль на весь об'єм тіла ефект руйнування схожий на ефект роздавлювання.

Під час розривання тіло руйнується під дією розтягувальних сил у результаті виникнення напруження в матеріалі, яке перевищує межу міцності на розрив.

Процес різання здійснюється ножами, під дією яких створюється зусилля P , направлене під визначеним кутом до матеріалу, який подрібнюється. Матеріал подрібнюється на частинки наперед заданих розмірів і форми. Даний процес є повністю керованим.

Розпилювання здійснюється за допомогою пилок, зубці яких являють собою ножі. Вплив пилки здійснюється натискуванням її на подрібнюваний матеріал, а також переміщенням пили у площині подрібнювання. Результат такий самий, як і після різання. На рис. 1.1 схематично показано напрями зусиль на матеріал у випадку використання того чи іншого способу подрібнювання.

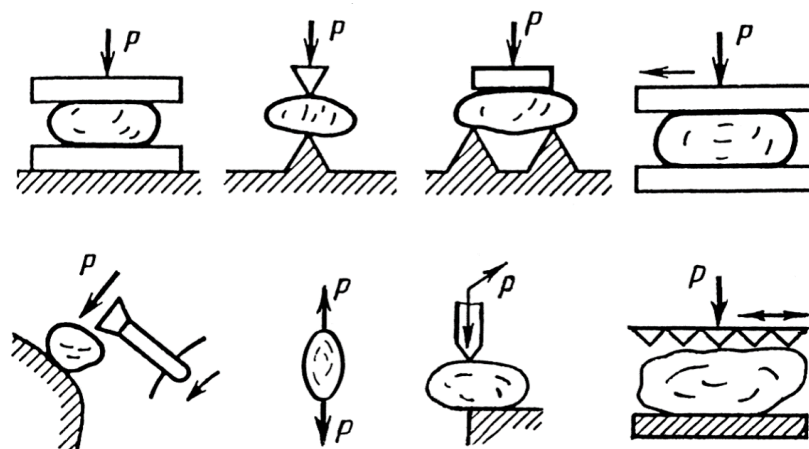


Рис. 1.1. Основні види подрібнювання та помелу

На практиці часто комбінують різні способи подрібнювання матеріалів. Так, наприклад, розтирання завжди супроводжується роздавлюванням чи розбиванням, розламування – розколюванням або роздавлюванням, завдяки чому з меншою витратою енергії найефективніше здійснюється подрібнювання матеріалу. Вибір способу подрібнювання залежить від фізичних властивостей та розмірів матеріалу. Основне значення має міцність матеріалу. Тверді та крихкі матеріали типу кристалів цукру або сухого зерна можна подрібнювати розбиванням або розтиранням [11, 12].

Теорія подрібнювання. Процес подрібнювання потребує значних витрат енергії, тому визначення величини використаної енергії є основною проблемою в теорії подрібнювання. Єдиної теорії руйнування тіл під дією внутрішніх напружень або зовнішніх сил нині немає. Найбільше поширені поверхнева та об'ємна теорії подрібнювання.

Поверхнева теорія Ріттінгера виходить з того, що під час подрібнювання робота витрачається на подолання сил молекулярного притягання по поверхням руйнування матеріалу. Очевидно, що в процесі подрібнювання необхідно витратити тим більше роботи, чим більше сумарна площа наново утворених у процесі подрібнювання граней або поверхонь. Звідси випливає така математична залежність, яка відбиває пропорційність витраченої роботи величині утвореній поверхні матеріалу при подрібнюванні:

$$A_1 = k_1 \Delta S \quad (1.3)$$

де A_1 – корисна робота подрібнювання (за поверхневою теорією); ΔS – площа утворених нових граней матеріалу; k_1 – коефіцієнт пропорційності.

Об'ємна теорія, запропонована Кирпичовим та Кіком, виходить із того, що під час подрібнювання робота витрачається на деформацію матеріалу до досягнення межевої руйнівної деформації. Звідси виходить, що робота, необхідна для подрібнювання, пропорційна зменшенню об'єму шматка матеріалу перед його руйнуванням. Математична залежність, яка відображає це твердження, має такий вигляд:

$$A_2 = k_2 \Delta V \quad (1.4)$$

де A_2 – корисна робота подрібнювання (по об'ємній теорії); ΔV – різниця об'ємів вихідного та подрібненого матеріалу; k_2 – коефіцієнт пропорційності.

У загальному випадку обидві теорії потрібно враховувати разом, оскільки жодна з них окремо не відбиває повною мірою всіх явищ, які відбуваються під час подрібнювання, і не враховує всіх витрат енергії.

За спостереженнями Ребіндера, енергія, яка витрачається на подрібнювання матеріалу, є сумою робіт, що йдуть на деформацію тіла перед руйнуванням і на утворення нових поверхонь:

$$A = A_1 + A_2 = k_1 \Delta S + k_2 \Delta V \quad (1.5)$$

Під час крупного і середнього подрібнювання поверхня, що утворилася заново, порівняно невелика; основна робота витрачається на деформацію матеріалу. Тому другий доданок правої частини рівняння (1.5) у багато разів більший від першого. У цьому випадку робота подрібнювання пропорційна зміні об'єму твердого тіла або просто пропорційна об'єму твердого тіла, оскільки зміна об'єму залежить від початкового об'єму тіла.

Під час тонкого подрібнювання переважає перший доданок рівняння, тому що поверхня збільшується у багато разів. У зв'язку з цим другим доданком можна знехтувати.

У феноменологічному рівнянні рушійні сили виражені не прямо, а посередньо – через результат їхньої дії. Рушійна сила для здійснення механічної роботи виражена через приріст площі вільної поверхні частинок, а для здійснення роботи деформації – через їхню деформацію [10-12].

1.2. Класифікація дробарок

Основною машиною для подрібнювання матеріалів є дробарка. Залежно від конструктивних особливостей, вони поділяються на такі типи: щоківі, конусні, валкові, молоткові та роторні. До всіх машин для подрібнювання можна сформулювати такі загальні вимоги: рівномірність шматків подрібненого матеріалу; своєчасне видалення подрібнених шматків із

робочого простору; зведення до мінімуму пилоутворення; безперервне і автоматичне розвантаження; можливість регулювання ступеня дробіння; можливість легкої заміни швидко зношуваних деталей; невелика витрата енергії на подрібнювання одиниці продукції; необхідність мати запобіжні пристрої, які запобігали б аварії всієї машини в разі потрапляння в зону подрібнювання міцних предметів.

Крупне подрібнювання в харчових виробництвах застосовується мало. До машин, які здійснюють таке подрібнювання, відносяться щокова і конусна дробарки. До найпоширеніших у харчовій промисловості дробарок давильної дії належать валкові дробарки. Для дрібного і тонкого подрібнювання зерна, цукру, солі, солоду, сухих плодів і картоплі в харчовій промисловості використовують машини, в яких процес подрібнювання здійснюється розбиванням. Прийнято поділ дробарок ударного типу на дві підгрупи: з ударним ротором та з неударним розгінним ротором (відцентровим). До машин з ударним ротором відносяться: молоткові, з шарнірно підвішеними молотками; роторні, з жорстко закріпленими лопатками; стрижневі дробарки (дезінтегратори) [10, 13]. Барабанні дробарки (грохот-дробарки) застосовують для очищення гірничої маси від крупногрудкової породи та сторонніх предметів.

Щокові дробарки

У промисловості щокові дробарки, в основному, застосовують для великого та середнього дроблення. Принцип роботи щокової дробарки полягає в наступному. В камеру дроблення, що має клиноподібну форму і утворену двома щоками, з яких одна в більшості випадків є нерухомою, а інша – рухомою, подається матеріал, який підлягає дробленню. Завдяки клинчастій формі камери дроблення шматки матеріалу розташовуються по висоті камери в залежності від їх величини – більші вгорі, менші – внизу. Рухома щока періодично наближається до нерухомої, причому при зближенні щік дробарки (стиснення) шматки матеріалу роздроблюються, при відході рухомої щоки (холостий хід) шматки матеріалу просуваються вниз під дією сили тяжіння або

виходять з камери дроблення, якщо їх розміри стали менше найбільш вузької частини камери(зветься вихідною щілиною), або займають нове положення, що відповідає своєму новому розміру. Потім цикл повторюється. Характер руху рухомої щоки залежить від кінематичних особливостей механізму щоківих дробарок. Головний параметр щоківих дробарок – розмір приймального отвору камери дроблення, що утворюється рухомою та нерухомою щоками. Щоків дробарка винайдена в 1858 році американцем Блеком.

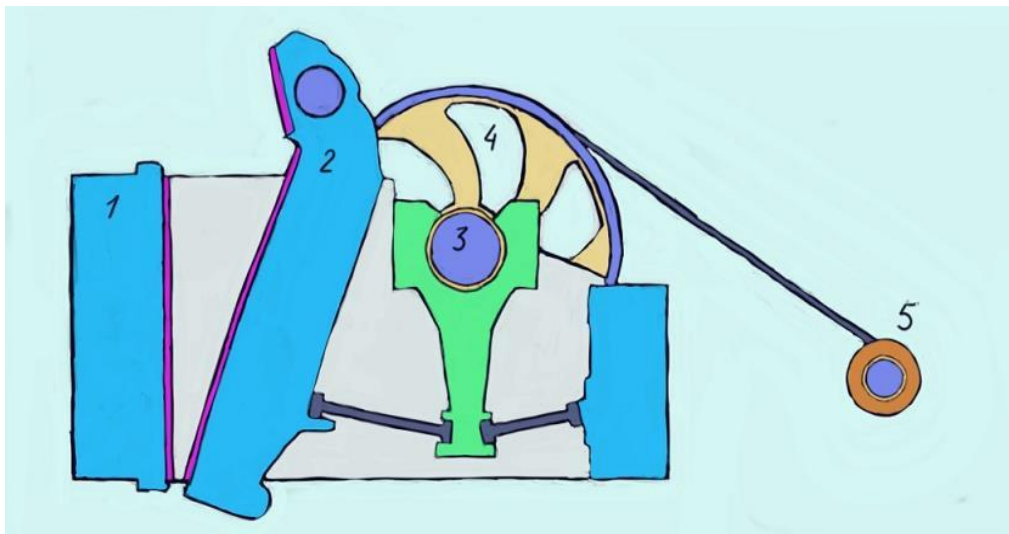


Рис. 1.2. Загальна схема щоків дробарки: 1 – нерухома щока, 2 – рухома щока, 3 – шатун, 4 – маховик, 5 – привід.

В залежності від кінематичних особливостей механізму щоків дробарки можна розділити на дві основні групи:

- дробарки, у яких рух від кривошипа до рухомої щоки передається певним кінематичним ланцюгом. При цьому траєкторії руху рухомої щоки являють собою частини дуги окружності. Ці машини називаються щоків дробарками з простим рухом рухомої щоки;

- дробарки, у яких кривошип і рухома щока утворюють єдину кінематичну пару. В цьому випадку траєкторії руху точок рухомої щоки являють собою замкнуті криві, частіше всього еліпси. Дробарки з такою кінематикою називаються щокowymi дробарками із складним рухом рухомої щоки [14].

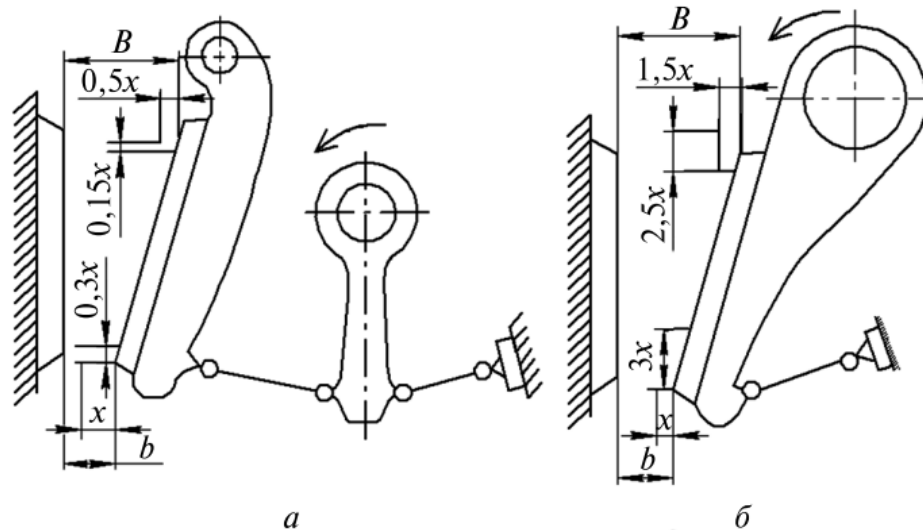


Рис. 1.3. Кінематичні схеми щокowych дробарок

На рис. 1.3 показано найбільш поширені кінематичні схеми щокowych дробарок: з простим (а) і складним (б) рухом рухомої щоки. У дробарці з простим рухом (Рис. 1.3а) рухома щока підвішена на нерухому вісь. Шатун дробарки верхньою головкою шарнірно з'єднаний з приводним ексцентриковим валом. У нижню частину шатуна шарнірно впираються дві розпирні плити, одна з яких протилежним кінцем впирається в нижню частину рухомої щоки, інша – в регулювальний пристрій. При обертанні ексцентрикового валу нижня частина шатуна рухається вгору і вниз, кут між плитами міняється і рухома щока отримує коливальний рух. Дробарки з простим рухом рухомої щоки розрізняються між собою способом її кріплення та приводним механізмом. Розрізняють дробарки з верхнім підвісом щоки, з нижньою шарнірною опорою, з кулачковим приводним механізмом, з кривошипно-шарнірним приводним механізмом.

Переваги даної кінематичної схеми: мала вертикальна складова ходу подрібнювальної плити зменшує зношування плит; присутня велика сила стиснення у верхній частині камери дроблення, що дуже важливо при дробленні шматків породи великих розмірів та високої міцності. Недоліки цієї схеми: мінімальний хід стиснення у верхній частині камери дроблення; малі зусилля захоплення шматка породи у верхній частині камери.

У дробарці зі складним рухом (Рис. 1.3б) рухома щока шарнірно підвішена на ексцентричній частині приводного валу. Низ рухомої щоки шарнірно спирається на регульовальний пристрій. У такої дробарки траєкторія руху рухомої щоки є замкненою кривою. У верхній частині камери дроблення ця крива являє собою еліпс, що наближається до кола, у нижній – сильно витягнутий еліпс [15].

Перевага цієї кінематичної схеми полягає в тому, що горизонтальний хід щоки у верхній частині камери дроблення достатній для інтенсивного дроблення, а напрямок руху верхніх точок рухомої щоки у бік завантаження сприяє кращому захопленню шматка породи. Недоліком є та обставина, що внаслідок великої вертикальної складової ходу рухомої щоки відбувається інтенсивне стирання каменю в нижній частині робочої камери, що призводить, по-перше, до швидкого зношування дрібних плит і, по-друге, до подрібнення матеріалу, на що витрачається частина потужності, яка споживається при дробленні.

Конусні дробарки

Конусна дробарка – пристрій, у якому шматки твердих матеріалів руйнуються між двома конусами – нерухомим зовнішнім і рухомим внутрішнім. Конусні дробарки (Рис. 1.4) також називають гіраційними. У більшості агрегатів внутрішній конус встановлений ексцентрично і при роботі гойдається відносно зовнішнього. У деяких, вісь внутрішнього конуса нерухома, а зовнішній має овальну форму. Принцип дії всіх конусних дробарок однаковий. Шматки породи через завантажувальний отвір потрапляють у робочу камеру. Там внутрішній конус обертається і дробить

вхідний матеріал. Менші шматки конусна дробарка розчавлює, на великі додається руйнування вигином. Для дроблення вигином використовується менше енергії, ніж для роздавлювання. При цьому також рівніший фракційний склад та менше пилу [16].

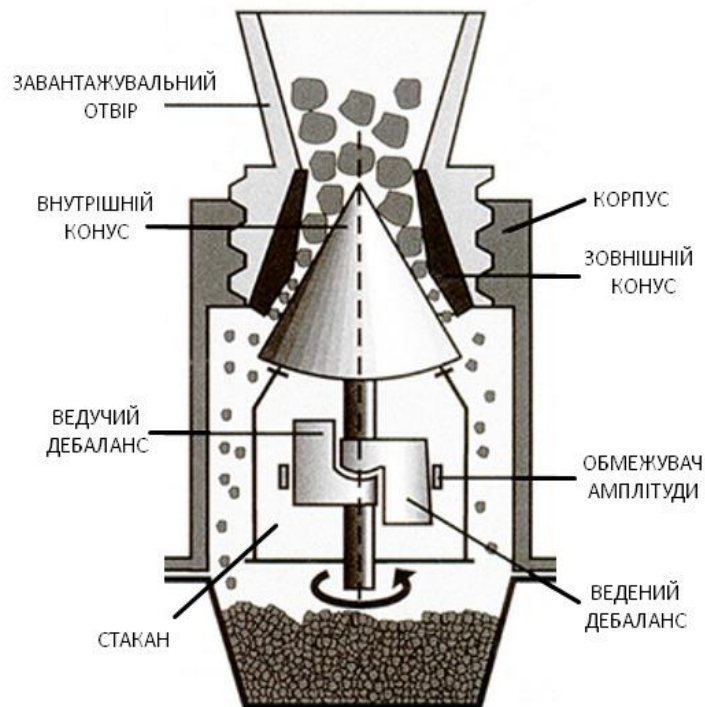


Рис. 1.4. Загальна схема конусної дробарки

Внутрішній конус жорстко кріпиться на валу, а нижнім кінцем вільно вставлений в ексцентриковий стакан. Стакан встановлюється концентрично зі станиною дробарки. Ось валу трохи нахилена до вертикальної осі корпусу дробарки. Ексцентриковий стакан отримує обертання від електродвигуна. Жорстко закріплений на валу внутрішній конус здійснює кругові погойдування, послідовно наближаючись до стінок зовнішнього конуса та віддаляючись. Наближення внутрішнього конуса до зовнішнього супроводжується дробленням шматків матеріалу, що надходять в простір між ними, а видалення – розвантаженням подрібненого продукту.

Конусні дробарки поділяються на дробарки для великого, середнього та дрібного дроблення. Головними критеріями такого поділу є розмір робочого

рухомого конуса і співвідношення висоти чаші до розмірів її поперечного розрізу. Від цих показників залежить розмір шматків вхідної та вихідної сировини. Робочі простори конусних дробарок для великого, середнього і дрібного дроблення різняться між собою конфігурацією. У дробарок для великого дроблення конус крутий (кут при вершині близько 20°), а у дробарок для середнього та дрібного дроблення – пологий (кут при вершині близько 100°). Конусні дробарки для крупного дроблення відрізняються від дробарок для дрібного і середнього дроблення величиною ексцентриситету чашки, що визначає амплітуду коливання дробильного конуса. У дробарок для великого дроблення ексцентриситет чашки становить не більше 25 мм, а у дробарок для середнього і дрібного дроблення – більше 100 мм [15, Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

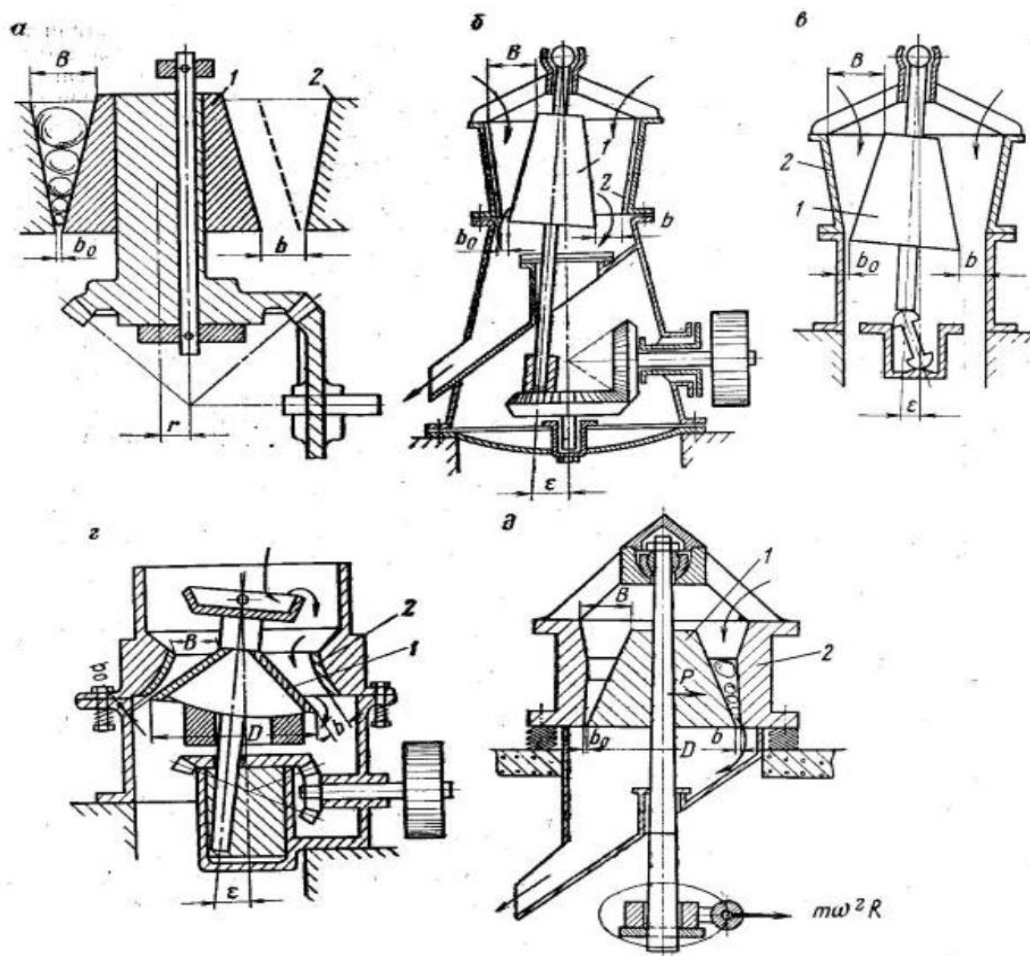


Рис. 1.5. Різновиди конусних дробарок. *а* – з нерухомою віссю, *б* – з підвісним валом, *в* – з валом, що має опору, *г* – з консольним валом, що спирається на кульовий підп'ятник, *д* – інерційна дробарка.

Незважаючи на стабільність вже існуючих дробарок конусного типу, постійно ведуться дослідження та модернізації пристроїв. Серед останніх нововведень слід відзначити конусні дробарки на основі дебалансних вібраторів, які придбали назву інерційна дробарка. Принцип роботи механізму полягає в тому, що під час роботи на рухомий конус також передається вібрація з встановленого вібраційного пристрою, що дозволяє поліпшити якість дроблення матеріалу, а також справлятися з більш твердою породою. Конусна дробарка має ряд переваг: відсутність холостого ходу (дозволяє проводити безперервне дроблення); висока продуктивність; низький рівень шуму; високий ступінь дроблення, зручне розвантаження. До недоліків відноситься високий рівень споживання електроенергії, великі габарити, складність конструкції та обслуговування.

Валкові дробарки

Валкові дробарки (Рис. 1.6) застосовуються для середнього, дрібного і тонкого дроблення твердих порід, подрібнення зерна, овочів тощо. Робочою частиною валкових дробарок є горизонтальні валки, кількість яких може бути різною, найчастіше дробарки мають одну пару валків. Матеріал подається в дробарку через завантажувальну воронку, захоплюється валками, що обертаються назустріч один одному, дробиться і розвантажуються вниз під дробарку. Циліндрична поверхня валків може бути гладкою, зубчастою, ребристою або рифленою. Дробарка складається з валків 1 і 2, які обертаються назустріч один одному. Підшипники валка 1 нерухомі, а валка 2 – рухомі. Останні утримуються за допомогою пружини 3, що дає можливість валку 2 зміщуватись, коли в дробарку потрапляють надто міцні сторонні предмети. За однакової швидкості обертання обох валків захоплений ними матеріал потрапляє у вузький проміжок (зазор) 4 і роздавлюється. Якщо швидкість

обертання валків різна (при співвідношенні швидкостей 1:2,5 для рифлених і 1:1,25 або 1:1,5 для гладких валків), то матеріал, крім роздавлювання, піддається розтиранню, а у випадку використання рифлених або зубчастих валків – ще й розколюванню. Регулювання розміру подрібнення (фракція на виході) виконується шляхом зміни відстані між валками [11].

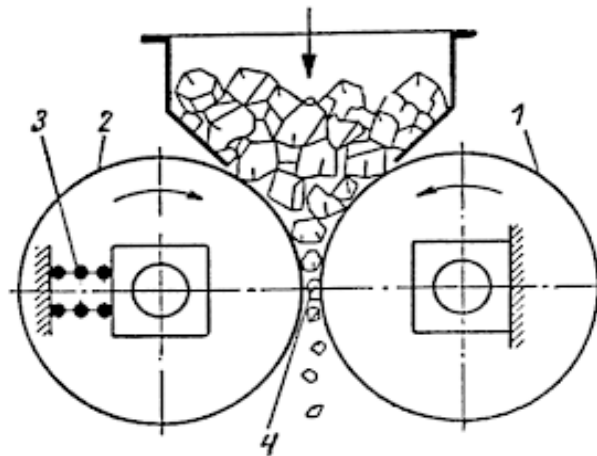


Рис. 1.6. Загальна схема валкової дробарки

У валкових дробарках валки, підшипники, направляючі, пружинні амортизатори та привід валків відрізняються різноманітністю конструкцій. Привід валків здійснюється від електродвигуна через редуктор і карданні вали, які забезпечують передачу обертання валкам навіть при значному відході їх один від одного. Валкова дробарка є виробом безперервної дії тому її продуктивність оцінюється за кількістю матеріалу, що виходить з дробарки за одиницю часу. Продуктивність валкової дробарки залежить від фізичних властивостей матеріалу, що подрібнюється, його розмірів на вході й необхідної крупності на виході (відстані між валками). Різна швидкість обертання валків дозволяє підвищити ефективність захоплення частинок матеріалу, що подрібнюються й продуктивність дробарки. Продуктивність валкової дробарки може бути визначена таким розрахунком. Об'єм матеріалу, який виходить із дробарки за один оберт валків, відповідає об'єму

паралелепіпеда з основою, рівною площі щілини, і висотою, рівною довжині кола валка.

Валкові дробарки можна класифікувати за наступними основними ознаками:

За призначенням та по формі робочої поверхні:

- для середнього, дрібного та тонкого дроблення матеріалів – з гладкою поверхнею валків, з подовжніми напівкруглими виїмками на одному з валків;
- для крупного дроблення глинистих матеріалів – із зубчатими валками;
- для середнього та дрібного дроблення глинистих матеріалів і видалення каменів – з одним гладким та іншим рифленим валками і з валками, що мають гвинтову поверхню;
- для крупного, середнього, дрібного, тонкого дроблення матеріалів – з дірчастими валками та валками, що мають півсферичні виїмки на обох валках.

По рухливості корпусів підшипників:

- дробарки з рухомими корпусами підшипників у одного з валків;
- дробарки з нерухомо закріпленими корпусами підшипників у обох валків;
- дробарки з рухомими корпусами підшипників у обох валків.

По кількості валків в дробарках:

- одновалкові;
- двовалкові;
- трьохвалкові та більше.

По виду комбінації пристроїв приводу:

- редукторний та карданний;
- ремінний та шестерний;
- тільки ремінний;

- редукторний та ремінний.

Широке застосування валкових дробарок пояснюється тим, що вони найбільш пристосовані для перероблення дуже поширених матеріалів, схильних до налипання або які містять липкі включення. Під час роботи дробарок налиплий на поверхню валків матеріал знімається очисними скребками. Це може бути застосовано для дробарок з гладкими валками. Двовалкові дробарки з гладкими та рифленими валками зазвичай застосовуються для вторинного дроблення нерудних будівельних матеріалів середньої та високої міцності. Але дробарку з гладкими валками можна використовувати для тонкого подрібнення крейди, мергелю, вугілля, глинистого сланцю, а також для подрібнення (з одночасним роздавлюванням) в'язких та вологих матеріалів, наприклад глин [17, 19].

Переваги валкових дробарок:

- простота конструкції пристрою;
- можливість дроблення вологих матеріалів;
- зручність обслуговування та ремонту;
- невеликі витрати електроенергії.

Недоліки валкових дробарок:

- невисока продуктивність;
- наявність вібрації;
- великий абразивний знос робочих поверхонь валків.

Дробарки ударної дії

Дробарка молоткова – це подрібнюючий пристрій, робочим інструментом якого є шарнірно закріплені на роторі ударні елементи (молотки). При шарнірному закріпленні молотків удар великого або важкого шматка гаситься силою інерції молотка, не передаючись на вал та підшипники. У разі попадання в дробарку великого та твердого шматка або металевих предметів шарнірно закріплений молоток відхиляється, тоді як жорстко закріплений міг би спричинити поломку конструкції.

Технологічний процес подрібнення виконується наступним чином. Подрібнюючий матеріал, потрапляючи в дробильну камеру, втягується в круговий рух молотковим ротором. Від первинних ударів молотків зерно відкидається на периферію, але остаточно не руйнується. У молотковій дробарці сировина подрібнюється від ударів молотків, які обертаються, ударів часточок одна об одну, а також внаслідок ударів матеріалу по ребристій поверхні стінок корпусу. Сировина надходить в бункер через колосник, що відсіває занадто великі фракції, здатні зупинити роботу пристрою. Ступінь подрібнення залежить від часу знаходження сировини в бункері та кількості її зіткнень з молотками (швидкості обертання ротора). Тому в молоткові дробарки сировину завантажують порціями, а потім подрібнюють до потрібного розміру [20].

Для подрібнення в'язких або липких матеріалів, а також матеріалів з вмістом води понад 15%, звичайні молоткові дробарки не придатні. Для матеріалів липких або тих, що містять глину, тобто матеріалів, що забивають колосникові решітки, використовують молоткові дробарки з рухомою плитою.

Молоткові дробарки можна класифікувати за такими конструктивними ознаками [21]:

1. За кількістю роторів(валів):

- однороторні, у яких диски з молотками насаджені на один вал, розташований горизонтально;
- двохроторні — з двома горизонтальними валами, які розташовані або паралельно, або послідовно.

2. За способом кріплення молотків:

- дробарки з шарнірно підвішеними молотками — власне молоткові, що застосовуються для великого, середнього і дрібного дроблення матеріалу м'якої і середньої міцності;
- дробарки з жорстко закріпленими ударними деталями (молотками, білами), що застосовуються для дрібного дроблення м'яких матеріалів, а також для помелу крейди,

гіпсу тощо(такі молоткові дробарки ще називають молотковими млинами).

3. По розташуванню молотків в роторі:

- однорядні, коли всі молотки розташовані в одній площині обертання;
- багаторядні, коли молотки розташовані в декілька рядів (по довжині ротора).

4. У напрямку обертання ротора:

- нереверсивні;
- реверсивні(ротор обертається в обидві сторони, що дозволяє використовувати робочі поверхні молотків без перестановки їх на 180 °).

5. По організації робочого процесу:

- відкритого типу(матеріал не робить оборот в камері);
- закритого типу(матеріал циркулює в камері).

На рис. 1.7 представлені схеми основних типів молоткових дробарок. Типова молоткова дробарка містить корпус 5 із завантажувальною горловиною 8, молотковий ротор 2 з валом 1, робочі елементи у вигляді молотків 4, футеровочні плити 6,деки і сепаруючу поверхню, яка в більшості випадків виконана у вигляді колосникових решіток 7 та/або фігурних колосників 10.

Залежно від властивостей матеріалу, що дробиться, і необхідної крупності подрібнення продукту, застосовують молотки(била) різної форми і маси (від 1 до 135 кг). Молотки колосникового типу (рис. 1.8 а, б) застосовують при дробленні малоабразивних та м'яких матеріалів. Деякі молотки мають два отвори, щоб можна було при зносі обох кінців молотка з одного боку перевісити його другим боком. Молотки з потовщенням на робочому кінці (рис. 1.8 в, г, д) застосовують при дробленні міцних матеріалів середньої абразивності. Скобоподібні молотки (рис. 1.8 е) використовують

при тих самих умовах роботи, що й молотки колосникового типу. Посилена скобоподібна конструкція (рис. 1.8 ж) застосовується при дробленні міцних матеріалів. Молотки скобоподібної форми працюють більш ефективно ніж колосникові, але експлуатація дробарок у цьому випадку є складнішою, тому що при їхньому нерівномірному зносі порушується зрівноваженість дробарки. Зазвичай молотки виготовляють з вуглецевих сталей з подальшим наплавленням робочих поверхонь твердими сплавами. Молотки дробарок, призначених для дроблення твердих матеріалів, виготовляють литими з марганцевої сталі. Конструкція молотків така, що їх можна переставляти після зносу однієї з робочих поверхонь.

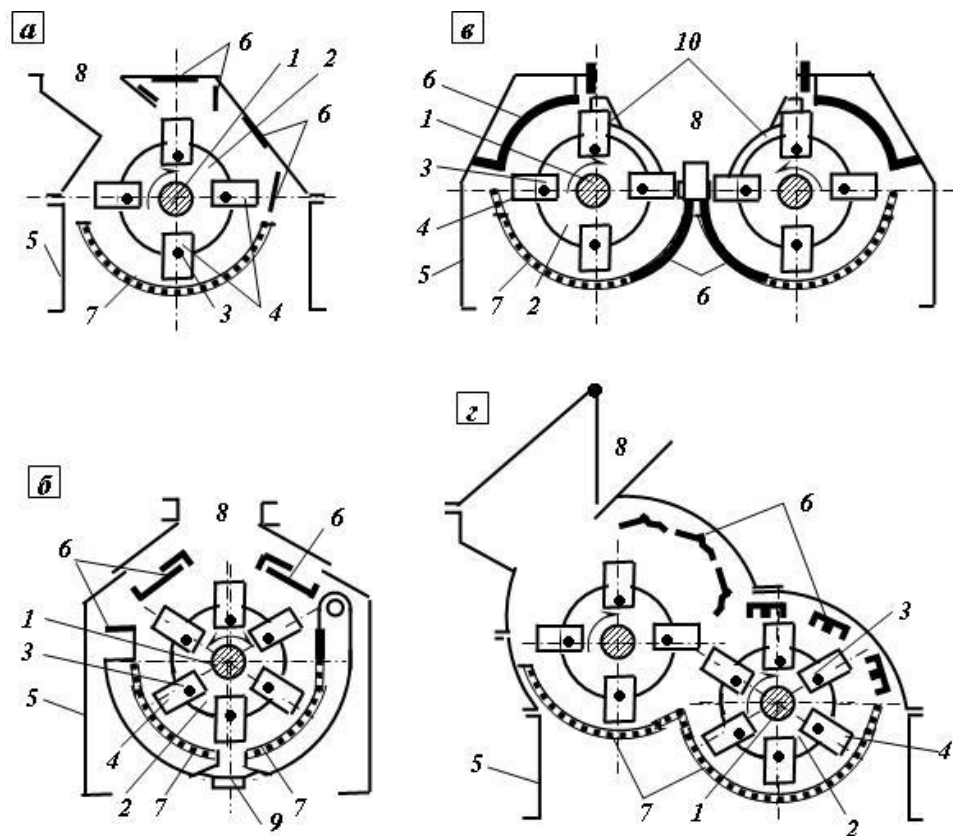


Рис. 1.7. Схеми молоткових дробарок: однороторні(*а* – нереверсивна, *б* – реверсивна), двороторні(*в* – паралельного дроблення, *г* – послідовного дроблення)

Розміри молоткових дробарок визначаються діаметром окружності, описуваної кінцями молотків, та довжиною ротора. Привід ротора

здійснюється від електродвигуна за допомогою плоскої пасової передачі або через пружну муфту. При крупному дробленні міцного матеріалу застосовують молоткові дробарки з великою вагою молотків та із збільшеними швидкостями роторів, при дрібному – дробарки з більш легкими молотками та в більшій кількості.

Ротори у молоткових дробарках, щоб уникнути динамічної неврівноваженості та появи дисбалансу, повинні бути ретельно збалансовані. Через великі інерційні зусилля, що виникають в роторі, молоткові дробарки найчастіше виходять з ладу в результаті аварій підшипників або великих динамічних навантажень. Внаслідок швидкохідності молоткових дробарок навіть при невеликому ексцентриситеті виникають значні відцентрові сили, в результаті чого починається биття ротора і може відбутися руйнування підшипників. Ступінь подрібнення в однороторних дробарках становить 10-15, в двороторних доходить до 30-40.

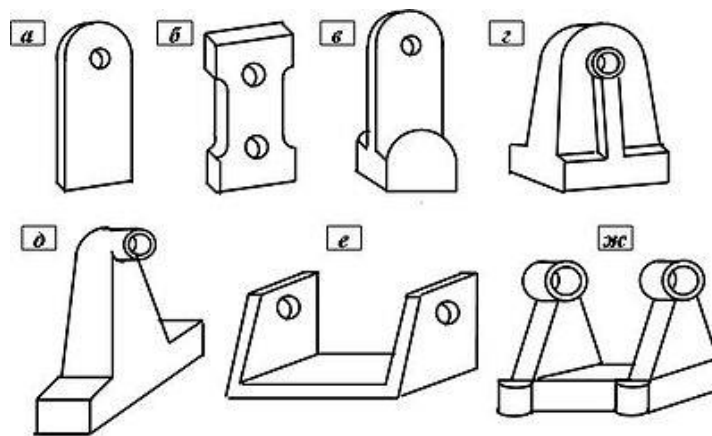


Рис. 1.8. Форми молотків

Зазвичай молоткові дробарки виготовляють з ротором, діаметр яких знаходиться в межах 500-2000 мм. Довжина ротора приймається рівною 0,65-1,5 його діаметра. Число обертів ротора за хвилину коливається: для однороторних в межах 500-1500, для двороторних – 200-300.

Молоткові дробарки прості за конструктивним виконанням, надійні при експлуатації, компактні, універсальні (зважаючи на переробку кормів з

різними фізико-механічними властивостями), мають невелику вагу, неперервність в роботі, високу продуктивність, можливість тонкого помелу. Всі ці переваги зумовили можливість широкого застосування молоткових дробарок в усіх галузях, а в технології подрібнення фуражного зерна вони на даний момент є основними машинами. До недоліків відносяться: високий рівень шуму при роботі, отримання неоднорідного гранулометричного складу готового продукту, тобто наявність частинок різного розміру (може бути присутнім як пиловидна фракція, так і цілі зерна). Для молоткових дробарок характерні велика витрата електроенергії та швидкий знос деталей дробарки (молотків, решіт, дек), немає можливості для дроблення вологих та досить міцних матеріалів [22, 23].

Дробарка роторна – машина для дроблення матеріалу шляхом ударного впливу за допомогою ротора з жорстко закріпленими на ньому билами. У промисловості молоткові агрегати представлені поряд з роторними аналогами. Їх будова та класифікація майже ідентичні молотковим. Вони відрізняються тільки способом кріплення робочих органів до тіла ротора.

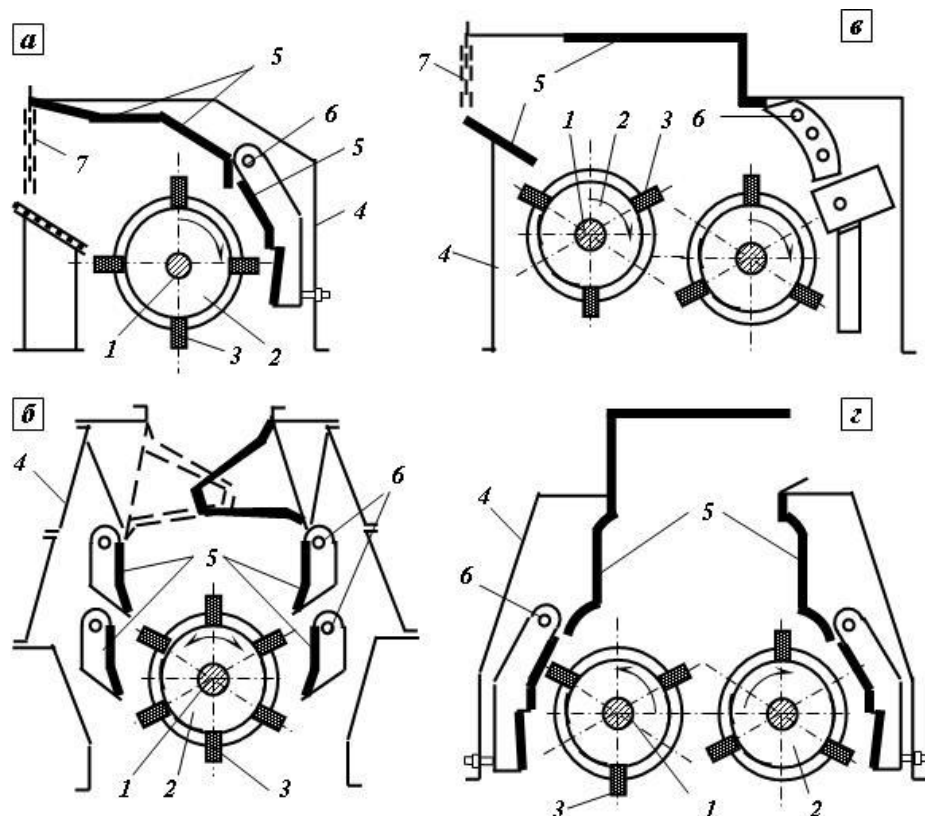


Рис. 1.9. Схеми основних типів роторних дробарок: однороторні(*а* – нереверсивна, *б* – реверсивна), двороторні(*в* – послідовного дроблення, *г* – паралельного дроблення)

Роторні дробарки бувають одно- і двороторні з послідовним дробленням матеріалу кожним ротором або з одночасним дробленням двома роторами, з колосниковою решіткою та без неї. Однороторні дробарки бувають реверсивні і нереверсивні. Характерною особливістю роторних дробарок є те, що в ударі по грудках вихідного матеріалу бере участь масивний ротор, тому удари значно міцніші ніж у молоткових дробарках. Це дозволяє застосовувати роторні дробарки у першій стадії дроблення (дробарки типу ДРК) для руйнування порівняно твердих матеріалів. Роторні дробарки застосовують також для середнього та дрібного дроблення (дробарки типу ДРС). Конструкції дробарок ДРК і ДРС аналогічні.

На рис. 1.9 показані схеми основних типів роторних дробарок. Роторна дробарка складається з корпусу дробарки 4, масивного ротора 2 з горизонтальним валом 1, відбійних плит 5 та решіток 8, в якості робочих елементів використовуються біла 3 [19, 24].

1.3. Аналіз конструктивних особливостей дробарок для виготовлення зернових кормів

Одним з найбільших виробників комбікормових установок є компанія ТОВ «Доза-Агро», що випускає широкий спектр зернодробарок серії ДКМ та ДЗМ [25]. Зернодробарки служать для подрібнення усіх видів зернових культур (бобових та злакових), олійних культур вологістю до 17%, а також шроту, макухи, лушпиння та інших кормових компонентів.

Дробарки серії ДКМ (Рис. 1.10) оснащені вбудованим вентилятором, завдяки якому під дією повітряного потоку відбувається забір і вивантаження готового продукту, що дозволяє уникнути використання механічних транспортів. Серія ДКМ включає дробарки різної потужності в яких

завантаження компонентів здійснюється механічно у спеціальний бункер. Потужність електродвигунів (залежно від моделі) – від 5,5 до 37 кВт, продуктивність за годину – від 0,7 до 4,8 тон готової продукції. Регулювання ступеня подрібнення зернових компонентів здійснюється шляхом установки змінних сит з різним діаметром перфорації, виключається подрібнення зерна в борошно. Сепаратор, встановлений на кришці дробарки, дозволяє відокремлювати великі мінеральні домішки. Також він містить магніт, який ловить і відокремлює металоманітні домішки з подаваного продукту.



Рис.1.10. Дробарка серії ДКМ [25]

Зернодробарка серії ДЗМ (Рис. 1.11) – це механічна решітчаста дробарка вертикальної дії, яка обробляє сировину молотками, змонтованими на роторі. Подача сировини відбувається за допомогою дозатора. Заміна робочих органів дробарки не вимагає повного розбирання корпусу, у конструкції передбачені люки з обох боків для оперативної заміни робочих органів.



Рис. 1.11. Дробарка серії ДЗМ [25]

Корпус зварний з листової вуглецевої сталі, вібрація під час роботи дробарки поглинається завдяки опорам, на які вона встановлена. Продуктивність машини, в залежності від моделі, становить від 3 до 16,5 тон на годину, потужність двигунів зернодробарки – від 30 до 160 кВт/год.

Випускаються промислові дробарки серії ДЗР (Рис. 1.12) [26], потужністю від 18,5 до 55 кВт. Продуктивність дробарок складає 5000-12000 кг/год. Дробарка застосовується для подрібнення зерна, бобових культур і не зернових (макуха, шрот, тирса, сіль, стружка, картон, тріски, солома тощо).



Рис. 1.12. Молоткова дробарка серії ДЗР [26]

Дробарка серії ДЗР передбачає примусову подачу сировини за допомогою шнекового живильника, встановленого в горловині

завантажувального бункера. Матеріал надходить до дробильної камери, де піддається подрібненню за допомогою ударів молотків, шарнірно закріплених на роторі. При досягненні заданого розміру помелу часточки виводяться з дробильної камери через ситову поверхню, яка розташовується в нижній частині корпусу дробильної камери. Залежно від конструкції молоткова дробарка має зворотний хід, що продовжує термін служби молотків. Апарат може комплектуватися дозуючим пристроєм для подачі сировини, електрообладнанням з частотним перетворювачем для можливості роботи з різною продуктивністю.

Українська фірма «ТехноМашСтрой» випускає молоткові дробарки серії Chopper та Kraft [27]. Молоткова дробарка серії Chopper (Рис. 1.13а) налічує три типи модельного ряду: 400, 500 та 600. Вони призначені для подрібнення зернових культур, качанів кукурудзи, тріски 3-4 см, технологічної стружки та іншого для подальшої переробки або грануляції. Дробарка оснащена вентиляторною витяжкою, що дозволяє транспортувати подрібнену сировину в циклон або на потрібну відстань по трубі до 15-20 метрів.



Рис.1.13 Молоткові дробарки Chopper (а) та Kraft (б) [27]

Дробарка славиться високою міцністю та довговічністю, вона виготовлена з надміцної нержавіючої сталі, покритою спеціальною краскою. Продуктивність по зерну дробарок даної серії становить 4-8 тон на годину, потужність двигуна – 15-30 кВт. До основних переваг відносять можливість

регулювання ступеня подрібнення матеріалу та низьку витрату енергії при високій продуктивності агрегату. Як і більшість молоткових дробарок, дробарки серії CHOPPER не мають можливості подрібнювати вологі, надто в'язкі та тверді матеріали.

Молоткові зернодробарки серії Kraft (Рис. 1.13б) призначені для подрібнення зернових культур в дерть. Пристрій автоматично засмоктує призначене для подрібнення зерно і подає його в кормозмішувач, з яким утворює лінію для приготування кормів. Дробарка забезпечує рівномірне подрібнення сировини, що подається при низькому утворенні дрібних пилоподібних фракцій, а також має можливість регулювання ступеня дроблення. Модельний ряд включає п'ять дробарок потужністю від 4 до 22кВт. Продуктивність зернодробарок становить 400-2000 кг/год. Агрегат комплектується ситам на 3 та 6 мм на вибір, а також містить уловлювач каміння та металічних шматків, який захищає обладнання від поломок.

Роторна дробарка «Джміль» (Рис. 1.14) [28], що випускається фірмою ТОВ «Альфа фермер», є мобільною універсальною дробаркою, яка не вимагає кріплення до підлоги і дозволяє пересуватися на колесах. Вона призначена для дроблення всіх видів зернових, подрібнення сіна, соломи, коренеплодів, листя, хвої та інших альтернативних видів корму. Підприємство виготовляє зернодробарки "Джміль" з двигунами від 2,2 кВт до 30 кВт та продуктивністю до 4 тон на годину. Завдяки робочому органу зернодробарки, що має конструкцію роторного типу, здійснюється пневматичне всмоктування зернофуражу, за рахунок чого не потрібно використання додаткового обладнання для подачі матеріалу, що подрібнюється. Процес подрібнення відбувається в камері дроблення за допомогою лопаток, жорстко закріплених на роторі. Сепаруюча поверхня у вигляді решета охоплює ротор на 360°. Для зміни розміру помелу в комплект входять змінні решета з діаметром отворів від 2 до 15 мм.



Рис. 1.14. Роторна зернодробарка «Джміль» [28]

Молоткові дробарки для подрібнення зерна серії RVO німецької компанії «Neuero» (Рис. 1.15) [29] призначені для виробництва комбікорму із зернових та інших злакових культур. Вони поєднують у собі високу продуктивність, надійність, низькі витрати електроенергії. Подача продукту в дробарку та його забір проводиться шнеком або спіраллю з частотно-керуючим приводом, що забезпечує оптимальне завантаження дробарки зерном. Вхідний продукт надходить у молоткову камеру, там дробиться під дією молотків, що швидко обертаються. Оптимальна структура подрібненого зерна досягається за рахунок використання трьох сит з різним розміром отворів або при комбінації спеціальної секції для поліпшення помелу, сит з круглими отворами, сит із металевими ґратами з різними розмірами отворів. Для безпечної роботи дробарок вони також оснащуються JET-фільтром. Продуктивність зернодробарок становить від 5700 до 14200 кг/год. Модельний ряд включає п'ять типів молоткових дробарок, що комплектуються трифазними електродвигунами з потужністю від 7,5 до 55 кВт. Для забезпечення підвищеної ефективності роботи ротор дробарок оснащується молотками в кількості 48-56 штук, які виготовляються з надміцної сталі.



