

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

МУШТРУК НАТАЛІЯ МИХАЙЛІВНА

УДК 664.871:66.047.57:621.929

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ВІБРОГІДРАВЛІЧНОГО ЗМІШУВАЧА ІНГРЕДІЄНТІВ
ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВМІСНИХ ПАСТ**

181 «Харчові технології»
18 «Виробництво та технології»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____ Н.М. Муштрук

Науковий керівник:
ВАСИЛІВ Володимир Павлович,
кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Муштрук Н. М. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів віброгідравлічного змішувача інгредієнтів для виробництва пектиновмісних паст. Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 «Харчові технології» (18 «Виробництво та технології»). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2026 р.

Сучасний розвиток харчових технологій характеризується зростаючим попитом на функціональні продукти з підвищеним вмістом біологічно активних речовин та зниженим вмістом цукру, зокрема, пектиновмісні пасти на основі рослинної сировини. Такі продукти є складними, високов'язкими, гетерогенними системами, стабільність і споживчі властивості яких значною мірою визначаються якістю процесу змішування інгредієнтів.

Існуючі технології виробництва пектиновмісних паст та традиційні типи змішувального обладнання не забезпечують достатньої однорідності структури, стабільності фізико-хімічних показників і збереження біологічно активних компонентів за високого вмісту пектинових речовин. Особливої складності набуває оброблення структурованих і високов'язких середовищ, для яких характерні інтенсивне структуроутворення та схильність до розшарування.

Удосконалення процесу змішування та параметрів обладнання для виробництва пектиновмісних паст потребує впровадження інноваційних технічних рішень, здатних поєднувати високу інтенсивність масообміну з рівномірним розподілом компонентів у робочому об'ємі апарата за помірних енергетичних витрат. Перспективним напрямом у цьому контексті є застосування віброгідравлічного змішування, яке поєднує вібраційний і гідравлічний впливи на технологічне середовище.

Незважаючи на потенційні переваги віброгідравлічного підходу, на сьогодні недостатньо дослідженими залишаються закономірності його впливу

на реологічні, структурно-механічні та фізико-хімічні властивості пектиновмісних паст. Відсутність науково обґрунтованих математичних моделей, що враховують специфіку в'язких пектиновмісних систем і параметри вібраційного впливу, ускладнює оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів змішувального обладнання.

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на теоретичне та експериментальне обґрунтування процесу віброгідравлічного змішування пектиновмісних паст і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення змішувального обладнання, є актуальними та мають важливе наукове і практичне значення для харчової промисловості.

У *першому розділі* здійснено комплексний аналіз вітчизняних і зарубіжних науково-технічних джерел, присвячених виробництву пектиновмісних продуктів та інтенсифікації відповідних технологічних процесів. Узагальнено сучасний стан і тенденції розвитку технологій перероблення рослинної сировини з високим вмістом пектинових речовин, а також проаналізовано асортимент пектиновмісних паст на продовольчому ринку, зокрема продукції на основі плодово-овочевої та вторинної рослинної сировини, що використовується як функціональні інгредієнти та напівфабрикати.

З урахуванням вимог ресурсозбереження та раціонального використання сировинної бази розглянуто можливості залучення альтернативної рослинної сировини, зокрема гарбузів, у технологіях виробництва пектиновмісних паст. Систематизовано сучасні методи інтенсифікації процесів отримання пектиновмісних паст (механічні, теплові, гідродинамічні та комбіновані), оцінено їх вплив на ефективність екстракції пектинових речовин, структурно-механічні властивості паст і енергоефективність процесу, що дозволило обґрунтувати доцільність подальших досліджень, спрямованих на розроблення енергоефективних і ресурсозберігаючих технологічних рішень.

У *другому розділі* розроблено та обґрунтовано методику експериментальних досліджень процесу виробництва пектиновмісних паст.

Сформовано програму експериментів, описано дослідну модель гідролізатора та експериментальне оснащення для визначення енергетичних, силових і вібраційних параметрів процесу. Наведено методики вимірювання параметрів вібрації та визначення загального хімічного складу пектинової пасти. Запропоновані методичні підходи забезпечують відтворюваність результатів і достовірну оцінку ефективності досліджуваних технологічних рішень.

У *третьому розділі* виконано математичне моделювання процесу інтенсифікації виготовлення пектинових паст із застосуванням віброгідравлічного змішування технологічного середовища. Графоаналітична обробка отриманих залежностей у математичному середовищі Excel дала змогу визначити раціональні інтервали параметрів робочих режимів спроектованого приводного механізму вібролопатевого перемішування рідкого технологічного середовища. Встановлено, що виконавчі органи механізму з проекцією твірної $L_g = 2 - 5$ мм забезпечують ефективну роботу в діапазоні кутових швидкостей $65-80$ рад/с, за якого досягається стабілізація амплітуди коливань на рівні $1,0-2,0$ мм та реалізується інтенсивне вібромеханічне перемішування.

Аналіз енергетичних характеристик показав недоцільність використання приводного лопатевого валу з проекцією твірної понад 2 мм. Зокрема, за $L_g = 5$ мм у частотному діапазоні $60-75$ рад/с спостерігається суттєве зростання споживаної потужності до $3-14$ кВт та питомих енерговитрат до $500-1700$ Вт/кг, що у 6–9 разів перевищує відповідні показники для проекції твірної $L_g = 2$ мм за рахунок збільшення коливної маси системи.

Результати моделювання створюють теоретичне підґрунтя для обґрунтування раціональних режимів віброгідравлічного змішування та подальшої оптимізації технологічного процесу виробництва пектинових паст.

У *четвертому розділі* наведено експериментально-аналітичну оцінку процесу виробництва пектиновмісних паст із гарбузової сировини з використанням віброгідравлічного перемішування. Обґрунтовано раціональну технологічну схему виробництва з урахуванням фізико-хімічних,

функціонально-технологічних і структурно-механічних властивостей вихідної сировини. Проведено комплексні дослідження якісних показників гарбузової м'якоті різних сортових груп і встановлено їхній вплив на формування властивостей готового продукту.

Визначено закономірності зміни в'язкості та міцності структури залежно від температури й концентрації цукру. Показано, що оптимальний вміст цукру забезпечує формування стабільної системи з високими показниками пружності та структурної міцності, а встановлені кореляційні зв'язки між вмістом пектинових речовин і функціонально-технологічними властивостями сировини дають змогу прогнозувати якість продукту на стадії підбору сировини.

Досліджено мікробіологічні показники пектинових паст і визначено їхній вплив на термін зберігання продукції. Методами математичного моделювання встановлено інтегральні показники якості та перевірено адекватність математичної моделі процесу віброгідравлічного змішування, що підтверджується високим рівнем збігу теоретичних і експериментальних даних та формує науково обґрунтовану основу для оптимізації технології виробництва пектиновмісних паст.

У *п'ятому розділі* представлено математичне моделювання методом факторних просторів та розрахунок економічної ефективності впровадження технології виробництва пектиновмісних паст із гарбузової сировини. Математична модель дозволила встановити основні характеристики дослідних зразків за величиною факторного простору. Всі якісні характеристики дослідних зразків не вийшли за межі як середньо, так і гранично допустимих норм. Встановлено, що застосування пектиновмісних паст із різним вмістом цукру є економічно ефективним, забезпечує зниження витрат на сировину та підвищення доданої вартості готової продукції, при цьому кожна рецептурна група характеризується власними технологічними та економічними перевагами залежно від напрямку використання.

За результатами дисертаційної роботи автором розроблено та науково обґрунтовано удосконалену технологічну схему виробництва пектиновмісних паст із гарбузової сировини з використанням віброгідравлічного змішування. Проведено виробничу апробацію отриманих науково-практичних результатів у промислових умовах, що підтвердило технологічну ефективність, стабільність якісних показників і доцільність впровадження розробленої технології.

Дослідження дисертаційної роботи тривали з 2022 по 2025 рік в лабораторії кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК Національного університету біоресурсів і природокористування України у відділі аналітичних досліджень та якості харчової продукції Інституту продовольчих ресурсів Національної академії аграрних наук України.