Рис. 1.15. Молоткова дробарка серії RVO німецької компанії «Neuhof» [29]

Республіка Польща випускає ряд різноманітних видів зернодробарок різних фірм. Дробарки серії «Zuptor» (Рис. 1.16) схожі за конструктивним виконанням з дробарками серії ДКМ. Вона має вдосконалений сепаратора для уловлювання важких сторонніх предметів. Подрібнений матеріал після проходження через сито викидається під дією вентилюючого ротора у випускний патрубок, а далі гнучким напірним трубопроводом транспортується в кормозмішувач або силос. Завдяки трьох камерній будові дробарки зерно після дроблення не контактує з активними частинами дробарки, що запобігає підгоранню сировини і, відповідно, не знижує якість кормів. У дробарках серії R використовуються щілинні сита, які завдяки прорізам, розташованим під кутом, дозволяють збільшити продуктивність і зменшити кількість відходу борошна. Товщина металу ротора дробарки становить 6-8 мм і є оптимальною для даної конструкції. Продуктивність дробарок становить 900-5000 кг/год, потужність двигуна – від 7,5 до 37 кВт/год.

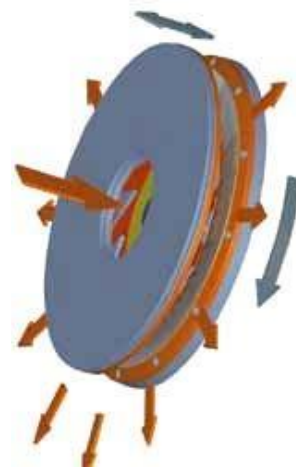


Рис. 1.16. Дробарка серії «ZUPTOR»

Фірма Skiold (Данія) випускає дискові дробарки серії SK (Рис. 1.17) [30]. У дисковому млині фірми Skiold розмелювання відбувається між двома дисками, що складаються з ряду сегментів, виготовлених із міцних сплавів методом агломерації. Відстань між двома дисками, що мелють, визначає ступінь розмелювання; млин дає можливість плавного регулювання зазору між дисками. Подрібнення відбувається в два етапи. Спочатку сировина проходить попередній помел між двома вхідними кільцями, потім відбувається остаточний помел між твердими металевими дисками. Диски складаються з сегментів твердістю 1700 HV, тоді як твердість бил у звичайному млині всього 600 HV після загартування. Дробарки поставляються у трьох розмірах: SK2500 з електромотором на 5,5 або 7,5 кВт, SK5000 з електромотором на 15 або 22 кВт та SK10T з електромотором 55 кВт. Продуктивність варіюється від 1000 до 12000 кг/год залежно від розміру млина та ступеня розмелювання при нормальному споживанні електроенергії всього 5 кВт на тонну продукту. Двигун встановлюється безпосередньо на диски, які мелють, що зменшує втрати енергії на приводі. Млин працює без внутрішнього тиску повітря, що усуває можливість викиду пилу. Основними перевагами цього обладнання є: однорідна структура продуктів помелу, низький рівень шуму та пилу, можливість плавного регулювання відстані між дисками, довговічність робочих деталей, висока продуктивність.



a)



б)

Рис. 1.17. Дисківа дробарка для зерна Skiold серії SK(a) та її робочий орган(б) [30]

Чеська компанія Romill – світовий бренд на зарубіжному ринку. Вона випускає валкові дробарки для виготовлення зернових кормів. Моделі серії S (Рис. 1.18) [25] оснащені валками з ріжучою поверхнею. Вони розрізають зерно під час проходження його між двома рифленими поверхнями. Приготовлений корм підходить для свиней та птиці. Продуктивність дробарок даної серії становить 0,9-25 т/год, потужність двигуна – від 2,2 до 45 кВт/год. Корпус є сталевією розбірною конструкцією, в якій розміщені робочі валки розміром 204 мм на 100 мм – ведучий та ведений. Швидкість обертання валків(ведучий-ведений) – 1000/500 обертів за хвилину. Ведучий валик закріплений нерухомо в підшипниках, він приводиться в рух від електродвигуна за допомогою ремінної передачі. Ведений валик закріплений на рухомий прямій, переміщенням якої регулюється зазор між валками (мінімальний – 0,1 мм). Валки мають протилежний один одному напрямок обертання. Передача обертання від ведучого валка до веденого відбувається за допомогою зубчастої передачі з передавальним співвідношенням 1:2.

Завантажувальний патрубок у формі зрізаного конуса призначений для наповнення дробарки як з транспортерів, так і вручну.



Рис. 1.18. Валкова дробарка для зерна Romill серії S [25]

В результаті проведеного літературно-патентного огляду основних видів машин для виготовлення сухих кормів можна виявити основні вимоги, що пред'являються до дробарок зерна фуражного типу: простота конструкції, рівномірність гранулометричного складу подрібненого матеріалу та зведення до мінімуму пилоподібної фракції, відповідність подрібненого продукту зоотехнічним вимогам, можливість регулювання ступеня подрібнення матеріалу, невисокі затрати електроенергії на процес виготовлення кормів.

Існуючі апарати для приготування сухих кормових сумішей мають недоліки і не являються оптимальними при годівлі певних груп сільськогосподарських тварин. Отриманий в розглянутих вище пристроях розмір твердих зернових фракцій після процесу подрібнення може значно перевищувати необхідний оптимальний розмір фракцій для високої засвоюваності тваринами, а також може містити пилоподібні фракції, які не відповідають встановленим нормам. Крім того, розглянуті зернодробарки різного типу витрачають значну кількість енергії для приготуванні одиниці кормової продукції. Для таких свійських тварин як свині, молодняк ВРХ, овець, кіз та інших тварин більш ефективними являється споживання рідких зернових кормів.

В Україні розроблені апарати типу АКГСМ «Мрія» (Рис. 1.19) [31] для приготування гомогенних кормових сумішей на основі зернових культур та води, які набули широкої популярності також і за кордоном. Основною конструкцією кормоагрегату серії АКГСМ «Мрія» є гідромлин-змішувач. Його особливість полягає в тому, що він є водночас багатофункціональним та малогабаритним робочим пристроєм, що займає площу від 0,02 до 0,1 м². У гідромлині встановлено три жорна (Рис. 1.20), два з яких – нерухомі, а третє являє собою ротор, який обертається із швидкістю 1500-3000 об/хв. Жорна мають спеціальну насічку трьох видів під різним кутом. Вони мають чотири зони подрібнення зернових, згідно конструкторського розрахунку це зона вільного удару, зона сколювання і різання, зона кришіння та зона плющення і розтирання. Зерно разом з водою потрапляє в спеціальні канавки, які регулюються зазором жорен і видають фіксовану фракцію від 0,5 до 2 мм в залежності від виду худоби, для якої виготовляється рідкий корм.

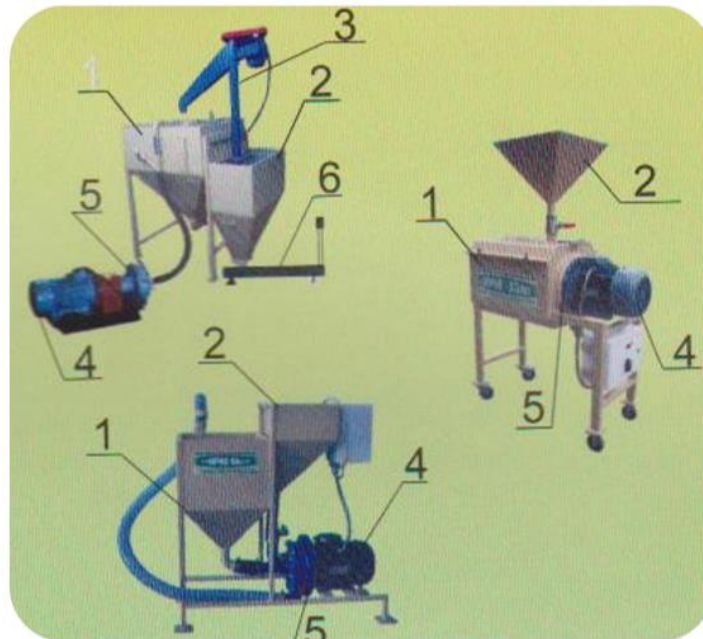


Рис. 1.19. Апарат для виготовлення рідких кормів АКГСМ «Мрія»



Рис. 1.20. Жорна для подрібнення

Принцип роботи агрегату полягає в наступному. В бункер 1 заливається вода; в бункер 2 засипається зернова суміш, вітаміни та премікси, які подаються в бункер 1 за допомогою шнека 3 (лише в агрегатах АКГСМ 01,01М, 02 та 02М, в інших агрегатах шнек відсутній). Вмикається електродвигун 4 і зернова суміш разом з водою подається в гідромлин з жорнами 5, де вона подрібнюється, переміщується та нагрівається за рахунок кавітації. Далі оброблена суміш повертається в бункер 1 через шланги. Цей цикл повторюється за 15 хвилин до 20 разів. Готова кормова суміш подається для згодовування тваринам. Дозування виконується вагами 6, розташованими під бункером 2, які установлюються на апарати АКГСМ 01 та АКГСМ 02. Розроблена установка кормоагрегатів серії АКГСМ «Мрія» налічує 19 модифікацій з продуктивністю до 3000 кг/год.

Основною метою в процесі виготовлення високоякісних рідких кормів є отримання оптимальних розмірів кормових частинок для максимальної засвоюваності в процесі годівлі свійських тварин при мінімальних енергетичних витратах на одиницю кормової маси. Тому актуальною темою являється розробка нових конструкцій апаратів для приготування рідких кормів на основі зернових сумішей, принцип роботи яких заснований на використанні технологій з меншими енерговитратами для отримання одиниці кормового продукту.

1.4. Метод дискретно-імпульсного введення енергії в рідких гетерогенних системах

Дослідження процесів тепломасопереносу в гетерогенних системах різних типів на сьогоднішній день являється досить важливим та актуальним напрямком науки. В даній області, зокрема, розглядаються процеси, пов'язані з подрібненням твердих частинок в системі «тверде тіло – рідина». До пристроїв, які виконують функції руйнування твердих тіл в оброблюваному середовищі відносяться розглянуті у розділі різновиди дробарок та млинів. В даних апаратах можна отримати достатню ступінь дисперсності оброблювальних матеріалів, проте при цьому різко зростають енергетичні витрати, час на подрібнення продукту та габарити самого обладнання. Основними недоліками таких пристроїв також являються: підвищений знос подрібнюючих органів, значне утворення пилоподібних фракцій, необхідність застосування додаткового обладнання для процесів гомогенізації та емульгування [32, 33]. Виходячи з вищезгаданого, в даний час необхідна розробка і реалізація комплексу заходів щодо поліпшення виробництва кормів для сільськогосподарських тварин за допомогою нових технологій, які дозволять об'єднати процеси подрібнення, диспергування, змішування, емульгування та гомогенізації для обробки гетерогенних багатокомпонентних систем. Зниження енерговитрат і підвищення продуктивності процесу при подрібненні зернових культур можна досягти за рахунок використання переваг методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ).

Оброблюване середовище, в якому використовується метод ДІВЕ, піддається пульсаційному впливу комплексів гідродинамічних явищ: дії великих швидкостей та прискорень, динаміці росту і схлопування парогазових бульбашок, руйнуванню тонких плівок рідини, створенню кавітаційних каверн та потужної турбулентності на міжфазній поверхні. Основна мета ДІВЕ – це інтенсифікація фізико-хімічних процесів у гетерогенних системах. Суть методу ДІВЕ полягає в акумуляції попередньо введеної у середовище енергії

у локальних зонах дуже маленьких розмірів ($\sim 10^{-9}$ м) та її імпульсному використанні для досягнення певного ефекту. Реалізація методу ДІВЕ передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених в дисперсному середовищі робочих органів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі і просторі. Застосування принципу ДІВЕ можливо шляхом реалізації комплексу ефектів: локального спаду або підвищення тиску, адіабатичного скипання, гідравлічного удару, ударної хвилі, реалізації зсувних напруг, ефектів турбулентності, ефектів кавітації вихрових утворень, що викликають на міжфазних поверхнях нестійкість типу Релея-Тейлора або типу Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного подрібнення дисперсних включень, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз і підвищення інтенсифікації процесів тепломасопереносу.

До апаратів, які реалізують метод орієнтованого дискретного енергетичного впливу на ряд технологічних процесів відносять апарати роторно-пульсаційного типу, робота яких базуються на реалізації комплексу фізичних проявів принципу ДІВЕ. В якості робочих систем, де ефективно використовують принцип ДІВЕ, вибираються, як правило, двофазні гетерогенні системи з декількома компонентами, взаємонерозчинні при нормальних умовах, або ж системи з низькою інтенсивністю тепломасообмінних процесів. В якості робочих процесів, де застосовується принцип ДІВЕ використовуються процеси перемішування, подрібнення, емульгування або гомогенізації дисперсних компонентів або дисперсних фаз. Тобто, використання вказаного принципу призводить до зменшення розміру твердих включень, підвищення їх однорідності, істотного збільшення сумарної поверхні контакту компонентів або фаз, що є технологічно необхідним в цілому ряді процесів промисловості.

Локальна та дискретна концентрація енергії при використанні принципу ДІВЕ можлива при наявності в робочій системі істотних градієнтів термодинамічних і гідродинамічних параметрів: температури, тиску,

швидкості, густини та ін. Це необхідна умова реалізації вказаного принципу. Достатньою умовою для його використання є наявність робочих елементів (або робочих органів) принципу ДІВЕ, тобто, таких утворень в гетерогенній системі, які можуть виконувати роль мікроаккумуляторів, а в подальшому мікрогенераторів або мікротрансформаторів енергії [4].

Принцип ДІВЕ визначає шляхи прямого перетворення енергії на виконання корисної роботи для прискорення процесів міжфазного тепло та масопереносу при обробці гетерогенних середовищ, що є ускладненим при використанні традиційних методів, наприклад, в класичних змішувальних апаратах. При використанні методу ДІВЕ енергія, що безперервно вводиться в апарат у вигляді короткочасних імпульсів високої потужності, дискретно розподілена в робочому об'ємі і концентрується безпосередньо на поверхні окремої дисперсної частинки, де необхідно виконати корисну роботу. Введена енергія може бути попередньо сконцентрована в різноманітних формах – у вигляді теплової, механічної, електричної, електромагнітної та ін.

Проблемам впливу ДІВЕ на рідкі гетерогенні системи присвячено багато теоретичних та експериментальних робіт. Принцип дискретно-імпульсного введення енергії був вперше запропонований в роботах А.А. Долінського [33-39], як узагальнюючий метод спрямованого, локального та інтенсивного використання концентрованої енергії в рідинних дисперсних системах. Він теоретично провів дослідження фізичних явищ динаміки основних елементів ДІВЕ, а також представив та узагальнив технологічні та інженерні програми рішення на базі цього принципу. У своїх роботах Девіс [41] провів теоретичні дослідження, які включають аналіз застосування теорії Колмогорова-Гінзе про розпад крапель у турбулентній рідині, її перевірку в діапазоні локальних розсіювання потужності на одиницю маси рідини від 5 до 10^9 Вт/кг, а також вплив на розмір крапель в'язкості дисперсної фази. Узагальнюючи велику кількість експериментальних даних різних авторів по здатності різних апаратів до диспергування, Девіс знайшов кореляцію між максимальним діаметром крапель і величиною дисипованої потужності в одиниці маси в діапазоні від 5

до 10^9 Вт/кг. Базуючись на отриманих результатах Девіса, підтверджується принципова відмінність апаратів ДІВЕ від традиційних і підкреслюється та обставина, що використання введеної енергії в цих апаратах здійснюється на досить якісному рівні. Ні в одному з механізмів ДІВЕ динамічний вплив на дисперсію з боку навколишнього середовища не зв'язується з наявністю мікрмасштабних турбулентних пульсацій і супутньої їм дисипацією енергії. Навпаки, методи інтенсифікації, в яких використовується принцип дискретного розподілу енергії, спрямовані якраз на запобігання такої дисипації там, де це можливо. В рамках концепції покладається, що деформація і руйнування дисперсійного середовища, а також прискорення конвективного переносу поблизу міжфазної границі обумовлені величиною відносної швидкості руху фаз.

У сенсі дискретності метод ДІВЕ полягає в розподілі енергії для різних фаз технологічного середовища по певному числу точок її об'єму, в сенсі імпульсного – в реалізації умов, при яких біля цих точок виникають суттєві градієнти тиску, швидкості, температури, потенціалів електричного або магнітного полів і т.д. Таким чином, метод ДІВЕ дозволяє спрямовано керувати процесами диспергування і гомогенізації та скорочувати питомі витрати електроенергії на виготовлення одиниці продукції.

Застосування принципу ДІВЕ при створенні енергозберігаючих технологій стосується раціонального використання внутрішньої енергії самої системи. Велика частина енергії, що вводиться в багатокomпонентну дисперсну систему з метою інтенсифікації процесів, дисипує в навколишній рідині, підвищуючи її температуру, або, в термінах термодинаміки, збільшуючи внутрішню енергію системи. Відповідно до першого закону термодинаміки, вся ця частина енергії витрачається непродуктивно – чим більша кількість введеної енергії йде на збільшення внутрішньої енергії, тим менше її йде на здійснення роботи. Інша справа, коли корисна робота виконується за рахунок зміни внутрішньої енергії самої системи. В цьому випадку перетворення акумульованої в рідині внутрішньої енергії в механічну

енергію може дати набагато більший ефект. Перетворення внутрішньої енергії самої системи в форму дискретних імпульсів для ініціювання високих значень питомих потужностей – один з важливих факторів принципу ДІВЕ.

В результаті огляду проаналізовані переваги принципу дискретно-імпульсного введення енергії як альтернативного підходу до інтенсифікації процесів в дисперсних середовищах, який забезпечує можливість досягнення високого рівня інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів при мінімальних непродуктивних витратах енергії. Показані загальні критерії ефективності фізичних механізмів ДІВЕ стосовно їх використання для інтенсифікації технологічних процесів.

Апарати, в яких реалізуються механізми ДІВЕ, при однаковій продуктивності відрізняються від традиційних апаратів аналогічного призначення малими габаритами і металоємністю, простотою конструкції і значною тривалістю безперервної роботи. У порівнянні з традиційними апаратами аналогічного призначення, основна перевага пропонованих апаратів полягає в досягненні більш високих ККД. Це пояснюється принципово іншим підходом до інтенсифікації процесів в дисперсних системах, альтернативним загальноприйнятій концепції про визначальну роль турбулентних пульсацій.

Висновки по розділу 1

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений літературно-патентному пошуку установок та комплексів для приготування кормів для сільськогосподарської худоби. Розглянуто особливості методу дискретно-імпульсного введення енергії в процесі виготовлення рідких кормів за допомогою роторно-пульсаційних технологій.

1. Проведено огляд існуючого обладнання для приготування зернових кормів для сільськогосподарських тварин. Обґрунтовано і наведено основні проблеми та недоліки даних апаратів. Проведений аналіз дозволив визначити, що найбільший інтерес становить обладнання,

яке дозволяє об'єднати у собі відразу всі основні процеси для обробки рідких гетерогенних систем – подрібнення, емульгування, гомогенізації, диспергування та змішування.

2. Розглянуто головні робочі елементи та теплофізичні процеси методу ДІВЕ, які реалізуються в роторно-пульсаційних технологіях. Проаналізовано переваги принципу дискретно-імпульсного введення енергії в дисперсних середовищах та особливості процесів тепломасопереносу в рідких гетерогенних системах. Даний метод дозволяє успішно вирішити проблеми гідродинамічного подрібнення та гомогенізації багатокomпонентних рідких середовищ.
3. Показано загальні критерії ефективності механізмів ДІВЕ стосовно їх використання для інтенсифікації технологічних процесів в дисперсних системах. Представлено порівняльний аналіз енергетичних витрат на виконання операцій диспергування при використанні традиційних апаратів та нових пристроїв, розроблених на основі методу ДІВЕ. Даний метод дає змогу зменшити витрати на електроенергію при виготовленні рідких зернових кормів для свійських тварин.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТУ. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В РПА

2.1. Конструктивні особливості існуючих РПА та їх використання в різних галузях промисловості

Підвищення ефективності хіміко-технологічного обладнання є актуальним напрямом розвитку науки і техніки, якому приділяється значна увага в Україні та світі. Одним із прогресивних методів інтенсифікації процесів у рідких середовищах полягає у проведенні їх за допомогою роторно-пульсаційних апаратів, в яких обробка рідин здійснюється внаслідок

комплексної дії механічних (удар, зсув) та гідродинамічних (тертя, пульсації тиску, кавітація та ін.) впливів [42].

Роторно-пульсаційні апарати – це пристрої, призначені для переробки механічних сумішей різнорідних взаємно нерозчинних рідин в дрібнодисперсні емульсії. Дані апарати широко використовуються в харчовій, хімічній, фармацевтичній та інших галузях промисловості. До факторів, що становлять вагомий вплив на оброблювану систему в РПА, відносять: гідродинамічний вплив – виражається у високих зсувних напругах оброблюваного середовища, розвиненій турбулентності, пульсаціях тиску та швидкості потоку рідини; механічний вплив на часточки в оброблюваному середовищі – полягає в навантаженнях типу удар, зріз, стирання, а також за рахунок контактів частинок з робочими частинами РПА; гідроакустичний вплив на рідину – здійснюється внаслідок масштабних пульсацій тиску та за рахунок інтенсивної кавітації. При обробці гетерогенної системи в робочій зоні РПА характерними для неї є високі значення локальних швидкостей, прискорень, градієнтів тиску, нормальних і дотичних напружень. Ці чинники являються визначальними при розгляді механізму подрібнення дисперсних частинок в потоці рідини. Роторно-пульсаційні апарати відрізняються високою ефективністю, а їх перевагою перед іншими типами обладнання є комплексна дія факторів впливу на рідке гетерогенне середовище, що дозволяє пришвидшити хіміко-технологічні процеси та підвищити якість оброблювальних середовища [43].

РПА поєднують у собі принципи роботи колоїдних млинів, дисмембраторів, насосів та змішувачів. Вони відрізняються простотою конструкції і невеликими розмірами. У РПА є два коаксіально розташованих циліндри з отворами певного діаметра. При швидкому обертанні одного з циліндрів виникають складні гідродинамічні умови, характерні для багатьох типів масообмінних пристроїв. Це пов'язано з тим, що при роботі апарата виникають пульсації швидкостей потоку, турбулізація рідини, особливо в пристінних ділянках апарата. Способи пульсаційної обробки сировини

успішно застосовують для інтенсифікації процесів гомогенізації та перемішування, розчинення важкорозчинних речовин, прискорення стадії екстрагування. Частота пульсацій у сучасних пневматичних установках – у межах 20-300 коливань на хвилину. Зворотно-поступальний рух рідини забезпечується за допомогою двигунів, що передають рух або безпосередньо на рідину, або через газовий буфер [44].

Роторно-пульсаційні апарати отримали широке застосування також за рахунок різноманітності у своїх конструктивних особливостях. Конструкції РПА класифікують за наступними ознаками:

- В залежності від типу організації потоку: періодичні та безперервні.
- За типом функціонування: занурені; вмонтовані; прохідні.
- За видом конструкції ротор-статор: радіальні; конічні; осьові.
- За типом подачі оброблюваного середовища: з самовсмоктуванням; зовнішнім насосом; комбіноване.
- За типом підведення рідини: в об'єм ротора; в об'єм статора.
- В залежності від типу вхідного патрубка: центральний; тангенціальний.
- За формою робочої камери: циліндрична; конічна; тороїдна.
- За формою пазів на статорі та роторі: круглі; прямокутні; трикутні; квадратні; трапецієвидні; складної конфігурації.
- За напрямком каналів: прямі; нахилені; ті, що перетинаються; ті, які сходяться; криволінійні.
- За типом перерізу робочої камери: прямокутна; кругла; іншої форми.
- Зазор між ротором і статором: постійний; регулюючий.
- За типом організації потоку: з рециркуляцією; з повним відведенням.

- За типом розміщення центральних осей ротора і статора: коаксіально; з ексцентриситетом.
- За типом робочої поверхні: гладка; довільної шорсткості; поверхня спеціального профілю.
- За типом додаткових диспергуючих елементів: тіла кочення; ножі.
- За способом підведення компонентів: разом; окремо.
- За формою робочих органів: циліндричні; дискові.

В роторно-пульсаційних апаратах радіального типу оброблюване середовище подається по центральному патрубку до робочої камери, де воно потрапляє в зону обробки між ротором і статором та піддається інтенсивній обробці. В апаратах осьового типу з'єднання статора і ротора оброблюване середовище подається по центральному патрубку і переміщується в осьовому напрямку. Даний тип є менш ефективний ніж радіальний. Широке застосування РПА радіального типу зумовлено тим, що вони забезпечують більш рівномірну обробку суміші та мають простішу конструкцію [45, 46].

За формою робочих органів РПА поділяються на апарати дискового та циліндричного типів. За принципом дії і основними характеристиками дискові апарати подібні циліндричним, проте є і деякі специфічні відмінності. Для циліндричного апарату характерні, як правило, щілинні канали прямокутного перерізу, а в дисковому апараті поряд з прямокутними, доцільно застосування каналів круглого перерізу. Причому, довжина каналів може істотно відрізнятися між собою. На відміну від циліндричних РПА насосний ефект в апаратах дискового типу відсутній і переміщення рідини відбувається тільки за рахунок перепаду тиску. У зв'язку з цим, більш широкого поширення набули РПА циліндричного типу. За способом підведення, циліндричні РПА можна розбити на дві групи: апарати занурюваного типу – робочі органи яких розташовані безпосередньо в оброблюваному об'ємі і апарати прохідного типу – їх робочі органи укладені в спеціальному кожусі, що має центроосьовий

патрубок входу і радіальний(або тангенціальний) патрубок виходу оброблюваного середовища.

Оброблюване середовище всмоктується в порожнину ротора, послідовно проходить через щілини роторних і статорних решіток, і викидається в навколишній об'єм. Ці апарати відрізняються простотою конструкції, проте їм притаманний один спільний недолік, що полягає в нерівномірності обробки всієї маси продукту, тому що кратність проходження різних частинок через робочі органи неоднакова. При використанні РПА циліндричного типу скорочується тривалість проходження в них процесів і кількість технологічних циклів в порівнянні з апаратами аналогічного призначення [4].

Екстракція за допомогою РПА – метод інтенсифікації, при якому перенесення маси в гетерогенній системі здійснюється за схемою накладання поля механічних коливань-пульсацій на рухомий потік рідини. Для здійснення різних масообмінних процесів, у тому числі й екстракції різних рідин (що знаходиться у зваженому стані в потоці рідини, яка рухається), можна застосувати пристрій, в основі якого лежить використання принципу трубки Вентурі з багатократними чергуваннями звужень і розширень. Якщо через таку трубку з певною швидкістю проганяти рідину, що містить тверду фазу, то в елементах з меншим перетином швидкість проходження потоку збільшиться, виникне перепад тиску. Внаслідок цього в рідині виникають зони її розриву – каверни, тобто утворюється кавітація. Кавітуюча рідина потрапляє в зону з підвищеним тиском (швидкість течії зменшується). Каверни закриваються. У момент закриття газопарового пухирця виникають гідродинамічні удари, які сприяють диспергуванню часток в рідині [44]. При обробці малов'язких рідин циркуляція через РПА відбувається внаслідок його власної насосної дії, але при обробці високов'язких рідин та рідин зі значним вмістом твердої фази, для забезпечення рівномірної подачі оброблюваного середовища, перед РПА встановлюють додатковий насос, або застосовують РПА зі шнеком [47, 48]. В окремих випадках для підвищення ступеня

диспергування, а також продуктивності процесів емульгування та диспергування, на вхідному патрубку РПА встановлюють пристрій для створення додаткових пульсацій у формі трубки Вентурі, на вході якої встановлено корпус, що містить шток, з вершиною у вигляді конуса, який спрямований в бік критичного перерізу трубки Вентурі, при цьому шток виконано з можливістю осьового переміщення [49].

У харчових та хімічних виробництвах часто виникає потреба в одержанні рідких сумішей, до складу яких входять тонкодисперсні сипучі матеріали, завантаження яких безпосередньо у ємкість з рідиною призводить до агломерації частинок, утворення флокул або налипання компонентів на стінках обладнання, забруднення повітря пилом. Для запобігання цим негативним явищам застосовують рециркуляційні схеми з додатковим резервуаром для сипучих речовин, який встановлюється перед входом в робочу камеру проточного РПА. Частинки сипучої речовини засмоктуються завдяки розрідженню, що створюється на вході в апарат його ротором, перемішуються з рідиною в пульсаційному вузлі, після чого суміш перекачується до ємкості, обладнаної зануреним РПА [42].

Динамічний вплив на дисперсну частку з боку рідкої або газової безперервної фази є наслідком переміщення цієї частинки відносно безперервної фази [50-53]. Змінити швидкість течії потоку рідини для того щоб ініціювати динамічний вплив на частку можна за рахунок різкого прискорення або гальмування потоку. Під дією сили гідродинамічного впливу частки з навколишньою рідиною в оточенні кожної частинки відбувається корисна робота.

Більш м'які режими інтенсифікації, без ударних впливів з використанням даного механізму, можна реалізувати шляхом періодичної зміни швидкості течії багатокомпонентних рідинних середовищ в каналах змінного перерізу. Такі режими характерні для апаратів із швидкозмінним об'ємом, які використовуються в якості екстракторів або аераторів, що застосовуються в ферментаційній промисловості [54]. Механізм прискорення

потоків з дуже високими значеннями g_c , безсумнівно, має місце в оточенні зростаючих або стискаючих бульбашок, а також в міжбульбашковому просторі ансамблю бульбашок, що динамічно розвиваються, де виникають нестационарні мікротечії. При наявності в рідкій безперервній фазі дисперсних включень останні, безсумнівно, піддаються динамічному впливу на мікрорівні.

При інтенсифікації гідромеханічних або масообмінних процесів в дисперсних системах застосовують поняття введеної і витраченої енергії. На виконання корисної роботи, яка пов'язана безпосередньо з руйнуванням дисперсних частинок, використовується мала частина введеної енергії в апарат. Інша її частина витрачається на приведення в рух всієї маси рідкої суміші, що приводить до незворотної дисипації енергії за рахунок подолання внутрішнього тертя і втрат за рахунок різних гідравлічних опорів [4].

За результатами аналізу варіантів встановлення РПА в промислових лініях виявлено, що раціональне компонування роторно-пульсаційних апаратів з іншим технологічним обладнанням дозволяє суттєво підвищити ефективність виробництва як у напрямі інтенсифікації, так і у напрямі покращення якості продукції.

РПА можуть бути використані для здійснення найрізноманітніших технологічних процесів, що протікають як в гетерогенних середовищах з рідкою суцільною фазою, так і при переробці високов'язких середовищ рослинного походження. Найбільш широке застосування вони отримали саме в технологіях приготування та обробки високов'язких вуглеводомістних гетерогенних середовищ, в яких поєднуються процеси диспергування і змішування [55, 56]. До однієї з таких технологій відноситься виробництво свинячих комбікормів. Підготовка кормів до згодовування сільськогосподарських тварин є одним з важливих способів підвищення їх поїдання, перетравлення, засвоєння і використання поживних речовин в організмі тварин. Недоліком даних способів обробки зернових являються велика тривалість технологічного процесу і високі температури, що неминуче

призводить до втрат біологічно активних речовин необхідних для нормального росту і розвитку свиней, значні енерговитрати.

У зв'язку з цим, були проведені досліді з виготовлення кормів із зернових культур із застосуванням роторно-пульсаційного апарату методом дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [40].

Одним з удосконалених апаратів являється циліндричний роторний тип апарату, який складається із статора і встановленим на валу ротора, що виконані у вигляді циліндрів з каналами круглого або прямокутного перерізу. Принцип роботи апарату полягає в наступному. Оброблюване середовище подається під тиском через вхідний патрубок в порожнину ротора, проходить через канали ротора, канали статора, робочу камеру і виходить з апарату через вихідний патрубок. При обороті ротора, його канали періодично співпадають з каналами статора. У період часу, коли канали ротора перекриті стінкою статора, в порожнині ротора тиск зростає, а при співпаданні каналу ротора з каналом статора тиск за короткий проміжок часу падає, в результаті чого в каналі статора поширюється імпульс тиску. Швидкість рідини в каналі статора є змінна величина.

Висока ефективність впливу РПА на оброблювані гетерогенні системи пояснюється впливом високочастотних коливань порядку десятків тисяч кілогерц. При проходженні через зазор між циліндрами середовище обробляється короткочасним розтягуванням в області зниженого тиску, а після проходження всіх циліндрів продовжує зазнавати впливу високочастотних коливань, що відбиваються від стінок кільцевого каналу, аж до виходу з РПА. Значну увагу цим питанням приділяється в роботах [57, 58], де згадані механізми впливу на оброблювану середу доповнюються з урахуванням кавітації. У цих роботах висувається гідродинамічна концепція роботи апаратів, відповідно до якої середовище, що надходить в центральну зону роторно-пульсаційного вузла, проходить циліндри ротора і статора в радіальному напрямку, піддаючись при цьому обробці в міжциліндрових зазорах, які є основною ділянкою гідродинамічного впливу.

Виділяються наступні основні фактори, що інтенсифікують гідродинамічний вплив на оброблюване середовище: різноспрямоване поле швидкостей, високі градієнти швидкостей і прискорень, високочастотні пульсації середовища, перепади тиску, турбулентність та ін. Обертання циліндрів викликає в потоці суміші рідин, що проходить крізь перфорацію і зазори, високі градієнти тиску, нормального і дотичного напружень, які швидко змінюються в часі і мають характер пульсацій. Наслідком цього є деформація і руйнування дисперсних включень, що знаходяться в потоці оброблюваної рідини. Чим вищі значення зазначених вище величин, тим до менших розмірів можна зруйнувати дисперсні частинки. Крім названих механічних факторів, причиною подрібнення частинок є також і кавітація, яка виникає в робочому просторі апарата внаслідок періодичних, різких спадів тиску. Використання ефектів кавітації в РПА значно підвищує інтенсивність обробки багатокомпонентних середовищ за рахунок створення каверн в оброблюваних сумішах при обтіканні їх рухомих і нерухомих робочих елементів апарату [59, 60]. Перевагою таких апаратів є те, що через схлопування каверн, генерується дискретно-імпульсна енергія кумулятивних струменів.

Проведений аналіз літературних джерел по дослідженню тепломасообмінних процесів обробки гетерогенних систем дозволив відзначити, що на сьогоднішній день становить інтерес обладнання, що дозволяє об'єднати процеси подрібнення, диспергування, змішування, емульгування і гомогенізації для обробки гетерогенних багатокомпонентних систем.

Розглянуто основні фізичні процеси і їх вплив на гетерогенну систему при обробці її в РПА. Показані загальні критерії ефективності фізичних механізмів ДІВЕ стосовно їх використання для інтенсифікації технологічних процесів. Проведено порівняльний аналіз енергетичних витрат на проведення операції диспергування при використанні для цієї мети традиційних промислових апаратів і нових диспергуючих пристроїв, розроблених на основі

принципу ДІВЕ. Показано, що для досягнення одного і того ж ступеня диспергування рівень питомої потужності в апаратах ДІВЕ, істотно нижчий в порівнянні з рівнем питомої потужності в традиційних пристроях. Проаналізовано та запропоновано конструктивні особливості РПА, в якому реалізується широкий спектр чинників впливу на процес переробки водозернових сумішей для отримання рідкого корму для тварин [4].

2.2. Розробка роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів

Розглянуті в першому розділі конструкції дробарок для фуражного зерна, які є найбільш поширеними апаратами для приготування кормів, як відмічалось раніше, мають ряд недоліків:

- значні питомі витрати електроенергії для приготування одиниці кормової продукції;
- великі габарити і масу;
- неоднорідний гранулометричний склад кормової продукції (наявність великих та дрібних фракцій, висока частка пилу, що в свою чергу погано впливає на перетравлення худобою);
- виготовлення сухого корму, який поступається рідкому своїми поживними властивостями та засвоюваністю для свиней, молодняка ВРХ, овець, кіз та інших тварин.

Наявні апарати для приготування рідкого корму хоч і являються кращими машинами в порівнянні з дробарками, але все таки мають досить великі масогабаритні показники та витрачають велику кількість питомої енергії на виготовлення кормів.

В дисертаційній роботі запропонована нова конструкція апарату для приготування рідких зернових сумішей, які базуються на застосуванні роторно-пульсаційних технологій [61-64]. Сутність таких технологій полягає у використанні робочого пристрою, що складається з циліндричного ротора і статора, які з'єднані коаксіально. На них розміщені отвори прямокутної або

іншої форми для проходження через них рідинного компоненту. Також рідина може проходити через зазор між поверхнями ротора і статора. Швидкість обертання ротора складає 2850 об/хв. При проходженні рідини з твердими фракціями через отвори ротора і статора відбуваються процеси кавітації, турбулізації потоку, дисипації кінетичної енергії обертання ротора в теплову енергію, що призводить до нагрівання оброблювальної суміші.

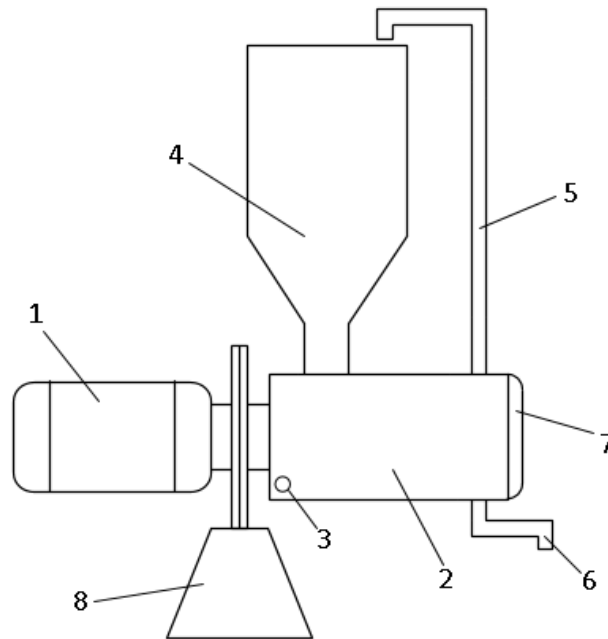


Рис. 2.1. Загальна схема РПА для приготування рідких кормів

Загальна схема роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів представлена на рис. 2.1. Вона складається з електричного приводу (1), переробної камери (2), патрубку для подачі води до переробної камери (3), бункера (4), патрубку для повторної подачі суміші в бункер (5), патрубку для виводу готової суміші з установки (6), кришки (7) та опорної арматури (8).

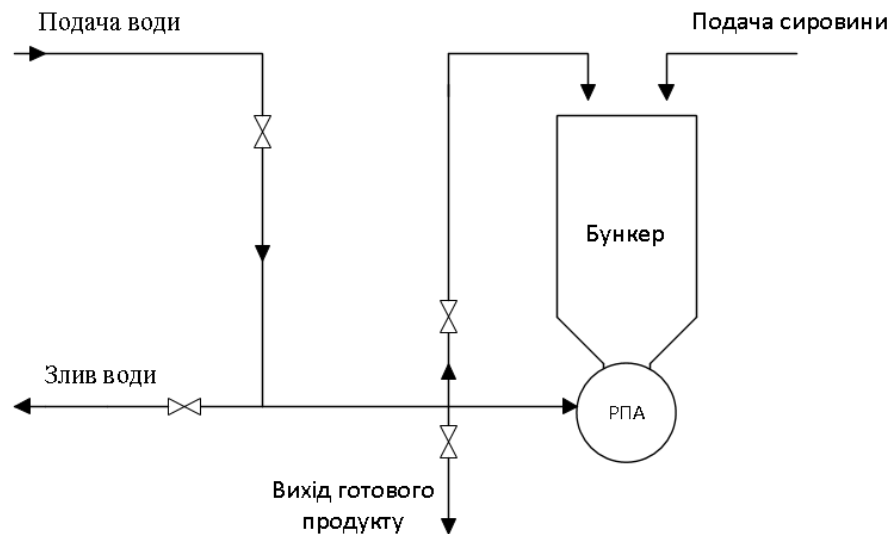


Рис. 2.2. Схема функціонування роторно-пульсаційного апарату

Роторно-пульсаційний апарат для приготування рідких кормів працює наступним чином (Рис. 2.2): спочатку через вхідний патрубок (3) переробна камера наповнюється водою до певного рівня, а потім до бункера (4) подається необхідна кількість зерна. Після подачі зерна запускається електричний привод (1) апарата і зерно разом з водою надходить до переробної камери (2), де воно подрібнюється між радіальними отворами (пазами) рухомого ротора та нерухомого статора. Потім подрібнена суміш переходить у режим циклічної рециркуляції: за допомогою вихідного патрубку (5) рідина подається в бункер, а після нього знову повертається до переробної камери (2) для більшого подрібнення та кращого розчинення дрібних зернових фракцій. РПА оснащена миттєвою системою виводу готового продукту з установки за допомогою відповідного патрубку (6). Кормова суміш підігрівається також за рахунок кавітації, турбулізації та інших процесів в рідинній зерновій суміші між пазами ротора та статора при переробці такої суміші. Тривалість процесу переробки зерна залежить від кількості необхідного корму та необхідних розмірів фракцій для певного виду сільськогосподарських тварин.

Конструктивно робоча камера представленого роторно-пульсаційного апарату являє собою два коаксіальні циліндри – нерухомий статор та рухомий

ротор, які мають радіальні отвори на бокових стінках (Рис. 2.3). Отвори на роторі і статорі можуть мати прямокутну або іншу форму, різні розміри, вони розташовані коаксіально один до одного. Зазор між ротором і статором повинен вибиратися мінімальним, що призводить до інтенсифікації процесів гомогенізації, кавітації і турбулізації потоку рідинної кормової суміші.

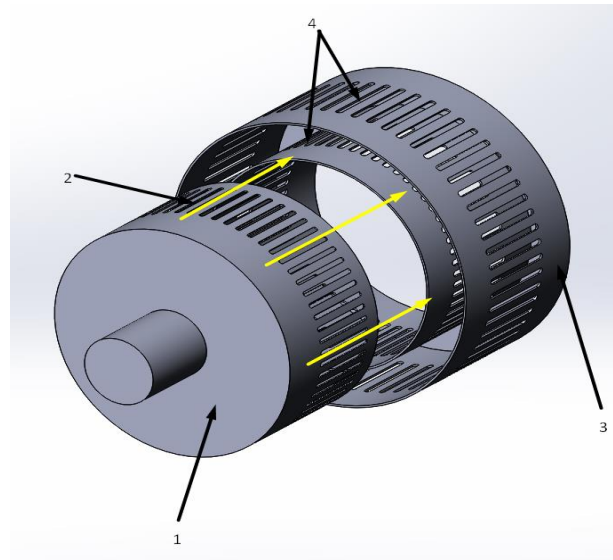


Рис. 2.3. Робочий механізм роторно-пульсаційного апарату з отворами прямокутної форми: 1 – ротор; 2 – пази ротора; 3 – статор; 4 – пази статора.

Для оптимального проходження процесу формування кормової суміші необхідно правильно вибрати геометричні розміри ротора і статора, а також розміри та кількість пазів на роторі і статорі, які забезпечать подрібнення твердих фракцій (зерна, преміксів, вітамінів), створення гомогенної кормової суміші та потрібних характеристик цієї суміші, що забезпечить необхідну консистенцію корму. Для визначення цих параметрів необхідно провести математичне моделювання процесів, що протікають в роторно-пульсаційному апараті.

Робочими елементами РПА циліндричного типу є два концентричних циліндра з круглими або прямокутними отворами, які розташовані в шаховому або коридорному порядку. Внутрішній циліндр (ротор) обертається із заданою швидкістю щодо зовнішнього нерухомого циліндра (статора). Ротор і статор розташовуються послідовно. При обертанні ротора, його канали періодично

збігаються з каналами статора. Дана конструкція елементів є особливою при обробці зернових сумішей, оскільки дозволяє обробляти дану сировину без попереднього подрібнення. Оброблюване середовище подається під тиском в порожнину ротора, проходить через канали отворів ротора і статора, потрапляє в робочу камеру і виходить з апарату через вихідний патрубок. Внаслідок обертання ротора гетерогенне середовище піддається впливу на неї таких чинників як швидкість потоку рідини, пульсації тиску, інтенсивної кавітація, високих зсувних і зрізуючих напруг. Такі фактори впливу здатні викликати деформацію і руйнування дисперсних включень в несучому потоці рідини [37, 65]. Чим вище будуть значення величин, які характеризують динамічний вплив з боку робочих органів апарату на гетерогенний потік, тим до менших розмірів можна подрібнити дисперсні частинки. Крім зазначених факторів подрібнення частинок в робочій зоні РПА, внаслідок періодичних падінь тиску, відбуваються також процеси кавітації і виникають турбулентні пульсації.

При роботі РПА важливими показниками є продуктивність по готовому продукту, енергоспоживання, масогабарити, час обробки вихідної суміші до необхідного розміру дисперсних включень, а також сам дисперсний склад. Показник, який характеризує необхідну якість одержуваного продукту, вважається основним.

В даний час питання про параметри роботи апарату, при яких можна отримати продукт, що відповідає вимогам до його якості, залишається проблематичним. Адже для створення оптимальних конструкцій апарату, задання необхідних режимних параметрів їх роботи, необхідно знайти їх зв'язок з дисперсним складом готового продукту [66, 67]. Вирішити дане питання можливо за допомогою аналізу кінематичних і динамічних характеристик течії несучого дисперсного середовища (градієнтів тиску, напруги, швидкості, інтенсивності їх пульсацій в часі і т.д.) [43].

Вплив здвигового, кавітаційного і вихрового механізмів на середовище в роторно-пульсаційному апараті супроводжується тепловою дисипацією

енергії. В результаті переходу механічної енергії в теплову відбувається нагрівання оброблюваного продукту, що може призвести до змін необхідних властивостей самого продукту, а також до виходу з ладу елементів апарату. Дисипативні тепловиділення відбуваються на обмежених ділянках, прилеглих до робочих органів. Наприклад, при локальному розігріві суміші, що включає білок, може відбуватися його термокоагуляція. Даний процес є неприпустимим за технологічною інструкцією приготування харчових продуктів. У таких випадках необхідно організувати систему відводу тепла від апарату, або зменшити швидкість обертання ротора. Тому для кожної оброблюваної системи існує своя оптимальна температура, при якій приготування кінцевої продукції того чи іншого типу відбуватиметься найбільш ефективно. У зв'язку з цим, актуальним завданням є визначення теплових характеристик обладнання при отриманні гомогенних середовищ. Тому, для вирішення завдання про подрібнення дисперсних частинок в робочій зоні РПА, можливих енергетичних витратах на здійснення даного процесу, необхідно дослідження динамічних і температурних характеристик потоку рідини в РПА.

2.3. Чисельне моделювання процесів гідродинаміки і теплопереносу в роторно-пульсаційному апараті

2.3.1. Розробка 3D моделі роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких кормів

Далі буде проведено математичне моделювання процесів гідродинаміки і тепломасопереносу в роторно-пульсаційному апараті для приготування рідких зернових кормів. На базі отриманих результатів чисельного моделювання можна буде вибрати розміри конструкції роторно-пульсаційного апарату, які будуть використані для виготовлення промислово-дослідного зразку даного пристрою.

На рис. 2.4 схематично показано роторно-пульсаційний апарат для приготування рідких зернових кормів, а саме – розміщення коаксіально з'єднаних ротора і статора РПА в робочій камері апарату. Завантажувальний пристрій виконано за допомогою програми SOLID WORKS, після чого він завантажений в ANSYS Design Modeler. Для моделювання суміші вибрано компонент заливка (Fill). Виставлено граничні умови та передано проект до ANSYS Meshing.

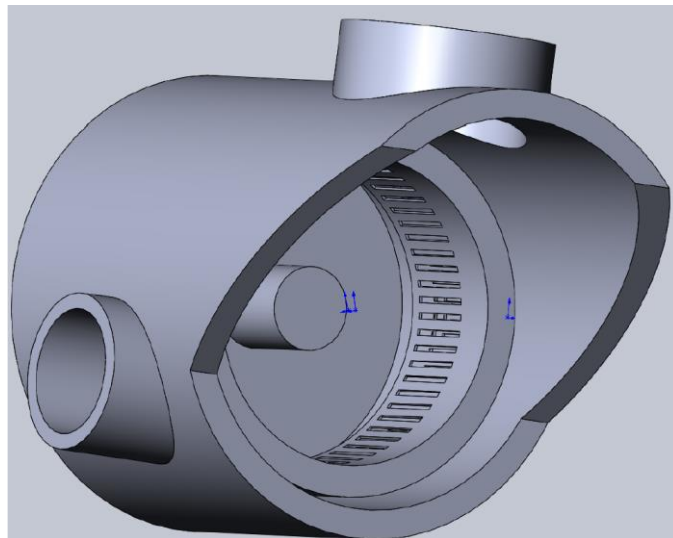


Рис. 2.4. Загальний вигляд системи ротор-статор в РПА

На рис. 2.5. показано граничні умови РПА. На вхідній границі inlet завантажуються суміш з масовою витратою $0,92 \text{ кг/с}$ з температурою $+20^\circ\text{C}$. Вихідна границя outlet виставлена по тиску (pressure outlet). Корпус РПА виконаний із алюмінію. На поверхні металічного корпусу задано температуру $+20^\circ\text{C}$. Об'єм статора РПА становить $2,181 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, об'єм ротора РПА становить $3,798 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$. Ротор обертається зі швидкістю 3000 об/хв . Чисельне моделювання проводилось три рази із сталою динамічною в'язкістю $0,2$; $1,1$ та $2,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

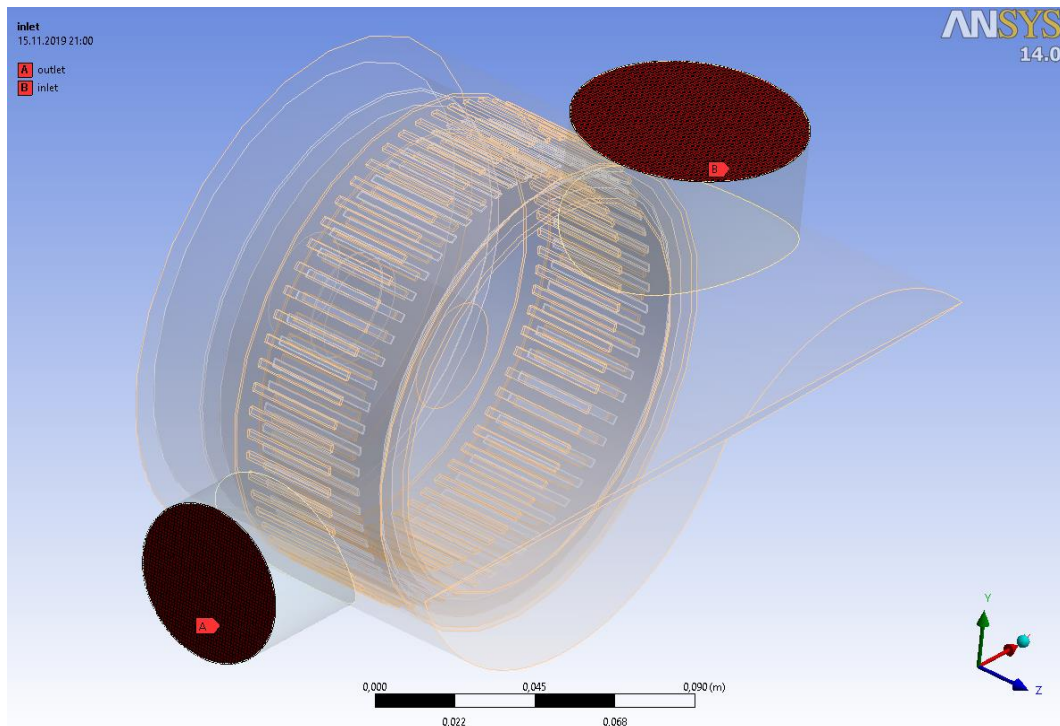


Рис. 2.5. Граничні умови в каналах РПА

Для чисельного моделювання введено суміш води та зерна у співвідношенні 9х1. Теплофізичні властивості води, які змінюється від температури, взяті із відповідних таблиць.

Теплофізичні властивості зерна вважаються незалежними від температури і є рівними:

- Густина 770 кг/м³
- Коефіцієнт теплопровідності 0,11 Вт/(м·°С)
- Теплоємність 1550 кДж/(кг·°С)

Суміш вода/зерно (Y), для усіх необхідних теплофізичних величин, розраховується за наступною формулою:

$$Y = \frac{9 \cdot x_1 + 1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} \quad (2.1)$$

де x – теплофізична величина; 1 – значення води; 2 – значення зерна. Теплофізичні властивості рідкої зернової суміші (таблиця 2.1) залежать від температури.

Таблиця 2.1

Теплофізичні властивості суміші

Температура, °C	Густина, кг/м ³	Теплоємність, кДж/ (кг·°C)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C)
20	977,5364	3933,6363	0,55454545
30	975,1909	3939,0909	0,57181818
40	972,0455	3940	0,58727273
50	968,2	3941,8181	0,59909091
60	963,7545	3945,4545	0,60909091
70	958,7545	3950	0,61727273
80	953,2727	3955,4545	0,62272727
90	947,3273	3963,6363	0,62636364

2.3.2. Побудова 3D сітки в Ansys Fluent Meshing

При чисельних розрахунках задач гідродинаміки і теплопереносу використовується метод кінцевих елементів (МКЕ). В англійському варіанті він називається Finite Elements Method (FEM). Суть даного методу полягає в наближеному розв'язку варіаційної задачі. При формулюванні такої задачі використовуємо поняття функціоналу. Оператор $I[f(x)]$ називається функціоналом, який заданий для деякої множини функцій, при умові що для кожної функції $f(x)$ ставиться у відповідність певне числове значення функції $I[f(x)]$ [68]. Іншими словами, такий функціонал являється «функцією від функції». В багатьох випадках функціонали мають вигляд інтегралів. В такому випадку варіаційна задача полягає у знаходженні відповідної функції $f(x)$, яка

відповідає мінімальному значенню функціоналу $I[f(x)]$. Вигляд вказаного функціоналу може бути різним для різних завдань та підбирається за спеціальним вибором.

В даний час МКЕ знайшов широке застосування при вирішенні задач теплопровідності для твердих тіл та при розрахунках матеріалів на міцність. Крім того, цей метод застосовується при розрахунку течій рідин і газів [69]. Відомі також методи, які поєднують у собі окремі елементи методу кінцевих об'ємів та методу кінцевих елементів [70, 71]. Об'єднання цих методів дозволяє використовувати ширший ряд розрахункових сіток (пірамідальні сітки, тетрагональні, призматичні, полігедральні), що є необхідним при розв'язку задач, які мають складну геометрію. Вказаний підхід використовується в CFD пакетах Ansys CFX, Ansys Fluent, Star-CD, Star-CCM+, Comsol тощо.

Пакет Ansys має широке застосування практично у всіх галузях сучасної науки та техніки, зокрема і в сільськогосподарській галузі. При чисельному моделюванні слід враховувати той факт, що при розв'язку різних фізичних задач потрібно використовувати різні підходи при моделюванні та побудові розрахункової сітки. Побудова сітки в процесі чисельного моделювання для задач гідродинаміки, тепло- та масопереносу має деякі особливості, сутність яких полягає у побудові її в Ansys Meshing для 2D та 3D моделей. ANSYS Meshing добре адаптована для побудови сітки в CFD додатках ANSYS-CFX та FLUENT, однак треба враховувати той факт, що розроблену логічну схему при побудові сітки також можна переносити в інші програми, які не використовуються в Ansys.

Побудова сітки проводилася в спеціальному генераторі ANSYS Meshing на основі платформи Workbench. В Ansys Meshing Application використовуються наступні методи розбивки у випадку 3D геометрії:

- автоматичний (Automatic);
- методи створення тетрагедральної сітки (Tetrahedrons):
 - на основі поверхневої сітки (Patch Conforming);

- на основі сітки, яка не залежить від поверхонь (Patch Independent);
 - CFX-Mesh;
- Методи створення гексагедральної сітки:
- із протяжкою (Sweep);
 - із протяжкою для тіл з оболонкою (Thin Sweep);
 - багатозональний метод (Multi Zone);
 - багатозональний метод (на основі блочної сітки ICEM CFD);
 - для випадку переважного використання гексаедрів (Hex Dominant)

В програмних пакетах використовуються декілька основних типів сітки для 3D моделі: тетрагедральна, декартова та гексагедральна. Тетрагедральна сітка дає можливість створювати осередки, які мають форму, близьку за формою до меж розрахункової області, а також до зон, для яких характерні високі градієнти швидкостей і температур. Такий підхід дозволяє виконувати моделювання приграничних шарів. Слід відзначити, що створення тетрагедральної сітки – це доволі трудомісткий процес. Використання декартової сітки дозволяє створювати лише осередки прямокутної форми, що може призвести до погіршення результатів розв’язку рівнянь прикордонного шару, але декартову сітку простіше створити. Існує багато методів, які дають можливість вирішувати рівняння переносу для областей в прикордонних шарах для високих градієнтів параметрів потоку речовини.

Гексагедральна сітка, яка використовується для вирішення задач з однаковою точністю, буде містити більше ніж у два рази менше вузлів, якщо порівнювати з тетрагедральною сіткою. Тому при застосуванні даної сітки необхідно менше елементів для розв’язку задач CFD.

Для анізотропних елементів можливе суміщення з анізотропною геометрією (для прикордонних шарів, для областей з великою кривизною і довгими кінцевими елементами). При довільній конфігурації гексагедральна сітка потребує доволі значну кількість підготовчих операцій, але це дає

можливість отримати більш якісний результат. У багатьох випадках використання більш простих конфігурацій на основі методу протяжності дає можливість створювати сітки більш простіше і швидше, використовуючи при цьому розгортки (Sweep) та мультizonальну (Multi Zone) побудову.

Таблиця 2.2

Параметри побудови сітки для РПА

Параметр	Значення
Показник якості сітки (orthogonal quality)	0,161
Кількість елементів, шт	4485359
Кількість вузлів, шт	4791394
Кривизна кута, град	45
Метод	Cut-Cell
Максимальний розмір, м	$1 \cdot 10^{-3}$
Мінімальний розмір, м	$5 \cdot 10^{-4}$

У таблиці 2.2 наведені параметри налаштування та результати побудови сітки в Ansys Meshing, яка подальшому буде використовуватися для чисельного розрахунку гідродинаміки, тепло- та масообміну в Ansys Fluent. Геометрія була побудована для реальних розмірів. При цьому кількість елементів і граней є достатньо великою. З урахуванням доволі великих розмірів РПА, розміри елементів і граней було збільшено досить на невелику величину через обмеження розрахункової потужності та продуктивності комп'ютера.

На рис. 2.6-2.8 зображено побудовану сітку роторно-пульсаційного апарата. Максимальні розміри сітки по всьому об'єму не перевищують $1 \cdot 10^{-3}$ м. Такі заходи були застосовані для покращення розрахунку гідродинаміки потоку. Для перерізів YZ та YX (Рис. 2.7) досить чітко спостерігається

збільшення концентрації сітки в отворах ротора і статора. Розміри концентрації сітки біля пазів становлять $5 \cdot 10^{-4}$ м (Рис. 2.8). Завдяки цьому можна краще оцінити недоліки та переваги в якості самої сітки. Кількість елементів сітки становить близько 4,5 млн. Якість такої сітки по orthogonal quality становить 0,161. Детальніші результати приведені в таблиці 2.2.

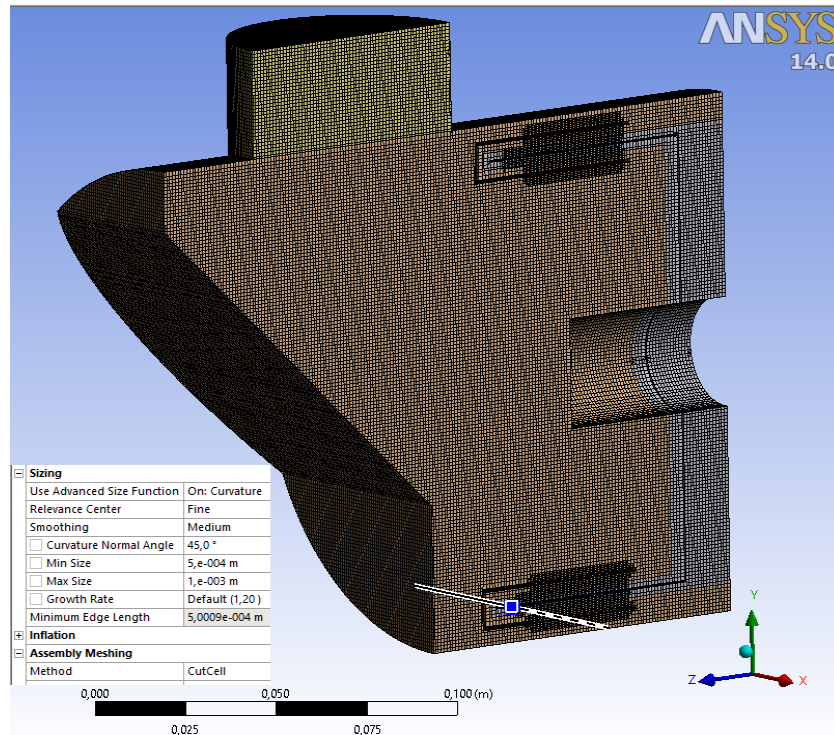


Рис. 2.6. Результат побудованої сітки у повздовжньому перерізі YZ

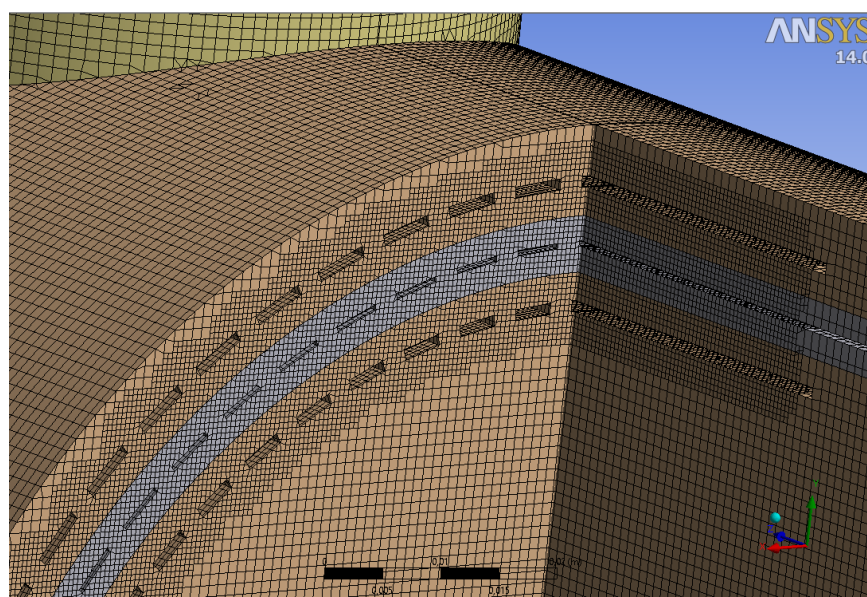


Рис. 2.7. Результат побудованої сітки в розрізі YZ та YX

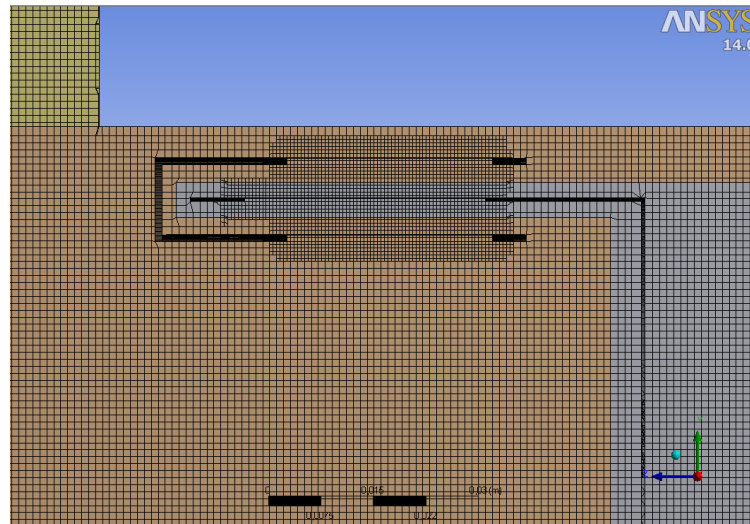


Рис. 2.8. Результат побудованої сітки між пазами в повздовжньому перерізі
YZ

Використовуючи метод кінцевих елементів було побудовано розрахункову 3D модель сітки РПА в програмному комплексі ANSYS Meshing для розв'язку задач гідродинаміки та тепломасопереносу в роторно пульсаційній установці. За результатами побудованих сіток для CFD моделей, було вибрано найкращу сітку за оптимальністю та якістю, що в результаті дає можливість отримати найбільш достовірні і точні результати дослідження процесів тепло- та масообміну в РПА.

2.3.3. Математичне моделювання процесів гідродинаміки в РПА

Рівняння, які описують рух в'язких рідин або газів, включають в себе рівняння нерозривності потоку та рівняння збереження кількості руху для трьох проекцій на осі координат. У випадку, якщо рух середовища буде супроводжуватися теплопереносом, то до системи названих рівнянь додається рівняння збереження енергії.

В основі математичної моделі процесів переносу в потоці рідкої суміші лежать рівняння Нав'є-Стокса [72] та рівняння переносу енергії для конвективних течій. Оскільки режим течії рідкої зернової суміші є турбулентним, то в розрахунках використана стандартна модель

турбулентності k-ε [73]. Нижче приведені вихідні рівняння математичної моделі.

Рівняння Нав'є-Стокса:

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

де ρ – густина в'язкого середовища, кг/м³; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Па·с; p – тиск, Па; u, v, w , – векторне поле швидкостей; t – час, с.

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (u\rho)}{\partial x} + \frac{\partial (v\rho)}{\partial y} + \frac{\partial (w\rho)}{\partial z} = 0, \quad (2.3)$$

Рівняння збереження енергії:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(\tau, x, y, z). \quad (2.4)$$

де T – температура середовища, К; λ – коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт/м · К; C_p – питома теплоємність середовища, Дж/кг · К.

Модель турбулентності

Для розрахунку гідродинаміки при русі теплоносіїв в каналах необхідно вибрати модель турбулентності, яка максимально чітко описує умови гідродинамічної течії для цих каналів. Однією з найбільш поширених моделей є стандартна k-ε модель, яка застосовується в програмному пакеті ANSYS FLUENT. Вказана модель турбулентності показала свою користь в описі турбулентних течій при проведенні практичних інженерних розрахунків для потокових каналів. Дана модель була запропонована В.Е.Launder і D.B.Spalding [73]. Вона відрізняється надійністю, економічністю і точністю в

розрахунках для широкого спектра турбулентних потоків, що пояснює її широке використання для моделювання теплообміну у каналах різної конфігурації.

Стандартна k-ε модель включає в себе модель рівняння переносу турбулентності кінетичної енергії (k) та швидкості дисипації цієї енергії(ε). Рівняння транспортної моделі для параметра k можна знайти з точного рівняння переносу, а рівняння транспортної моделі для параметра ε отримують з фізичних передумов турбулентної течії.

При виводі k-ε моделі приймається, що потік є повністю турбулентний, а вплив ефектів молекулярної в'язкості незначний, тобто стандартна k-ε модель використовується для повністю турбулізованих потоків.

В подальших дослідженнях стандартну k-ε модель турбулентності було вдосконалено, що зумовило зростання її ефективності. Найвідомішими є два вдосконалені варіанти такої моделі, які є доступними для використання в програмному пакеті ANSYS FLUENT, а точніше – RNG k-ε модель [74] та реальна (realizable) k-ε модель [75].

Рівняння переносу стандартної k- ε моделі.

Кінетичну енергію турбулентності k та її швидкість дисипації ε знаходять при розв'язку транспортних рівнянь 2.5-2.6.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.6)$$

де, G_k – генерація кінетичної енергії турбулентності за рахунок градієнтів швидкості (див. рівняння (2.12)); G_b – генерація кінетичної енергії турбулентності (див. рівняння (2.16)); Y_M – член рівняння, який описує вклад в розширення коливань стисливості турбулентних потоків для загальної швидкості дисипації (див. рівняння (2.18)); $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ і $C_{3\varepsilon}$ – експериментальні

константами; σ_k і σ_ε – турбулентні числа Прандтля для k і ε відповідно [76, 77, 78]. Величини S_k , S_ε визначаються як характеристики при пульсацій та дисипації кінетичної енергії:

$$S_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon - \mu_t \left(\frac{g_i \partial \rho}{\sigma_B \rho \partial x_i} \right), \quad (2.7)$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B \left(\frac{g_i \partial \rho}{\sigma_B \rho \partial x_i} \right) \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.8)$$

де $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_k = 1$ – емпіричні коефіцієнти; f_1 , f_2 – змінні, які залежать від коефіцієнтів турбулентної та динамічної в'язкості і визначаються за наступними формулами:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - e^{-R_T^2} \quad (2.9)$$

Значення вищеприведених констант і параметрів потоку в даній моделі турбулентності визначалися із експериментів для базових турбулентних потоків, в тому числі й для зсувних течій, прикордонних шарів, змішаних шарів, а також для розкладу ізотропної сітки турбулентності. Вони виявились досить ефективними для широкого діапазону для зсувних течій, які обмежені стінкою.

Моделювання турбулентної в'язкості.

Турбулентна (або вихрова) в'язкість μ_t вираховується через параметри k і ε з наступного рівняння:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

де, C_μ – константа.

Ступінь, в якій ε залежить від плавучості визначається постійною $C_{3\varepsilon}$. В ANSYS FLUENT величина $C_{3\varepsilon}$ знаходиться за співвідношенням [79]:

$$C_{3e} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (2.11)$$

де v – компонента складова швидкості потоку, яка є паралельною до гравітаційного вектора, u – складова швидкості потоку, яка перпендикулярна до гравітаційного вектора. Таким чином, C_{3e} стає рівною 1,0 для плавучих зсувних шарів, у яких основним напрямком потоку співпадає з напрямом дії вектора сили тяжіння. Для плавучих шарів зсуву, які перпендикулярні до гравітаційного вектора, C_{3e} стає рівним 0.

Модельовання турбулентних процесів в к-ε моделі.

Параметр G_k відповідає за процес кінетичної енергії турбулентності, який моделюється однаковою чином як для стандартної RNG моделі, так і для realizable к-ε моделі. Він визначається за формулою 2.12:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (2.12)$$

За оцінкою G_k у відповідності до гіпотези Буссінеска:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.13)$$

де S – модуль середньої швидкості зміни тензора деформації, який може бути визначений із співвідношення:

$$S \equiv \sqrt{2 S_j S_{/j}} \quad (2.14)$$

Ефекти впливу плавучості на турбулентність в к-ε моделі

Параметр генерації турбулентності за рахунок плавучості визначається з виразу:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2.15)$$

де Pr – турбулентне число Прандтля для енергії; g_i – компонент гравітаційного вектора для i -того напрямку. Для стандартних k - ϵ моделей значення числа Прандтля рівне 0,85.

Коефіцієнт теплового розширення β визначається як:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.16)$$

Для ідеального газу співвідношення (2.15) можна звести до наступного:

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (2.17)$$

Як видно з рівнянь переносу для параметра k (див. рівняння (2.5)) турбулентність кінетичної енергії збільшена ($G_b > 0$) при умові нестійкості стратифікації потоку. Для стійкої стратифікації необхідно зменшити вказану турбулентність ($G_b < 0$). В пакетах ANSYS FLUENT вплив ефекту плавучості на генерацію k враховуються завжди, за умов наявності гравітаційного поля з відмінним від нуля температурним градієнтом.

Для врахування вказаних ефектів для k - ϵ моделі в ANSYS FLUENT використовується параметр розсіювання розширення Y_M , який входить до складу рівняння при визначенні k (2.6). Цей параметр моделюється відповідно до співвідношення, запропонованого Саркаром [80]:

$$Y_M = 2\rho\epsilon M_t^2 \quad (2.18)$$

де M_t – турбулентне число Маха, що визначається з виразу:

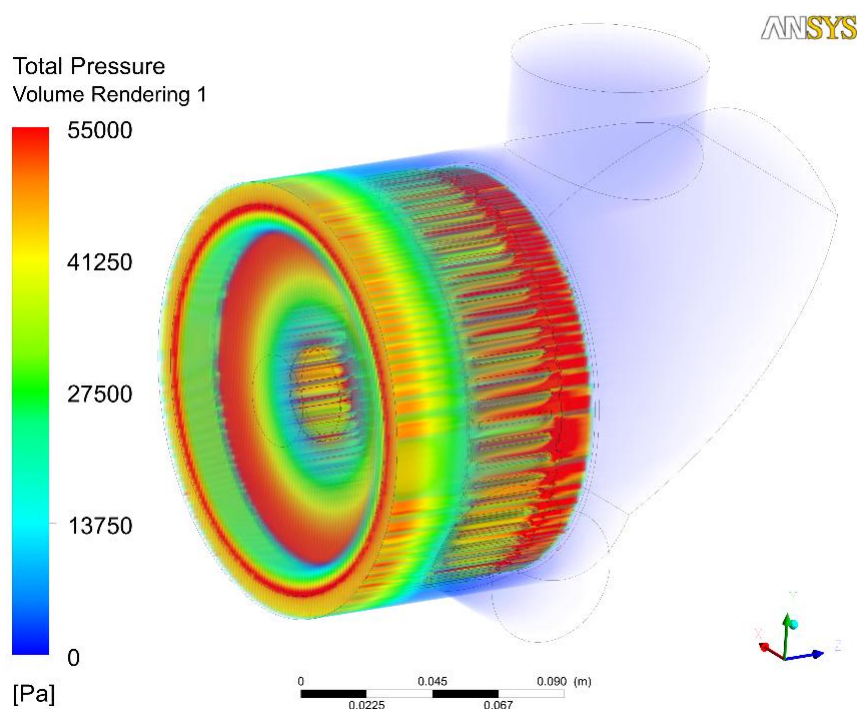
$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (2.19)$$

де a ($a \equiv \sqrt{\gamma RT}$) – це швидкість звуку.

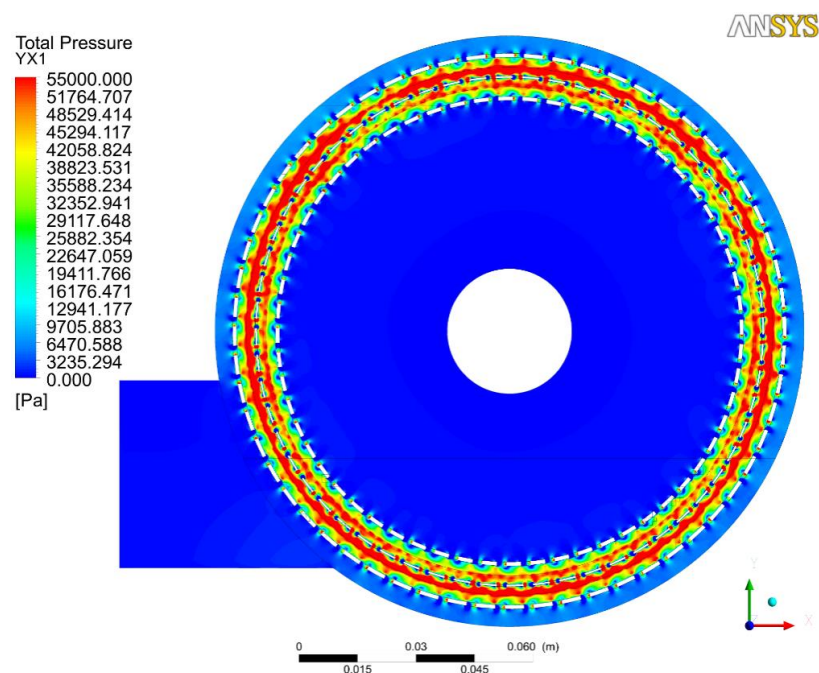
2.3.4. Результати чисельного моделювання в РПА

В результаті чисельних розрахунків з використанням пакетів прикладних програм ANSYS FLUENT було отримано всі динамічні і термічні характеристики рідкої кормової суміші при проходженні її через систему каналів ротор-статор [81-85]. Результати проведених розрахунків представлені на рис. 2.9-2.11.

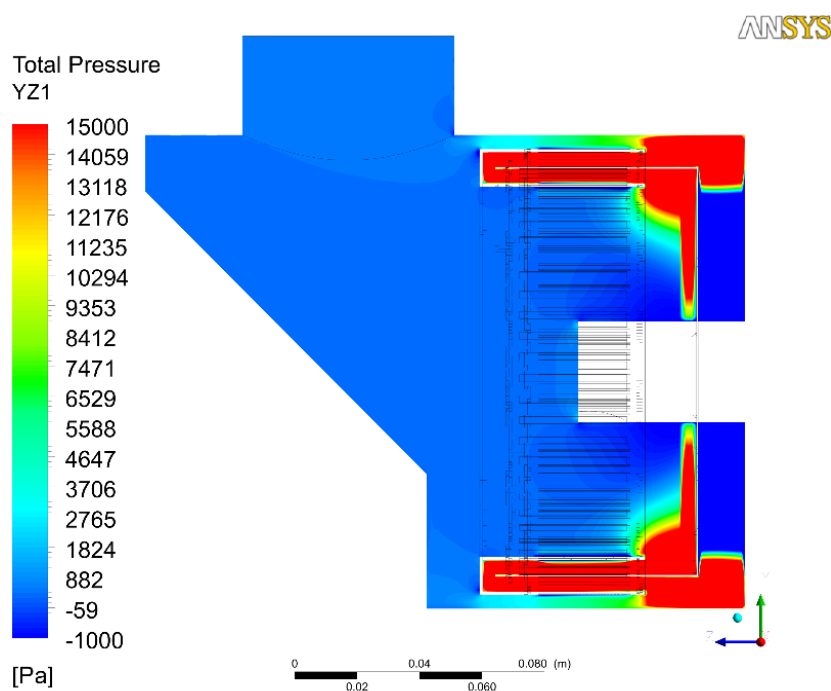
На рис. 2.9 представлений розподіл тисків в каналах роторно-пульсаційного апарата при протіканні в них рідкої кормової суміші. Як показує аналіз розподілу тисків максимальні цифри його приросту в потоці кормової суміші спостерігається в областях, що знаходяться між ротором і статором. В цих областях приріст тиску може складати 55 кПа в порівнянні з тиском на вході в канал. Цей факт свідчить про значний вплив в'язкості суміші на зміну тиску в каналах ротор-статор, що супроводжується перетворенням кінетичної енергії обертання ротора в теплову енергію кормової суміші.



a)



б)

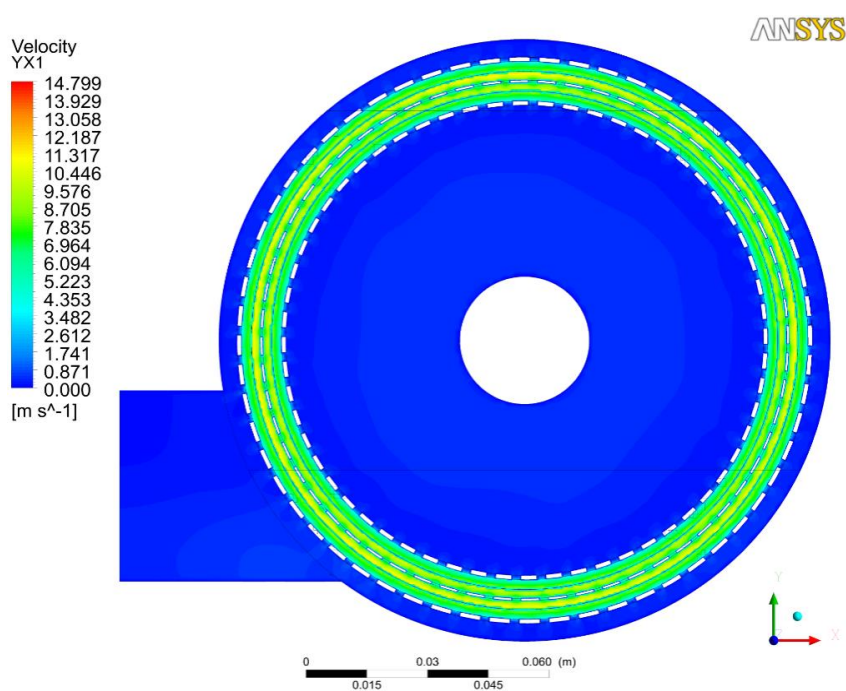
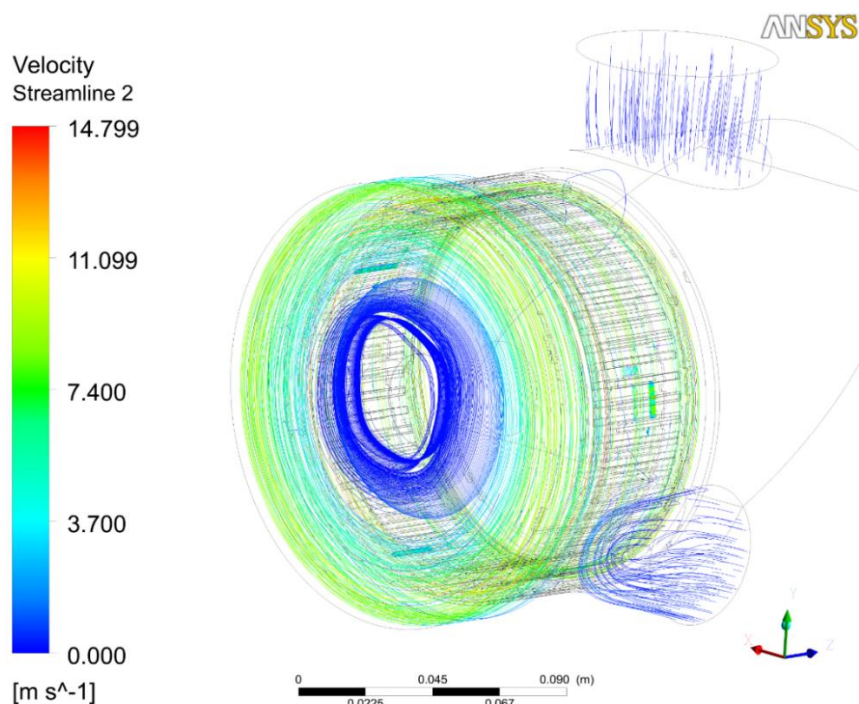


в)

Рис. 2.9. Розподіл тисків в системі ротор-статор: а – 3D формат; б – поперечний переріз; в – повздовжній переріз.

На рис. 2.10 приведені розподіли швидкостей в каналах робочої ділянки для системи ротор-статор. Максимальні значення швидкості потоку кормової суміші спостерігаються в каналах між ротором і статором, де ці значення

можуть перевищувати 7 м/с. При виході рідини з каналу ротор-статор утворюються області завихрення потоку, які турбулізують течію в каналах та призводять до інтенсивного перемішування водозернової суміші. В результаті цих процесів утворюється гомогенна кормова зернова суміш.



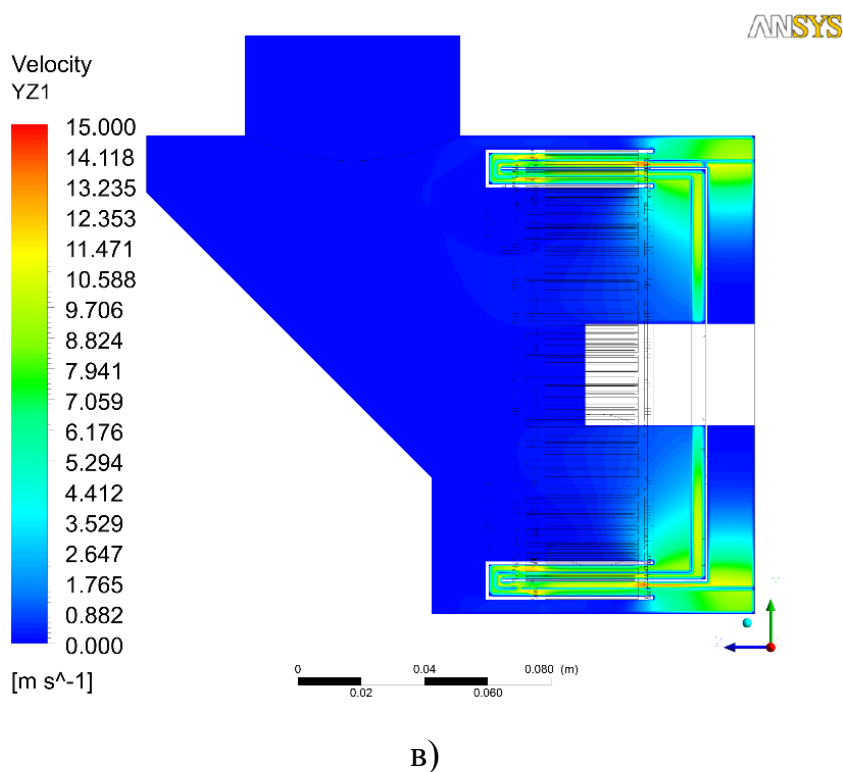


Рис. 2.10. Розподіл швидкостей в системі ротор-статор: а – 3D формат; б – поперечний переріз; в – повздовжній переріз.

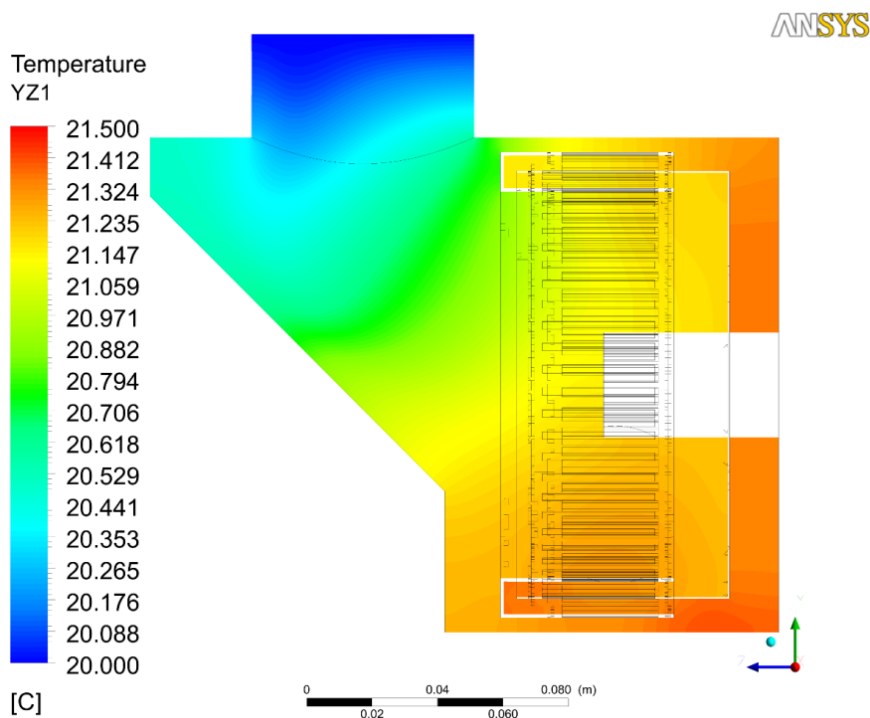


Рис. 2.11. Розподіл температур в кормовій суміші у системі ротор-статор.

Температурні розподіли рідинної суміші в каналах системи ротор-статор приведені на рис. 2.11. Найбільші значення температур в рідинній кормовій суміші мають місце в областях, що прилягають до поверхні торцевої площини ротора і можуть перевищувати 21°C . Це свідчить про дисипацію кінетичної енергії обертання ротора та підвищення температури кормової суміші в процесі її обробки. В результаті відбувається нагрів кормової суміші, що особливо важливо в зимовий період року і дає змогу не витрачати додаткових зусиль для підігрівання кормової зернової суміші в цей період.

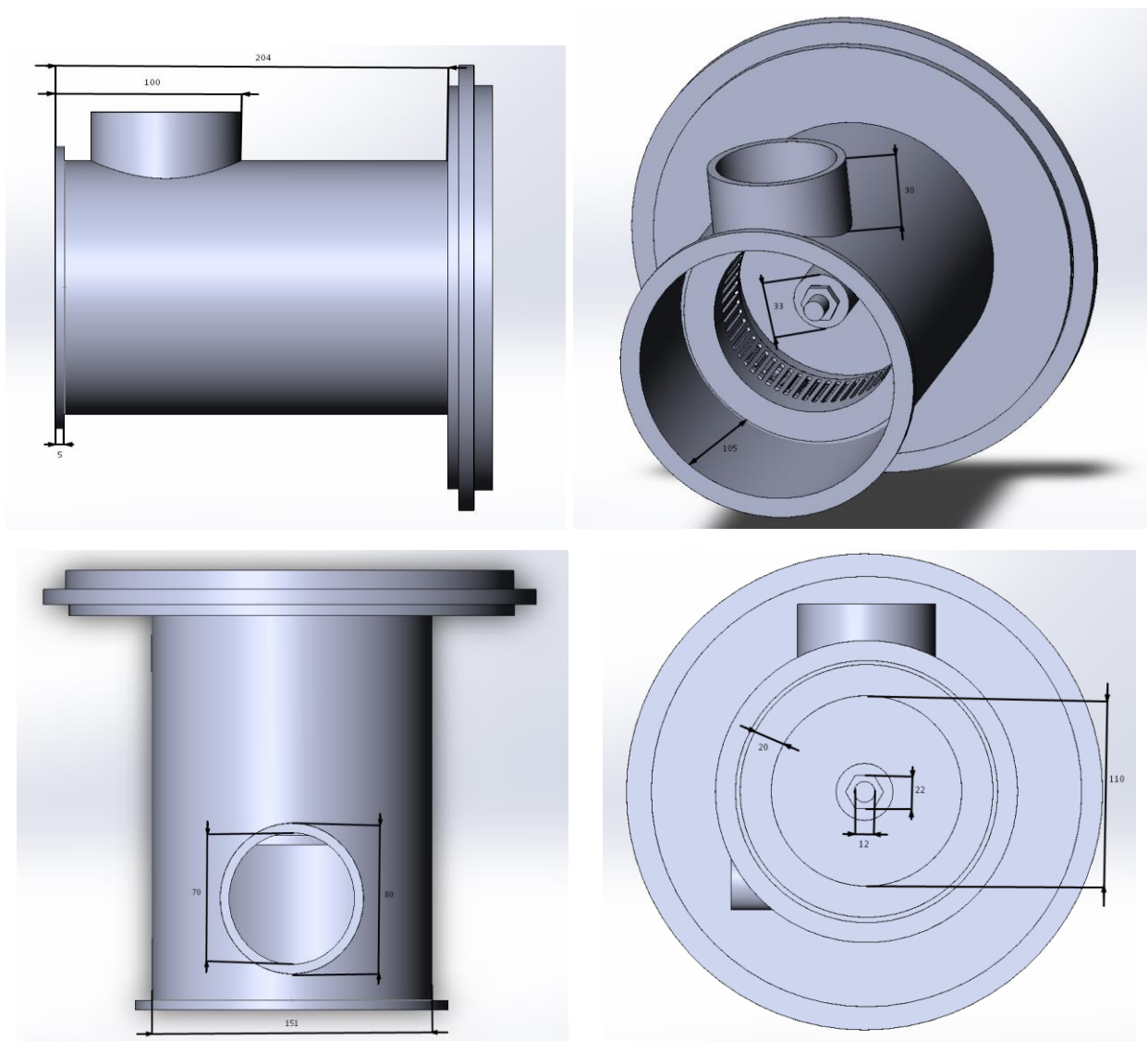


Рис. 2.12. Робочі креслення переробної камери РПА

В результаті чисельного моделювання було отримано поля тисків, швидкостей і температур в рідинній кормовій суміші, які дали можливість при варіюванні геометричних розмірів ротора і статора, величини зазору між ними та розмірів пазів на них вибрати конструкцію роторно-пульсаційної установки (Рис. 2.12), яка в подальшому буде використана для розробки експериментального зразка такого апарату.

Висновки по розділу 2

У другому розділі дисертаційної роботи проаналізовано та запропоновано нові конструктивні особливості електротехнічного комплексу для приготування рідких кормів на базі роторно-пульсаційних технологій, проведено чисельне моделювання процесів тепломасопереносу та гідродинаміки в розробленому РПА циліндричного типу.

1. Розглянуто основні фізичні процеси та їх вплив на обробку гетерогенних систем в роторно-пульсаційних апаратах. Проаналізовано високу ефективність впливу роторно-пульсаційних технологій при обробці гетерогенного середовища.
2. Запропоновано нові конструктивні особливості апарату на основі роторно-пульсаційних технологій, в якому реалізується широкий спектр впливу на процеси переробки водозернових сумішей для отримання рідкого корму для сільськогосподарських тварин. Робочою частиною апарату у вигляді коаксіально з'єднаних ротора і статора виконується процес подрібнення рідкого середовища під дією комплексу ефектів, які наявні за рахунок використання методу дискретно-імпульсного введення енергії.
3. Розроблено конструктивну модель переробної камери та робочих органів у вигляді ротора та статора для експериментально-дослідної установки в програмному пакеті Solidworks.

4. Проведено математичне моделювання процесів тепломасопереносу та гідродинаміки в роторно-пульсаційних апаратах в системному пакеті Ansys Fluent.
5. Отримано поля тисків, швидкостей і температур в рідинній кормовій суміші, які дали можливість при варіюванні геометричних розмірів ротора і статора, величини зазору між ними та розмірів пазів на них вибрати конструкцію роторно-пульсаційної установки, яка в подальшому буде використана для розробки експериментального зразка такого апарату.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТУ

3.1. Вибір електричного обладнання для приводу роторно-пульсаційної установки

В результаті проведення чисельного моделювання гідравлічних та тепломасообмінних процесів в роторно пульсаційному апараті було визначено оптимальні розміри робочої камери установки, ротора і статора, зазору між ними, кількість пазів на них та інших параметрів. Для проведення експериментально-дослідної роботи та повноцінного функціонування роторно-пульсаційного апарату також необхідно розробити електротехнічний комплекс, який зможе забезпечувати стабільну та безаварійну роботу даної установки. Для цього необхідно вибрати та встановити електричний привід, вимірювальне та допоміжне устаткування. Роторно-пульсаційний апарат буде приводитися в дію за допомогою електричного двигуна. Методика проведення експериментальних досліджень включає в себе вимірювання наступних параметрів: споживаної потужності, струму, напруги та коефіцієнту потужності установки, зміни температури та в'язкості кормової суміші по мірі її оброблення, визначення середньоповерхневого розміру частинок зерна у водозерновій суміші, швидкість потоку рідини в трубопроводі та її витрату. Також буде проводитися регулювання швидкості обертання ротора асинхронної машин за допомогою частотного перетворювача в межах від 1800 до 3000 об/хв. На рис. 3.1 показано загальний вигляд електротехнічного комплексу для роботи роторно-пульсаційної установки, який складається з різних компонентів, розрахунок та вибір яких приведено далі в цьому розділі.

Електротехнічний комплекс РПА працює за наступним алгоритмом(Рис. 3.1). Живлення комплексу відбувається від трифазної електричної мережі напругою 380 В. Для приводу роторно-пульсаційного апарату встановлено асинхронний двигун. До щитка керування роторно-пульсаційною установкою

входить автоматичний вимикач, магнітний пускач з тепловим реле та кнопковий пост. Експериментально-дослідна установка оснащена частотним перетворювачем для можливості регулювання частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна в ході експериментальних досліджень та для забезпечення плавності пуску асинхронного двигуна з метою зменшення величини пускової потужності і оптимізації його перехідних процесів. Перед частотним перетворювачем встановлений лічильник електричної енергії для вимірювання споживаної потужності під час виготовлення рідкого корму.

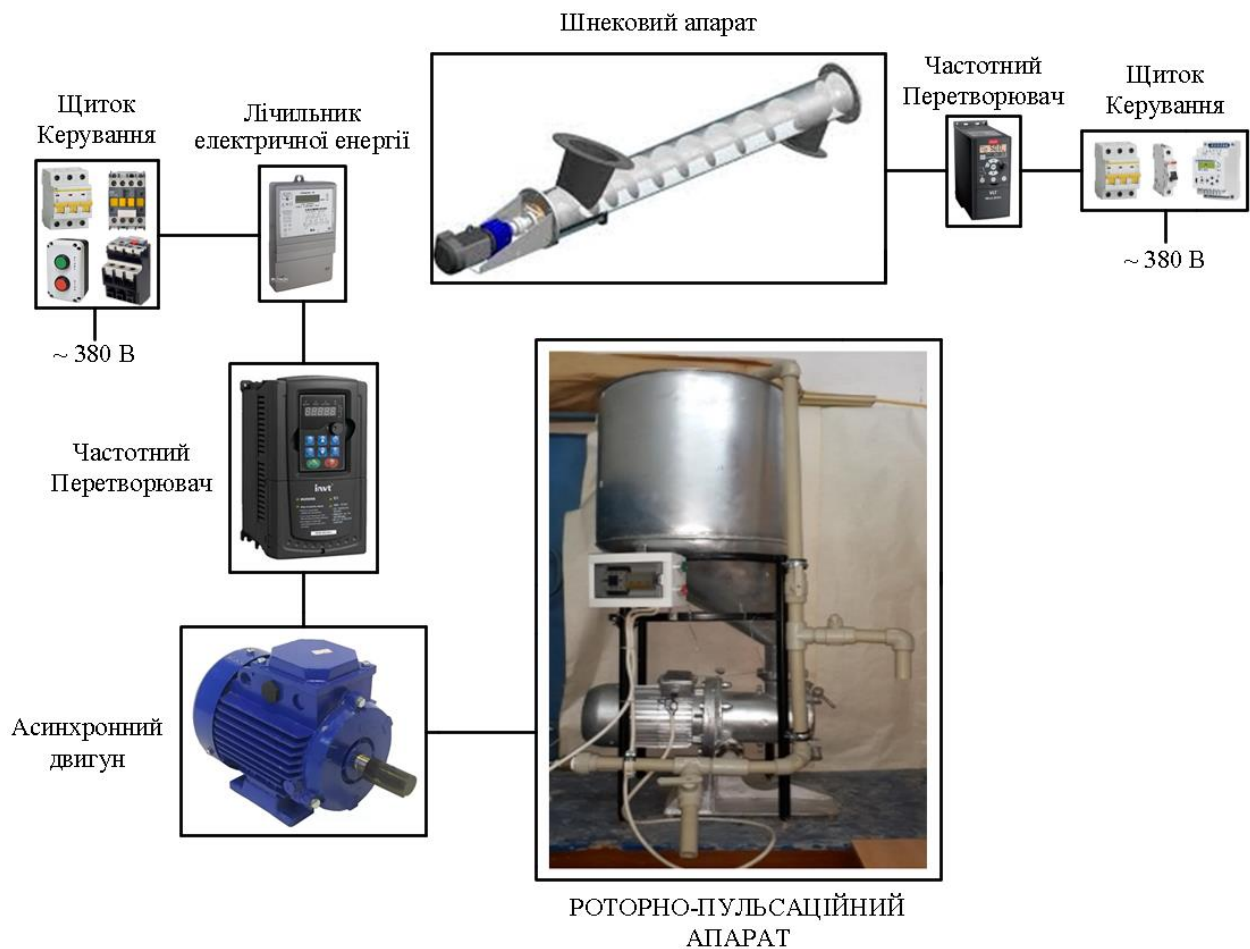


Рис. 3.1. Електротехнічний комплекс роторно-пульсаційної установки

Вимірювання енергетичних параметрів асинхронного двигуна, таких як споживана напруга та струм, виконувалось частотним перетворювачем. Коефіцієнт потужності вимірювався за допомогою фазометра. Для визначення швидкості обертання ротора двигуна в процесі подрібнення зерна було використано цифровий тахометр. Вал асинхронного двигуна з'єднується з

ротором РПА через муфту. Вимірювання температури рідкого корму проводилося за допомогою термометра, термопара якого встановлена в отворі на виході оброблюваного середовища з трубопроводу в бункер. Для визначення напірно-витратних характеристик (напір, витрата та швидкість потоку рідкого середовища) використовувався ультразвуковий витратомір, датчики якого розміщені на трубопроводі, по якому циркулює оброблювальна суміш. Для подачі та дозування зернового компонента до електротехнічного комплексу було включено шнековий апарат.