Загалом дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальних науково-практичних завдань харчової промисловості шляхом удосконалення технології виробництва пектиновмісних паст із гарбузової сировини. Основну увагу приділено формуванню фізико-хімічних, функціонально-технологічних, реологічних та структурно-механічних властивостей продуктів, забезпеченню їхньої мікробіологічної стабільності, підвищенню біологічної та харчової цінності, а також оптимізації технологічних параметрів і зниженню собівартості продукції. Раціональне використання пектиновмісної рослинної сировини та впровадження віброгідравлічних методів змішування сприяють інтенсифікації технологічних процесів і розширенню асортименту продуктів із функціональним призначенням. Отримані результати досліджень створюють науково обґрунтовані передумови для практичного впровадження пектиновмісних паст у різних галузях харчових технологій та подальшого розвитку ресурсозберігаючих технологічних рішень.

Ключові слова: пектиновмісні пасти, гарбузова сировина, пектинові речовини, реологічні властивості, структурно-механічні показники, функціонально-технологічні властивості, віброгідравлічне змішування, показники якості.

ABSTRACT

Mushtruk N.M. Substantiation of the design and technological parameters of a vibro-hydraulic mixer of ingredients for the production of pectin-containing pastes. Qualification research paper (manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 181 "Food Technologies" (18 "Production and Technologies"). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

Existing technologies for producing pectin-containing pastes and traditional types of mixing equipment do not ensure sufficient structural homogeneity, stability of physicochemical parameters, or preservation of biologically active components at high pectin content. Processing structured and highly viscous media is particularly challenging, as such systems exhibit intensive structural formation and a tendency toward phase separation.

Improving the mixing process of pectin-containing pastes requires implementing innovative technical solutions that combine high mass-transfer intensity with uniform distribution of components throughout the apparatus's working volume, while maintaining moderate energy consumption. A promising direction in this context is the application of vibrohydraulic mixing, which combines vibrational and hydraulic effects on the technological medium.

Despite the potential advantages of the vibrohydraulic approach, the regularities of its influence on the rheological, structural-mechanical, and physicochemical properties of pectin-containing pastes remain insufficiently studied. The lack of scientifically substantiated mathematical models that account for the specificity of viscous pectin-containing systems and vibration parameters complicates the optimization of the design and technological parameters of mixing equipment.

In this regard, research aimed at theoretically and experimentally substantiating the vibrohydraulic mixing process for pectin-containing pastes, as well as developing scientifically grounded recommendations for improving mixing

equipment, is relevant and holds significant scientific and practical importance for the food industry.

The *first section* provides a comprehensive analysis of domestic and foreign scientific and technical sources devoted to the production of pectin-containing products and the intensification of relevant technological processes. The current state and trends in the development of technologies for processing plant raw materials with a high content of pectin substances are summarized, and the range of pectin-containing pastes on the food market is analyzed, in particular, products based on fruit and vegetable and secondary plant raw materials used as functional ingredients and semi-finished products.

Considering the need for resource conservation and the rational use of the raw material base, the feasibility of incorporating alternative plant raw materials, particularly pumpkins, into pectin-containing paste production technologies is examined. Modern methods for intensifying the processes of obtaining pectin-containing pastes (mechanical, thermal, hydrodynamic, and combined) are systematized, and their effects on the efficiency of pectin extraction, structural-mechanical properties of pastes, and energy efficiency of the process are evaluated. This enabled substantiating the expediency of further research to develop energy-efficient and resource-saving technological solutions.

The *second chapter* develops and substantiates the methodology of experimental studies of the pectin-containing paste production process. An experimental program is established, and the experimental model of a hydrolyzer, as well as the experimental equipment used to determine energy, force, and vibration parameters of the process, are described. Methods for measuring vibration parameters and determining the overall chemical composition of pectin paste are presented. The proposed methodological approaches ensure reproducibility of results and reliable assessment of the effectiveness of the investigated technological solutions.

In the *third section*, mathematical modeling of the intensification of pectin paste production via vibrohydraulic mixing of the technological medium was performed.