3.1.1. Вибір електричного двигуна

Перш за все, для виготовленої роторно-пульсаційної установки необхідно вибрати електричний двигун, який зможе привести експериментальний агрегат в роботу. Двигун за допомогою муфти буде з'єднаний з підшипниковим вузлом, до валу двигуна прикріпиться ротор з пазами, розміщений в робочій камері установки. Сама ж переробна камера буде закріплена на фланці підшипникового вузла.

Згідно з дослідженнями авторів [86], насосний коефіцієнт корисної дії роторно-пульсаційної установки становить близько 30-33%. Це означає, що даний відсоток потужності йде на перекачування крохмалевмісного середовища по установці, а тому залишок – близько 70%, який без урахування втрат на підшипники і втрат в навколишнє середовище, витрачається на подрібнення та на нагрівання корму, що особливо істотно з точки зору технологічного використання корисної роботи устаткування. Виходячи з цих тверджень, потужність електричного двигуна будемо визначати в залежності від насосного коефіцієнту корисної дії роторно-пульсаційної установки. Для визначення умовної потужності насоса візьмемо набір даних, визначених при чисельному моделюванні роторно-пульсаційної установки в попередньому розділі. Як було з'ясовано раніше, чисельне значення робочого тиску в системі каналів ротор-статор сягає 55 кПа, середнє значення швидкості потоку кормової суміші в трубопроводі – 1,5-2 м/с. Масова витрата суміші становить

0,92 кг/с, її густина – 929 кг/м³(при вмісті твердої фази в зерновій суміші 30%). При збільшенні вмісту твердої фази тиск в камері збільшиться за рахунок збільшення в'язкості середовища. Далі виконуємо спрощений гідравлічний розрахунок насосного ККД для роторно-пульсаційного апарату.

Обчислюємо внутрішній діаметр напірного трубопроводу за наступною залежністю:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot v}} \quad (3.1)$$

де G – масова витрата рідини, кг/с; ρ – густина рідини, кг/м³; v – швидкість руху рідини в трубопроводі, м/с.

Підставивши вихідні дані у формулу (3.1) знаходимо внутрішній діаметр трубопроводу, який рівний $d = 0,0251$ м. Після цього необхідно прийняти стандартні розміри внутрішнього діаметру трубопроводу. Вибираємо поліпропіленовий трубопровід з внутрішнім діаметром 26,6 мм. Після того, як приймається діаметр трубопроводу, необхідно вирахувати дійсну швидкість рідини в трубопроводі, м/с:

$$v = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot d^2} \quad (3.2)$$

Дійсна швидкість потоку кормової суміші після вибору діаметру трубопроводу становить $v = 1,78$ м/с, що задовольняє результати чисельного моделювання.

Далі визначаємо необхідний напір насоса для роторно-пульсаційного апарату. Напір насоса повинен бути таким, щоб він міг подавати воду при потрібному тиску в задану точку, тобто з робочої камери в бункер. Необхідний напір насоса є рівним сумі геодезичного напору, втратами по довжині трубопроводу та тиском всередині робочої камери. Розрізняють гідравлічний опір по довжині трубопроводу – це втрати на тертя, які залежать від довжини та площі перерізу трубопроводів, в'язкості рідини та швидкості руху потоку рідкого середовища, та місцеві гідравлічні опори, де відбувається зміна швидкості за напрямком та величиною потоку.

Повний напір, що розвивається насосом визначається за формулою:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} + H_z + h_n \quad (3.3)$$

де P – тиск в робочій камері РПА, Па; g – прискорення вільного падіння, м/с²; H_z – геодезичний тиск, м; h_n – втрати напору по довжині трубопроводу, м.

Із розрахунку слідує, що напір насосної установки складає $H = 17,54$ м. Визначаємо корисну потужність насоса за формулою:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (3.4)$$

де Q – об'ємна витрата рідини, м³/с; H – повний напір насоса, м.

Для визначення необхідної потужності електродвигуна для насосної установки використовуємо наступну формулу:

$$P_{\text{дв}} = \frac{k_z \cdot N}{\eta_n \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{дв}}} \quad (3.5)$$

де k_z – коефіцієнт запасу міцності ($k_z = 1,2 \dots 1,7$); N – корисна потужність насоса, Вт; η_n , η_n та $\eta_{\text{дв}}$ – відповідно ККД насоса, передачі та двигуна.

Корисна потужність насоса із рівняння (3.4) становить 160 Вт. Для відцентрових насосів ККД рівний 0,5-0,75. Коефіцієнт корисно дії передачі приймаємо $\eta_n = 0,95$. Середній ККД електродвигуна приймаємо рівним $\eta_{\text{дв}} = 0,8$. З рівняння (3.5) витікає, що для насоса РПА максимально можлива необхідна потужність складає близько 716 Вт. Оскільки дана величина становить 30% від всієї необхідно потужності для роторно-пульсаційної установки, то потужність електричного двигуна, який треба встановити в роторно-пульсаційну установку, приймаємо не менше 2,5 кВт.

Електродвигун вибирають за такими основними ознаками: родом струму; напругою; режимом роботи; частотою обертання; потужністю; електричною модифікацією; конструктивним виконанням та способом монтажу; кліматичним виконанням і категорією розміщення; ступенем захисту персоналу від доторкання до струмоведучих або рухомих частин, що

знаходяться всередині його корпусу, та від потрапляння всередину корпусу твердих сторонніх тіл і води.

За родом струму електродвигун вибирають відповідно до роду струму електричної мережі, від якої він буде живитись. У сільському господарстві використовують мережі змінного струму, тому і електродвигун вибираємо змінного струму. За напругою електродвигун вибирають так, щоб його номінальна напруга відповідала напрузі електромережі, в яку він буде вмикатися. Живлення електродвигуна передбачається трифазним змінним струмом напругою 380 В та частотою 50 Гц. За режимом роботи (тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний та інші) двигун вибирають відповідно до режиму роботи машини, для приводу якої він призначений. Для обробки водозернової суміші в РПА необхідно постійно підтримувати постійну роботу апарата без перебоїв та вимикань до кінцевого подрібнення зернових компонентів. За потужністю електродвигун будемо вибирати, відштовхуючись від попередніх розрахунків, з яких випливає, що потужність двигуна повинна бути мінімум 2,5 кВт.

За конструктивним виконанням і способом монтажу електродвигун вибирають залежно від конструктивних особливостей робочої машини і передавального пристрою та їх розташування на місці встановлення. За кліматичним виконанням і категорією розміщення двигун вибирають відповідно до кліматичних умов району, в якому він буде експлуатуватися, та характеристики місця його розташування. Оскільки експериментально-дослідна установка буде знаходитись в лабораторії, вибираємо двигун для роботи у приміщеннях з природною вентиляцією без штучного мікроклімату. За ступенем захисту персоналу від доторкання до струмоведучих або рухомих частин, що знаходяться всередині корпусу двигуна, і від потрапляння всередину корпусу твердих сторонніх тіл та води двигун вибирають відповідно до характеристики навколишнього середовища, в якому він буде працювати. Вибираємо електродвигун із ступенем захисту IP44 (закрите

виконання) – захист від проникнення під оболонку твердих тіл діаметром більше 1 мм, захист від бризів води будь-якого напрямку.

Навантаження на двигун буде постійне, режим роботи електродвигуна довготривалий. Ступінь захисту електродвигуна від дії навколишнього середовища вибираємо IP44, оскільки установка буде знаходитись в лабораторії.

Для роботи роторно-пульсаційного апарату вибираємо асинхронний електричний двигун серії 4АМУ 90L2(Рис. 3.2) потужністю 3 кВт, технічні та експлуатаційні характеристики якого приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Технічні та експлуатаційні характеристики електродвигуна

Найменування електродвигуна	4АМУ 90L2
Тип	Асинхронний
Споживча потужність, кВт	3,0
Частота обертання, об/хв	2850
Фазність	3-фазний
Коефіцієнт потужності	0,87
Кількість полюсів	2
Ступінь захисту	IP44
ККД, %	82,5
Номінальна напруга, В	380
Ковзання, %	5,0
Номінальний струм, А	6,4
Кліматичне виконання	У3
Режим роботи	S1, тривалий
Кратність пускового струму	6,5
Частота мережі живлення, Гц	50
Момент інерції ротора, кг·м ²	0,0029



Рис. 3.2. Електродвигун серії 4AMU 90L2

3.1.2. Дослідження перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна РПА в програмному пакеті Matlab

Сільськогосподарські машини та агрегати через особливості своїх технологічних процесів, неякісну електричну енергію в сільській мережі та некваліфікований персонал по статистиці мають часті аварійні режими роботи, наявність тривалих або короткочасних перевантажень та велику кількість відмов електродвигунів. Такі режими характерні для асинхронних двигунів дробарок, подрібнювачів кормів, змішувачів кормів, транспортерів, тощо. Електричні двигуни славляться своїм досить високим коефіцієнтом корисної дії (близько 80-90 %) в порівнянні з іншими приводними механізмами. Проте слід зазначити, що ці цифри є справедливими лише для роботи в номінальному режимі, під час перехідних процесів електричні втрати суттєво підвищуються. Одним з найбільш затратних процесів являється пуск електродвигуна: для досягнення необхідної швидкості двигуна треба забезпечити підвищення моменту на валу, який призводить до зростання електричного струму i , відповідно, до квадратичного збільшення електричних витрат [87, 88, 89].

Для захисту електричних двигунів в перехідних режимах створено велику кількість засобів захисту. При цьому захисне обладнання, при виникненні тривалого перевантаження, зазвичай, відключає двигун від

електричної мережі. В наслідок цього зупиняється технологічний процес, що призводить до значних економічних збитків. Перевантаження може виникати не лише в процесі роботи електропривода, але й при його включенні в мережу, коли пусковий момент електродвигуна стає меншим за момент навантаження. В такому випадку ротор двигуна перебуває загальмованим, що є досить небезпечним аварійним режимом. Загальмування ротора електродвигуна також може відбуватися у випадках, коли під час його роботи момент навантаження стає більшим за максимальний момент. У цих випадках виявляється неможливим запуск двигуна до усунення усіх причин його перевантаження. Поліпшити пускові властивості перевантаженого в момент пуску асинхронного двигуна можна змінюючи початкові умови включення двигуна в мережу – початкову фазу напруги живлення, кутове положення ротора тощо [90].

Трифазні асинхронні двигуни мають незадовільні пускові характеристики. Сила пускового струму трифазного асинхронного двигуна перевищує номінальну силу струму в 6-8 разів. Також у момент пуску обертальний момент двигуна є малим, тому запуск двигуна необхідно здійснювати без навантаження. Для визначення правильності вибору електричного двигуна буде проведено моделювання перехідних процесів асинхронного двигуна для приводу роторно-пульсаційної установки серії 4AMU90L2 за допомогою прикладного пакету програм Matlab Simulink.

Для розрахунку перехідних параметрів при пуску реальний асинхронний електродвигун замінюється еквівалентною схемою його заміщення, в якій електромагнітний зв'язок замінюється на електричний. При цьому параметри ланцюга ротора наводяться до відповідних параметрів ланцюга статора. У асинхронного двигуна існує Т-подібна та Г-подібна схеми його заміщення. Більш зручною при практичних розрахунках є Г-подібна схема заміщення. Як правило, в каталогах на асинхронні двигуни наводяться такі технічні дані: номінальні потужність, напруга та струм; номінальна частота обертання та ковзання машини; ККД та коефіцієнт потужності; кратність пускового струму

та моменту. Ці дані дозволяють розрахувати параметри схеми заміщення асинхронного двигуна з тим нюансом, що активні опори обмоток ротора і статора є незалежними від режиму роботи двигуна, тобто ефекти витіснення струму не враховуються [91, 92]. Далі проводимо розрахунок параметрів схеми заміщення, необхідних для моделювання перехідних процесів асинхронного двигуна в пакеті Matlab Simulink.

Визначення параметрів схеми заміщення вибраної асинхронної машини за каталожними даними

1. Критичне ковзання:

$$S_{кр} = S_n \left(\frac{M_{макс}}{M_n} + \sqrt{\left(\frac{M_{макс}}{M_n} \right)^2 - 1} \right) \quad (3.6)$$

де S_n – номінальне ковзання асинхронного двигуна; $M_{макс}/M_n$ – відношення максимального моменту(критичного) до номінального моменту.

$$S_{кр} = 0,05 \left(2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1} \right) = 0,24$$

2. Механічні втрати в двигуні, Вт:

$$\Delta P_{мех} = \frac{P_n}{6} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (3.7)$$

де P_n – номінальна потужність двигуна, Вт; η – ККД електродвигуна.

$$\Delta P_{мех} = \frac{3000}{6} \cdot \left(\frac{1}{0,825} - 1 \right) = 106,06$$

3. Опір обмотки статора:

$$R_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_n^2 (1 - S_n)}{c_1 \left(1 + \frac{c_1}{S_{кр}} \right) \cdot m_k (P_n + \Delta P_{мех})} \quad (3.8)$$

де U_n – номінальна напруга, В; c_1 – конструктивний коефіцієнт, який задається в діапазоні 1,02...1,05; m_k – кратність пускового моменту.

$$R_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{380^2 (1 - 0,05)}{1,02 \left(1 + \frac{1,02}{0,24}\right) \cdot 2,1(3000 + 106,06)} = 1,9637$$

4. Опір обмотки ротора, Ом:

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{m_\kappa (P_H + \Delta P_{Mex})}{(i_\kappa \cdot I_H)^2 \cdot (1 - S_H)} \quad (3.9)$$

де i_κ – кратність пускового струму; I_H – номінальний струм двигуна, А.

$$R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{2,1(3000 + 106,06)}{(6,5 \cdot 6,4)^2 \cdot (1 - 0,05)} = 1,3225$$

5. Індуктивність статора і ротора, Гн:

$$L_s \cong L_r = \frac{1}{2\pi \cdot f_H} \cdot \frac{\frac{U_H}{\sqrt{3}}}{I_H \left(\sqrt{1 - \cos^2 \varphi} - \cos \varphi \cdot \frac{S_H}{S_{kp}} \right)} \quad (3.10)$$

де f_H – номінальна частота мережі, Гц; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

$$L_s \cong L_r = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{6,4 \left(\sqrt{1 - 0,87^2} - 0,87 \cdot \frac{0,05}{0,24} \right)} = 0,3509$$

6. Індуктивність розсіювання статора і ротора, Гн:

$$L_{is} \cong L_{ir} = \frac{1}{4\pi \cdot f_H} \cdot \sqrt{\left[\frac{U_H}{\sqrt{3}} / (i_\kappa \cdot I_H) \right]^2 - (R_s + R_r)^2} \quad (3.11)$$

$$L_{is} \cong L_{ir} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \sqrt{\left[\frac{380}{\sqrt{3}} / (6,5 \cdot 6,4) \right]^2 - (1,9637 + 1,3225)^2} = 0,006595$$

7. Взаємна індуктивність, Гн:

$$L_m = L_s - L_{is} \quad (3.12)$$

$$L_m = 0,3509 - 0,006595 = 0,3443$$

В таблиці 3.2 наведено параметри схеми заміщення асинхронного електродвигуна, необхідні для моделювання перехідних процесів при пуску

установки в прикладному пакеті програми Matlab Simulink. Для дослідження перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна приймаємо, що він розганяється при відсутності навантаження на валу. У момент часу 1 с на вал двигуна подається статичний момент навантаження, який дорівнює номінальному моменту двигуна:

$$M_c = M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 60}{2\pi \cdot n_{ном}} \quad (3.13)$$

$$M_{ном} = \frac{3000 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 2850} = 10,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таблиця 3.2

Параметри схеми заміщення асинхронного двигуна серії 4АМУ90L2

Номінальне ковзання	0,05
Опір обмотки статора, Ом	1,9637
Опір обмотки ротора, Ом	1,3225
Індуктивність статора і ротора, Гн	0,3509
Індуктивність розсіювання, Гн	0,006595
Взаємодукція, Гн	0,3443

Струми та напруги фаз статора та ротора асинхронного електродвигуна можна представити в якості просторового вектору, який призводить до спрощення структури та кількості рівнянь, які описують робочі процеси асинхронної машини. Суть методу просторового вектора полягає в тому, що миттєві значення симетричних трифазних змінних, таких як напруга, струм, потокозчеплення, можна математично перетворити так, щоб вони були представлені одним просторовим вектором. При побудові реальних систем електроприводу змінного струму майже завжди в систему керування вводиться фазний перетворювач 3/2 та 2/3. Основний сенс даного перетворювача координат полягає в заміні реальної трьохфазної машини еквівалентною двофазною моделлю, яка має аналогічні значення просторового вектора. Ця заміна змінних величин широко застосовується при математичному дослідженні електричних машин з метою спрощення систем

диференціальних рівнянь електричної рівноваги кіл ротора і статора. З метою вираження перехідних процесів для асинхронних машин використовується нерухома система координат, яка являється нерухомою відносно статора.

Математична модель асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором включає систему рівнянь рівноваги напруги статора та ротора, які записуються у відповідності до закону Кірхгофа у трифазній системі координат. Диференціальне рівняння електричної рівноваги кола як статора, так і ротора для миттєвих значень напруги, струму та потокозчеплення, що записані у матричній формі [93, 94, 95], для двигуна має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_s &= R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ 0 &= R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$[u_s], [i_s], [\psi_s]$ – матриці миттєвого значення прикладеної напруги, струму та потокозчеплення фаз A, B, C обмотки статора; $[i_r], [\psi_r]$ – матриці миттєвого значення струму та потокозчеплення фаз a, b, c обмотки ротора. Матриці активних опорів обмотки статора і приведених до статора активних опорів обмотки ротора мають такий вигляд:

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix}; [R_r] = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Обертовий магнітний потік взаємоіндукції створює потокозчеплення машини, обумовлене протіканням струму намагнічування. Потокозчеплення будь-якої фази статора або ротора визначаються величиною власної індуктивності обмоток і взаємної індуктивності з усіма іншими обмотками.

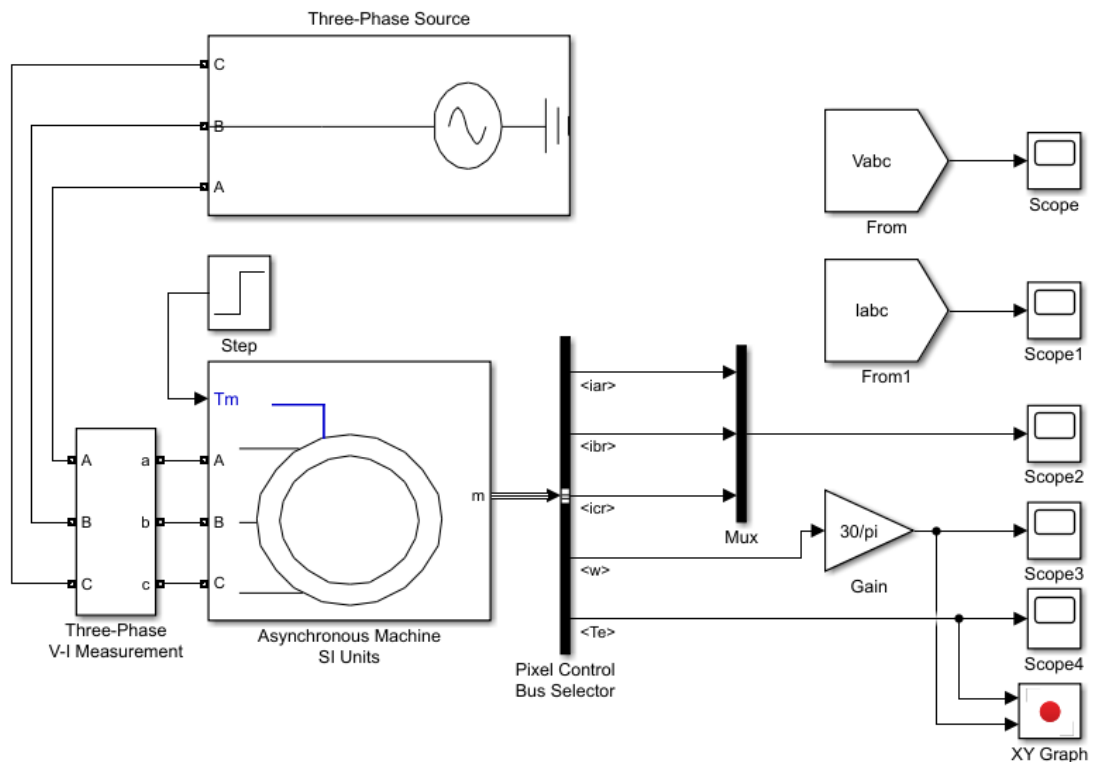


Рис. 3.4. Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в програмному пакеті Matlab Simulink

На рис. 3.4 представлено схему моделювання процесу пуску асинхронного двигуна. Віртуальна модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (Asynchronous Machine) була вибрана із розділу бібліотеки SimPowerSystem в абсолютних одиницях (SI Units). В рядку Rotor type даного блоку вибрано варіант Squirrel cage – короткозамкнутий двигун (з білячою кліткою). В рядку Reference frame вибрано варіант вибору системи координат – Stationary (нерухома система). Розраховані параметри схеми заміщення асинхронного двигуна (таблиця 3.3) записуються у вікні Parameters. На вкладці Configuration необхідно вибрати пункт Use signal names to identify bus labels. У властивостях шини Bus Selector вибираються значення струмів фаз обмотки ротора (i_{ar} , i_{br} , i_{cr}), швидкість обертання ротора (w) та електромагнітний момент двигуна (T_e). Значення струмів фаз обмотки статора та напруги виводиться за допомогою блоків From (Signal routing). До входу T_m задається активний момент навантаження в Н·м. Час моделювання пуску АД прийнято 1,4 секунди. Повний час моделювання процесу складає 2 секунди.

Для переведення величини вимірювання швидкості обертання ротора асинхронного двигуна з рад/с в об/хв було використано блок Gain.

На рис. 3.5 показано отримані результати моделювання перехідних процесів струму в обмотках статора вибраного асинхронного двигуна серії 4АМУ90L2 для приводу роторно-пульсаційної установки.

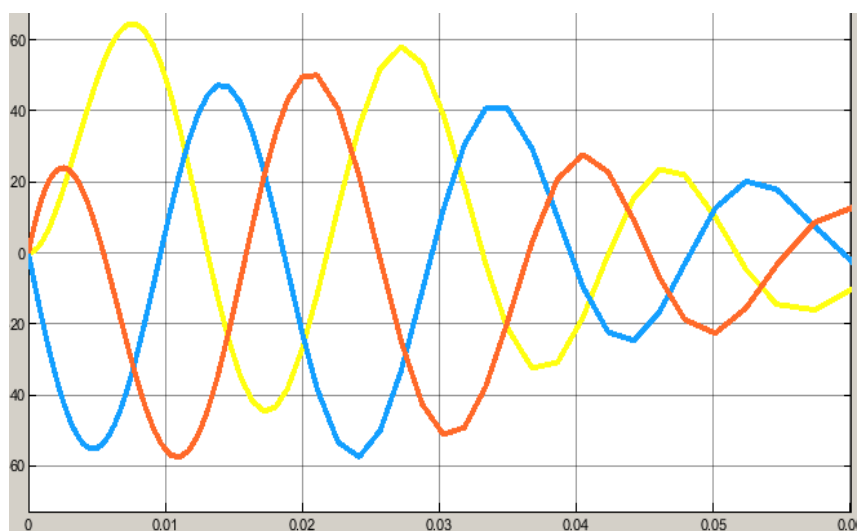


Рис. 3.5. Струм в обмотках статора при пуску АД

Динамічну механічну характеристику асинхронного двигуна можна отримати лише за результатами розрахунків перехідних процесів швидкості обертання ротора двигуна та його електромагнітного моменту. Перехідні процеси при пуску АД прямим включенням в мережу показані на рис. 3.6-3.7.

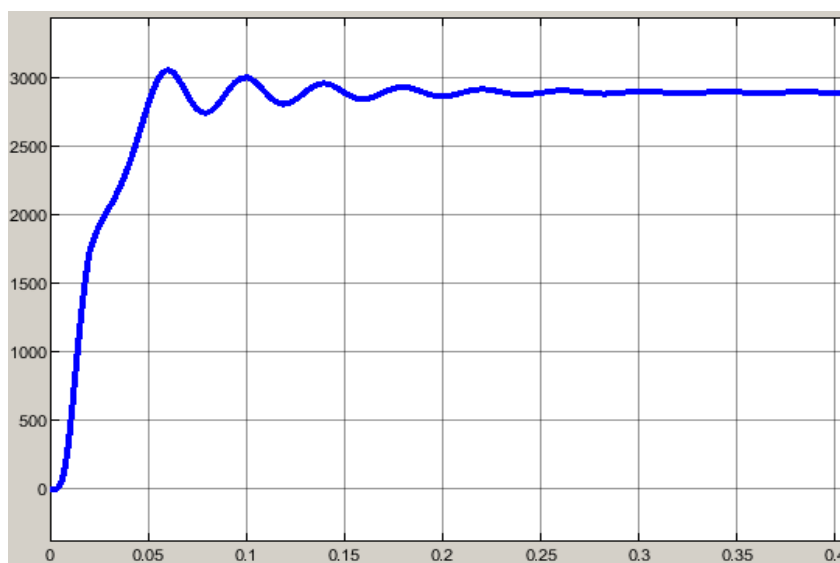


Рис. 3.6. Швидкість обертання ротора АД в момент пуску

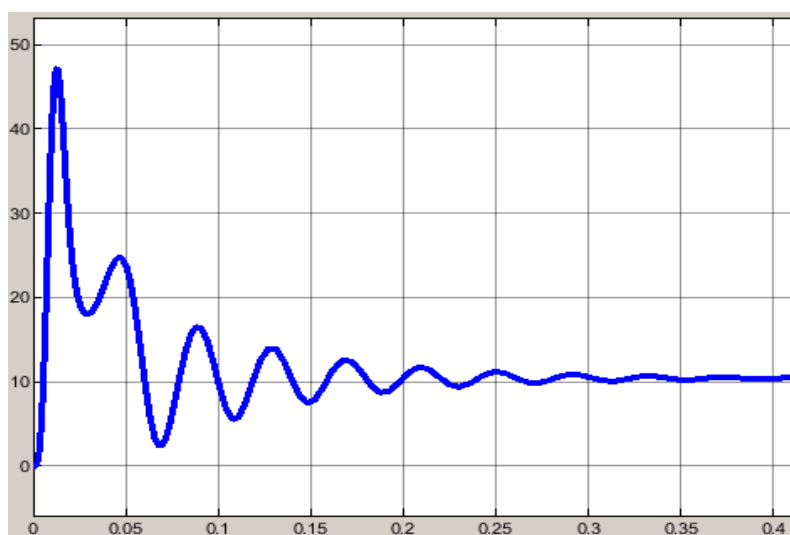


Рис. 3.7. Електромагнітний момент на валу асинхронного двигуна

При пуску асинхронного двигуна на нього подається напруга з прямим чергуванням фаз, починається процес розгону двигуна під номінальним навантаженням 10,05 Н·м. Пусковий струм в обмотці статора досягає свого амплітудного значення в 41,75 А. Приблизно такого ж значення досягає струм в обмотці ротора, оскільки виводиться приведенне значення струму ротора в його обмотці до струму в обмотці статора. Максимальне значення електромагнітного моменту двигуна при пуску становить близько 47,15 Н·м. Він носить коливальний характер, що в свою чергу призводить до погіршення пускових характеристик двигуна і являється недоліком усіх асинхронних машин. При підвищенні частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна коливання моменту поступово згасають. При цьому струми в обмотках статора зменшуються при сталій частоті в 50 Гц. Струми в обмотці ротора також зменшується, але частота струмів ротора зменшується разом з цим. Це пояснюється вибором нерухомої системи координат [96, 97].

На рис. 3.8 наведено зняту під час пуску асинхронного двигуна динамічну механічну характеристику ($M=f(n)$). Динамічною механічною характеристикою асинхронного двигуна називається залежність між миттєвими значеннями швидкості (або ковзання) та моменту електричної машини для одного і того ж моменту часу перехідного режиму роботи. Динамічна механічна характеристика визначається не лише параметрами

схеми заміщення асинхронного двигуна, але й параметрами електроприводу, такими як еквівалентний момент інерції та момент опору на валу двигуна. Звідси виходить, що асинхронний двигун при даних параметрах мережі живлення та схемі заміщення має одну статичну і безліч динамічних механічних характеристик. Облік лише статичної характеристики АД може призвести до не зовсім вірних результатів та спотворення характеру динамічних навантажень при пуску установки. Коливальні процеси моменту при пуску електродвигуна можна побачити на вершині графіка при пікових значеннях частоти обертання ротора двигуна [98].

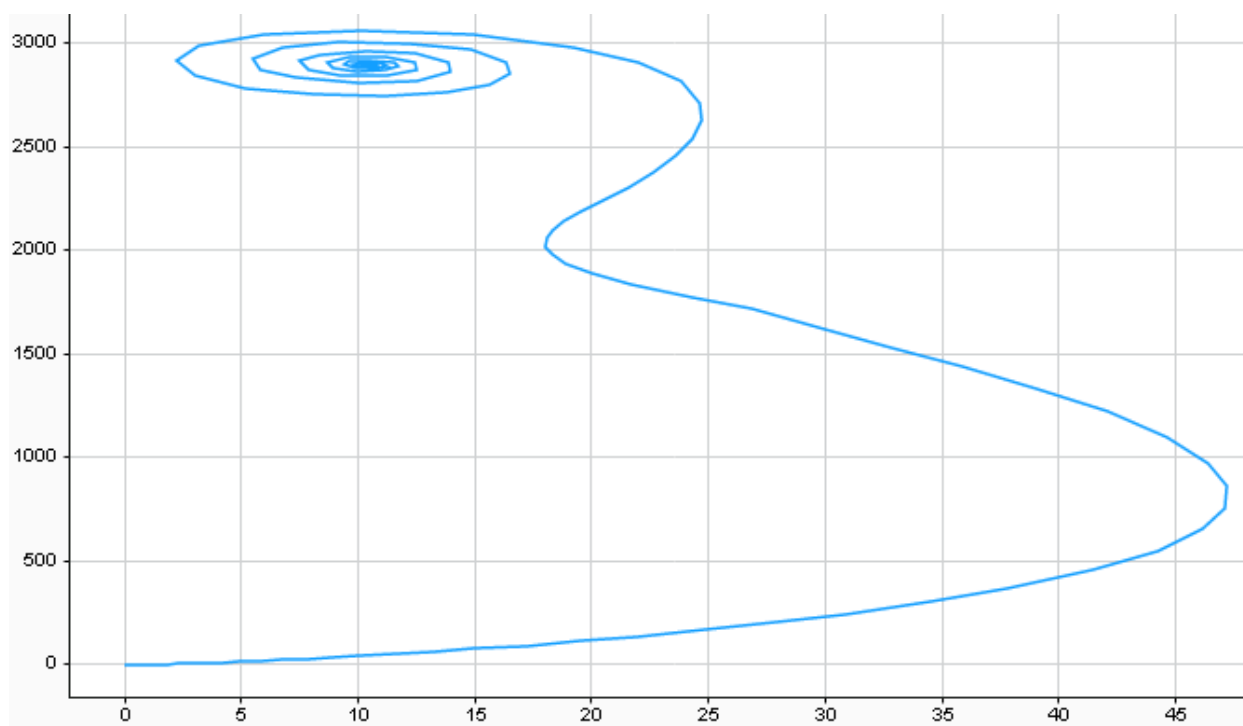


Рис. 3.8. Динамічна механічна характеристика при пуску АД

Аналіз динамічної механічної характеристики асинхронного двигуна (Рис. 3.8) показує, що максимальні ударні моменти при пуску перевищують номінальний момент статичної механічної характеристики більш ніж в 4,5 разів. Ударні моменти при пуску, і особливо при реверсі асинхронного двигуна, призводять до виходу з ладу кінематики виробничих механізмів і самого асинхронного двигуна. Далі виконуємо побудову природної механічної характеристики АД.

Побудова природної статичної механічної характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з достатньою точністю можна виконати за формулою Клосса. Оскільки потужність вибраного електродвигуна невелика, то розрахунки необхідно проводити не за спрощеною, а за уточненою формулою Клосса, в якій вводиться додатковий параметр q . Вона дає достатню точність розрахунків при побудові робочої ділянки статичної механічної характеристики в межах зміни ковзання від нуля до критичного значення. Ділянку пускового та мінімального моменту можна побудувати за паспортними даними по характерним точкам. Уточнена формула Клосса має наступний вигляд:

$$M = \frac{M_{кр} (2 + q)}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S} + q} \quad (3.17)$$

де $M_{кр}$ – критичний(максимальний) момент асинхронного двигуна, q – додатковий параметр.

Критичне ковзання для побудови природної механічної характеристики асинхронного двигуна розраховують за виразом:

$$S_{кр} = \frac{S_n + \sqrt{k \cdot S_n}}{1 + \sqrt{k \cdot S_n}} \quad (3.18)$$

де k – допоміжний коефіцієнт, який дорівнює 7,875.

$$S_{кр} = \frac{0,05 + \sqrt{7,875 \cdot 0,05}}{1 + \sqrt{7,875 \cdot 0,05}} = 0,413$$

Параметр q можна знайти за наступною формулою:

$$q = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{S_{кр}}} - \sqrt{S_{кр}} \right)^2}{\frac{m_{кр}}{m_n} - 1} - 2 \quad (3.19)$$

$$q = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{0,42}} - \sqrt{0,42} \right)^2}{\frac{2,5}{2,1} - 1} - 2 = 2,256$$

Для можливості побудови механічної характеристики також необхідно визначити значення максимального, пускового та мінімального моменту асинхронного двигуна за каталожними даними:

$$M_{кр} = m_{кр} \cdot M_n \quad (3.20)$$

$$M_n = m_n \cdot M_n \quad (3.21)$$

$$M_n = m_{мін} \cdot M_n \quad (3.22)$$

де $m_{кр}$, m_n та $m_{мін}$ – відповідно кратність критичного, пускового та мінімального моменту.

$$M_{кр} = 2,5 \cdot 10,05 = 25,125 H \cdot m$$

$$M_n = 2,1 \cdot 10,05 = 21,105 H \cdot m$$

$$M_n = 1,3 \cdot 10,05 = 13,065 H \cdot m$$

В рівняння (3.17) підставляємо послідовно значення ковзання від нуля до одиниці (через певні проміжки, які вибираємо довільно з урахуванням значень номінального та критичного ковзання). Для кожного вибраного значення ковзання розраховуємо значення моменту за уточненою формулою Клосса. При значеннях ковзання від $S = 0,413$ до $S = 1$ (пусковий режим двигуна) використання формули Клосса призводить до великої похибки при розрахунку пускового моменту, особливо для двигунів невеликої потужності. Тому при розрахунках пускового моменту асинхронного двигуна доцільно використовувати паспортні дані двигуна, за якими будуються точка пускового моменту ($S = 1$) та точка мінімального моменту ($S = 0,8$). Результати проведених розрахунків зводимо до таблиці 3.3. За результатами даних таблиці будуємо природну статичну механічну характеристику асинхронного електродвигуна 4АМУ90L2 (рис. 3.9).

Таблиця 3.3

Результати розрахунків статичної механічної характеристики за рівнянням

Клосса ($S = 0 \dots 0,413$) та каталожними даними ($S = 0,413 \dots 1$)

S	1	0,8	0,413	0,3	0,2	0,1	0,05	0
M, Н·м	21,105	13,065	25,125	24,53	22,25	16,13	10,05	0

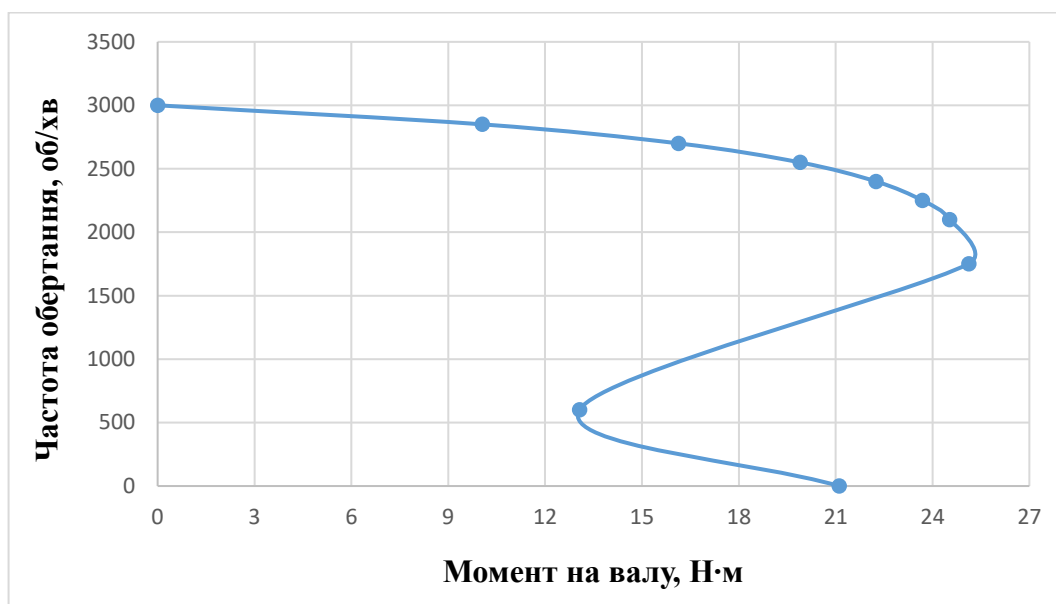


Рис. 3.9. Природна статична механічна характеристика АД 4АМУ90L2

Принцип формування динамічного пускового моменту асинхронного двигуна, який перевищує пусковий момент двигуна, що визначається за статичною механічною характеристикою, впливає з розгляду цих самих статичної та динамічної механічної характеристики асинхронної машини [89]. Разом з тим, в кривій динамічного моменту є негативні провали, внаслідок чого результуючий момент при пуску АД буде меншим максимально можливого моменту. Це добре видно на рис. 3.8. З аналізу механічних характеристик асинхронного двигуна можна зробити висновок про те, що якщо при пуску двигуна будь-яким чином формувати його динамічні характеристики, виключаючи або зменшуючи негативні провали в кривій моменту, то можливо істотно підвищити пускову здатність установки. З метою усунення аварійного режиму під час пуску асинхронного двигуна можна

використати такий прилад як частотний перетворювач. Частотні перетворювачі дозволяють здійснювати м'який пуск електричних машин, обмежувати пускові струми, синхронізувати момент сили на валу з моментом навантаження, здійснювати точне регулювання швидкості обертання, підключати трифазні двигуни в однофазну мережу без конденсаторів.

Далі для порівняльного аналізу проводимо моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна роторно-пульсаційної установки з використанням частотного перетворювача. На рис. 3.10 представлено схему моделювання процесу пуску асинхронного двигуна з впровадженням частотного перетворювача в програмному пакеті Matlab Simulink.

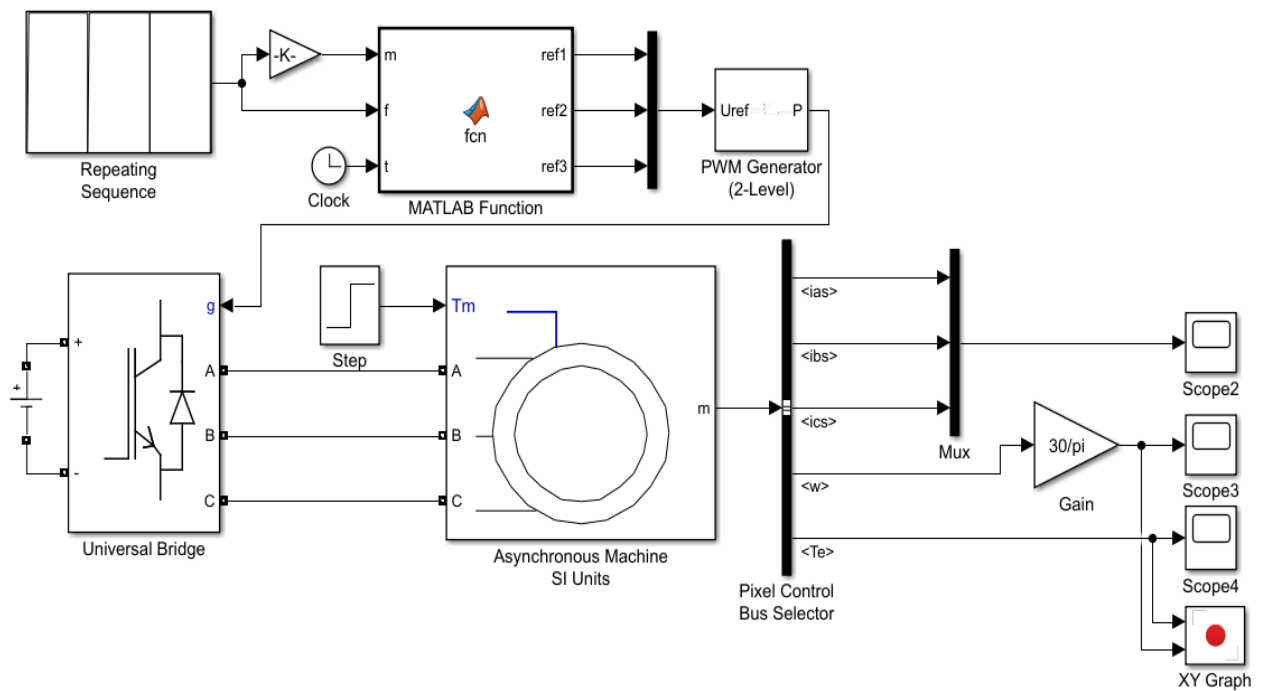


Рис. 3.10. Схема моделювання пуску АД з частотним перетворювачем

Частотний перетворювач представлений блоками Universal Bridge – універсальний трифазний перетворювач електроенергії та PWM Generator – генератор імпульсів для перетворювача на основі широтно-імпульсної модуляції з використанням дворівневої топології. Блок Repeating Sequence призначений для виводу періодичного скалярного сигналу із заданою нами формою. В блоці Matlab Function вводяться функції для заданих параметрів

коефіцієнту модуляції, часу та частоти. В діалоговому вікні блока Universal Bridge необхідно вибрати потрібний силовий електронний пристрій (Power Electronic device), а саме – IGBT / Diodes.

На рис. 3.11-3.13 показані результати моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна роторно-пульсаційної установки з використанням частотного перетворювача.

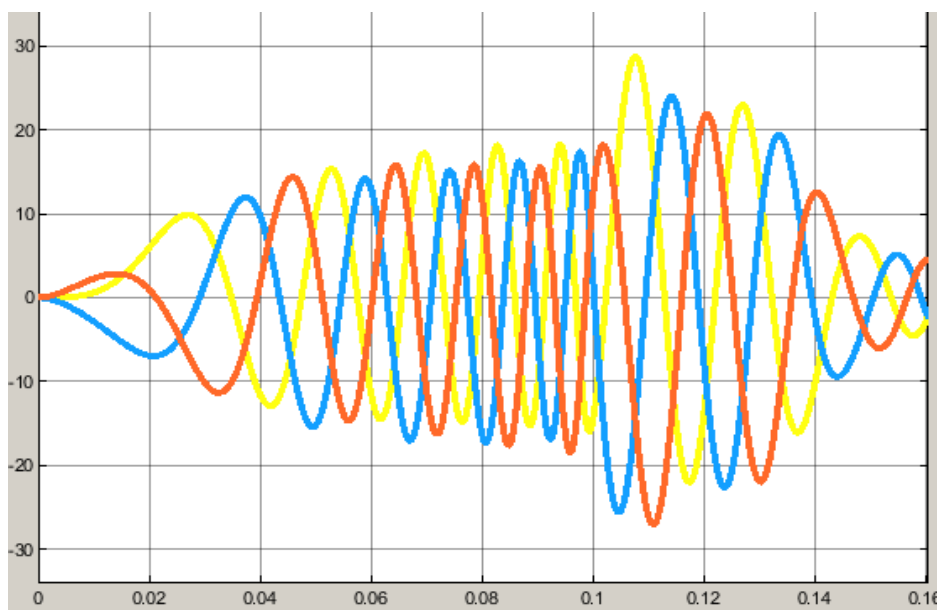


Рис. 3.11. Струм в обмотках статора при пуску АД з використанням ЧП

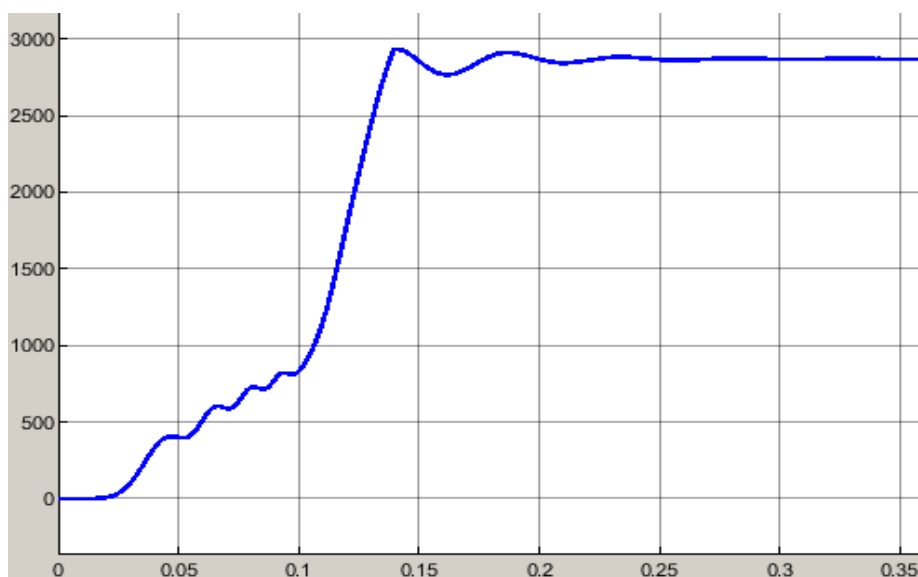


Рис. 3.12. Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна при пуску з використанням частотного перетворювача

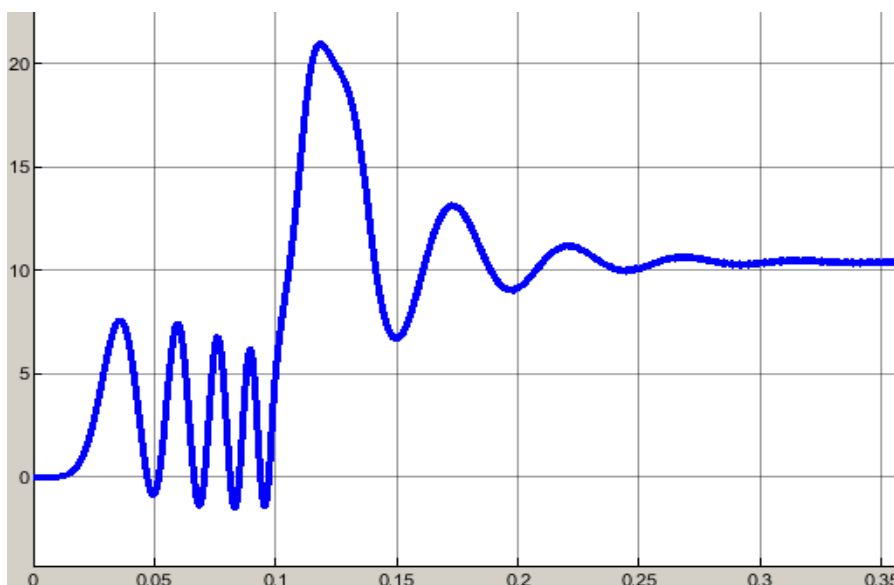


Рис. 3.13. Електромагнітний момент на валу асинхронного двигуна при його пуску з використанням частотного перетворювача

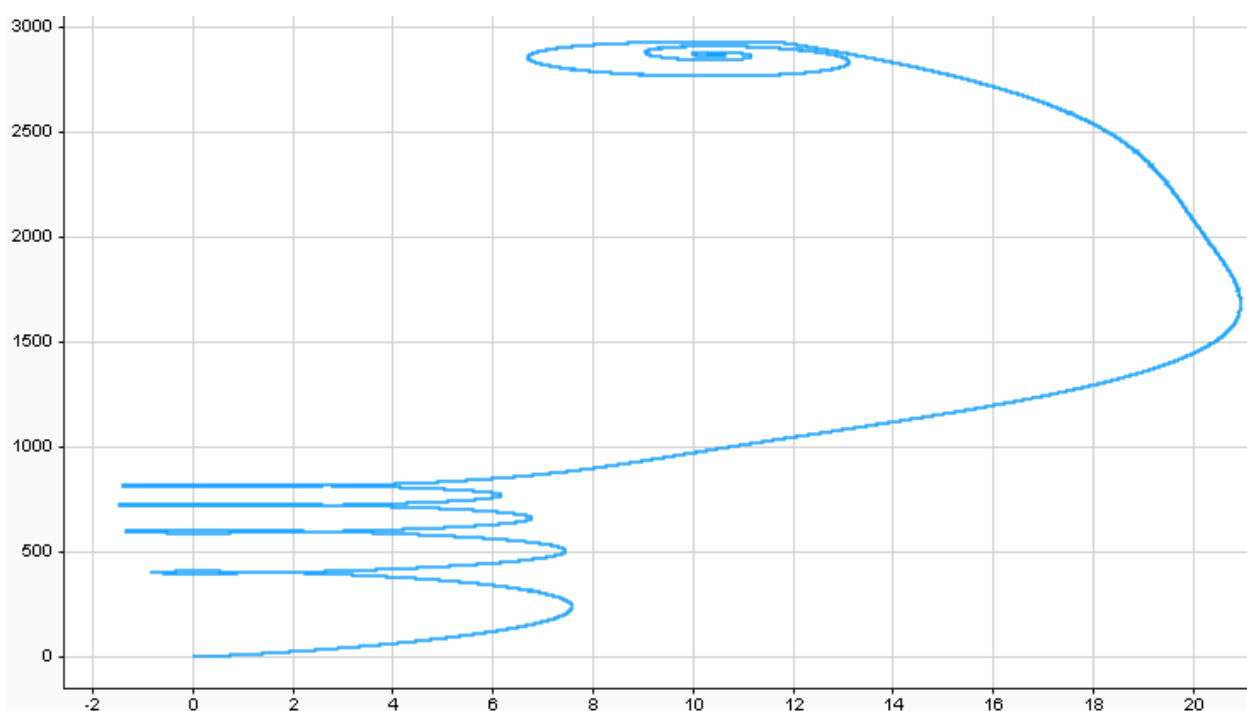


Рис. 3.14. Динамічна механічна характеристика асинхронного двигуна при його пуску з використанням частотного перетворювача

Порівнюючи результати моделювання перехідних процесів при пуску АД з використанням частотного перетворювача та без нього можна зробити висновок, що при використанні частотного перетворювача для можливості плавного пуску АД пускові струми та електромагнітний момент суттєво

зменшуються в порівнянні з результатами без використання ЧП(Рис. 3.5-3.8). Використання частотного перетворювача для покращення пуску асинхронного електродвигуна роторно-пульсаційного апарата дозволить усунути аварійні режими роботи та забезпечить більшу надійність роботи експериментально-дослідної установки.

Важливу роль при експлуатації РПА відіграє витрачена енергія на приготування одиниці кормової продукції. Один із способів зниження витрат електричної енергії - використання частотного перетворювача для зменшення цих витрат. В подальшому будуть досліджені режими роботи асинхронного двигуна з використанням частотного перетворювача, коли для окремих стадій обробки водозернової суміші зменшується швидкість обертів двигуна, що дає можливість знизити величину затраченої потужності на її обробку.

3.1.3. Схема керування асинхронним двигуном роторно-пульсаційної установки

На рис. 3.15 представлена принципова схема керування асинхронним двигуном серії 4АМУ 90L2. При проведенні експериментально-дослідних робіт може використовуватися як прямий пуск асинхронного електродвигуна, так і пуск за допомогою частотного перетворювача.

В першому випадку електрична схема забезпечує прямий пуск двигуна **М** та вимкнення його з мережі, а отже і вмикання та вимикання роторно-пульсаційної установки. Для пуску асинхронного двигуна замикають автоматичний вимикач **QF1** і натискають на кнопку **SB2** «Пуск». Коло котушки магнітного пускача **КМ** замикається, пускач спрацьовує і головними контактами подає напругу до електродвигуна. Одночасно замикається контакт **КМ**, який шунтує кнопку **SB2**(при її відпусканні котушка пускача залишається увімкненою через контакт **КМ**). Відбувається розгін двигуна на його природній характеристиці. Зупинка двигуна відбувається при натисканні кнопки **SB1** «Стоп» або при спрацюванні теплового реле **КК**. При цьому розмикається коло живлення котушки

контактора пускача, контактор **КМ** втрачає живлення і від'єднує двигун від мережі. Починається процес гальмування двигуна. Захист кола від коротких замикань здійснює автоматичний вимикач **QF1**.

В другому випадку електрична схема забезпечує плавний пуск асинхронного електродвигуна **М** за допомогою частотного перетворювача(**ЧП**). Для подачі живлення до частотного перетворювача необхідно замкнути автоматичний вимикач **QF2**. Частотний перетворювач здатен забезпечити максимальний захист електродвигуна від коротких замикань та перевантажень.

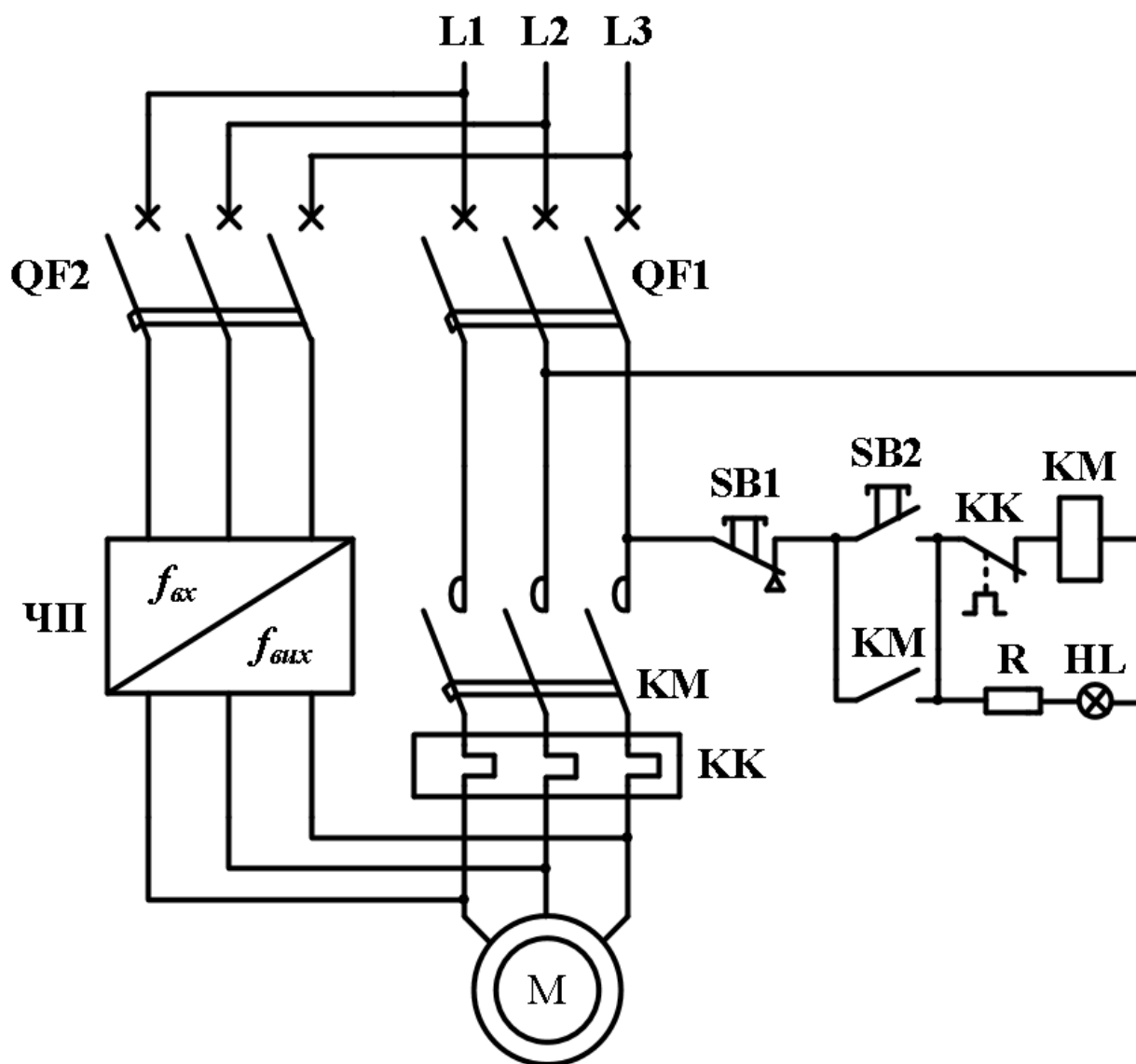


Рис. 3.15. Принципова схема керування асинхронним двигуном РПА

3.1.4. Вибір пускозахисної апаратури електродвигуна

Виконуємо розрахунок та вибір пускозахисної апаратури для приводу двигуна роторно-пульсаційної установки. Паспортні дані електродвигуна 4АМУ 90L2, необхідні для розрахунку, наведені в таблиці 3.1.

Для подачі живлення до електродвигуна та його захисту від струмів короткого замикання і перевантажень вибираємо автоматичний вимикач виходячи з умов, приведених нижче.

Номінальний струм автоматичного вимикача $I_{н.авт}$ та номінальний струм його розчіплювачів $I_{н.роз}$ повинні бути не меншими від номінального струму електродвигуна $I_{н.дв}$:

$$I_{н.авт} \geq I_{н.дв} ; \quad I_{н.роз} \geq I_{н.дв} \quad (3.23)$$

Номінальна напруга вимикача $U_{н.авт}$ повинна бути не меншою напруги мережі $U_{н.мер}$, в якій він буде працювати:

$$U_{н.авт} \geq U_{мер} \quad (3.24)$$

Також автоматичні вимикачі вибирають за конструктивними ознаками (кількістю полюсів; кількістю та видом розчіплювачів максимального струму, додаткових контактів, додаткових розчіплювачів; наявністю пристрою для регулювання струму неспрацювання теплових розчіплювачів), за ступенем захисту від дії навколишнього середовища та за кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Вибираємо автоматичний вимикач серії ВА 47-29 з наступними паспортними даними: $I_{н.авт} = 10A$; $I_{н.роз} = 10A$; $K_{відс} = 7$.

Перевіряємо виконання умов:

$$U_{н.авт} = 400B \geq U_{мер} = 380B ;$$

$$I_{н.авт} = 10A \geq I_{н.дв} = 6,4A ;$$

$$I_{н.роз} = 10A \geq I_{н.дв} = 6,4A .$$

Вибраний автоматичний вимикач слід перевірити на неспрацювання при пуску асинхронного електродвигуна. Для цього визначаємо струм відсічки(спрацювання) електромагнітного розчіплювача:

$$I_{відс} = K_{відс} \cdot I_{н.роз} = 7 \cdot 10 = 70 A \quad (3.25)$$

Повинна виконуватись умова, при якій струм відсічки розчіплювача повинен бути більшим струму його неспрацювання при пуску АД:

$$I_{відс} > I_{неспр}$$

Визначаємо струм неспрацювання та перевіряємо умову:

$$I_{неспр} = K_3 \cdot K_{p.p} \cdot K_{p.n.c} \cdot K_i \cdot I_{н.дв} , \quad (3.26)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, приймають рівним 1,1; $K_{p.p}$ – коефіцієнт, який враховує розкид струмів спрацювання електромагнітних розчіплювачів (визначається з технічної характеристики автомата); $K_{p.n.c}$ – коефіцієнт розкиду пускового струму двигуна; K_i – кратність пускового струму двигуна, $I_{н.дв}$ – номінальний струм двигуна, А.

$$I_{неспр} = 1,1 \cdot 1,25 \cdot 1,1 \cdot 6,5 \cdot 6,4 = 63 A$$

$$I_{відс} = 70 A > I_{неспр} = 63 A$$

Усі умови вибору автоматичного вимикача виконуються. Повне позначення вибраного автоматичного вимикача для захисту роторно-пульсаційної установки: ВА 47-29 MVA20-3-010-С. Технічні характеристики вибраного автоматичного вимикача: кількість полюсів – 3; номінальний струм – 10 А; номінальний струм розчіплювача – 10 А; тип захисної характеристики електромагнітного розчіплювача – С; номінальна напруга – 400 В; частота струму – 50 Гц; гранична розривна здатність – 4,5 кА; максимальний переріз зовнішніх проводів – 25 мм²; ступінь захисту – IP20; час спрацювання електромагнітного захисту – 0,1 с.

Для дистанційного керування роботою електродвигуна вибираємо електромагнітний пускач, дотримуючись наступних умов вибору.

Номінальна напруга електромагнітного пускача $U_{н.м.п}$ повинна бути не менше номінальної напруги електродвигуна $U_{н.дв}$:

$$U_{н.м.п} \geq U_{н.дв} \quad (3.27)$$

Номінальний струм електромагнітного пускача $I_{н.м.п}$ повинен бути не менше номінального струму електродвигуна $I_{н.дв}$:

$$I_{н.м.п} \geq I_{н.дв} \quad (3.28)$$

Номінальна напруга котушки $U_{н.кот}$ повинна дорівнювати напрузі кола керування пускачем $U_{кер}$:

$$U_{н.кот} \geq U_{кер} \quad (3.29)$$

Магнітні пускачі також вибирають: за призначенням – реверсивний, неререверсивний, для пуску електродвигунів з перемиканням обмоток із зірки на трикутник, з апаратом захисту (теплове реле, позисторний захист) чи без нього; за ступенем захисту від дії навколишнього середовища; за кількістю і видом контактів допоміжного кола; за кліматичним виконанням і категорією розміщення; за стійкістю контактів головного кола проти комутаційних спрацювань залежно від частоти вмикань пускача, категорії застосування та необхідного строку служби пускача.

Вибираємо магнітний пускач серії КМІ з наступними паспортними даними: $U_{н.м.п} = 380В$; $I_{н.м.п} = 12А$; $U_{н.кот} = 380В$.

Перевіряємо виконання умов:

$$U_{н.м.п} = 380В \geq U_{н.дв} = 380В$$

$$I_{н.м.п} = 12А \geq I_{н.дв} = 6,4А$$

$$U_{н.кот} = 380В = U_{кер} = 380В$$

Умови вибору виконуються. Повне позначення вибраного електромагнітного пускача – КМІ 11210 12А 380В. Технічні характеристики

вибраного магнітного пускача: номінальна напруга – 380 В; номінальний струм – 12 А; номінальна напруга котушки керування – 380 В; напруга ізоляції – 8 кВ; ступінь захисту – IP20; кількість контактів – 3+1; тип – малогабаритний; комутаційна зносостійкість – 1,7 млн. циклів.

З метою захисту електродвигуна від перенавантаження вибраний магнітний пускач повинен бути укомплектований тепловим реле, яке вибирають за такими умовами:

1) За типом магнітного пускача;

2) Номінальний струм теплового реле повинен бути не меншим за номінальний струм електродвигуна:

$$I_{т.р.н} \geq I_{н.дв} \quad (3.30)$$

3) Номінальний струм електродвигуна повинен бути в межах діапазону регулювання струму неспрацювання теплового реле:

$$I_{р.макс} \geq I_{н.дв} \geq I_{р.мін} \quad (3.31)$$

До експлуатації приймаємо теплове реле з такими паспортними даними:

$$I_{т.р.н} = 8A; I_{н.е} = 5,5 - 8A.$$

Перевіряємо виконання умов:

$$I_{т.р.н} = 8A \geq I_{н.дв} = 6,4A$$

$$I_{р.макс} = 8A \geq I_{н.дв} = 6,4A \geq I_{р.мін} = 5,5A$$

Умови вибору виконуються. Повне позначення вибраного теплового реле – РТ 1312 5,5-8 А.

Для дистанційного керування магнітним пускачем, тобто дистанційним вмиканням та вимиканням асинхронного електродвигуна, вибираємо кнопковий пост керування на дві кнопки – «Пуск» та «Стоп». Ступінь захисту поста керування – IP 54.

З метою регулювання швидкості обертання ротора та можливості плавного пуску електродвигуна роторно-пульсаційної установки необхідно вибрати та встановити частотний перетворювач. Даний пристрій призначений

для регулювання швидкості або моменту електродвигуна в широких діапазонах при максимальних значеннях коефіцієнту потужності електричної машини. Також перетворювач частоти може реєструвати, вимірювати та відображати параметри електричного двигуна, такі як швидкість, момент, напругу, струм, температуру тощо. Потужність перетворювача частоти повинна бути більшою, ніж повна потужність двигуна, який буде до нього підключатися. Для двигуна з номінальною потужністю 3 кВт перетворювач вибираємо найбільший в бік збільшення з модельного ряду. Струм перетворювача частоти повинен бути рівний або більшим за струм трифазного асинхронного електродвигуна, який споживається при повному навантаженні, в даному випадку більше 6,4 А. Силовий перетворювач підключається безпосередньо до асинхронного електродвигуна 4AMУ90L2 і дозволяє регулювати швидкість обертання ротора за рахунок зміни частоти вихідної напруги. Виходячи з вищенаведених критеріїв обираємо частотний перетворювач серії INVT GD300-004G-4 з наступними характеристиками (Рис. 3.16): основна потужність – 4 кВт; кількість фаз – 3; напруга на вході/виході – 380 В; номінальний струм – 9 А; максимальна вихідна частота – 400 Гц; ступінь захисту – IP20.



Рис. 3.16. Частотний перетворювач INVT GD300-004G-4

3.2. Обладнання для вимірювання енергетичних, теплових та напірно-витратних характеристик РПА

Для підрахунку електроенергії, яка витрачається роторно-пульсаційною установкою на виготовлення рідкої кормової суміші, необхідно вибрати і встановити лічильник електричної енергії. При виборі даного устаткування необхідно враховувати такі аспекти: кількість фаз, необхідний клас точності, номінальну напругу живлення, номінальний та максимально допустимий струм, визначити спосіб підключення електролічильника в мережу.

Всі електролічильники поділяються на однофазні та трифазні. Оскільки вибраний раніше електричний двигун 4АМУ 90L2 живиться від мережі 380 В, тобто він є трифазним, то і лічильник електроенергії вибираємо також трифазним. Клас точності дозволяє визначити похибку, яка допустима для лічильника. Найпоширенішими класами точності є: 0,2s; 0,5s; 1,0 та 2,0. Споживча потужність вибраного двигуна є порівняно не великою і складає 3 кВт, тож вибираючи клас точності можна зупинитися на моделях з цифрами 1,0 та 2,0. Максимальна похибка вимірювання буде варіюватися від 0,03 до 0,06 кВт відповідно до класу точності лічильника. При виборі електролічильника за номінальною напругою є три найпоширеніші варіанти: 100 В – розраховані під трифазні лічильники, які використовуються з трансформаторами струму в мережах з напругою понад 660 В; 220-230 В – характерно для однофазних пристроїв обліку; 220/380 В та 230/400 В – використовуються в моделях з трифазною електричною мережею. Існує два основні варіанти підключення лічильника в електромережу. Пряме – розраховане на підключення до мережі без застосування трансформаторів. Призначені для пропускної потужності до 60 кВт включно, показники максимального струму до 100А. Трансформаторне – непряме підключення, яке здійснюється з використанням трансформаторів. Характерно лише для трифазних лічильників. При виборі електролічильника важливо враховувати показники номінального струму, з яким забезпечується стабільна робота

облікового пристрою. Залежно від моделі може становити від 5 до 100 А. Багато в чому показник залежить від кількості фаз, з якими працює лічильник: однофазні з прямим підключенням – від 5 до 60 А; трифазні лічильники з прямим підключенням – від 5 до 100 А. Максимально допустимий струм лічильника – показник граничних значень сили струму, при якому ймовірність виходу лічильника з ладу мінімальна. Для вибору лічильника за цим показником достатньо прорахувати потужність усіх електроспоживачів. Якщо показники невисокі – до 15-20 кВт, можна обмежитись пристроєм зі значенням до 60А. Якщо споживання вище, слід підібрати лічильник зі значенням максимального струму до 100А.

Виходячи з вищенаведених критеріїв вибору пристрою обліку електроенергії, було прийнято до експлуатації трифазний електролічильник «Енергія - 9» серії СТК3-10А1Н7Р. Лічильник українського виробництва має клас точності 1,0 та розрахований на номінальний струм в 5 А при максимально допустимому в 60А. Схема підключення електролічильника до мережі 380 В – пряма чотирьохпровідна.

Під час проведення експериментальних досліджень необхідно проводити вимірювання не лише витрати електричної енергії, але й багатьох інших показників, таких як швидкість потоку рідини, її в'язкість, витрату, температуру тощо.

Для вимірювання швидкість потоку кормової суміші в трубопроводі РПА та її витрату за одиницю часу було вибрано електронний ультразвуковий витратомір TUF-2000M (Рис. 3.17а) з датчиками TS-2 (Рис. 3.17б). Накладні датчики мають захист IP68, що забезпечує повну герметизацію та тривалу роботу. Датчики здатні працювати в діапазоні температур -30...90°C. Принцип роботи ультразвукового витратоміра заснований на вимірюванні часових параметрів частотно-модульованого імпульсу та відгуку акустичної енергії між двома датчиками. Датчики TS-2 встановлюються один навпроти одного на поверхні трубопроводу на відстані, яку вираховує сам витратомір, в залежності від вибраних даних: матеріалу трубопроводу, його діаметру та

товщини стінок, типу рідини та її в'язкості, типу та товщини прокладки між датчиками та трубопроводом.



Рис. 3.17. Витратомір TUF-2000M(a) та його датчики типу TS-2(б)

Для вимірювання температури водозернової суміші під час її обробки в РПА було вибрано цифровий термометр Unit-T UT320A для термопар К/І типу з діапазоном вимірювань від -50 до $+1300$ °C. Датчик може проводити виміри температури як в °C, так і в °F. Для максимальної точності вимірювання температури оброблюваної суміші необхідно термопару розташувати так, щоб був прямий контакт між нею та оброблюваним середовищем. Для цього на виході трубопроводу в бункер було зроблено отвір, через який просовуються кінці термоелектричного перетворювача для безпосереднього контакту з водозерновою речовиною.

Для визначення в'язкості рідкого зернового корму будемо застосовувати ротаційний віскозиметр «Реотест-2». Універсальні віскозиметри марки «Реотест» дозволяють вивчати властивості в'язкості досліджуваної речовини з витриманням фізично точно визначених умов течії, що здійснюється за допомогою циліндричних вимірювальних пристроїв або вимірювального пристрою типу «Конус-Плита». У ротаційному віскозиметрі досліджуване середовище розміщується в щілині між двома коаксіальними тілами обертання – циліндрами, один з яких (зазвичай внутрішній) є нерухомим, а інший може

обертатися з певною кутовою швидкістю. Межі вимірювання ротаційного віскозиметра: від 1 до 10^5 Па·с, відносна похибка: 3-5 %. Робочий діапазон температур ротаційного віскозиметра сягає від -60 до 300°C. «Реотест-2» може бути застосований як для визначення динамічної в'язкості, так і для дослідження залежності в'язкості від швидкості деформації (ефективної в'язкості). Обладнання відрізняється великим діапазоном вимірювання напруги зсуву і швидкості деформації. Необхідна температура забезпечується термостатуванням зразка з використанням ультратермостата.

3.3. Обладнання для подачі сировини та вивантаження готової продукції

Дозування та подача твердого зернового компоненту до бункера роторно-пульсаційної установки буде виконуватися за допомогою шнекового конвеєра. До експлуатації прийнято шнековий апарат з електродвигуном марки MS 712-6 B5. Потужність агрегату становить 250 Вт, швидкість руху шнека – 30 об/хв, номінальна швидкість обертання двигуна – 880 об/хв. Шнековий конвеєр має вбудований редуктор, передаточне число якого становить 30. Далі необхідно визначити продуктивність шнекового конвеєра. Найбільш розповсюджена формула для розрахунку продуктивності шнека має наступний вигляд:

$$Q = S \cdot w \cdot n \cdot k \cdot \rho \cdot 60, \quad (3.32)$$

де S – площа внутрішньої поверхні шнекового апарата, м^2 ; w – інтервал між витками, м; n – швидкість обертання шнека, об/хв; k – коефіцієнт заповнення жолоба субстанцією ($k=0,45$); ρ – питома вага субстанції, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Площа внутрішньої поверхні шнека $S_{\text{вн}}$ знаходиться як різниця між площею зовнішньої поверхні шнека $S_{\text{зовн}}$ та площею поперечного перерізу валу шнека $S_{\text{в}}$:

$$S_{\text{вн}} = S_{\text{зовн}} - S_{\text{в}} \quad (3.33)$$

$$S_{\text{зовн}} = \pi \left(\frac{d_{\text{зовн}}}{2} \right)^2, S_{\text{в}} = \pi \left(\frac{d_{\text{в}}}{2} \right)^2 \quad (3.34)$$

де $d_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр шнекового конвеєра, м; $d_{\text{в}}$ – діаметр валу, м.

Отже, $Q = 0,0144 \cdot 0,1 \cdot 30 \cdot 0,45 \cdot 700 \cdot 60 = 816,5$ кг/год. З розрахунків виходить, що продуктивність шнекового конвеєра по зерновим культурам становить близько 816,5 кілограм на годину.

Швидкість, час та інтервал подачі зерна в установку буде регулюватися частотним перетворювачем у відповідності до проведених експериментальних досліджень, результати яких наведено в розділі 4.2.2. Частотний перетворювач для регулювання швидкості подачі зерна в бункер РПА вибираємо Danfoss VLT Micro FC-051з номінальною потужністю 0,37 кВт та номінальним струмом 1,2 А. Автоматичний вимикач для шнекового конвеєра вибрано ВА 47-29 з номінальним струмом 6 А.

Роторно-пульсаційна установка повинна бути оснащена системою подачі води до робочої камери та системою виводу готової продукції з установки. Основними елементами для функціонування даних систем будуть виступати електромагнітні клапани, розміщені на відповідних трубопроводах. Електромагнітний клапан – це пристрій, який забезпечує автоматичне керування потоком робочого середовища по команді у вигляді електричного сигналу: або при його подачі, або при знятті. Принцип його роботи досить простий і полягає в наступному. На електромагнітну котушку клапана подається електрична напруга, після чого магнітний сердечник втягується в соленоїд, що призводить до відкриття або закриття клапана. При виборі електромагнітного клапана необхідно враховувати діаметр труби, на яку він буде встановлюватися, номінальний або максимальний тиск робочого середовища та напругу котушки керування. Також електромагнітні клапани можуть бути нормально-відкриті та нормально-закриті. Нормально-закритий клапан це такий клапан, який є закритим при відсутності напруги живлення, а при її появі він відкривається. Нормально-відкритий клапан працює навпаки –

він закривається при подачі напруги, а в момент її відсутності він знаходиться у відкритому положенні.

Клапан для подачі води в установку повинен бути закритим на протязі всього періоду обробки водозернового середовища, і відкритим лише в період між циклами технологічного процесу. Отже, електромагнітний клапан для подачі води в установку вибираємо нормально-закритим. Інший клапан – для виведення виготовленої продукції з установки, вибираємо за такими ж твердженнями. Оскільки клапан повинен бути відкритим лише після завершення кожного циклу обробки і закритим в процесі виготовлення рідкого зернового корму, то він також повинен бути нормально-закритим. Із рівняння (3.1) діаметр отвору клапанів вибираємо 27 мм, напруга котушки живлення – 220 В, робочий тиск в трубопроводах при подачі води та виведення корму з установки не перевищує 10 бар.

Для автоматичного вмикання та вимикання таких складових електротехнічного комплексу як електромагнітний клапан для подачі води в робочу камеру РПА та електромагнітний клапан для вивантаження приготовленої кормової продукції необхідно вибрати та встановити реле часу. Це електротехнічний апарат, який дозволяє включати і вимикати прилади через заданий проміжок часу на протязі певного циклу. При виборі реле часу необхідно врахувати, щоб кількість її каналів була не менше кількості підведених навантажень. До експлуатації було прийнято багатофункціональне цифрове реле часу РЕВ-302. Дана модель має вісім режимів роботи та здатна забезпечити незалежне керування двома різними навантаженнями. Реле часу потрібно правильно запрограмувати та налаштувати. Це виконується за допомогою відповідного конфігуратора реле на ПК. Дані, які необхідно вводити в програму, будуть визначені в ході експериментальних досліджень в наступному розділі. Автоматичний вимикач для реле часу вибрано марки АВВ SH201-C2 з номінальним струмом 3А.

Висновки по розділу 3

В третьому розділі дисертаційної роботи представлено розрахунок та вибір електричного, вимірювального та допоміжного обладнання, яке необхідне для забезпечення роботи електротехнологічного комплексу на базі роторно-пульсаційних технологій.

1. На основі результатів математичного моделювання в попередньому розділі було розраховано потужність електроприводу РПА для забезпечення оптимальної роботи установки. Вибрано асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором марки 4АМУ90 L2.
2. Проведено математичне моделювання перехідних процесів при пуску вибраного асинхронного електродвигуна в програмному пакеті MATLAB Simulink з метою вибору необхідного захисного обладнання для усунення можливих аварійних режимів роботи установки.
3. Проведено вибір пуско-захисної апаратури для електричного двигуна установки. Оптимальні параметри вибраного захисного обладнання обґрунтовано відповідними електричними розрахунками.
4. Наведено опис та основні характеристики вибраного вимірювального та додаткового обладнання для визначення температурних, енергетичних та напірно-витратних характеристик роторно-пульсаційного апарату.
5. Для подачі та дозування необхідної кількості зернового компоненту в бункер роторно-пульсаційного апарата було вибрано для встановлення шнековий апарат.

На основі проведених розрахунків та вибору устаткування було створено електричний комплекс для забезпечення стабільної роботи експериментально-дослідної установки.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РІДКИХ ЗЕРНОВИХ КОРМІВ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ

4.1. Конструкція та принцип роботи експериментально-дослідної установки

При приготуванні рідких кормів для сільськогосподарських тварин головним процесом в технології є подрібнення зернової суміші. За класичною технологією спочатку виконують диспергування зернової суміші в сухому вигляді, а потім підігрівають воду і змішують її з подрібненим зерном. При такій технології розмір часток зерна становить від 50 до 2000 мкм. Це негативно позначається на засвоєнні кормів тваринами. Справа в тому, що поживні речовини засвоюються організмом тварини тільки в розчиненому вигляді, а швидкість обробки корму шлунковим соком прямо пропорційна площі поверхні частинок зерен в кормах. В результаті подрібнення кормів утворюється частинки з високорозвиненою поверхнею, що сприяє прискоренню процесів травлення і підвищенню засвоюваності поживних речовин. Крім того, недоліками класичної технології є декілька додаткових стадій – підігрів води та подальше перемішування, що в свою чергу збільшує тривалість процесу та підвищує енергетичні витрати.

У даній роботі пропонується вдосконалена технологія приготування рідких зернових кормів із застосуванням методу ДІВЕ, що реалізується за рахунок РПА. Суть технології полягає в тому, що в приймальному бункері РПА змішується зерно з водою і обробляється в режимі рециркуляції. При обробці середовища в РПА останнє піддається впливу основних механізмів ДІВЕ, що покращує диспергування, зменшує час обробки суміші та енергетичні витрати.

За результатами моделювання, проведених в попередньому розділі, розроблена і виготовлена експериментально-дослідна установка, особливістю

якої є наявність прямокутних і круглих отворів на робочих елементах апарату. Дана установка дозволяє вивчити характер протікання тепломасообмінних процесів при обробці крохмалевмісного середовища в процесі виготовлення рідкого зернового корму. На підставі отриманих експериментальних даних можна оцінити достовірність теоретичних досліджень, а також відпрацювати технологічний процес приготування рідких кормів для сільськогосподарських тварин.

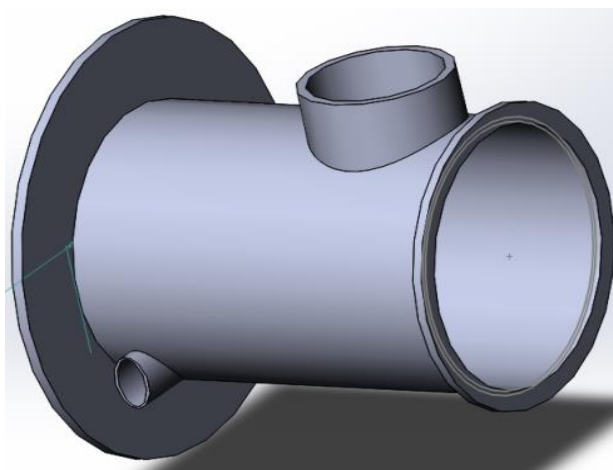
Розроблена та виготовлена експериментально-промислова установка (Рис. 4.1) забезпечує високу ефективність тепломасообмінних процесів, диспергування, перемішування, нагрівання, здатність витримувати робочі напруги, герметичність роз'ємних та нероз'ємних (зварних) з'єднань, безпеку і відповідність санітарним нормам, зручність і надійність в обслуговуванні та ремонті.



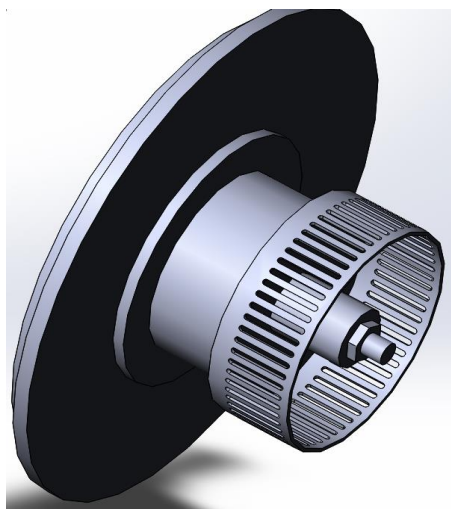
Рис. 4.1. Роторно-пульсаційна установка для приготування рідких зернових кормів

Розроблена експериментально-дослідна установка працює за наступним принципом(Рис. 4.2). Через вхідний електромагнітний клапан 3 необхідна кількість води надходить до робочої камери 2 та частково заповнює бункер 13 до певного рівня. За допомогою автоматичного вимикача, розміщеного в щитку керування 14, подається живлення на електродвигун 1. За рахунок обертання закріпленого на валу двигуна ротора РПА створюється високий тиск в робочій камері, який примушує воду циркулювати в замкненій герметичній системі через трубопровід 7 до бункеру 13 установки. Зерно в необхідній кількості засипається в бункер 12, де змішуючись із циркулюючою в системі водою надходить в робочу камеру, в якій воно подрібнюється при проходженні через систему робочих органів ротор-статор(Рис. 4.3). Далі водозернова суміш починає переміщатися по установці в режимі рециркуляції між робочою камерою та бункером через трубопровід 7. З кожним наступним циклом обробки водозернової суміші її температура та в'язкість підвищується, а середньоповерхневий розмір частинок зерна в ній зменшується. За допомогою шнекового апарату 12 зерновий компонент дозується та подається до бункеру 13 робочої установки. Зміна температури відстежується термопарою 10, яка встановлена на виході зернової суміші з трубопроводу в бункер і підключена до цифрового термометра 11. На трубопроводі розміщено два датчики 9 ультразвукового витратоміра 8, які вимірюють витрату рідини та її швидкість в процесі обробки. Електричний лічильник 15 призначений для вимірювання електроенергії, яка споживається установкою при виготовленні рідкого зернового корму. Для регулювання швидкості обертання ротора РПА використовували частотний перетворювач 16. Основна конструкції робочого апарату закріплена на опорній арматурі 4. Також роторно-пульсаційна установка оснащена системою миттєвого виводу приготовленого рідкого корму за допомогою вихідного електромагнітного клапана 6. Робота електромагнітних клапанів 3 та 6 контролюється за допомогою цифрового реле часу 17. Видалити залишки корму та провести очистку переробної камери можна при знятті кришки 5.

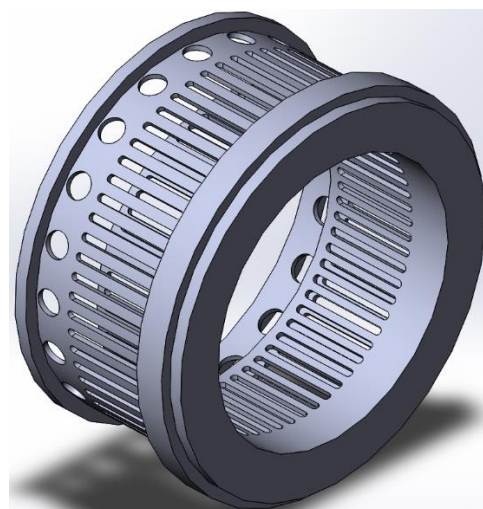
Для дослідження впливів механізму дискретно-імпульсного введення енергії на процес обробки водозернової суміші необхідно було провести ряд експериментів по визначенню залежності характеристик зернового корму від різних параметрів.



а)



б)



в)

Рис. 4.3. Загальний вигляд робочої камери (а) та робочих елементів РПА у вигляді ротора(б) і статора(в)

На якісні характеристики виготовленого продукту впливають наступні чинники:

- зміна температури та в'язкості оброблюваного середовища;

- вплив фізичних факторів на гранулометричний склад оброблюваного середовища – зміна швидкості обертання ротора двигуна, швидкість потоку та витрата середовища, тиск в середині камери та в трубопроводі; кількість циклів та час обробки суміші в робочій камері апарату;
- конструктивні особливості апарату – геометричні розміри ротора і статора, зазор між ними, кількість та форма пазів на робочих органах машини;
- вплив теплових ефектів на подрібнення водозернового середовища.

Метод ДІВЕ реалізований в роторно-пульсаційних установках характеризується частотою пульсації потоку оброблювальної суміші. Частота пульсації потоку залежить від частоти обертання та кількості пазів в системі ротор-статор. Результати моделювання показали, що з урахуванням вимог до середньоповерхневого розміру частинок зерна в суміші не більше 300 мкм, обробку необхідно проводити при частоті пульсації 3 кГц. З метою зменшення споживаної енергії, яка витрачається на приготування рідкого корму проводилися дослідження по зміні швидкості обертання ротора двигуна за допомогою частотного перетворювача.

Згідно з літературою [65], на процеси диспергування крохмалевмісного середовища впливає кількість твердої фази в ній. Для більшого вивчення даного питання було проведено експериментальні дослідження визначення впливу кількості твердої фази в суміші на середньоповерхневий розмір часточок. Кількість твердої фази в оброблювальній суміші становило 10,20 та 30%. В ході експериментів в якості модельного середовища досліджувалася крохмалевмісна суміш, яка складається з води та злакових культур (пшениці, ячменю та кукурудзи) в різних пропорціях. Також основна увага приділялася використанню частотного перетворювача для зменшення споживаної потужності на приготування одиниці кормової продукції. Частоту напруги мережі змінювали в межах 30-50 Гц для різних режимів роботи двигуна.

Конструктивно роторно-пульсаційний апарат змонтований на станині, виготовленої із швелера номер 24. На станині встановлений електродвигун, який за допомогою муфти з'єднаний з підшипниковим вузлом. На фланці підшипникового вузла закріплений РПА. Ширина зазору між ротором і статором складає 0,5 мм. Кожен циліндричний робочий елемент має по 56 прямокутних отворів, які розташовані в два ряди на статорі і один ряд на роторі, а також 20 круглих отворів, які розташовані лише на поверхні статора (Рис. 4.3.в). Ширина отвору пазів рівна 2,8 мм, довжина кожного з них – 35 мм. Номінальна швидкість обертання ротора двигуна – 2850 обертів за хвилину.

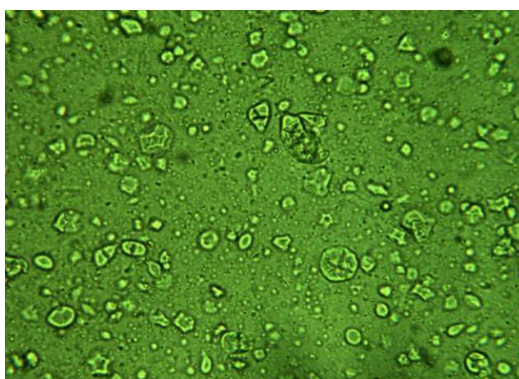
Вибір вимірювального та допоміжного обладнання для РПА був показаний у попередньому розділі дисертації. Швидкість потоку кормової суміші в роторно-пульсаційній установці та її витрату за одиницю часу вимірювали за допомогою витратоміра TUF2000M, датчики якого розміщувалися на трубопроводі, який з'єднує робочу камеру з бункером. Температура суміші, що циркулює в установці, вимірювалась за допомогою цифрового термометра UT320A, що входить до комплекту мультиметра UNI-T. Швидкість обертання ротора установки змінювали за допомогою частотного перетворювача INVT GD300-004G-4. Також даний прилад може реєструвати, вимірювати та відображати параметри електричного двигуна, такі як напругу, струм, момент тощо. Швидкість обертання ротора при обробці крохмалевмісного середовища вимірювали за допомогою тахометра. Електроенергію, яку споживає роторно-пульсаційна установка в процесі виготовлення корму, визначали за допомогою електролічильника марки СТКЗ – 10А 1Н6РВ. Коефіцієнт потужності вимірювали за допомогою фазометра.

Для визначення розмірів частинок зерен кормової суміші при обробці її в РПА використовували електронний оптичний мікроскоп SIGETA MB-202 (Рис. 4.4) з біокулярною насадкою та цифровою камерою MDC - 560. Для вимірювання розмірів частинок зерна в рідині проводилося накладання на фотографії градуйованої сітки з визначеним масштабом поділок (Рис. 4.5). В

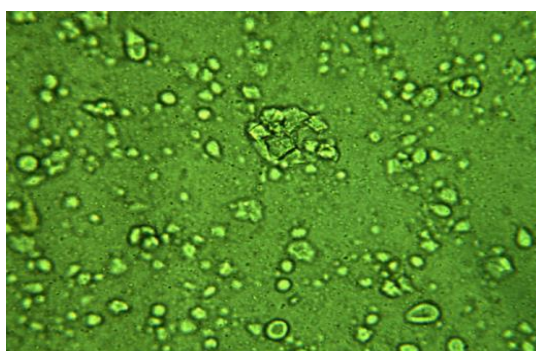
результаті обробки отриманих фотографій визначалося середнє значення розмірів частинок в рідкій зерновій суміші в різні моменти часу. Дослідження крупності зерна при обробці його в РПА дає можливість визначити кількість циклів та час обробки водозернової суміші для досягнення оптимального складу суміші для різних видів худоби.



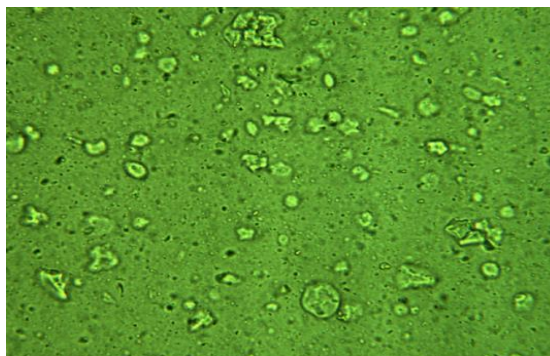
Рис. 4.4. Оптичний мікроскоп SIGETA MB-202



а)



б)



в)

Рис. 4.5. Фотографії зразків рідкої зернової суміші в різні моменти часу: а) 7 хв, б) 14 хв, в) 21 хв

Для визначення в'язкості оброблювального середовища застосовувався ротаційний віскозиметр «Реотест-2».

Забір проб водозернової суміші для визначення її гранулометричного складу та в'язкості проводився кожні дві хвилини. Вимірювання показників споживання енергії, напірно-витратних характеристик та температури суміші проводилося кожну хвилину.

4.2. Експериментальні дослідження процесів приготування рідких зернових кормів за допомогою РПА

Було проведено експериментальні дослідження по виготовленню рідких зернових кормів в розробленому роторно-пульсаційному апараті. В ході роботи визначалися такі параметри як енергетичні витрати на виготовлення кормів, температура та в'язкість суміші в процесі її приготування, найоптимальніший час засипки зернового компоненту, вплив зміни швидкості обертання ротора двигуна на енергетичні показники установки, досліджувалася динаміка зміни середніх розмірів частинок зерна в різні моменти часу під час її обробки. Моніторинг температури суміші при її обробці є не менш важливим параметром ніж решта, оскільки при традиційних методиках підготовки кормової суміші на основі сухих кормів необхідні додаткові енергетичні витрати та устаткування для її підігріву в зимовий період часу.

4.2.1. Визначення гранулометричного складу кормової суміші

Використання електронного мікроскопу для визначення гранулометричного складу зернової суміші під час її обробки дає можливість прослідкувати, як змінюється середній розмір частинок зерна в залежності від часу обробки та кількості циклів проходження суміші через робочу камеру. Основною метою даних досліджень є визначення часу обробки та кількості циклів, при яких гранулометричний склад та розмір частинок кормової суміші буде оптимальним з точки зору засвоєння її свійськими тваринами. При цьому досліджувались водозернові суміші з використанням різних видів зернових культур – пшениці, ячменю та кукурудзи.

Проведено дослідження впливу зміни швидкості обертання ротора двигуна роторно-пульсаційної установки на гранулометричний склад виготовленої суміші. Швидкість обертання ротора електродвигуна змінювали за допомогою частотного перетворювача. У таблиці 4.1 показано залежність зміни середньоповерхневого розміру частинок суміші від швидкості обертання ротора РПА та часу обробки гетерогенного середовища.

Аналізуючи табличні дані, можна зробити висновок, що при збільшенні швидкості обертання ротора установки та часу обробки середньоповерхневий розмір диспергованої рідини зменшується, проте споживана енергія при цьому збільшується. Дослідження по впливу зміни швидкості обертання ротора двигуна на енергетичні параметри установки показані в наступному підрозділі. Найбільш оптимальними параметрами обробки водозернового середовища для отримання зернових частинок з розміром близько 300 мкм є швидкість обертання ротора РПА 3000 об/хв та час обробки – 17,5 хвилин.

Результати досліджень по визначенню середнього розміру частинок зерна в залежності від часу обробки приведені на рис. 4.6-4.8. Дослідження проводились для різних видів зернових при різній концентрації зерен та води в рідкій зерновій суміші.

Таблиця 4.1

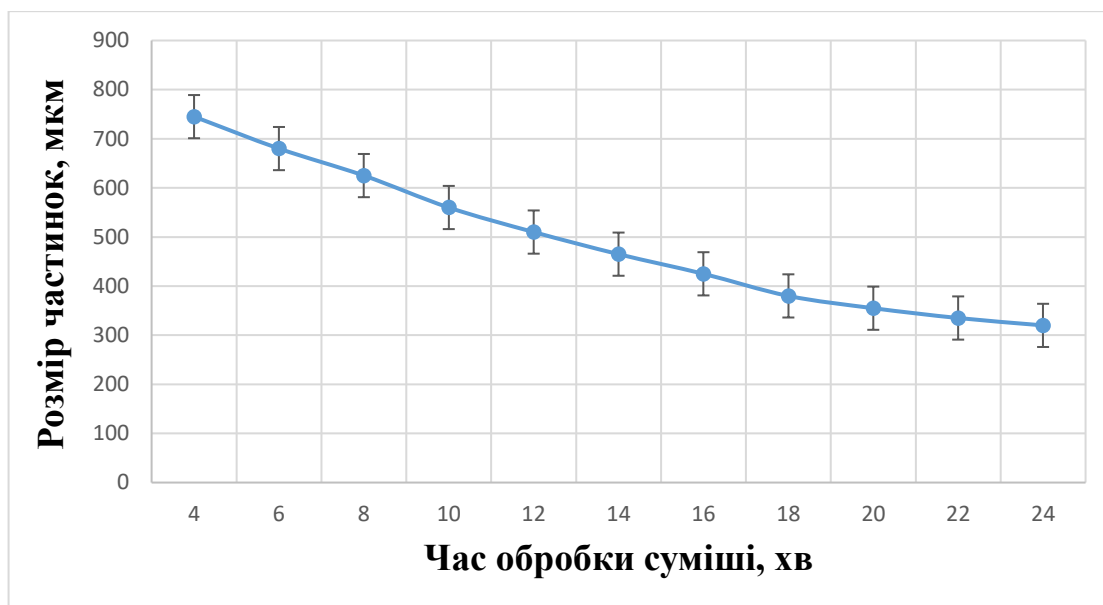
Залежність середньоповерхневого розміру частинок від швидкості обертання ротора установки та часу обробки суміші

Вимірювальні показники		
Час обробки суміші, хв	Швидкість обертання ротора, об/хв	Середньоповерхневий розмір фракцій, мкм
5	1800	760
10		610
15		500
20		415
25		360
5	2400	640
10		490
15		385
20		330
25		290
5	3000	560
10		415
15		330
20		280
25		255

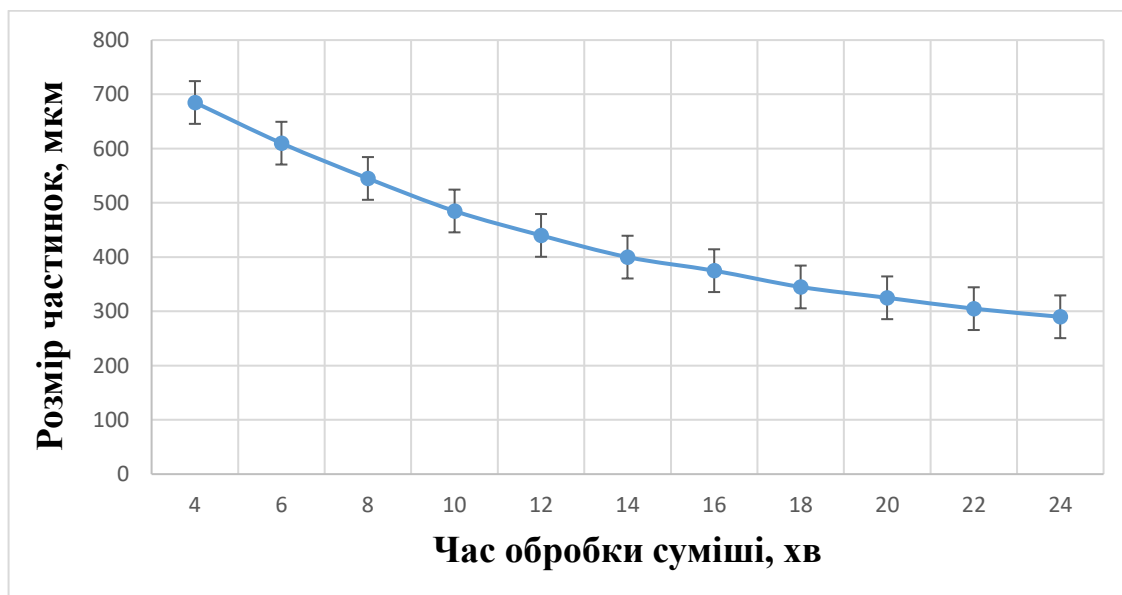
На рис. 4.6. представлені залежності середнього розміру частинок зерна пшениці від часу обробки при концентрації пшениці 10%, 20% та 30% від загального об'єму водозернової суміші.

Як видно з отриманих залежностей, час обробки зернової суміші при концентрації пшениці 10% складає близько 26-27 хв або ж 37-38 циклів обробки водозернової суміші в робочій камері РПА. Збільшення концентрації зерна в суміші до 20% призводить до зменшення часу обробки, що складає близько 22-23 хв та 33-34 цикли обробки в робочій камері установки. При концентрації зерна пшениці 30% у водозерновій суміші кількість циклів

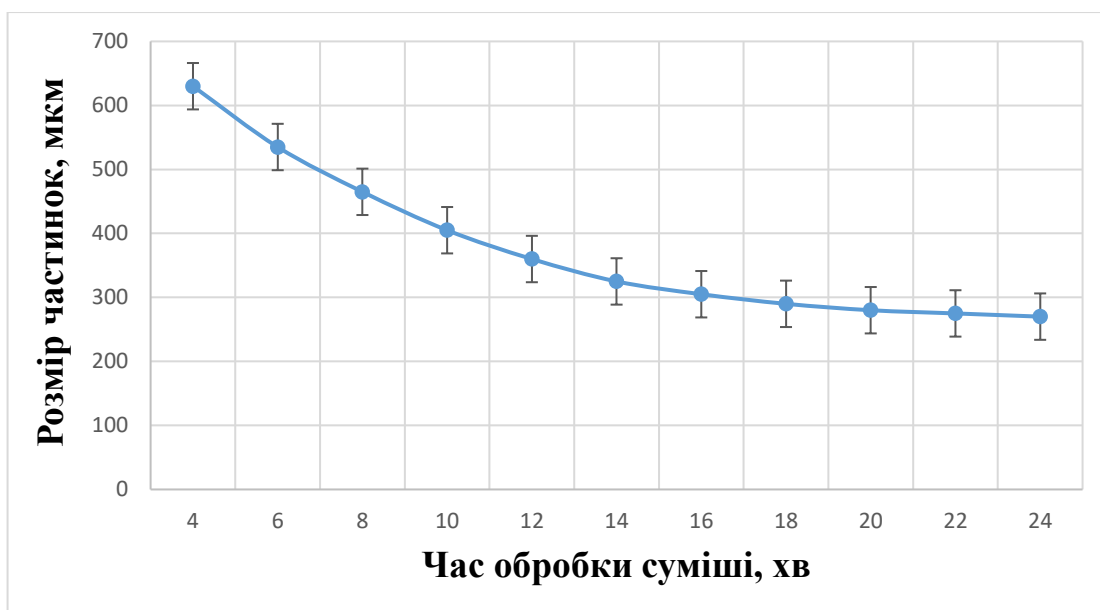
обробки суттєво зменшується і складає близько 29-30 циклів або ж 17-18 хвилин. Цей факт пояснюється тим, що при обробці суміші ударні навантаження виникають не тільки за рахунок контакту твердих частинок з робочими поверхнями РПА, але і один з одним. Зі збільшенням твердої фази в суміші збільшуються ударні навантаження частинок одна з одною.



а)



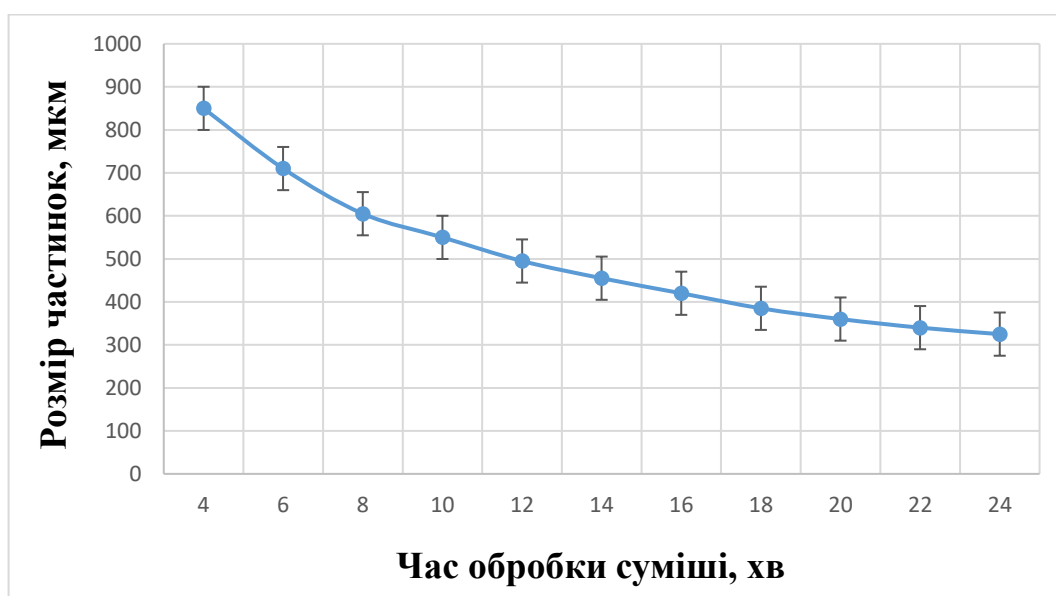
б)



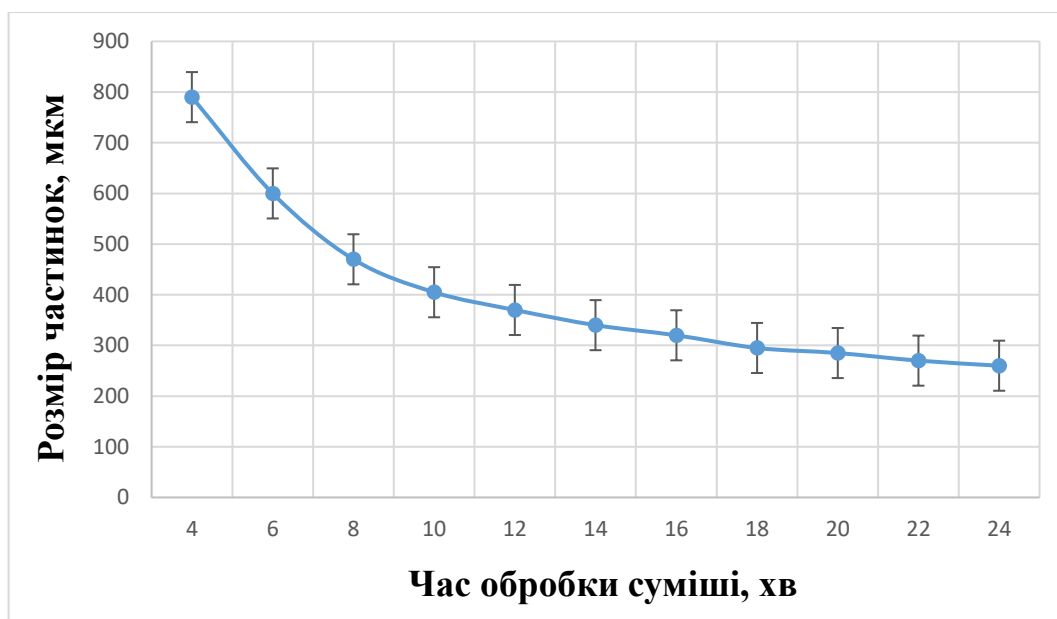
в)

Рис. 4.6. Залежність середньоповерхового розміру частинок зерна пшениці в рідкій кормовій суміші від часу обробки суміші при концентрації зерна 10%(а), 20%(б) та 30%(в)

На рис. 4.7. наведено аналогічні експериментальні залежності, які були отримані для кукурудзяної кормової суміші при концентрації зерна 10% та 30%.



а)

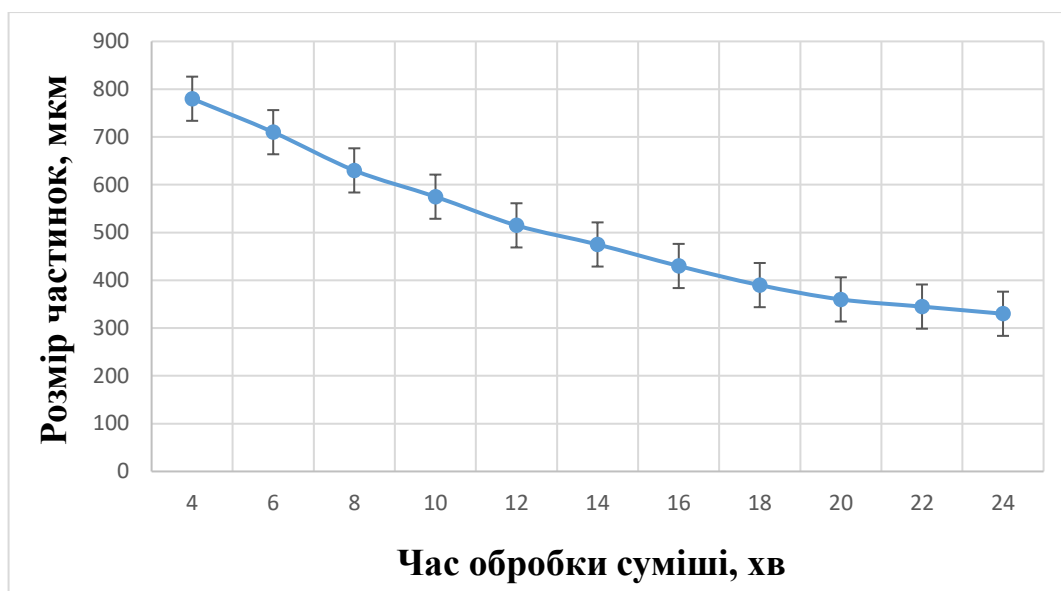


б)

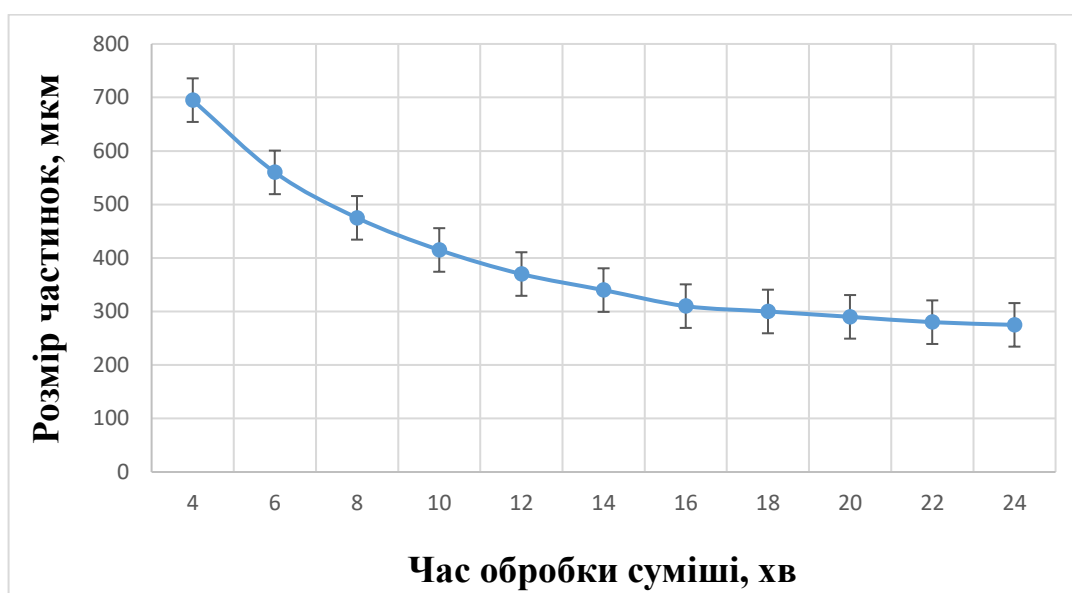
Рис. 4.7. Залежність середньоповерхового розміру частинок зерна кукурудзи в рідкій суміші від часу обробки при концентрації зерна 10%(а) та 30%(б)

Час обробки кукурудзяної суміші для отримання корму з оптимальним розміром частинок зерна складає близько 27-28 хв або ж 39-40 циклів проходження зернової суміші через робочу камеру РПА для концентрації твердої фракції кукурудзи в суміші у розмірі 10%. При збільшенні концентрації зерна кукурудзи в кормовій суміші до 30% термін обробки корму зменшується до 17-18 хвилин (30-31 цикл обробки).

На рис. 4.8. наведені залежності середньоповерхового розміру часточок ячменю відносно часу обробки кормової суміші. Вміст ячменю в водозерновій суміші, при проведенні експериментів, складає 10% та 30%. З отриманих графіків видно, що при концентрації зерна 10 % час обробки кормової суміші складає 28-29 хвилин або ж 40-42 цикли обробки. При збільшенні концентрації ячменю в зерновій суміші до 30% час та кількість циклів обробки зменшується до 18 хвилин (28-29 циклів обробки).



а)



б)

Рис. 4.8. Залежність середньоповерхового розміру частинок зерна ячменю в рідкій суміші від часу обробки при концентрації зерна 10%(а) та 30%(б)

Аналіз отриманих залежностей для різних видів зернових показує, що необхідний час обробки рідкої зернової суміші складає від 17 до 18 хвилин або ж 28-30 циклів обробки. При такій тривалості приготування рідких кормів середній розмір частинок зерна буде близький до 300мкм – найбільш оптимальному розмірі частинок зерна для найкращої засвоюваності рідкого корму свійськими тваринами.

Найбільш ефективними параметрами для диспергування крохмалевмісного середовища в роторно-пульсаційному апараті для приготування рідких зернових кормів є: вміст твердої фази в суміші – 30%, швидкість обертання ротора установки – 3000 об/хв, зазор між ротором і статором – 500мкм, тривалість обробки водозернової суміші – 17-18 хвилин (або ж 28-30 циклів обробки).

4.2.2. Дослідження енергетичних характеристик РПА при виготовленні рідких зернових кормів

За рахунок подрібнення частинок зерна збільшується загальноповерхнева площа виготовленого матеріалу, покращується взаємодія комбікорму з травними ферментами, знижуються енергозатрати продукції та підвищується якість змішування компонентів. Однак тонке подрібнення збільшує енергетичні витрати, а борошністі компоненти викликають захворювання тварин, особливо свиней та великої рогатої худоби. Процес подрібнення займає близько 50% від загальних енергетичних витрат в процесі виготовлення рідких зернових кормів.

Метод дискретно-імпульсного введення енергії полягає у створенні таких умов, які забезпечують при локальному введенні енергії в технологічну систему, її дискретний розподіл по простору та імпульсному впливі за часом. При традиційному способі приготування рідких кормів зернові культури подрібнюють та змішують з водою. Оскільки подрібнення відбувається в дробарках або екструдерах, розмір частинок готового продукту становить понад 700 мкм. Пропонована технологія рідких кормів передбачає змішування води із зерновою сумішшю і комбікормом у співвідношенні від 10 до 30% твердої фази і обробці в роторно-пульсаційному апараті (РПА) до отримання однорідної маси з розміром часток не більше 500 мкм. Однією з важливих енергетичних характеристик РПА є його споживана потужність. Вся потужність, що підводиться до валу ротора, виражається у витратах енергії. Дана енергія витрачається на подолання опору тертя в різних вузлах РПА і на

обробку робочого середовища [99]. Виходячи з цього, визначення необхідних енергетичних витрат на приготування одиниці кормової продукції є важливим параметром РПА для приготування рідких зернових кормів. Для визначення даного параметра був використаний лічильник електроенергії моделі СТКЗ – 10А 1Н7РВ, яким проводили вимірювання споживаної потужності електродвигуна установки в різні моменти часу при різній концентрації зерна в кормовій суміші. Також додатково вимірювались й інші параметри асинхронного двигуна, такі як струм, напруга, коефіцієнт потужності тощо.

На даному етапі роботи досліджувався вплив зміни швидкості подачі твердого компоненту в робочу камеру на енергетичні параметри електродвигуна роторно-пульсаційного апарата. Подача зернового компоненту забезпечується шнековим конвеєром, швидкість подачі регулюється частотним перетворювачем. Результати проведених досліджень приведені на рис. 4.9-4.11.

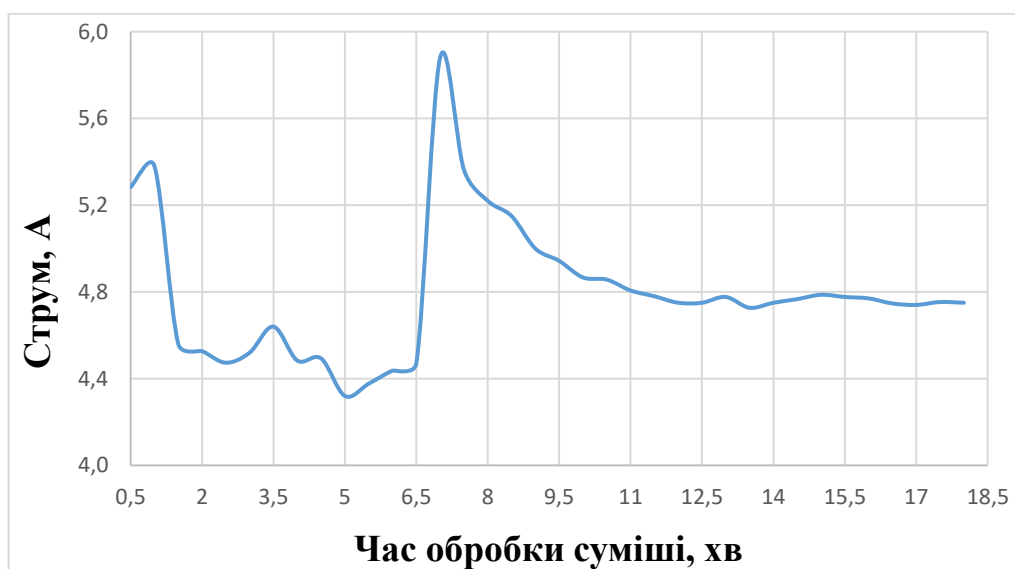
Дозування зернового компонента, яке виконується за допомогою шнекового апарата, може відігравати важливу роль при обробці водозернового середовища. Визначення правильної інтенсивності подачі зерна до бункера роторно-пульсаційної установки дозволить збалансувати навантаження на електричний двигун на початковій стадії обробки суміші з метою усунення можливого перевантаження(досить швидка подача зерна) або недовантаження(досить повільна подача зерна) установки. Різке підвищення твердої фази в робочій камері РПА за рахунок занадто швидкої засипки може призвести до недопустимого збільшення сили тертя в робочих органах установки, що супроводжується підвищенням споживаної потужності та можливістю повної зупинки технологічного процесу через закупорювання робочих отворів ротора і статора. В іншому випадку, коли швидкість подачі твердого компоненту буде занадто повільною, є можливість порушення однорідності гранулометричного складу кормової суміші – дисперсність зерна, яке засипалося на початку, буде суттєво відрізнятися від дисперсності зерна, яке подавалося наприкінці терміну засипки.

Виходячи з вище згаданого, необхідною задачею є проведення моніторингу зміни енергетичних характеристик РПА в залежності від зміни часу засипки зернового компоненту. Дослідження проводилися для водозернової суміші з концентрацією зерна 30%, яка є оптимальною при приготуванні рідкого зернового корму. Час засипки зернового компоненту становив 100, 200 та 300 секунд.

На рис. 4.9 показано зміну енергетичних параметрів асинхронного двигуна РПА, якщо шнек рівномірно подає зерно впродовж 100 секунд.



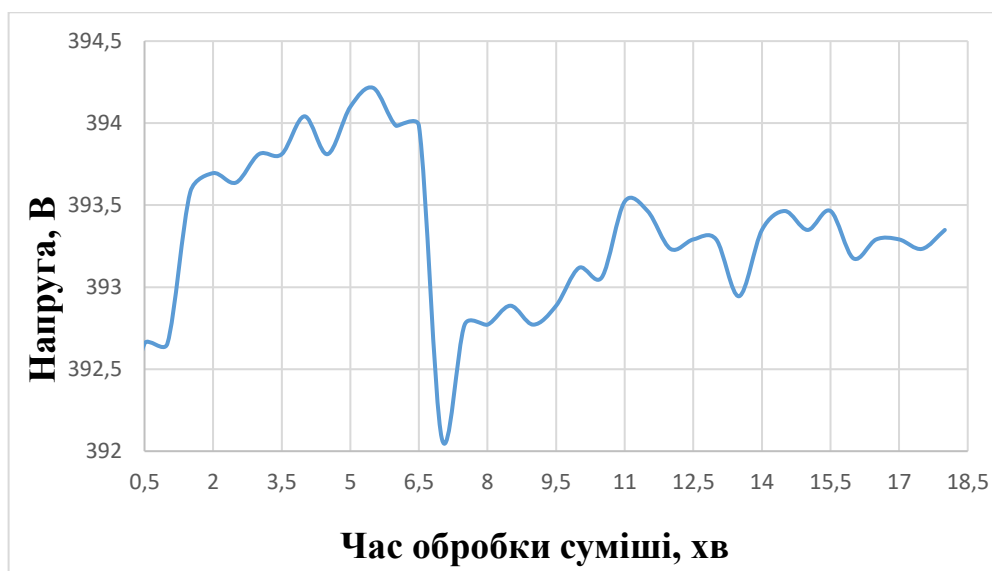
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.9. Залежність споживаної потужності(а), струму (б), коефіцієнту потужності(в) та напруги живлення(г) двигуна від часу обробки суміші при часі засипки зерна 100 с

Отримані значення показують, що локальні значення споживаної потужності, струму та коефіцієнту потужності(Рис. 4.9 а, б, в) змінюються однаково в залежності від навантаження двигуна. Напруга живлення(Рис. 4.9г) при цьому має певну стабільність – вона коливається в незначних межах від 392 до 394 В. На проміжку часу від 1 до 6 хвилини споживана потужність,

струм та коефіцієнт потужності становлять найменше значення. При потраплянні великої кількості зерна до робочої камери за короткий проміжок часу починається процес його інтенсивного подрібнення в робочих органах РПА. Споживана потужність при цьому повинна підвищитися, проте на графіку ми спостерігаємо протилежне. Це можна пояснити наступним чином. Основна величина споживаної потужності витрачається на два основні процеси в РПА – подрібнення зернового компоненту та перекачування водозернового середовища. Чим більша кількість зерна надходить в робочу камеру за одиницю часу, тим більше необхідно витратити потужності на подолання опору тертя при подрібненні зерна в робочих органах РПА. При цьому величина потужності, яка витрачається на перекачування середовища, стає значно меншою у зв'язку з тим, що основний об'єм робочої камери заповнений зерном, яке заважає циркуляції води між камерою та бункером через трубопровід. За рахунок цього зменшується швидкість та витрата суміші, що призводить до зменшення споживаної потужності.

На шостій хвилині різко збільшуються енерговитрати з 1,86 кВт/год до 3,13 кВт/год за рахунок збільшення витрати та швидкості проходження суміші через робочу камеру. Таким чином, зі збільшенням витрати та швидкості суміші збільшується споживана енергія на її перекачування між робочими вузлами установки. Після шостої хвилини споживана потужність поступово починає зменшуватись і стає постійною на дванадцятій хвилині, коли основна частина зерна знаходиться в однорідному дисперсному стані і на її обробку не потрібно витрачати додаткову енергію. За 18 хвилин обробки водозернового середовища було спожито близько 660,6 Вт електроенергії. Гранулометричний склад виготовленого корму не є задовільним, середній розмір частинок зерна становить близько 370 мкм, кількість циклів обробки зерна становить лише 21,1. Для зменшення розміру частинок зерна до оптимального (300 мкм) та проходження 30-и циклів обробки суміші необхідно продовжити обробку до 23 хв 45с, при цьому енерговитрати

збільшаться до 870 Вт. В таблиці 4.2 наведено основні результати проведених досліджень для даного періоду засипки зерна.

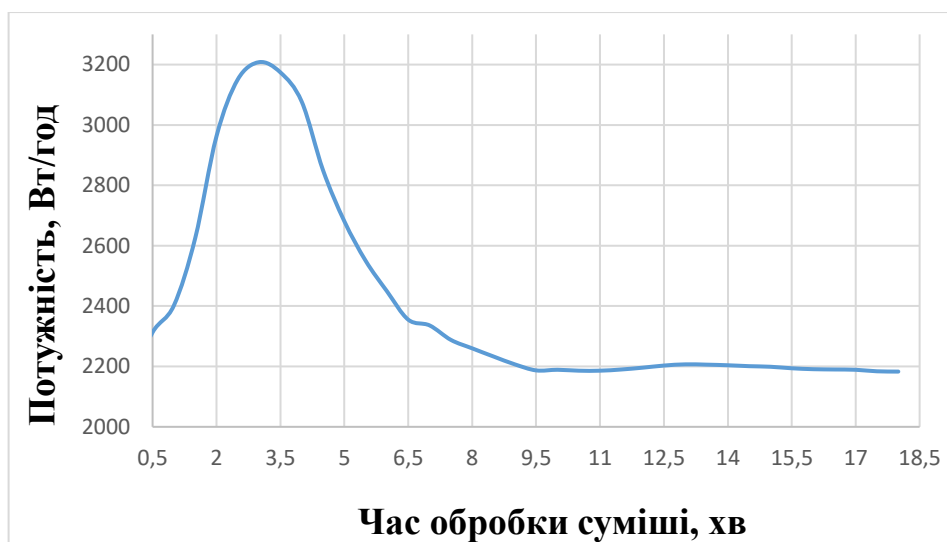
Таблиця 4.2

Результати проведених досліджень для часу подачі зерна 100 с

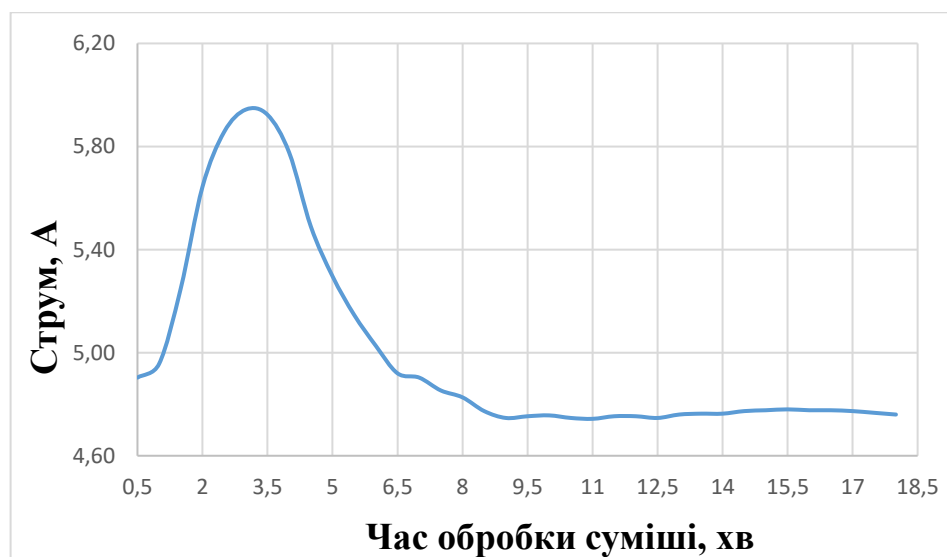
За 18 хвилин	
Споживана потужність, Вт	660,6
Кількість повних циклів обробки суміші	21,08
Кількість циклів обробки суміші після закінчення засипки	19,63
Температура суміші наприкінці обробки, °С	48,6
Середньоповерхневий розмір частинок зерна, мкм	380
Рівномірність гранулометричного складу, мкм	355-405
За 23 хвилини 45 секунд	
Споживана потужність, Вт	870
Кількість повних циклів обробки суміші, шт	30
Кількість циклів обробки суміші після закінчення засипки	28,51
Температура суміші наприкінці обробки, °С	54,5
Середньоповерхневий розмір частинок зерна, мкм	300
Рівномірність гранулометричного складу, мкм	280-320

Аналогічні дослідження були проведені при іншому часі засипки зерна, який рівний 200 с. На рис. 4.10 показано зміну енергетичних параметрів електричного двигуна РПА для даного часу засипки зернового компоненту.

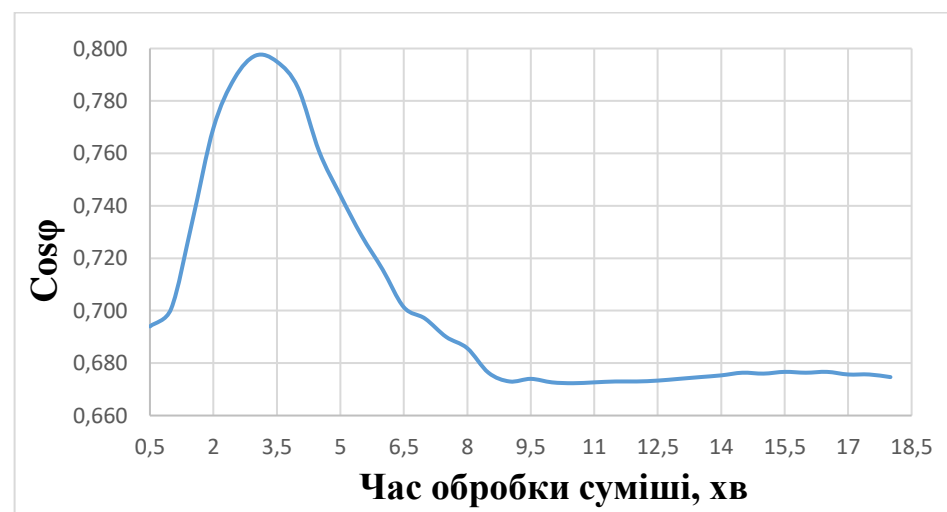
При збільшенні часу засипки зерна до 200 секунд спостерігається суттєве збільшення навантаження на початковій ділянці обробки середовища. В результаті того, що інтенсивність подачі зерна стає в два рази повільнішою, циркуляція водозернової суміші по трубопроводах між камерою та бункером суттєво пришвидшується, що в свою чергу призводить до зростання споживаної енергії.



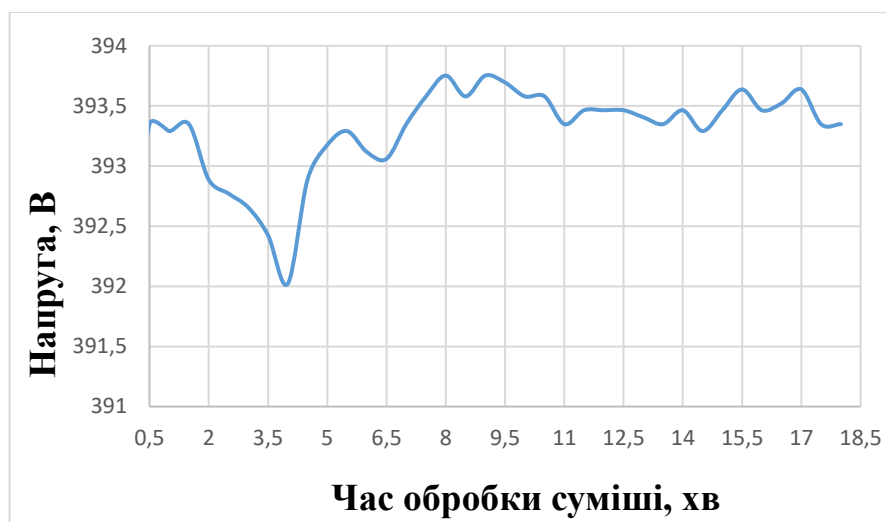
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.10. Залежність споживаної потужності(а), струму (б), коефіцієнту потужності(в) та напруги живлення(г) двигуна від часу обробки суміші при часі засипки зерна 200 с

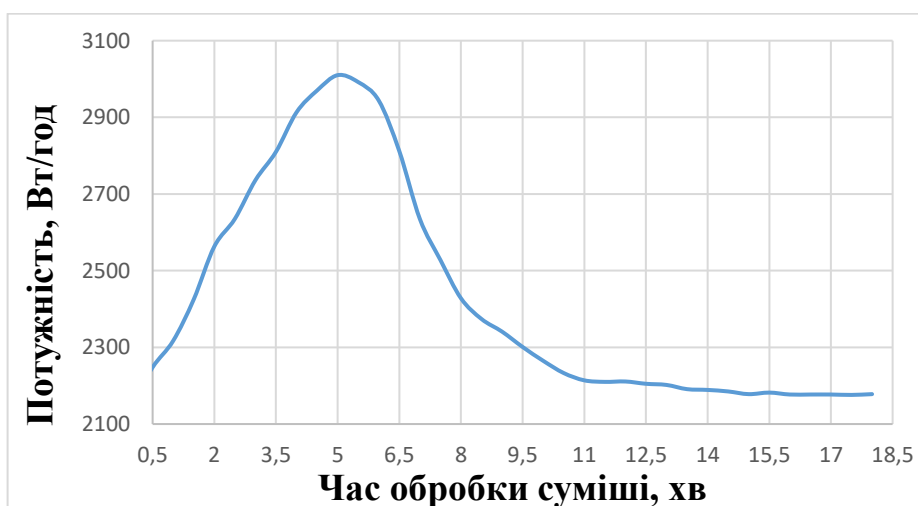
Таблиця 4.3

Результати проведених досліджень для часу подачі зерна 200 с

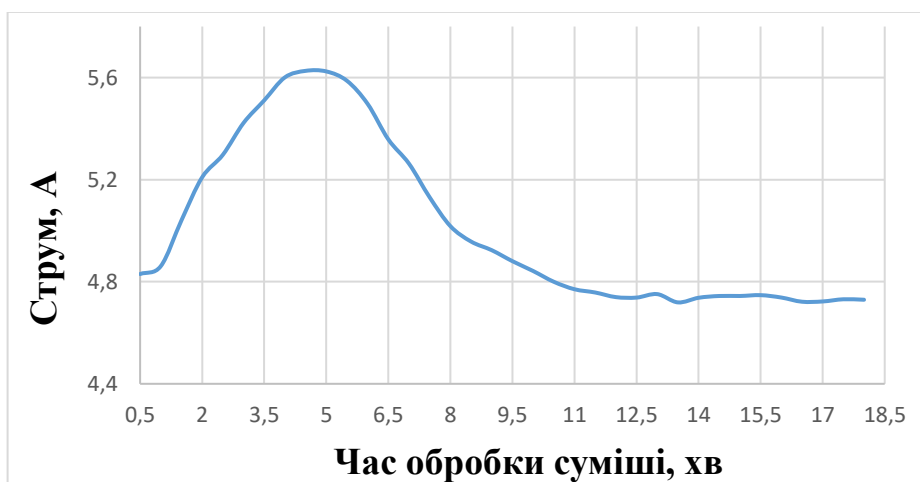
За 18 хвилин	
Споживана потужність, Вт	721,7
Кількість повних циклів обробки суміші, шт	31
Кількість циклів обробки суміші після закінчення засипки	25,93
Температура суміші наприкінці обробки, °C	59,6
Середньоповерхневий розмір частинок зерна, мкм	295
Рівномірність гранулометричного складу, мкм	280-310
За 17 хвилин 30 секунд	
Споживана потужність, Вт	704,7
Кількість повних циклів обробки суміші, шт	30
Кількість циклів обробки суміші після закінчення засипки	24,91
Температура суміші наприкінці обробки, °C	59,2
Середньоповерхневий розмір частинок зерна, мкм	300
Рівномірність гранулометричного складу, мкм	285-315

За 18 хвилин обробки водозернового середовища було спожито близько 721,7 Вт електроенергії. Середній розмір частинок зерна при такій обробці становить близько 295 мкм (кількість циклів обробки – 31). Отриманий гранулометричний склад кормової суміші є дещо нижчим від норми. З метою отримання необхідного розміру частинок та зменшення споживаної енергії час обробки суміші можна знизити на півхвилини – за 17,5 хв обробки буде затрачено 704,7 Вт енергії, а середньоповерхневий розмір частинок зерна буде становити 300 мкм. Основні результати проведених досліджень для періоду засипки зерна рівному 200 с наведені в таблиці 4.3

На рис. 4.11 показано зміну енергетичних параметрів електричного двигуна РПА для часу засипки зерна 300 с.



а)



б)



в)



г)

Рис. 4.11. Залежність споживаної потужності(а), струму (б), коефіцієнту потужності(в) та напруги живлення(г) двигуна від часу обробки суміші при часі засипки зерна 300 с

За 18 хвилин обробки водозернового середовища(час подачі зерна становить 300с) було спожито близько 727,8 Вт електроенергії. Середній розмір частинок зерна при такій обробці становить близько 290 мкм(кількість циклів обробки – 31,82). Для отримання необхідного розміру частинок зерна в 300 мікрон та зменшення споживаної потужності час обробки суміші можна знизити на 45 секунд – за 17хв 15 с обробки буде затрачено 700,6 Вт енергії. Отриманий гранулометричний склад кормової суміші нижчій від норми, як і в

попередньому досліді, проте його рівномірність гірша – зустрічаються часточки з розміром від 275-325 мкм(таблиця 4.4). Це пов'язано з більш тривалим часом засипки зерна.

Таблиця 4.4

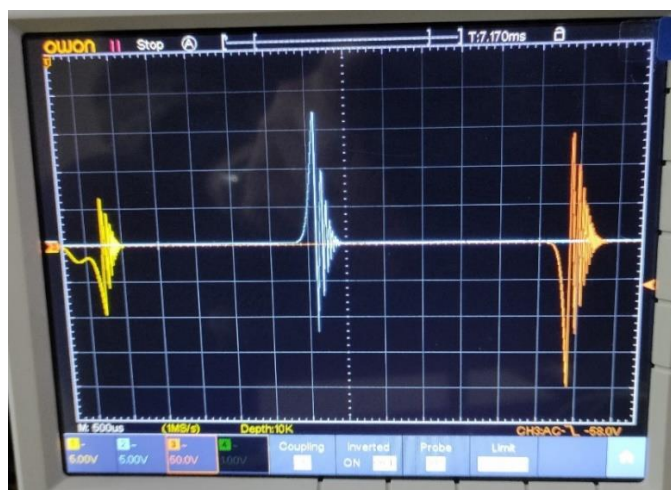
Результати проведених досліджень для часу подачі зерна 300 с

За 18 хвилин	
Споживана потужність, Вт	727,8
Кількість повних циклів обробки суміші, шт	31,82
Кількість циклів обробки суміші після закінчення засипки	24,25
Температура суміші наприкінці обробки, °С	57,8
Середньоповерхневий розмір частинок зерна, мкм	290
Рівномірність гранулометричного складу, мкм	265-315
За 17 хвилин 15 секунд	
Споживана потужність, Вт	700,6
Кількість повних циклів обробки суміші, шт	30
Кількість циклів обробки суміші після закінчення засипки	22,51
Температура суміші наприкінці обробки, °С	57,1
Середньоповерхневий розмір частинок зерна, мкм	300
Рівномірність гранулометричного складу, мкм	275-325

Порівнюючи результати досліджень при різній інтенсивності подачі зернового компоненту до робочої камери РПА можна зробити наступні висновки. Енергетичні параметри електродвигуна(споживана потужність, струм та коефіцієнт потужності) змінюються однаково в залежності від навантаження установки – при збільшенні/зменшенні навантаження збільшуються/зменшуються вищеперераховані показники. Напруга живлення при цьому коливається не більше ніж на 2-3 В. Споживана потужність установки досить сильно залежить від кількості твердої фази та швидкості потоку середовища – зі збільшенням твердої фази та швидкості потоку середовища збільшуються енергетичні витрати. Проте слід зазначити, що при

збільшенні кількості твердої фази в суміші, швидкість її потоку зменшується і навпаки, при зменшенні кількості твердої фази швидкість потоку кормової суміші збільшується. Це означає, що найоптимальнішим варіантом є вибір середньої інтенсивності подачі зерна в робочу камеру РПА, тобто 200 секунд. При такій інтенсивності отримується оптимальний розмір частинок зерна в суміші з однорідним складом та мінімальною споживаною потужністю на її приготування за 17,5 хвилин.

На рис. 4.12 зображені осцилограми струму асинхронного двигуна в момент його пуску.



а)



б)

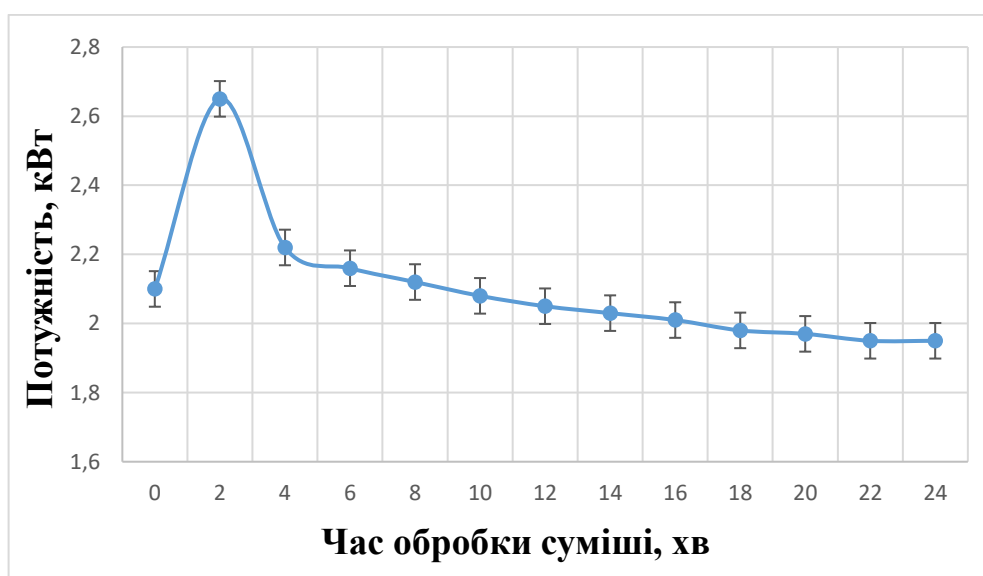
Рис. 4.12. Осцилограма струмів при пуску двигуна РПА(а – загальний вид, б – фаза С в розширеному вигляді)

Двигун РПА запускається не в холосту, а з попередньо набраною в бункер кількістю води, необхідною для проведення експериментальних досліджень. Для відтворення осцилограми використовувався осцилограф марки «Owon» з додатковими шунтами. Отримана в режимі реального часу осцилограма пускового струму дає можливість простежити реакцію електродвигуна РПА на величину навантаження, яким слугує вода в робочій камері. Як видно з осцилограми в момент пуску струм спочатку розгортається повільно, потім з'являється короткочасний пік струму, який при збільшенні швидкості ротора до номінальної поступово спадає. Пояснюється це характером зміни опору обмоток двигуна. Пусковий струм двигуна складається із змінної складової, загасаючої в міру збільшення частоти обертання ротора, і аперіодичної складової, загасаючої протягом декількох періодів. Тривалість загасання періодичної складової пускового струму до значення номінального струму залежить від параметрів електродвигуна і умов пуску. При пуску з навантаженням розгону електродвигуна до номінальної швидкості відбувається повільніше і тривалість спаду струму збільшується. Це пояснюється тим, що прискорення обертання ротора залежить від значення надлишкового моменту, якщо він додатній, то двигун набирає номінальну частоту обертання ротора швидко і легко.

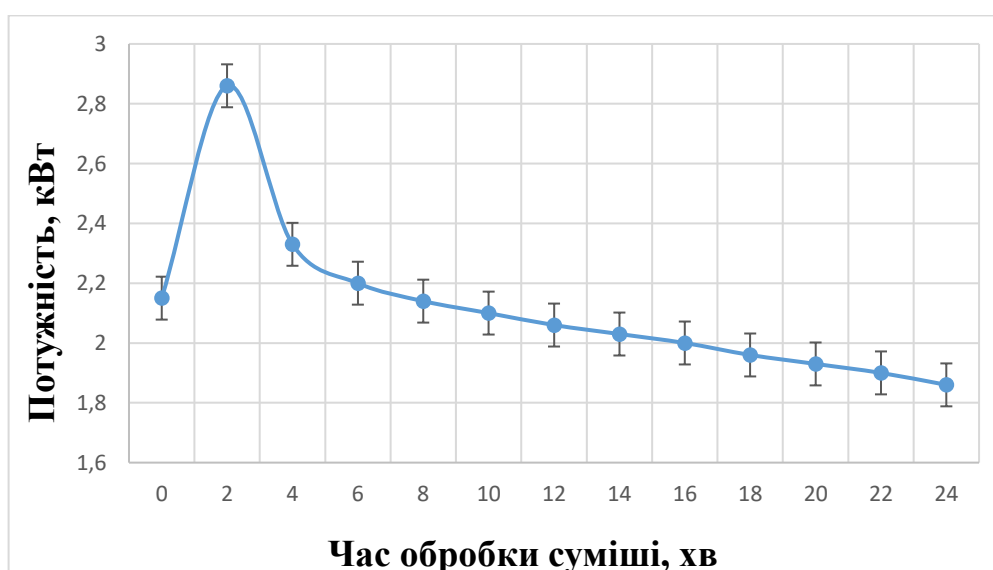
На наступному етапі роботи досліджувалися впливи вмісту твердої фази в кормовій суміші, температури середовища та терміну її обробки на енергетичні витрати роторно-пульсаційного апарата. Результати проведених досліджень приведені на рис. 4.13-4.15.

На рис. 4.13(а) наведені значення споживаної потужності в різні моменти часу при концентрації пшениці в кормовій суміші 10%. Аналіз отриманих даних показує, що в початковий момент часу споживана потужність максимальна і поступово зменшується по мірі обробки водозернового середовища. Зі збільшенням концентрації зернової фракції енергетичні витрати також збільшуються (Рис. 4.13 б, в). Це пояснюється тим, що зі збільшенням твердої фракції пшениці в оброблюваному середовищі

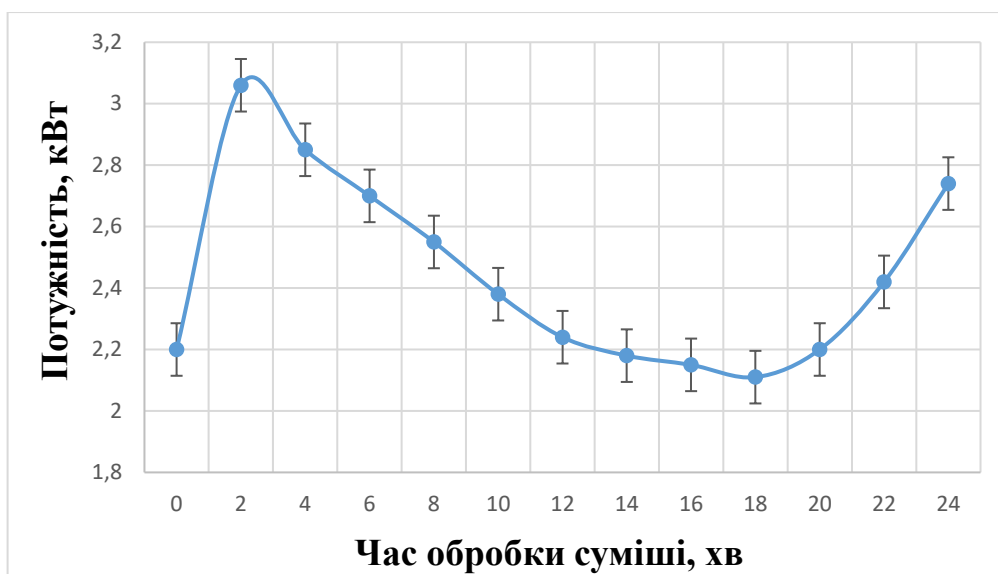
збільшується сила тертя в робочих органах установки, а ,отже, потрібно витратити більшу кількість енергії на подолання опору тертя. Характерно, що на останніх стадіях приготування кормової суміші при високій концентрації зерна відбувається підвищення споживаної потужності електродвигуна. Цей факт обумовлений підвищенням в'язкості кормової суміші при її нагрівання. Збільшення температури призводить до збільшення в'язкості розчинів, що також веде до збільшення споживаної потужності, необхідної для обробки середовища. Підвищення в'язкості пояснюється початком клейстеризації крохмалю в зерновій суміші.



а)



б)

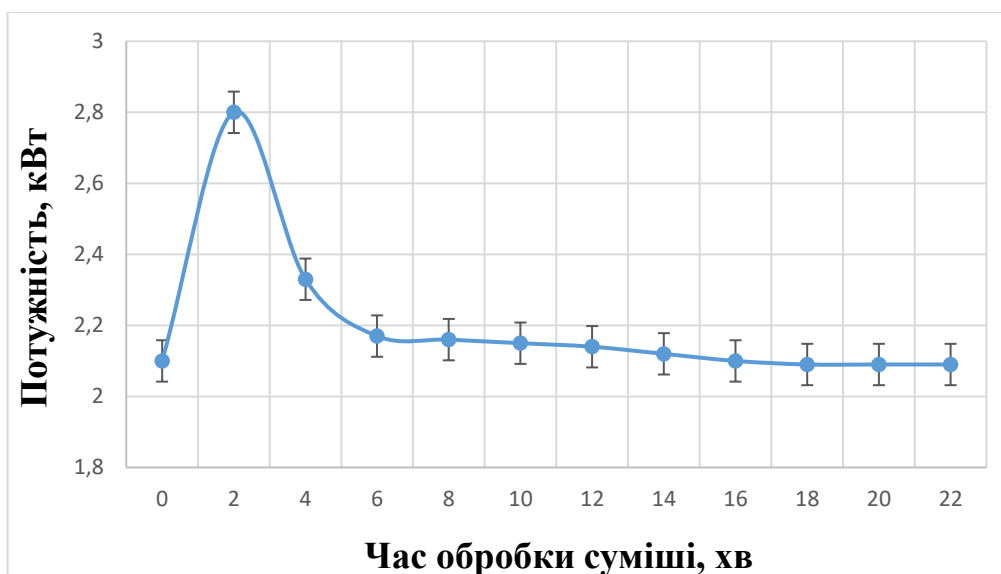


в)

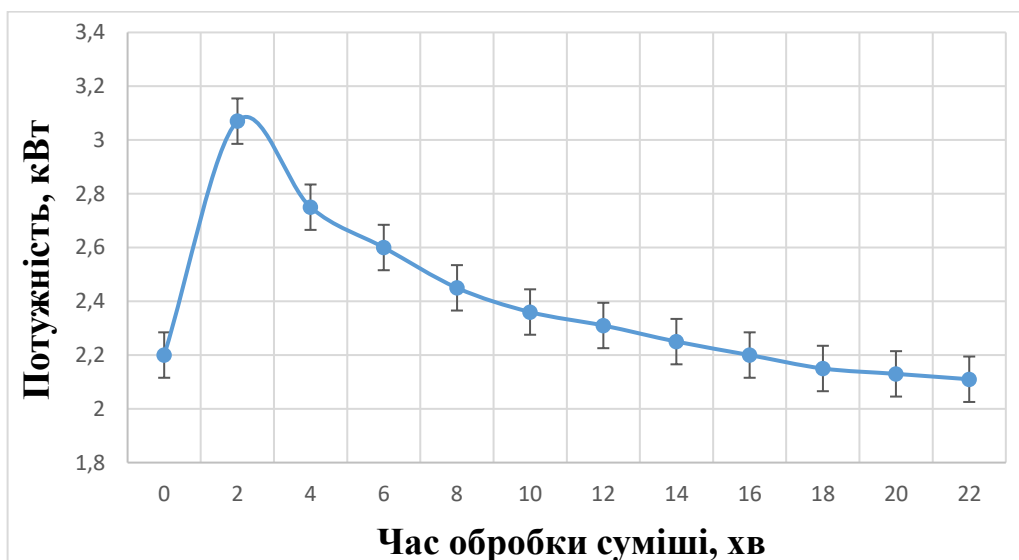
Рис. 4.13. Зміна споживаної потужності РПА при обробці водозернової суміші при різних концентраціях пшениці: а) 10%; б) 20%; в) 30%

На рис. 4.14 наведена величина споживаної потужності електродвигуна РПА в різні моменти часу для кормової суміші з використанням кукурудзи при її концентрації в 10% та 30%.

Слід зазначити, що найбільша споживана потужність двигуна, як і для водозернової суміші з використанням пшениці, спостерігається на початкових стадіях обробки, коли велика частина енергії витрачається на подрібнення зерна. Зі збільшенням зернової фракції в три рази (Рис. 4.14б) енергетичні витрати також збільшуються. Разом з тим, на кінцевих стадіях обробки споживана потужність практично не залежить від концентрації зерна кукурудзи у суміші. На графіках обробки водозернової суміші типу кукурудза-вода споживана потужність не підвищується на кінцевих етапах приготування корму на відміну від суміші типу пшениця-вода, оскільки, процес клейстеризації крохмалю зерен кукурудзи на момент закінчення приготування кормової суміші ще не розпочався.



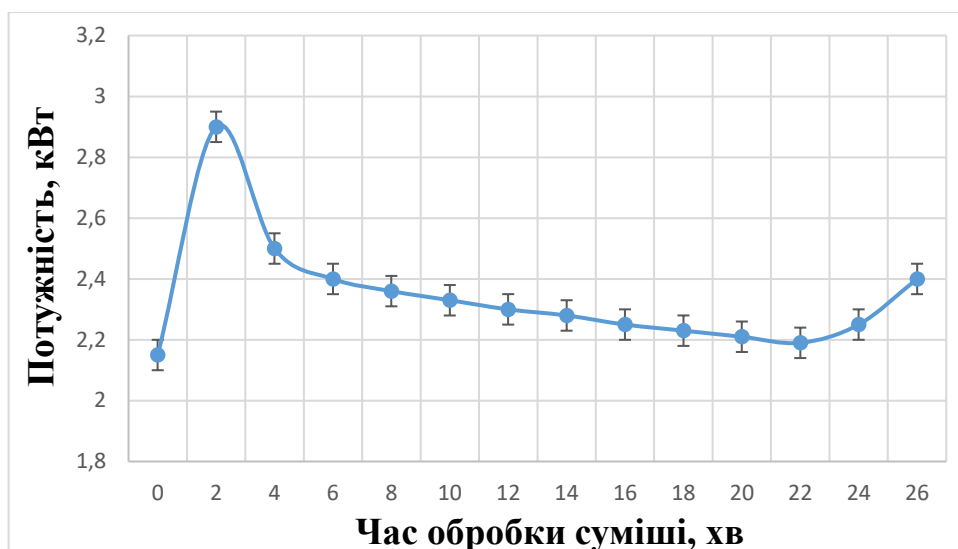
а)



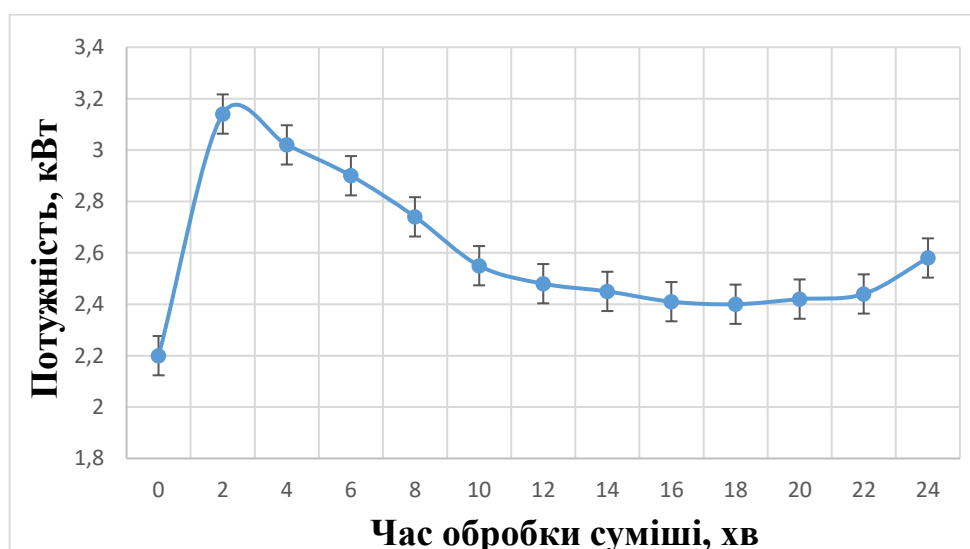
б)

Рис. 4.14. Зміна споживаної потужності РПА при обробці водозернової суміші при концентраціях кукурудзи 10%(а) та 30%(б)

На рис. 4.15 наведені результати експериментальних досліджень стосовно енергетичних витрат при обробці кормової суміші типу ячмінь-вода. Як слідує з аналізу отриманих залежностей загальні тенденції витрат споживаної потужності зберігаються у порівнянні з пшеничним і кукурудзяним кормами. При збільшенні концентрації ячменю в рідкій зерновій суміші споживана потужність також зростає.



а)



б)

Рис. 4.15. Зміна споживаної потужності при обробці водозернової суміші при концентраціях ячменю 10%(а) та 30%(б)

Отримані експериментальні результати дають можливість провести оцінку енергетичних витрат, які необхідні для приготування одиниці кормової продукції в роторно-пульсаційному апараті.

По мірі обробки водозернового середовища в роторно-пульсаційному апараті підвищується її температура, а отже і її в'язкість. Зміна цих двох параметрів має вагомий вплив на споживану потужність, яка необхідна для проведення процесу приготування водозернової суміші роторно-пульсаційній

установці. В таблиці 4.5 приведено залежності споживаної потужності РПА від температури та в'язкості крохмалевмісного середовища. З отриманих даних видно, що зі збільшенням тривалості обробки водозернової суміші збільшується її температура. Збільшення температури призводить до збільшення в'язкості розчину, що в свою чергу призводить до підвищення споживаної потужності агрегату.

Таблиця 4.5

Залежність споживаної потужності РПА від температури та в'язкості
оброблювального середовища

Температура середовища, °C	В'язкість, Па·с	Споживана потужність, кВт
35	0,8	2,0
40	1,0	2,2
45	1,3	2,4
50	1,6	2,6
55	2,4	3,3
60	2,7	3,6

Опираючись на технологічні вимоги для приготування рідких кормів та оптимальних витрат електроенергії на їх диспергування в роторно-пульсаційній установці, дослідження слід проводити при вмісті твердої фази 30%, температурі суміші не більше 55°C та в'язкості близько 2 Па·с. Час засипки зернового компонента при цьому повинен становити 200 секунд.

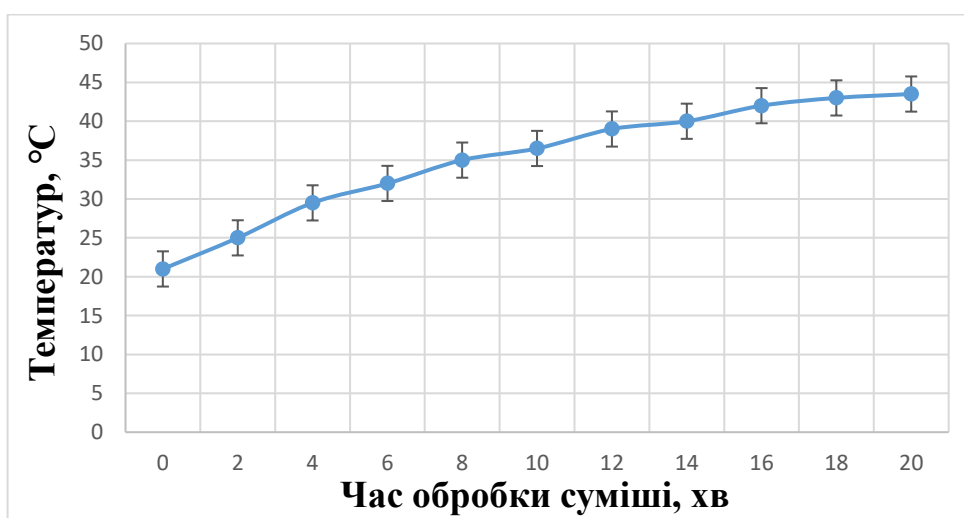
4.2.3. Дослідження зміни температури при обробці кормової сировини

Відомо, що при проходженні рідини через робочу камеру роторно-пульсаційного апарату підвищується її температура. Нагрівання суміші в РПА є наслідком дисипації кінетичної енергії потоку, тобто результатом перетворення механічної енергії в теплову. Вивченню даного питання в роторно-пульсаційних установках циліндричного типу присвячено досить не

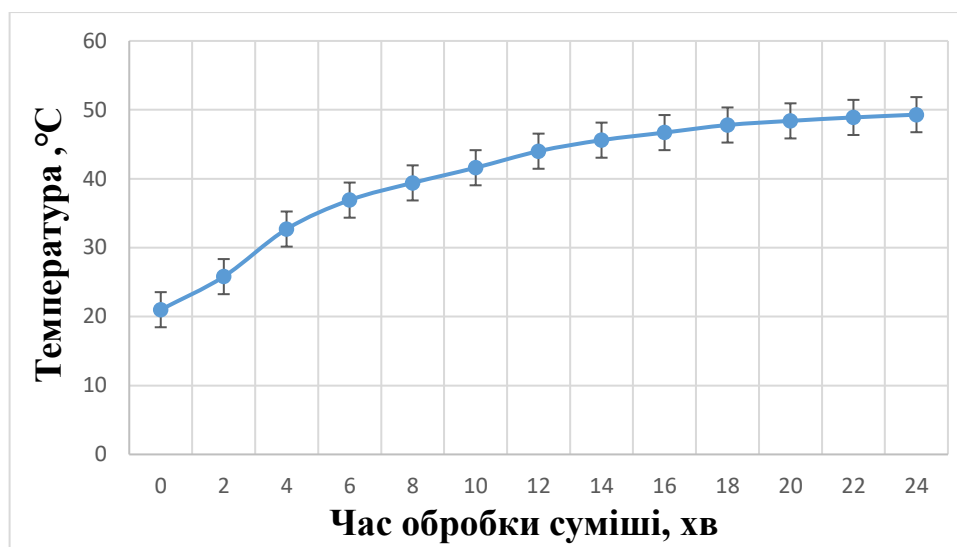
мало наукових публікацій, з яких слід виділити роботи [100, 101]. При обробці гетерогенних середовищ в РПА відбувається підвищення температури за рахунок енергії дисипації [102]. За звичай, при підвищенні температури зменшується в'язкість розчинів. Проте, при диспергуванні водозернової суміші в РПА зі збільшенням температури та зменшенням середньоповерхневого розміру частинок зерна в'язкість рідини підвищується. Це можна пояснити тим, що зернові культури містять велику кількість крохмалю – від 50 до 70%. Температура клейстеризації крохмалю для кожної зернової культури різниться. В основному вона коливається в межах 50-75 °C [103]. Тому, при досягненні температури суміші 50 °C починається процес клейстеризації крохмалю, що значно підвищує в'язкість водозернової суміші.

Температурні характеристики рідких зернових кормів під час їх приготування відіграють важливу роль, оскільки для підігріву корму необхідні додаткові витрати енергоресурсів та обладнання. З цією метою проводилися вимірювання температур кормової суміші з використанням зерна пшениці, кукурудзи та ячменю в залежності від часу обробки. Результати досліджень наведені в графіках на рис. 4.16-4.18.

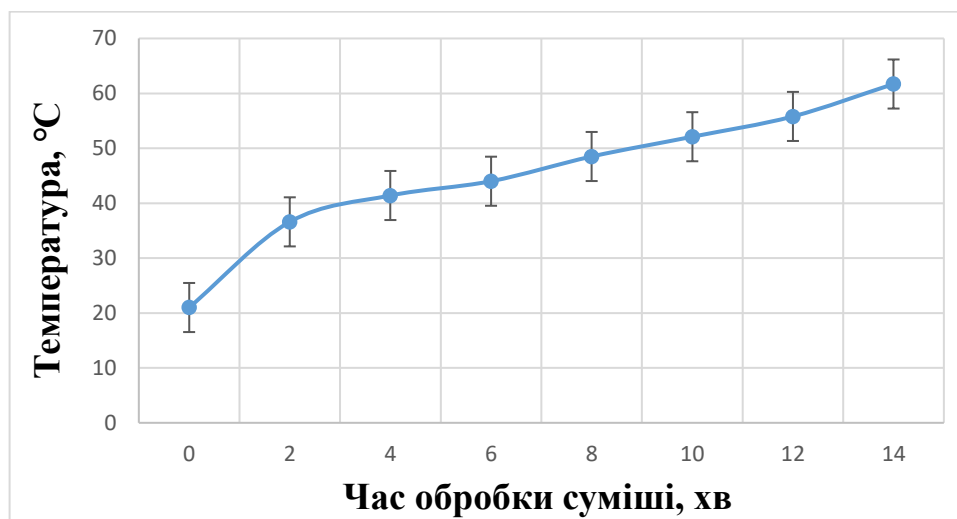
На рис. 4.16 приведені залежності температури пшеничної суміші відносно часу обробки сировини в роторно-пульсаційному апараті при концентрації зернового компонента в кормі відповідно 10%, 20% та 30%.



а)



б)

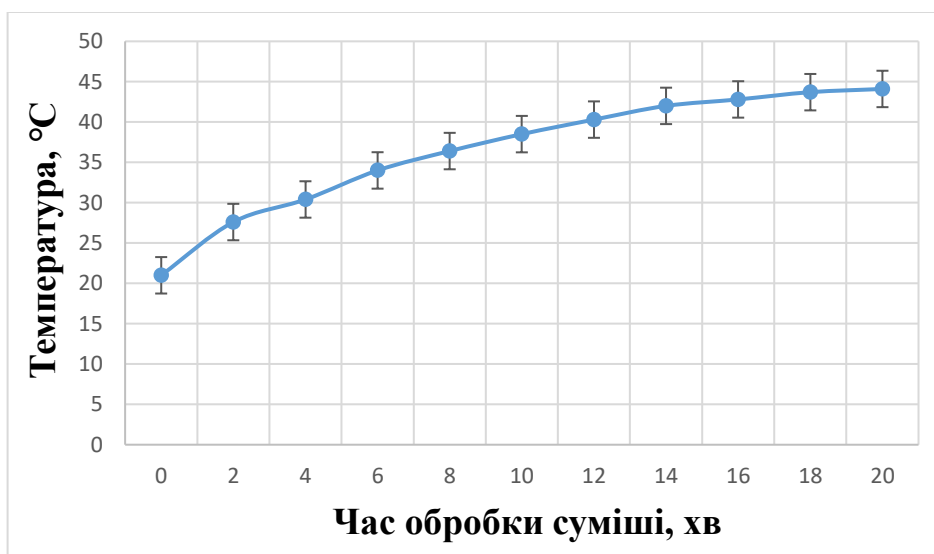


в)

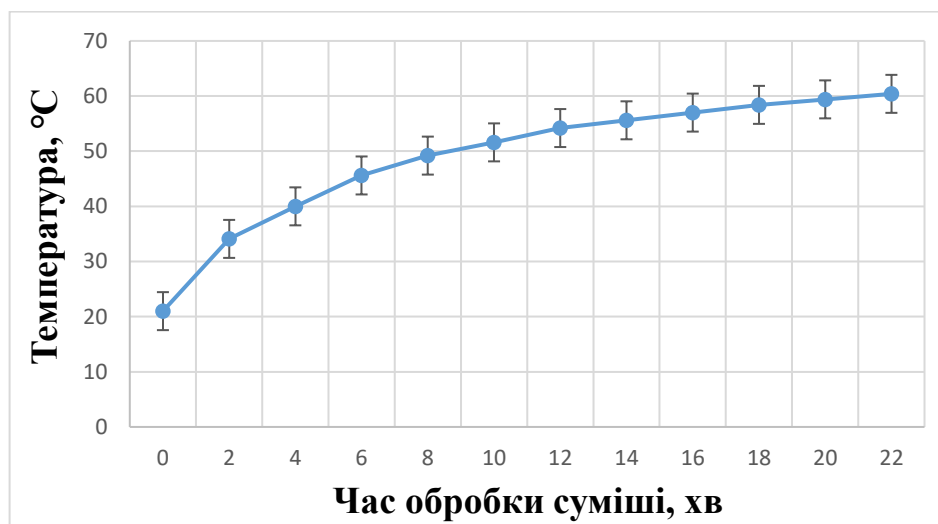
Рис. 4.16. Залежність температури рідкої зернової суміші при різних концентрації в ній пшениці: а) 10%; б) 20%; в) 30%

Отримані залежності показують підвищення температури рідкого зернового корму по мірі його обробки. Вказані процеси обумовлені дисипацією кінетичної енергії обертання ротора і перетворенням її в теплову енергію. З отриманих графічних залежностей випливає, що при більшій концентрації зерна у водозерновій суміші приріст температури буде вищий, що обумовлено більшими витратами енергії на її приготування.

На рис. 4.17 наведені залежності температур від часу для водозернових сумішей з використанням кукурудзи з відсотковим вмістом 10% та 30%. Як показують отримані графічні залежності приріст температури в процесі обробки рідкої зернової суміші з використанням кукурудзи залежить від її концентрації – при вмісті твердої фази кукурудзи в суміші 10% приріст температури складає 23°C за 20 хвилин обробки, а при концентрації 30% температура підвищується на 39°C за 23 хвилини.



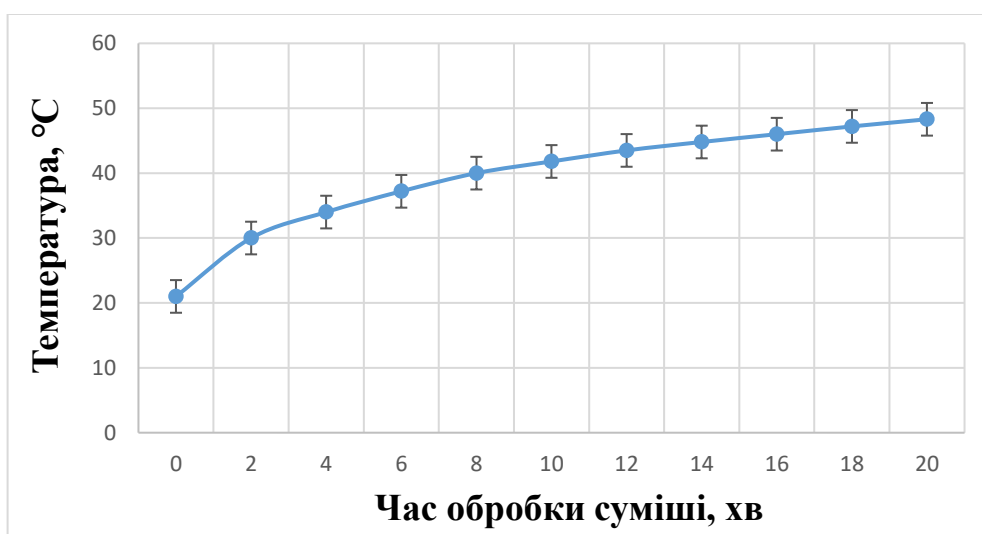
а)



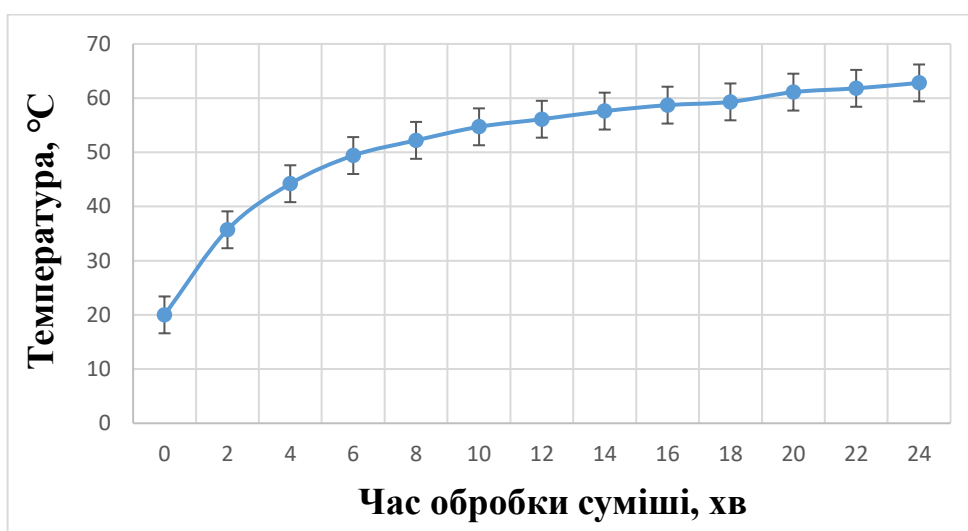
б)

Рис. 4.17. Залежність температури рідкої зернової суміші при концентрації в ній кукурудзи 10%(а) та 30%(б)

Аналогічні залежності отримані для ячмінного корму при його концентраціях у водозерновій суміші 10% та 30%(рис. 4.18). Характерно, що для ячмінної кормової суміші підвищення температури є дещо вищою в порівнянні з пшеничною та кукурудзяною рідкою сумішшю – приріст температури при концентрації ячменю в суміші 23% становить 43°C за 25 хвилин, тоді як при аналогічній концентрації пшениці та кукурудзи у водозерновій суміші прирости температури є меншими.



а)



б)

Рис. 4.18. Залежність температури рідкої зернової суміші при концентрації в ній ячменю 10%(а) та 30%(б)

Отримані дані свідчать про те, що зі збільшенням тривалості обробки водозернової суміші в РПА збільшується її температура. Зі збільшенням температури збільшується в'язкість розчинів, що веде до збільшення споживаної потужності необхідної для обробки водозернового середовища. Різке підвищення в'язкості середовища в інтервалах температур 50-62°C пояснюється початком процесу клейстеризації крохмалю зернової суміші. Зі зменшенням розміру диспергованого зерна та збільшенням температури клейстеризація крохмалю проходить інтенсивніше. Зниження розміру часток зерна менше 300 мкм і збільшення температури понад 60°C призводить до повної клейстеризації крохмальних зерен, збільшення в'язкості більше 3 Па·с і неможливості обробки в РПА. Для подальшої обробки необхідно проводити розрідження крохмалю за допомогою спеціальних ферментних препаратів.

Таким чином, можна зробити висновок, що використання дискретно-імпульсного введення енергії в крохмаловмісне середовище, яким являється водозернова суміш, супроводжується дисипацією кінетичної енергії обертання ротора у теплову енергію. Вказані явища обумовлені турбулізацією, кавітацією та іншими процесами в потоці рідини, які відбуваються в робочій камері роторно-пульсаційного апарата при приготуванні рідких зернових кормів.

4.3. Використання частотного перетворювача для зменшення споживаної енергії в процесі приготування рідких зернових кормів

Однією з особливостей використання частотного перетворювача є можливість зміни частоти напруги живлення електродвигуна з метою зменшення споживаної потужності установки. Економія електричної енергії відбувається з декількох причин. По-перше, за рахунок того, що коефіцієнт потужності зростає до найбільшого значення, тобто максимум потужності використовується на виконання корисної роботи, а мінімум – йде на втрати в підшипниках, нагрівання тощо. По-друге, високий коефіцієнт потужності зберігається на всіх режимах роботи електричного двигуна. Без використання

частотного перетворювача асинхронні двигуни при малому навантаженні мають коефіцієнт потужності в межах 0,3-0,4. По-третє, немає необхідності у використанні додаткового механічного регулювання (шиберах, заслінках, тормозах, вентилях, дроселях тощо), все це виконується електронним шляхом.

З проведених раніше досліджень витікає, що в певний момент технологічного процесу споживана потужність при обробці водозернового середовища стає постійною. Тому на даному періоді обробки суміші доцільно зменшити швидкість обертання ротора електродвигуна, що дозволить зменшити величину споживаної потужності на приготування рідких кормів. З цією метою проведено дослідження по визначенню залежності зміни споживаної потужності та витрати суміші від часу обробки при зменшенні частоти напруги живлення після зниження пікового навантаження на електричний двигун. Дослідження проведено для кормової суміші з вмістом твердої фази – 30%, час подачі зерна в бункер – 200 секунд. На рис. 4.10(а) видно, що споживана потужність поступово падає (з 3,21 кВт/год до 2,35 кВт/год) в інтервалі часу від 3 до 6,5 хвилини. Частоту напруги живлення з самого початку технологічного процесу зменшувати недоцільно, оскільки на стадії засипки зерна та деякий час після неї навантаження на валу асинхронного двигуна є найвищим. Частота напруги живлення від початку технологічного процесу і до 6,5 хвилини для кожного дослідження становить 50 Гц, оскільки даний період обробки водозернового середовища характеризується максимальним навантаженням. Після спаду навантаження, з метою економії електричної енергії, частота напруги буде зменшена до 45, 40, 35 та 30 Гц відповідно для кожного окремого дослідження.

Аналіз зміни споживаної потужності при зміні частоти напруги живлення після 6,5 хвилини наведено на рис. 4.19. Проведені дослідження показують, що при зменшенні частоти напруги живлення споживана потужність також зменшується. Це частково пов'язано з тим, що зменшується витрата та швидкість потоку суміші. Струм та напруга живлення зменшуються пропорційно частоті напруги. В таблиці 4.6 приведено порівняльний аналіз

технологічного процесу обробки водозернової суміші в розробленому РПА при зміні частоти напруги мережі за допомогою частотного перетворювача.

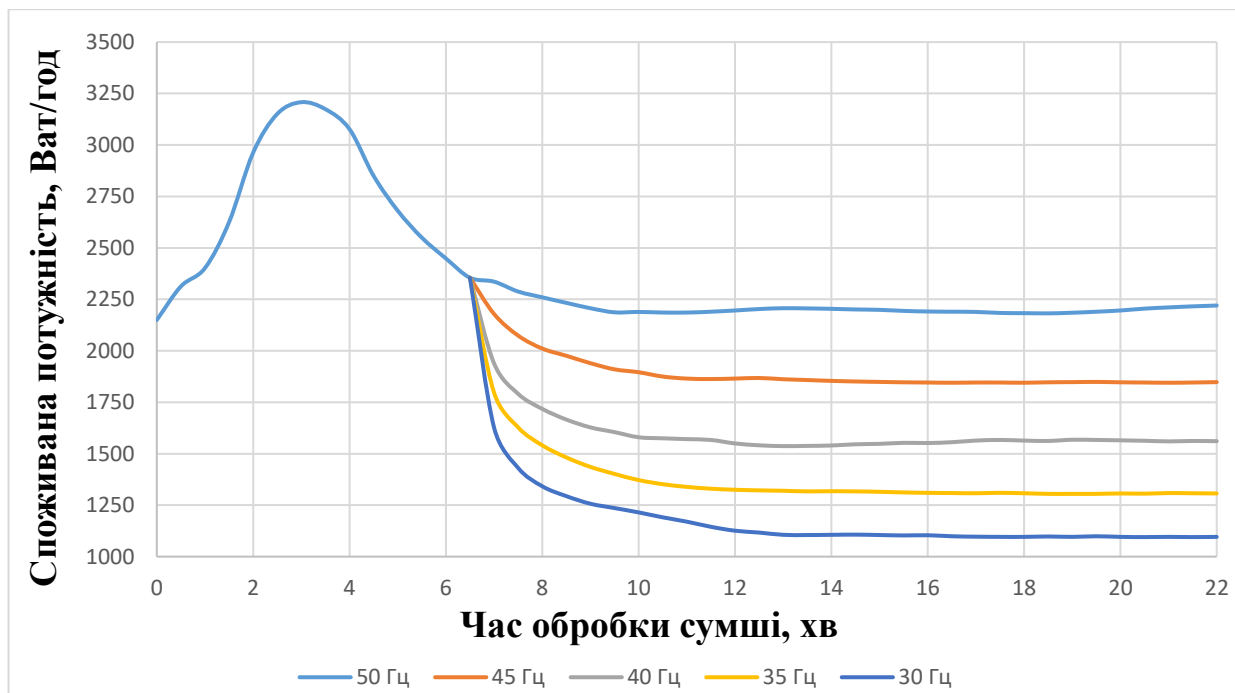


Рис. 4.19. Залежність зміни споживаної потужності електродвигуна від часу обробки суміші при зміні частоти напруги живлення

Як видно з таблиці 4.6, зменшення частоти напруги живлення призводить до того, що час обробки гетерогенного середовища, при якому буде отриманий корм з розмірами часточок близько 300 мкм, збільшується. При цьому затрати електричної енергії на приготування 100 кг рідкого корму та його кінцева температура зменшуються. Для покращеного засвоювання рідких кормів свійською худобою його температура повинна бути не менше 45-55°C.

Найбільш оптимальним варіантом для обробки гетерогенного середовища є той, при якому зміна частоти напруги мережі відбувається в межах 50-40 Гц. Обґрунтувати це можна тим, що при зниженні частоти напруги до 35Гц збільшується час обробки суміші на 2 хвилини 15 секунд, при цьому споживається лише на 1,7 Вт електроенергії менше, в порівнянні з вибраним варіантом. До того ж температура виготовленого корму

зменшується на 7,4°C. В іншому випадку, якщо знизити частоту напруги мережі до 45 Гц після 6,5 хвилини, то час обробки буде меншим на 1,5 хвилини(в порівнянні з тим, якщо частоту зменшити до 40 Гц), проте енерговитрати становитимуть вже 678,6 Вт, що на 21,5 Вт більше, ніж при запропонованому варіанті.

Таблиця 4.6

Аналіз технологічного процесу приготування рідких кормів при зміні частоти напруги живлення в межах від 30 до 50 Гц

Частота напруги, Гц	Час обробки суміші, хв	Споживана енергія на приготування корму, Вт	Температура виготовленого корму, °C
50	17,5	704,7	58,4
45	18,5	678,6	54,3
40	20	657,1	48,6
35	22,25	655,4	41,2
30	24,75	649	35,4

На рис. 4.20 графічно показано ефект від впровадження частотного перетворювача в електротехнічному комплексі для приготування рідких зернових кормів. Якщо порівнювати споживану потужність роторно-пульсаційного апарату при наявності та за відсутності частотного перетворювача, то використання останнього в процесі приготування рідкого

корму дає можливість зменшити енергетичні витрати на 6,75% за один цикл обробки водозернової кормової суміші масою 100 кг.

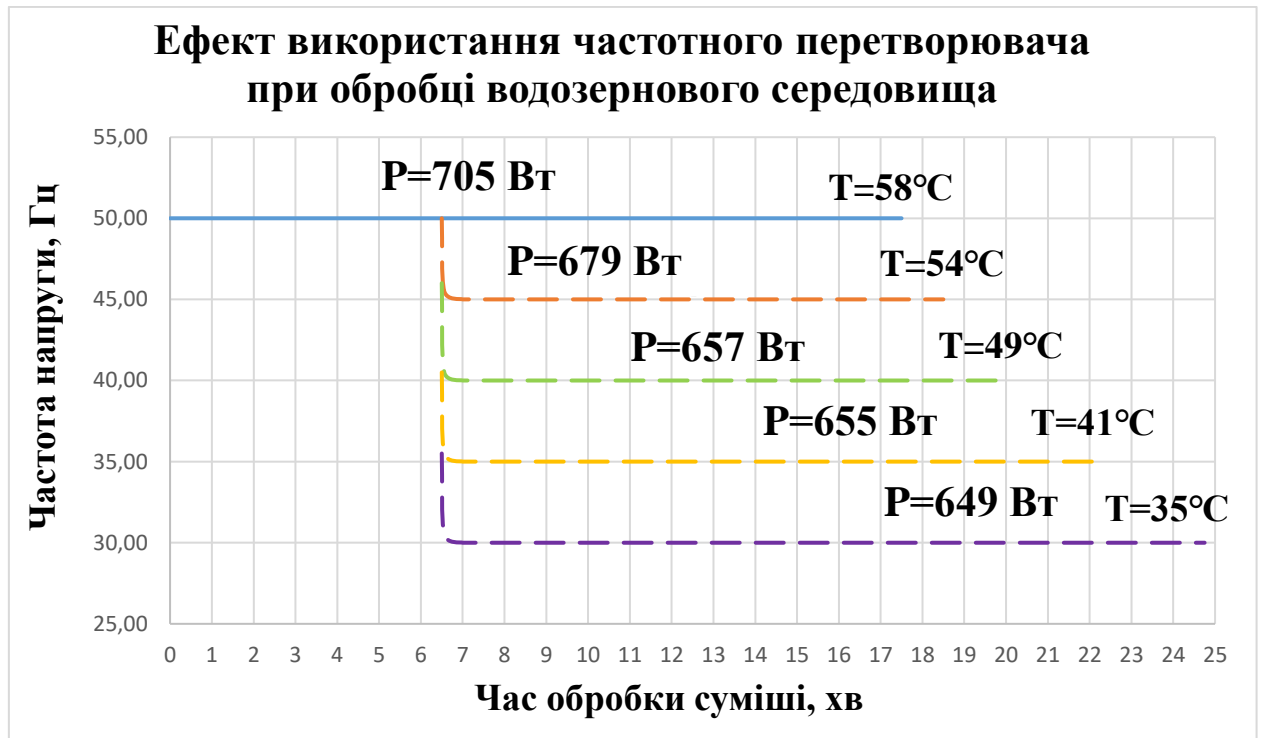


Рис. 4.20. Ефект використання частотного перетворювача в РПА при обробці водозернового середовища

На рис. 4.21-4.22 показані зміна частоти напруги живлення та навантаження електродвигуна для технологічного процесу приготування рідких зернових кормів за допомогою експериментального зразка роторно-пульсаційної установки. Конфігурацію представлених графіків можна пояснити наступним чином. Пуск асинхронного електродвигуна РПА виконується за допомогою частотного перетворювача за 5 секунд. В інтервалі часу від початку обробки водозернового середовища до 6 хв 30 с триває перший етап обробки суміші, при якому відбувається процес подачі твердої фракції зерна до роторно-пульсаційної установки. Дана стадія обробки характеризується високою інтенсивністю подрібнення зернового компоненту в робочих зонах ротора і статора, що супроводжується високим навантаженням на електродвигун. Збільшення кількості зерна, яке подається шнековим апаратом, призводить до збільшення споживаної потужності від

2,15 до 3,21 кВт/год. Після закінчення процесу засипки зерна інтенсивність подрібнення поступово знижується, споживана потужність падає до 2,36 кВт/год. Частота напруги живлення мережі на даному етапі становить номінальні 50 Гц.

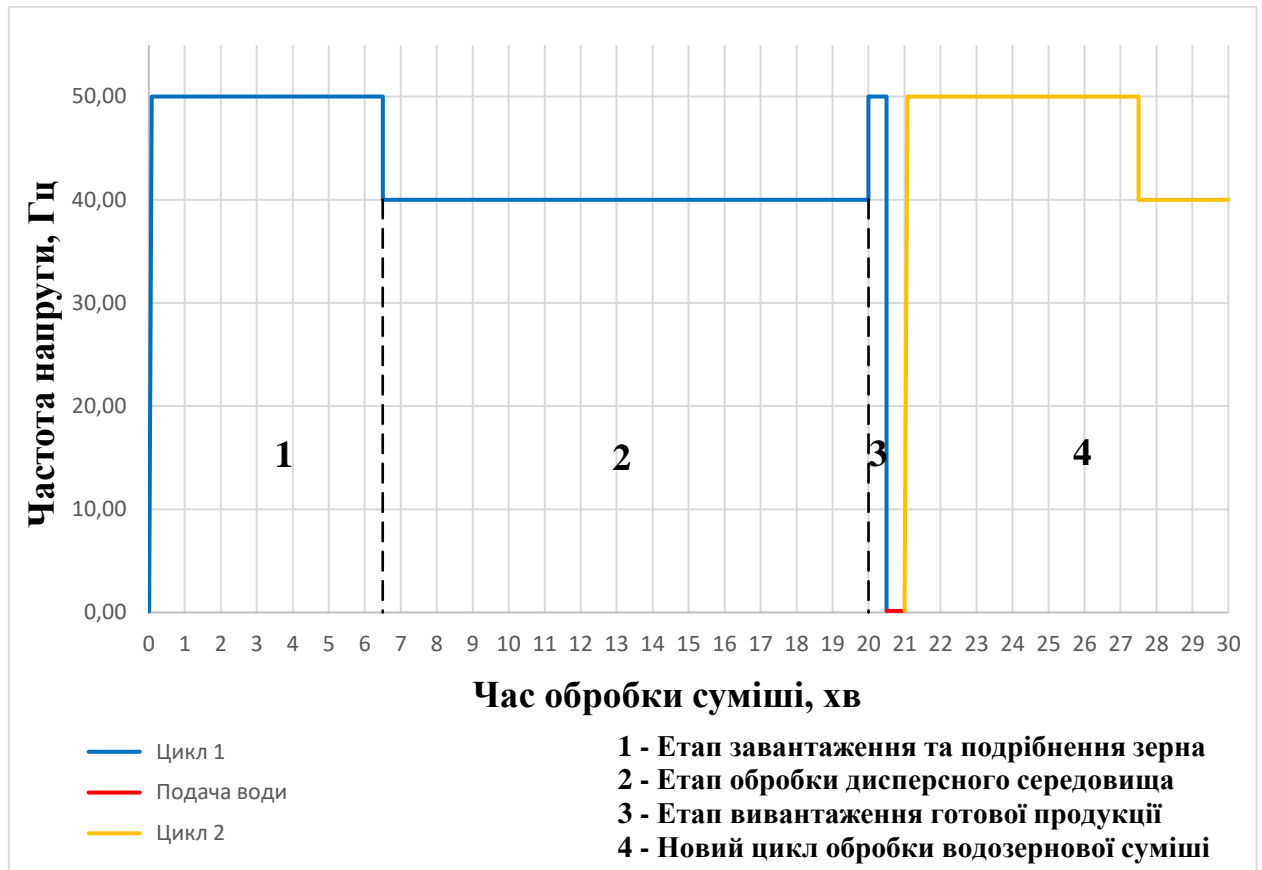


Рис. 4.21. Технологічний процес приготування рідких зернових кормів за допомогою роторно-пульсаційного апарату

Другий етап обробки гетерогенного середовища починається після 6,5 хвилини і триває до кінця процесу приготування кормової суміші, тобто до 20 хвилини. Ця стадія приготування кормів характеризується тим, що майже вся водозернова суміш вже знаходиться в дисперсному стані, і основна частина енергії витрачається на перекачування гомогенного середовища між робочими вузлами РПА. Частота напруги мережі знижується за допомогою частотного перетворювача до 40 Гц. Споживана потужність значно знижується з 2,36 до 1,58 кВт/год в інтервалі часу 6,5-10 хвилин. Після десятої хвилини крива

навантаження набуває прямолінійної форми, що свідчить про стабілізацію споживаної потужності. Далі до завершення обробки її числове значення коливається в межах від 1,54 до 1,58 кВт за годину.

Остання стадія – процес вивантаження приготовленого рідкого зернового корму з роторно-пульсаційної установки. Даний процес займає по часу близько півхвилини, частота напруги мережі на даному етапі підвищується з 40 до 50 Гц для пришвидшення процесу вивантаження готового продукту. У момент часу, коли вся маса виготовленого корму вивантажена з установки, клапан виведення готової продукції закривається і відкривається клапан для подачі води в робочу камеру РПА. Після цього можна починати наступний цикл приготування нової партії високоякісного рідкого корму для сільськогосподарських тварин за аналогічним алгоритмом.

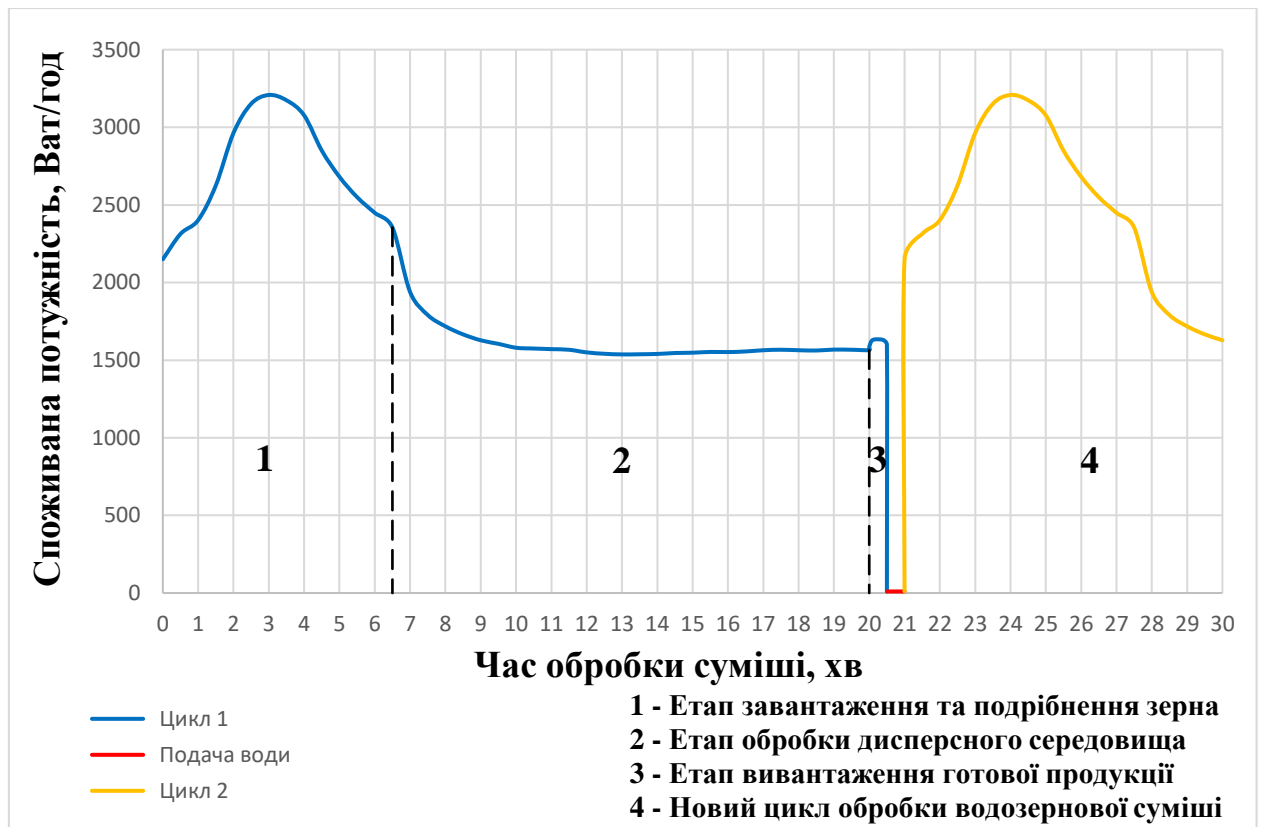


Рис. 4.22. Зміна навантаження електродвигуна роторно-пульсаційної установки в процесі приготування рідких зернових кормів

В результаті проведених досліджень було отримано оптимальний режим роботи електродвигуна, який необхідно використовувати при роботі РПА з використанням частотного перетворювача – для першого етапу обробки водозернової суміші, при якому відбувається основний процес подрібнення зерна необхідно підтримувати частоту напруги живлення електродвигуна 50Гц, на другому етапі приготування корму при обробці вже диспергованого корму частота напруги знижується за допомогою частотного перетворювача до 40Гц. Це дає можливість знизити загальні енергетичні витрати на 6,75% для одного циклу обробки кормової суміші масою 100 кг. Економічний розрахунок при використанні частотного перетворювача в електротехнічному комплексі для приготування рідких зернових кормів наведений в розділі 5.

Після визначення основного режиму роботи електродвигуна РПА можна провести остаточне налаштування для реле часу та визначити режим роботи шнекового конвеєра. Опираючись на проведені дослідження, було побудовано гістограми режимів роботи електромагнітних клапанів, які керуються за допомогою реле часу, та шнекового конвеєра, який керується за допомогою відповідного частотного перетворювача(Рис. 4.23).

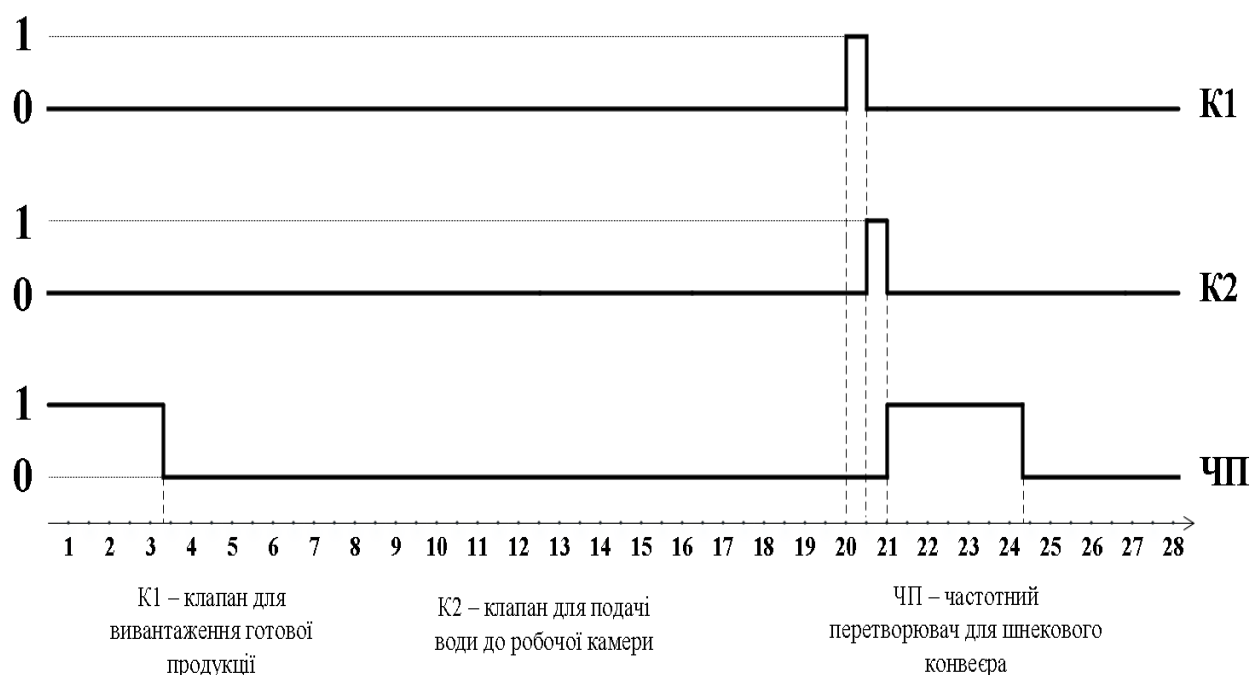


Рис. 4.23. Режимы работы клапанів та шнекового конвеєра

Шнековий апарат, як було раніше розраховано в розділі 3, має продуктивність в 816,5 кг/год. Для подачі зернового компоненту масою 30 кг за 200 секунд необхідно зменшити продуктивність за допомогою частотного перетворювача. Провівши прості розрахунки було визначено, що швидкість обертання шнека необхідно знизити майже в півтора рази, а точніше до швидкості 19,85 обертів за хвилину, що досягається при зміні частоти напруги з 50 Гц на 33 Гц. За один цикл приготування 100 кг рідкого корму за допомогою роторно-пульсаційної установки шнековий апарат, так само як і клапани для подачі води та виведення готової продукції, вмикаються та вимикаються лише один раз.

Гістограми на рис. 4.23 можна пояснити наступним чином. Цифра 1 відповідає режиму роботи «увімкнено», а 0 – режим роботи «вимкнено». Подача води до робочої камери перед початком першого циклу обробки здійснюється в ручному режимі за допомогою реле часу. Далі для кожного нового циклу реле часу автоматично комутує електромагнітний клапан для подачі води. Подача води відбувається за командою реле часу через контакт К2, час відкриття – 30 секунд, інтервал відкриття клапана – кожні 20,5 хв з моменту початку технологічного процесу обробки водозернового середовища. До іншого контакту реле часу К1 приєднується електромагнітний клапан для виведення готової продукції з установки, час відкриття клапана – 30 с, інтервал відкриття – кожні 20 хвилин. Шнековий апарат комутується через частотний перетворювач, час роботи – 200 с, інтервал увімкнення – 17 хв 40 с.

Висновки по розділу 4

В четвертому розділі дисертаційної роботи представлено новий електротехнологічний комплекс на основі РПА для приготування рідких кормів. За допомогою установки проведено експериментальні дослідження диспергування крохмалевмісного середовища.

1. Представлено схему виготовленого електротехнологічного комплексу та викладена методика проведення експериментальних досліджень.

2. З'ясовано та досліджено головні фактори впливу на дисперсність досліджуваної водозернової суміші. Деякі з них були визначені при чисельному моделюванні в другому розділі (міжциліндричний зазор, частота пульсації потоку, геометричні розміри робочих органів, швидкість обертання ротора), інші – були досліджені вже під час експериментальних досліджень (концентрація твердої фази в суміші, тривалість обробки).
3. Наведені результати експериментального дослідження процесів диспергування оброблювальних середовищ. Для визначення гранулометричного складу готової кормової суміші було застосовано оптичний мікроскоп Sigeta MB-202 з біноккулярною насадкою та цифровою камерою.
4. Досліджено головні фактори впливу на енергетичні характеристики РПА в процесі обробки водозернового середовища.
5. Визначено енергетичні витрати на приготування одиниці кормової суміші для різних видів зернових культур.
6. Наведено результати експериментальних досліджень, які свідчать про те, що використання частотного перетворювача в електротехнічному комплексі для приготування рідких кормів дозволяє зменшити енергетичні витрати на приготування одиниці кормової продукції в середньому на 6-7 % за рахунок зменшення швидкості обертання ротора на певних моментах часу технологічного процесу.
7. Досліджено зміни температури та в'язкості водозернового корму в процесі його обробки в РПА.

Проведено аналіз результатів експериментальних досліджень, який дозволив визначити оптимальні режими роботи при обробці водозернової суміші за допомогою нового електротехнічного комплексу.

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИГОТУВАННЯ РІДКИХ КОРМІВ

5.1. Існуюча технологія та устаткування для виготовлення рідкого зернового корму

Як і в будь-якій іншій технології, в системі з використанням рідкої годівлі тварин є свої нюанси, «плюси» та «мінуси». Використання рідкого корму дозволяє значно збільшити масогабарити худоби, оскільки такі корми є найкращими для тварин з точки зору засвоюваності та їх фізіології. Рідкий ферментований корм сприятливо впливає на стан травного тракту худоби. Разом з тим, технологія з використанням рідкого годування вимагає більших вкладень у основне обладнання для годівлі та вищих операційних витрат на його обслуговування та охолодження/підігрівання кормів. Якщо в базову комплектацію обладнання для приготування сухого корму повинні входити бункер для зберігання корму, транспортери та годівниці, то для приготування рідкого корму, крім вище переліченого необхідна кормоприготувальна станція, насоси для перекачки рідкого корму та система трубопроводів. Більш дешевше і зручніше при експлуатації обладнання для сухої кормороздачі і годівлі тварин вологим кормом поєднувати все це обладнання з водопоєм.

В ряді країн рідка годівля з контрольованим процесом ферментації для сільськогосподарських тварин дозволяє зменшити витрати на приготування корму в порівнянні з сухим згодовлюванням. Перевагою вказаної технології є можливість використання побічних продуктів діяльності підприємств в рідкій формі, до яких відносяться підприємства для вироблення алкогольних напоїв, молокозаводи, м'ясокомбінати, харчові комбінати тощо. До переваг відносять більш високу засвоюваність рідких кормів порівняно з сухими, яка є особливо важливою для літніх місяців; спрощене використання добавок, медикаментів та преміксів; зниження втрат кормової продукції; відсутні проблеми з гризунами, а також наявністю пилу; можливість відмовитися від поїлок і т.д.

Важливим моментом у відгодівлі худоби є необхідність дотримання оптимальних пропорцій в процесі приготування кормових сумішей. По традиційній схемі годування тварин ефективним вважають годування кормовою сумішшю з вологістю 60-70%. При збільшенні вологості корму понад 80 % це може призвести до ряду негативних наслідків. Встановлено, що при рідкому годуванні з вологістю 78-85% практично повністю відключаються слинні залози тварин, при підвищенні вологості комбікормів від 76 до 82% знижується використання тваринами кальцію на 8,2%, заліза – на 6,3-15,3%, фосфору – на 11,1%, міді – на 9,5-13,4%. При збільшенні кількості води у кормовій суміші підвищується швидкість проходження харчової маси через шлунково-кишковий тракт, при цьому відбувається зниження засвоюваності рослинних волокон тваринами. Вода, яка надходить в шлунок, швидко всмоктується і при цьому не встигає захоплювати достатню кількість слизу разом з продуктами розпаду білків, які є збудниками роботи шлункових залоз. Втрата соків може викликати набряки, лейкоцитоз, а також сприяє зниженню лужного резерву крові. При затримці води в організмі тварин підвищується фізіологічна норма на 8,7-9,4%. Дослідження вчених показало, що при підвищенні вологості корму понад нормативного показника на 4-8 % для супоросних та лактуючих свиноматок призводить до збільшення кількості мертвонароджених поросят на 0,5-0,7 голів в одному гнізді, а також призводить до зниження їх негативної маси на 0,2-0,8 кг, збереженість приплоду падає на 4,7-5,4%. При використанні корму з вологістю 65-73% для свиноматок, які мають на підсисі поросят, показник живої маси останніх в момент відлучення становить 17,2 кг, а для вологості 85-89% – 15,5 кг. Падіж поросят може досягати при цьому 15-16%. Слід відзначити, що депонування води в м'язах тварин і жировій тканині викликає пухкість загальної будови організму тварин – конституції, стають частішими випадки виникнення серцевої недостатності, як наслідок цього близько 15% худоби необхідно вибраковувати. Разом з тим, на думку британського професора Пітера Брукса,

технологія рідкої годівлі успішно застосовується на 60 великих фермах в Данії, використовується в Німеччині та в інших країнах Європи.

Годівля сільськогосподарських тварин рідким кормом може призвести до зниження вертикальної передачі ентеропатогену молодняку, причому передача їх через їжу може покращувати екофізіологію кишечника та стимулювати імунну систему тварин. Встановлено, що спроби використовувати грануляцію корму при високій температурі в харчовій промисловості з метою скорочення ймовірності появи бактерії *Salmonella* в кормах тварин не призвело до зниження числа випадків виникнення інфекцій, які викликані бактерією *Salmonella*. Окремі дослідження по виявленню бактерії *Salmonella* в німецьких фермах показало, що технологія використання гранульованого корму вважається фактором ризику для *Salmonella*. Дослідження, проведені в Данії, показали скорочення випадків виникнення *Salmonella* в процесі годівлі худоби сипучим, а не гранульованим кормом. При цьому виявлено невелику кількість тварин з позитивними результатами тестування на *Salmonella* при наявності в кормі достатньо великих шматочків їжі. Встановлено, що раціон, який базується на використанні гранульованих кормів руйнує функцію бар'єру на поверхні шлунку. При поїданні свинями сипкого корму, він тривалий період часу залишається у шлунку, причому на *Salmonella* впливає молочна кислота у проксимальній частині шлунку. Наявна концентрація молочної кислоти та тривалість її дії є достатніми для того, щоб знищити *Salmonella*. При поїданні тваринами гранульованого корму їжа затримується в шлунку з меншою тривалістю часу і концентрація молочної кислоти в шлунку є значно нижчою. З проведених досліджень випливає, що рідкі корми сприятливо впливають на стан кишечника та знижують випадки виникнення бактерій *Salmonella* у сільськогосподарських тварин [104].

Результати європейських досліджень показують, що випадків зараження *Salmonella* було на 8,2% більшим в стаді, де годування відбувалось гранульованим сухим кормом, на 4,2% більшим у стаді, в якому використовувався негранульований сухий корм, і лише на 1% більше в стаді,

якому годувували негранульований зволожений корм. Характерно, що для стад, в яких використовували рідку молочну сироватку, позитивність вмісту сірки складала лише 1% порівняно із 5,6% в стаді, для якого молочна сироватка не використовувалась взагалі. При дослідженні 320 ферм в Голландії ймовірність зараження *Salmonella* виявилась у десять разів нижчою на фермах, в яких для годівлі тварин був використаний рідкий корм порівняно з фермами, які використовували сухий корм. Також було зафіксовано часткове зниження інфекції на господарських фермах, де до корму додавали окислену сирну сироватку.

Проведені дослідження показують, що використання автоматичної системи годування тварин рідкими кормами призводить до зниження ризику виникнення інфекційних захворювань. Аналогічні дослідження, в яких підтверджено зниження випадків захворювання *Salmonella* при використанні рідкого корму, проводились також у Данії і Нідерландах. В цих країнах використовують побічні продукти харчової промисловості, причому для значної частини цих добавок відбувається ферментація молочнокислих бактерій і внаслідок цього кормові суміші мають низький рівень рН та містять досить велику кількість молочної кислоти. Висока концентрація молочної кислоти суттєво зменшує ймовірність появи *Salmonella* в кормах і дає можливість уникнути наявності цих бактерій на початку харчового ланцюжка. Таким чином, при включенні ферментованих побічних продуктів в раціон, який базується на рідкому кормі для тварин, можна суттєво підвищити безпечність кормових продуктів.

Технологічною лінією для приготування рідкого зернового корму, яка отримала широке розповсюдження в нашій країні та країнах Європи, є конструкція «Тихенко-Аргус», яка включає послідовно з'єднані і технологічно зв'язані між собою завантажувальний пристрій, два транспортери, очищувач та дозатор сировини, магнітну колонку, робочу ємність, подрібнювач для циклічної переробки сировини. Сировина для приготування корму подається до завантажувального пристрою, з якого за допомогою першого транспортера

надходить в очисник сировини, де остання очищається від механічних домішок. Одночасно з цим в дозатор додають різні добавки, що поліпшують поживність і якість вихідного корму. У ємність диспергатора через дозатор заливається вода в об'ємі, не менше половини об'єму оброблюваної суміші. Після цього вмикають електропривод, який приводить в обертання насос та ротор і за допомогою транспортера подають оброблювану сировину. Недоліками такої технологічної лінії є відносно невисока щільність кавітації в робочих органах установки (через те, що отвори пазів ротора і статора виконані у вигляді дозвукових сопел, профіль котрих призначений для газу, а не для рідини), що обумовлює недостатню ефективність технологічної лінії та використання більш великих затрат електричної енергії на приготування рідкого корму.

5.2. Запропонована технологія та устаткування для виготовлення рідкого зернового корму

Основною характеристикою якості рідких кормів є ступінь дисперсності, оскільки це впливає на їх засвоюваність у тварин. За літературними даними для того, щоб отримати повноцінний корм, який буде відповідати вимогам для відгодівлі свиней, потрібно, щоб суміш була однорідною з розміром частинок не більше 300 мкм. Аналіз існуючих технологій приготування зернових кормів показав, що подрібнення зернових сумішей, як правило, проводять з використанням молоткових дробарок. Розмір частинок після даної обробки складає від 50 до 2000 мкм, після чого суха зернова суміш змішується з водою, яку попередньо нагрівають до 40-50°C, додають необхідні компоненти по рецептурі, потім готова суміш направляється на згодовування тваринам. Тому було запропоновано новий метод обробки зернових сумішей для приготування рідких кормів, який дозволить поєднати декілька стадій технологічного процесу в одному апараті. Це дає можливість створити безперервну технологію приготування рідких зернових кормів і отримати економічний ефект за рахунок збільшення

продуктивності, зменшення тривалості технологічних процесів, зниження енергетичних витрат та матеріаломісткості обладнання.

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень було розроблено і виготовлено дослідно-промислову установку (Рис. 5.1), яка здатна забезпечити:

- високу ефективність тепло- та масообмінних процесів;
- перемішування, диспергування та нагрівання рідкої суміші;
- здатність установки витримувати значні навантаження;
- герметичність усіх роз'ємних і нероз'ємних зварних з'єднань;
- надійність і зручність в обслуговуванні та ремонті;
- безпечність та відповідність існуючим санітарним вимогам.



Рис. 5.1. Роторно-пульсаційна установка для приготування рідких зернових кормів

Окрім визначення гранулометричного складу виготовленого рідкого зернового корму метою роботи також стояло завдання визначити поживні характеристики виготовленої суміші. У таблиці 5.1 представлено порівняльну характеристику результатів дослідження хімічного складу виготовлених

рідких кормових сумішей за допомогою РПА та традиційних апаратів по виготовленню рідких кормів відповідно.

Таблиця 5.1

Порівняння хімічного складу зернових кормів при різних способах його виготовлення

Хімічна складова		Корма, виготовлені за допомогою РПА	Корма, виготовлені традиційними апаратами
Білки, г		4,52	3,98
Жири, г		0,95	0,83
Вуглеводи, г	загальні	26,71	26,55
	сахариди	1,45	1,42
	крохмаль	21,36	21,4
Клітковина, г		0,98	0,85
Зола, г		0,71	0,61
Мінеральні речовини, мг	Ca	34,25	29,11
	Fe	2,24	1,97
	K	154,61	134,42
	Mg	45,88	39,06
	Na	11,32	10,12
	P	134,24	115,12
Вітаміни, мг	β - каротин	0,18	0,17
	B1	0,17	0,17
	B2	0,061	0,057
	PP	1,96	1,85
	C	0,7	0,62

Дослідження хімічного складу виготовленої водозернової суміші показали, що за своєю поживністю корма, приготовлені методом ДІВЕ на 12-15% є більш кращими за споживаністю аніж ті, які приготовлені традиційними апаратами для приготування рідких зернових кормів. В таблиці 5.2 приведено порівняння фізико-хімічних показників корму, виготовленого за допомогою

розробленого РПА, та корму, який нормується за державними стандартами та правилами.

Таблиця 5.2

Фізико-хімічні показники виготовленого корму

Назва показника	Виготовлений корм	Норма
Вологість, %	70,0	<75,0
Масова частка цілих зерен, %	0	<1,0
Активна кислотність, рН	4,2	3,5...4,5
Токсичні речовини	Відсутні	Не допускається
Патогенна мікрофлора	Відсутня	Не допускається
Гранулометричний склад, % частинок менше 500мкм	100	95

З таблиці 5.2 видно, що корм, виготовлений за допомогою експериментально-дослідної установки задовольняє усі норми за державними стандартами та правилами.

Дослідно-промислова роторно-пульсаційна установка працює за наступним принципом. Відповідно до рецептури зернову кормову суміш подають в приймач-дозатор, потім в основний бункер через трубопровід подається необхідна кількість води. Після включення електричного двигуна установки до потоку води, яка протікає по трубопроводу подається зерно і вся суміш обробляється в РПА в режимі рециркуляції. При такій обробці відбувається подрібнення зерна та змішування його часточок з водою. Оскільки при обробці зернової суміші відбувається її поступове нагрівання за рахунок дисипації енергії, на бункері передбачений отвір для встановлення термopари та відстеження температури суміші в різні моменти часу.

Розроблена роторно-пульсаційна установка має ряд переваг:

- безперервність процесу виробництва та зменшення часу на приготування рідких кормів;
- можливість отримання багатокомпонентних сумішей різного складу без попереднього подрібнення;
- здійснення декількох стадій технологічного процесу в одному апараті;
- зниження енерговитрат при виробництві рідких кормів в 1,25...1,5 рази в порівнянні з традиційними технологіями приготування кормів.

5.3. Економічна та енергетична ефективність розробленої технології для приготування рідких зернових кормів

Одним з важливих досліджень при переробці зернової сировини із застосуванням роторно-пульсаційного апарату було визначення споживаної потужності установки на різних стадіях приготування рідких високодисперсних кормів. На рис. 5.2 наведено графік залежності споживаної потужності РПА від тривалості переробки зернової сировини з використанням частотного перетворювача.

Складна конфігурація отриманої кривої пояснюється наступним чином. Приймемо, що РПА працює в періодичному режимі. Для переробки 100 кг зернової сировини в готовий продукт потрібно 20 хвилин. Споживана потужність буде змінюватися в часі в залежності від виду операції в роторно-пульсаційному апараті. На ділянці кривій 1 - 2 споживана потужність поступово зростає і досягає свого максимального значення. Ця ділянка кривої показує період засипки зерна в робочу камеру РПА за допомогою шнекового апарата. Зі збільшенням кількості зерна, що подається, споживана потужність РПА збільшується до 3,2 кВт. На ділянці 2 - 3 (від 3 до 6,5 хв) після закінчення подачі зерна в бункер потужність починає поступово знижуватися. Далі з метою зменшення споживаної потужності РПА частота напруги зменшується за

допомогою частотного перетворювача. На ділянці кривої 3 - 4 (від 6,5 до 10 хв) продовжується зниження споживаної потужності, але вже при частоті напруги 40 Гц. Ділянка 4 - 5 (від 10 до 20 хв) відповідає періоду, коли вся основна маса зерна вже перейшла в дисперсний стан, маса стала однорідною і може легко проходити через робочі органи РПА без збільшення енерговитрати. Споживана потужність для даного періоду в середньому досягає 1,55 кВт, а для деяких культур зернових навіть менше.

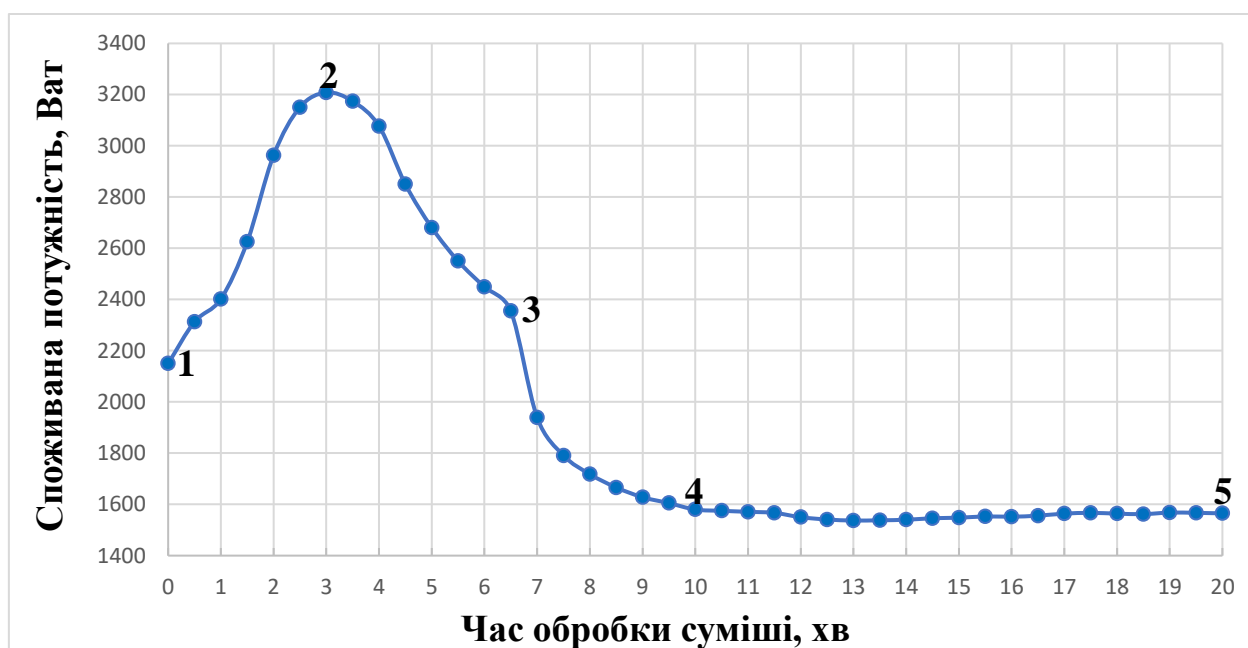


Рис. 5.2. Залежність потужності, споживаної РПА, від тривалості переробки зернової сировини

Для приготування рідких високодисперсних кормів методом дискретно-імпульсного введення енергії необхідно обробляти суміш з вмістом твердої фракції в ній близько 30%, тобто на 70 л води необхідно 30 кг зерна. За 20 хв роботи апарату вихід готової продукції становить 100 кг, а за 1 год – 300 кг.

З рис. 5.2 можна побачити, що для приготування 100 кг корму за 20 хвилин необхідно приблизно 0,657 кВт електроенергії. На 1 тону готового продукту витрата електроенергії становитиме 6,57 кВт.

Нижче наведено розрахунок економічного ефекту від впровадження одного РПА продуктивністю 300 кг/год по готовому продукту.

Таблиця 5.3

Економічний ефект приготування 1 тони рідкого зернового корму із застосуванням методу ДІВЕ

Витрати	Існуюча технологія виробництва рідких кормів		
На електроенергію	кВт	Ціна за 1 кВт/год, грн	Вартість, грн
	9,1	7	63,7
На сировину	Кількість, кг	Ціна за 1 кг, грн	Вартість, грн
	300	5,9	1770
Загальні	–	–	1833,7
Витрати	Технологія виробництва рідких кормів методом дискретно-імпульсного введення енергії		
На електроенергію	кВт	Ціна за 1 кВт/год, грн	Вартість, грн
	6,57	7	45,99
На сировину	Кількість, кг	Ціна за 1 кг, грн	Вартість, грн
	255	5,9	1504,5
Загальні	–	–	1550,49
Економічний ефект	1833,7 – 1550,49 = 283,21 грн на 1000 кг		

Для порівняння наведені витрати за існуючою технологією приготування кормів, що включає три окремі вироблені стадії: подрібнення (молоткова дробарка), змішування з водою (змішувальний апарат), нагрівання (парова головка). У таблиці 5.3 вказані енергетичні витрати та ресурсовитрати на приготування рідких кормів за існуючою технологією і за технологією із застосуванням методу ДІВЕ. Аналіз економічної та енергетичної ефективності застосування РПА циліндричного типу в технології приготування рідких зернових кормів показав, що при роторно-пульсаційній гомогенізації забезпечується низька собівартість корму. Для вигодовування 100 свиней необхідно 1000 кг корму в день, в рік – 365 000 кг. Річний економічний ефект від вигодовування 100 свиней складе близько 103 371 грн 65 коп.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що рідкий високодисперсний корм, приготований методом ДІВЕ має на 15% більшу поживну та енергетичну цінність, він більш повно засвоюється організмом тварин, ніж приготований корм за існуючою технологією. Тому, при розрахунку економічного ефекту витрати за кількістю зерна були знижені на цю ж величину.

Проаналізовано існуюче обладнання для приготування рідких кормів для сільськогосподарських тварин. На основі експериментальних даних виготовлено дослідно-промислову установку, яка дозволяє інтенсифікувати технологію приготування рідких кормів. За результатами виконаної роботи отримано патент України на корисну модель № 142713 «Роторно-пульсаційний апарат для приготування рідких кормів» [5].

Висновки по розділу 5

У п'ятому розділі дисертаційної роботи представлено виготовлене обладнання і технологію приготування рідких зернових кормів для сільськогосподарських тварин на основі проведених в попередніх розділах експериментальних дослідженнях.

1. Розроблена технологія приготування рідких зернових кормів із застосуванням роторно-пульсаційного апарату, принцип роботи якого базується на використанні дискретно-імпульсних технологій обробки рідких гетерогенних сумішей.
2. Проведено порівняльний аналіз хімічного та біологічного складу виготовленого рідкого зернового корму за допомогою розробленого електротехнологічного комплексу з кормом, виготовленим за існуючою технологією. На основі цього було доведено, що рідкий зерновий корм, виготовлений за допомогою розробленої технології має на 15 % вищі поживні характеристики ніж корм, який виготовлений за існуючою технологією виробництва кормів для свійських тварин.

3. Проведено аналіз економічної та енергетичної ефективності застосування електротехнічного комплексу на базі роторно-пульсаційних технологій для приготування рідких зернових кормів. Було науково доведено, що використання роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів є економічно вигідним, витрати електроенергії скорочуються на 25-30%. Річний економічний ефект від вигодовування однієї сотні свиней складає близько 103 тис. гривень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розроблено нову конструкцію роторно-пульсаційного апарата для приготування рідких зернових кормів, функціонування якого забезпечується електротехнічним комплексом, що дає змогу підвищити енергетичну ефективність установки, інтенсифікувати процеси диспергування оброблювальної суміші та покращити якість кормової продукції. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Проведений аналіз існуючих апаратів та устаткування для приготування зернових кормів показав, що в переважній більшості вказані пристрої, призначені для виготовлення сухого корму, який має нерівномірний гранулометричний склад і не являється оптимальним для засвоєння свійськими тваринами. Відомі апарати мають значні масогабаритні характеристики та потребують великих витрат енергії на одиницю виготовленої продукції.
2. Запропоновано нову конструкцію роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких зернових кормів, робочими органами якого є коаксіально з'єднані ротор і статор з прямокутними отворами для обробки кормової суміші. РПА базується на використанні дискретно-імпульсного вводу енергії, що забезпечує інтенсивну обробку водозернової суміші і супроводжується процесами, в результаті яких утворюється гомогенна водозернова суміш та зменшується споживана потужність на її приготування.
3. Запропоновано конструкцію робочої камери для обробки водозернової суміші та проведено 3D моделювання процесів гідродинаміки та тепломасопереносу за допомогою пакету прикладних програм Ansys Fluent та Solidworks. В результаті чисельних розрахунків було отримано динамічні та термічні характеристики рідкої кормової суміші (поля тисків, швидкостей, температур), які дали можливість визначити

оптимальні геометричні розміри ротора і статора, величини зазору між ними та визначити кількість і розміри отворів прямокутного профілю, при яких процес обробки суміші буде найбільш ефективним.

4. Розроблено електротехнічний комплекс для приготування рідких зернових кормів та проведено моделювання перехідних процесів при пуску асинхронного електродвигуна роторно-пульсаційної установки в програмному пакеті Matlab Simulink. На основі розробленої імітаційної моделі встановлені закономірності перехідних процесів електропривода роторно-пульсаційної установки, що дозволяють формувати умови запобігання виникненню можливих аварійних режимів роботи і зупинки технологічного процесу.
5. Розроблено та виготовлено експериментально-дослідну установку для приготування рідких зернових кормів. Проведено експериментальні дослідження процесу обробки водозернових сумішей з різним складом зернового компоненту (пшениця, кукурудза, ячмінь) при різній концентрації твердої фракції (10, 20 і 30% від загальної маси корму). Досліджено режими роботи електродвигуна роторно-пульсаційного апарату в процесі обробки водозернового середовища.
6. Проведено дослідження по використанню частотного перетворювача в електротехнічному комплексі для приготування рідких кормів для зміни швидкості обертання ротора двигуна в процесі приготування корму. За рахунок цього вдалося зменшити енергетичні витрати на приготування одиниці кормової продукції на 6-7 % шляхом зменшення швидкості обертання ротора установки після спаду пікового навантаження, коли основна маса водозернової суміші знаходиться в дисперсному стані.
7. Аналізуючи результати досліджень встановлено, що обробку водозернового середовища слід проводити з використанням частотного перетворювача при наступних параметрах: вміст твердої фази в суміші – 30%, швидкість обертання ротора установки – змінювали в межах 2400-3000 об/хв, зазор між ротором і статором – 500мкм, тривалість

- обробки водозернової суміші – 20 хв (або ж 25-30 циклів обробки); температура суміші – не більше 50°C, в'язкість – близько 2 Па·с. Дані параметри являються оптимальними для отримання високоякісних кормів при мінімальних затратах електричної енергії на їх приготування.
8. Визначений фізико-хімічний склад і поживність отриманого рідкого зернового корму. Встановлено, що виготовлений за допомогою розробленого електротехнічного комплексу рідкий корм має на 15% більшу поживну та енергетичну цінність, ніж корм, приготовлений за існуючою технологією.
 9. Аналіз економічної та енергетичної ефективності застосування електротехнічного комплексу для приготування рідких зернових кормів в роторно-пульсаційному апараті показав, що запропонована технологія для приготування кормової суміші дозволяє зменшити витрати електричної енергії на 25-30%. Річний економічний ефект від вигодовування 100 свиней складає близько 103 000 грн.
 10. Розроблена технологія на базі роторно-пульсаційного апарату може бути використана на фермерських господарствах та агрокомплексах при виготовленні високоякісних рідких зернових кормів з підвищеними поживними характеристиками для згодовування більшості видів сільськогосподарських тварин (ВРХ, свиней, кіз, овець тощо) при мінімальних енергетичних витратах на їх приготування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ібатуллін І. І., Мельник Ю. Ф., Отченашко В. В. Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин: навчальний посібник. Київ, 2014. 422 с.
2. Ібатуллін І. І., Мельничук Д. О., Богданов Г. О. та ін. Годівля сільськогосподарських тварин: навчальний посібник. Київ, 2006. 444 с.
3. Оборудование для комбикормового производства. Комбикорма. 2005. № 8. С. 32-33.
4. 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. 191 с.
5. Горобець В. Г., Антипов Є. О., Троханяк В. І., Сердюк А. М. Роторно-пульсаційний апарат для приготування рідких кормів: патент України на корисну модель №142713, МПК (2020.01), B02C 7/18 (2006.01), B02C 9/00. Заявник і патентовласник НУБіП України. № u201911830; Заявлено 11.12.2019; Опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12.
6. Gorobets V. G., Serdyuk A. M. Rotor-pulsating apparatus for the preparation of liquid feeds on the grain basis. Енергетика і автоматика. 2018. №6. С. 51-57.
7. 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.
8. 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.
9. Gorobets V. G., Trokhaniak V. I., Serdyuk A. M. Numerical simulation of hydrodynamics and heat transfer processes in rotor-pulsing apparatus for preparation of liquid feed. Енергетика і автоматика. 2019. №5, С. 22-29.

10. Процеси і апарати харчових виробництв. За ред. А. М. Поперечного. К., Центр учбової літератури. 2007. 301 с.
11. Стабников В. Н., Баранцев В. И. Процессы и аппараты пищевых производств. М., Пищ.пром-сть, 1984. 349 с.
12. Кавецкий Г. Д., Королев А. В. Процессы и аппараты пищевых производств. М., Агропромиздат. 1999. 430 с.
13. Шерышев М. А., Тихонов Н. Н. Вспомогательное оборудование для переработки пластмасс. М., Профессия. 2015. 168 с.
14. Принцип роботи щокрової дробарки. URL: <https://mcet.com.ua/printsip-roboti-shhokovoyi-drobarki-zagalna-informatsiya-vidi-drobarok/>
15. Дробильное оборудование. URL: <https://extxe.com/4532/drobilnoe-oborudovanie/>
16. Конусна дробарка. Принцип роботи та загальні відомості. URL: <https://moezerno.ru/tekhnika/crusher/konusnaya-drobilka-printsip-raboty.html>
17. Справочник по обогащению руд: Подготовительный процессы. Под ред. О. С. Богданова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Недра. 1982. 366 с.
18. Смирнов В. О., Білецький В. С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин: навчальний посібник. Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ. 2012. 284 с.
19. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. За ред. В. С. Білецького. Д., Донбас. 2004. Т. 1. 640 с.
20. ГОСТ 28098-89. Дробилки кормов молотковые. Общие технические условия. М., Изд-во стандартов. 1989.
21. Мельников С. В. Классификация молотковых дробилок. Механизация сельскохозяйственного производства: Записки ЛСХИ. 1972. С. 3-8.
22. Коротчиков П. Х. Новое оборудование для переработки фуражного зерна в хозяйствах. Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1996. №3. С. 8.

23. Savinyh P., Aleshkin A., Nechaev V., Ivanovs S. Simulation of particle movement in crushing chamber of rotary grain crusher: 16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 2017. P. 309-316.
24. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. За ред. В. С. Білецького. Д., Донбас. 2007. Т. 2. 670 с.
25. Доза Агро. Види механічних зернодробилок. URL: <https://dozaagro.com/oborudovanie/droblenie/>
26. Дробилки ДЗР. URL: <https://agrotm.pro/drobilki-zasypnye-rotornye/>
27. ТехноМашСтрой. Дробарка сирієї деревини та зерна Chopper. URL: https://tmagro.com.ua/ua/site_search?search_term=Chopper
28. Технические характеристики зернодробилки «Шмель» URL: <https://shmell174.ru/products/zernodrobilka-shmel>
29. Високопродуктивна дробарка зерна Neuero RVO. URL: <https://neuero-ukraine.all.biz/uk/vysokoproduktyvna-drobarka-zerna-rvo-1045-g3123342>
30. Зерновые мельницы фирмы Skiold: электронный ресурс. URL: <https://agrosistemas.ee/ru/farming-equipment/grain-mills/skiold/>
31. Апарати для приготування гомогенних кормових сумішей типу АКГСМ «Мрія». URL: <https://agroagregat.com/nasha-produktsiya/kormoagregaty>
32. Чуешов В. И., Зайцев А. И., Шебанова С. Т. Промышленная технология лекарств. Харьков: Основа. Издательство УкрФа. 1999. Т.2. 557 с.
33. Malzig G., Their B. Помол и гомогенизация. 1986. Vol.57, № 634. С.817-842.
34. Долінський А. А. Принцип дискретно-імпульсного введення енергії та його використання в технологічних процесах. Вісник АН УРСР. 1984. №1. С. 39.
35. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. Модель динамики одиночного парового пузырька. Пром. теплотехника. 1995. Т. 17, №5. С. 3-28.

36. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков. Пром. теплотехника. 1996. Т. 18, №1. С. 3-20.
37. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Принципы разработки новых энерго- ресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии. Пром. теплотехника. 1997. Т. 19, №4-5. С. 13-25.
38. Долинский А. А., Басок Б. И., Гулый И. С., Накорчевский А. И., Шурчкова Ю. А. Дискретно-импульсный ввод энергии в технологиях. К., ИТТФ НАНУ. 1996. 208 с.
39. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. К., Наукова думка. 2008. 381 с.
40. Долинский А. А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий. ИФЖ. 1996. Т. 69, №6. С. 35-43.
41. Davies J. T. A physical interpretation of drop sizes in homogenizers and agitated tanks, including the dispersion of viscous oils. Chem. Engng. Sci. 1987. Vol. 42, №7. P. 1671-1676.
42. Семінський О. О., Онищенко Д. М. Дослідження особливостей використання роторно-пульсаційних апаратів у промислових лініях. Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2019. №4. С. 82-88.
43. Басок Б. И., Давиденко Б. В., Авраменко А. О., Піроженко І. А. Гідродинаміка, теплообмін та ефекти подрібнення в обертовопульсуючих потоках. К., Наукове видання. 2012. 296 с.
44. Промышленная технология лекарств: В 2 т. / Под ред. проф. В. И. Чуешова. Х., 2002.
45. Богданов В. В., Христофоров Е. И., Клоцунг Б. А. Эффективные малообъемные смесители. Л., Химия. 1989. 224 с.

46. Промтов М. А., Степанов А. Ю., Алешин А.В. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата. М., Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ». 2015. 148с.
47. Rolf, Reinhall, Bellevue, Wash.. Apparatus and method for conjoint adjustment of both the inner and outer grinding spaces of pulp defibrating appatatus: пат. №5042726 United States. Заявник і патентовласник Sunds Defibrator; опубл. 27.08.91.
48. Понькин В. Н. Пульсационный аппарат роторного типа: пат. №2257948 Российская Федерация, МПК B01F 7/00. Заявник і патентовласник ООО «Авиамотор»; заявл. 09.12.03; опубл. 10.08.05. Бюл. №22.
49. Виноградов Б. В. Роторнопульсацийний апарат: пат. №200805667 Україна, МПК B01F 7/00, B06B 1/18. Заявник і патентовласник Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»; заявл. 30.04.08.
50. Train K. E. Incentives for Energy Conservation in the Commercial and Industrial Sectors. The Energy Journal. 1988. Vol. 9, №3. P. 113-138.
51. Arai K., Konno M., Matunga J., Saito S. Effect of dispersed phase viscosity on the maximum stable drops size for break-up in turbulent flow. J. Chem. Engng. Japan. 1977. Vol. 10. P. 325-330.
52. Coulaloglou C. A., Tavlarides L. L. Drop size distribution and coalescence frequencies of liquid-liquid dispersions in flow vessels. Chem. Engng. Sci. 1977. Vol. 32, №1. P. 289-297.
53. Cruz-Pinto J. J., Korchinski W. J. Drop break-up in counter current flow liquid-liquid extraction column. Chem. Engng. Sci. 1981. Vol. 36, №4. P. 687-694.
54. Долинский А. А., Накорчевский А. А., Корчинский А. А. Моделирование работы пульсационной установки с переменной геометрией рабочего объема. Докл. АН Украины. 1994. №2. С. 89-94.
55. Басок Б. И., Гартвиг А. П., Коба А.Р. Оборудование для получения и обработки высоковязких дисперсных сред. Промышленная теплотехника. 1996. Т.18, №1. С. 50-56.

56. Балабудкин М. А., Голобородкин С. И., Шулаев Н. С. Об эффективности РПА при обработке эмульсионных систем. Теоретические основы химической технологии. 1990. Т.24, № 4. С.502-508.
57. Накорчевский А. И., Басок Б. И., Рыжкова Т. С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов. ИФЖ. 2002. Т. 75, №2. С. 58-68.
58. Казеинов А. К., Козлов И. И., Прокофьев В. В., Шугай А. А. Исследование кавитационного течения горячей жидкости через препятствия в трубопроводе. МЖГ. 1993. №4. С. 124-128.
59. Basok B., Dolinsky A., Ivanitsky G., Ryzhkova T. Book of Abstracts of the International Symposium on Liquid-Liquid Two-Phase Flow and Transport Phenomena. Dynamics of single droplets moving through liquid media. Antalia (Turkey). Session 3. 1997. P. 26-28.
60. Hinze J. O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. A. I. Ch. E. Journ. 1955. Vol. 1, №3. P. 289-295.
61. Ободович О. М., Драганов Б. Х., Шеліманова О. В. Спосіб приготування рідких кормів для сільськогосподарських тварин з відходів виробництва рослинної сировини: пат. № 52090 Україна. МПК А23К1/00. Власник Інститут технічної теплофізики НАН України, у 2010 02252; дата подання заявки 01.03.2010; дата публ. 10.08.2010. Бюл. № 15.
62. Горобець В. Г., Гескін Д. В. Методи приготування рідких кормів за допомогою роторно-пульсаційного апарата. Науковий вісник НУБіП. 2013. Вип. 184. Ч. 1 С. 241-246.
63. Горобець В. Г., Гескін Д. В. Визначення умов руйнування (подрібнення) часточок різної форми при застосуванні роторно-пульсаційного апарата (РПА). Науковий вісник НУБіП. 2013. Вип. 184. Ч. 2, С. 65-70.
64. Горобець В. Г., Гескін Д. В. Доцільність використання роторно-пульсаційного апарату для приготування рідкого корму. Науковий вісник НУБіП України. К., НАУ. 2014. № 194, Ч. 1. С. 30-36.
65. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: монография. М., Машиностроение. 2001. 260 с.

66. Иваницкий Г. К. Разрушение капель эмульсии в адиабатно вскипающих потоках. Пром. теплотехника. 1999. Т. 21, №4-5. С. 10-15.
67. Davies J. T. Turbulence phenomena. N.Y., Acad. Press. 1972. 412 p.
68. Дульнев Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. М., Высшая школа. 1990. 207 с.
69. Власова Е. А., Парфенов В. Г., Сигалов А. В., Кувыркин Г. Н. Приближенные методы математической физики. М., Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2001. 700 с.
70. Ferziger J. H., Perić M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer. 2002. 423 p.
71. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости; перевод с англ. под. ред. В. Д. Виленского. М., Энергоатомиздат. 1984. 150 с.
72. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука. 1974. 712 с.
73. Launder B. E., Spalding D. B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England. 1972.
74. Shih T. H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows. Model Development and Validation. Computers Fluids. 1995. No 24(3). P. 227-238.
75. Yakhot V., Orszag S. A. Renormalization Group Analysis of Turbulence. Basic Theory. Journal of Scientific Computing. 1986. No 1(1). P.1-51.
76. Bardina J. E., Huang P. G., Coakley T. J. Turbulence Modeling Validation, Testing and Development. California, NASA reports. 1997. 88 p.
77. Hanjalic K. Advanced Turbulence Closure Models: A View on the Future Prospects, Int. J. Heat & Fluid Flow. 1994. Vol. 15, P. 178-204.
78. Speziale C. G., Gatski T., Hussaini M., Lumley J. Modeling of Turbulent Transport Equations. Simulation and Modeling of Turbulent Flows, Oxford University. Press. 1996. 159 p.

79. Henkes R. A. W. M., van der Flugt F. F., Hoogendoorn C. J. Natural Convection Flow in a Square Cavity Calculated with Low-Reynolds-Number Turbulence Models. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991. No 34. P. 1543-1557.

80. Sarkar S., Balakrishnan L. Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer. ICASE Report 90-18. NASA CR 182002. 1990.

81. Gorobets V. G., Trokanyak V. I., Serdyuk A. M. Numerical simulation of the processes of the preparation of liquid grain feed with the use of rotor-pulsation technologies. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: IX Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 19-22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ. 2020. С. 151-152.

82. Gorobets V., Trokhaniak V., Antypov I., 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.

83. 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.

84. Горобець В. Г., Троханяк В. І., Сердюк А. М. Дослідження процесів тепломасопереносу в роторно-пульсаційних апаратах для приготування кормових сумішей методами чисельного моделювання. Збірник тез конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»: V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року. С. 153-155.

85. Горобець В. Г., Сердюк А. М. Роторно-пульсаційні апарати для приготування рідких зернових кормів. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: VIII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20-24 травня 2019 року: тези доповіді. Київ. 2019. С. 120-121.

86. Піроженко, І. А. Гідродинаміка та теплові ефекти в циліндричному роторно-пульсаційному апараті: дис. кандидата техн. наук. К., 2005. 161с.
87. Кондратюк О. Ю., Егоров А. Б. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты. Системи обробки інформації. 2006. Вип. 4 (53). С. 79-86.
88. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навч. посіб. За ред. В. І. Мілих. Київ: Каравела. 2018. 452 с.
89. Sotnik O. V., Sorokin M. S. Research of ways to improve the start of the asynchronous motor of an agricultural machine. Engineering of nature management, 1(23). 2022. P. 74-80.
90. Сотнік О. В. Дослідження шляхів підвищення пускового моменту асинхронного двигуна сільськогосподарської машини. Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції «Наукові дослідження: парадигма інноваційного розвитку», м. Прага, Чехія, 30 квітня 2021 р.
91. Терехин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: учебное пособие: изд. Томского политехнического университета. 2008. 320 с.
92. Мугалимов Р. Г., Мугалимова А. Р., Храмшин Р. Я. Сравнительный анализ методик расчета параметров электрических схем замещения асинхронных двигателей. Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3, №1. С. 36-40.
93. Толочко О. І. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання Simscape. Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода. Харків: НТУ «ХПІ». 2015. С.118-123.
94. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Навчальний посібник. Київ, НТУУ «КПІ». 2016. 150 с.
95. Anand B., Aspalli M. Dynamic dq model of induction motor using Simulink. Intern.Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2015. Vol. 24 (5), P. 252-257.

96. Donolo P. Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research* 140. 2016. P. 866-873.
97. Balara D., Timko J., Zilkova J., Leso M. Neutral Networks Application For Mechanical Parameters Identification Of Asynchronous Motor. *Neural Network World*. 2017. №3. P. 259-270.
98. Chioncel C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque: *International Conference on Applied Sciences*. 2015. P.1-6.
99. Ободович А. Н., Драганов Б. Х., Лымарь А. Ю. Исследования процесса диспергирования зерновых смесей с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) для получения жидких кормов. *Промышленная теплотехника*. 2013. Т.35, №5. С. 9-18.
100. Долинский А. А., Басок Б. И. Роторно-импульсный аппарат. Локальный импульсный нагрев жидкости. *Промышленная теплотехника*. 1999. Т.21, №1. С. 3-5.
101. Накорчевский А. И., Басок Б. И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. К., Наукова думка. 2001. 348 с.
102. Басок Б. И., Давыденко Б. В., Ободович А. Н., Пироженко И.А. Диссипация энергии в активной зоне роторно-пульсационного аппарата. *Доповіді Національної Академії Наук України*, № 12. 2006. С.81-87.
103. Липэц А. А. Технология крахмала и крахмалопродуктов. Киев: Науч. пос. К., НУПТ. 2003. 168 с.
104. Gorobets V. G., Obodovich O. M., Lyamar A. Y., Trokhaniak V. I., Antypov I. O., Spodynuk N. A. Research of preparation processes of liquid grain feeds using rotor-pulsation technologies: monograph. K., KPE Yamchynskyi O. 2022. 178 p.

ДОДАТКИ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Статті у наукових фахових виданнях України**

1. 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. *(Здобувачем проведено дослідження використання методу дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційних технологіях для приготування рідких кормів, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*
2. 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. *(Здобувачем проведено 3D моделювання процесів тепломасопереносу та гідродинаміки в переробній камері роторно-пульсаційного апарату для приготування рідких кормів, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*
3. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження залежності споживаної енергії роторно-пульсаційної установки від зміни в'язкості та температури суміші в процесі її обробки, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*
4. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження зміни енергетичних характеристик роторно-пульсаційної установки при обробці різних видів зернового компоненту, зроблено висновки і підготовлено статтю до друку).*
5. 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. *(Здобувачем проведено дослідження перехідних процесів при пуску роторно-пульсаційної установки з використанням частотного перетворювача, зроблено висновки, подано статтю до друку).*

Статті у наукових виданнях іншої держави

6. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження залежності зміни гранулометричного складу кормової суміші та її температури від кількості циклів обробки та швидкості обертання ротора установки, зроблено висновки та підготовлено статтю до друку).*

Монографії

7. 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. *(Здобувачем проведено експериментальні дослідження виготовлення рідких зернових кормів за допомогою нового електротехнічного комплексу на базі роторно-пульсаційних технологій з використанням методу ДІВЕ).*

Патенти України на винахід та корисні моделі

8. Горобець В. Г., Антипов Є. О., Троханяк В. І., **Сердюк А. М.** Роторно-пульсаційний апарат для приготування рідких кормів: патент на корисну модель №142713 Україна, МПК (2020.01), B02C 7/18 (2006.01), B02C 9/00. дата подання заявки 11.12.2019; дата публ. 25.06.2020. Бюл. № 12, 5 с. *(Здобувачем проведений літературно-патентний пошук, здійснено порівняльний аналіз існуючих технологій для приготування кормів, узагальнено та систематизовано результати, підготовлено заявку на патент).*

Тези наукових доповідей

9. Горобець В. Г., **Сердюк А. М.** Роторно-пульсаційні апарати для приготування рідких зернових кормів. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: VIII Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 20-24 травня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 120-121. *(Здобувачем вивчено питання розробки та побудови роторно-пульсаційної установки для приготування високоякісних рідких зернових кормів, узагальнено та систематизовано результати).*

10. Горобець В. Г., Троханяк В. І., **Сердюк А. М.** Дослідження процесів тепломасопереносу в роторно-пульсаційних апаратах для приготування кормових сумішей методами чисельного моделювання. Збірник тез конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК»: V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті професора Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року. С. 153-155. *(Здобувачем проведено чисельне моделювання процесів тепломасопереносу в робочій камері установки, узагальнено і систематизовано результати).*

11. Gorobets V. G., Trokanyak V. I., **Serdiuk A. M.** Numerical simulation of the processes of the preparation of liquid grain feed with the use of rotor-pulsation technologies. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: IX Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 19-22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 151-152. *(Здобувачем вивчено питання методики проведення експериментальних досліджень приготування рідких кормів в роторно-пульсаційному апараті, узагальнено та систематизовано результати).*

12. Gorobets V., Trokhaniak V., Antypov E, **Serdiuk A.** Investigation of preparation processes of liquid feed mixtures in rotary pulsating apparatus. Conference Programme II International Scientific Conference Ecocomfort and Current Issues of Civil Engineering. Lviv, September 16-18, 2020. P. 120. *(Здобувачем обґрунтовано розробку нового електротехнічного комплексу для*

приготування рідких зернових кормів на базі роторно-пульсаційних технологій, узагальнено і систематизовано результати)

Патент на корисну модель