Graphical-analytical processing of the obtained dependencies in the Excel mathematical environment enabled the determination of rational parameter intervals for the operating modes of the designed drive mechanism for vibro-blade mixing of the liquid technological medium. It was established that the actuators of the mechanism with the projection of the generator $L_g = 2 - 5$ mm provide effective operation in the range of angular velocities of 65-80 rad/s, at which stabilization of the oscillation amplitude is achieved at the level of 1.0 – 2.0 mm and intensive vibro-mechanical mixing is realized. Analysis of energy characteristics showed that using a drive blade shaft with a generator projection exceeding 2 mm is ineffective. In particular, for $L_g = 5$ mm in the frequency range of 60 – 75 rad/s, a significant increase in power consumption to 3–14 kW and specific energy consumption to 500–1700 W/kg is observed, which is 6–9 times higher than the corresponding indicators for the projection of the generating $L_g = 2$ mm due to the increase in the oscillating mass of the system. The modeling results provide a theoretical basis to substantiate rational modes of vibro-hydraulic mixing and further optimize the technological process for producing pectin pastes.

The modeling results provide a theoretical basis for substantiating rational vibrohydraulic mixing regimes and further optimizing the technological process of pectin paste production.

The *fourth section* presents an experimental and analytical assessment of the process of producing pectin-containing pastes from pumpkin raw materials using vibro-hydraulic mixing. A rational technological scheme of production is substantiated, taking into account the physico-chemical, functional-technological, and structural-mechanical properties of the starting raw materials. Comprehensive studies of the qualitative indicators of pumpkin pulp across different varietal groups have been conducted, and their influence on the finished product's properties has been established. The patterns of change in viscosity and structural strength with temperature and sugar concentration have been determined. It has been shown that the optimal sugar content ensures the formation of a stable system with high elasticity and structural strength, and that the established correlations between pectin

content and the functional-technological properties of the raw materials allow prediction of product quality at the stage of raw material selection. The microbiological indicators of pectin pastes have been studied, and their influence on the product's shelf life has been determined. Using mathematical modeling, integral quality indicators were established, and the adequacy of the mathematical model of the vibrohydraulic mixing process was verified, as evidenced by the high level of agreement between theoretical and experimental data, thereby providing a scientifically sound basis for optimizing the production technology of pectin-containing pastes.

The *fifth section* presents mathematical modeling using the factor space method and calculation of the economic efficiency of implementing the technology for producing pectin-containing pastes from pumpkin raw materials. The mathematical model allowed us to determine the main characteristics of the experimental samples from the size of the factor space; none of the qualitative characteristics exceeded the average and maximum permissible norms. It was established that using pectin-containing pastes with varying sugar contents is cost-effective, reducing raw material costs and increasing the finished product's added value. Each recipe group is characterized by its own technological and economic advantages depending on the intended use. Based on the dissertation results, the author developed and scientifically substantiated an improved technological scheme for producing pectin-containing pastes from pumpkin raw materials using vibro-hydraulic mixing.

The obtained scientific and practical results were tested under industrial conditions, confirming the technological efficiency, stability of quality indicators, and the feasibility of implementing the developed technology.

The dissertation research was conducted from 2022 to 2025 in the laboratory of the Department of Processes and Equipment for Processing Agricultural Products of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine and in the Department of Analytical Research and Food Quality of the Institute of Food Resources of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine.

Overall, the dissertation aims to address relevant scientific and practical problems in the food industry by improving the technology for producing pectin-containing pastes from pumpkin. Particular attention is paid to the formation of the physicochemical, functional-technological, rheological, and structural-mechanical properties of products, ensuring their microbiological stability, increasing their biological and nutritional value, and optimizing technological parameters while reducing production costs. The rational use of pectin-containing plant raw materials, combined with the implementation of vibrohydraulic mixing methods, intensifies technological processes and expands the range of functional food products. The obtained research results provide a scientifically grounded basis for the practical implementation of pectin-containing pastes in various areas of food technology and for the further development of resource-saving technological solutions.

Keywords: pectin-containing pastes, pumpkin raw materials, pectic substances, rheological properties, structural-mechanical indicators, functional-technological properties, vibrohydraulic mixing, quality indicators.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України

1. **Mushtruk N.M.**, Mushtruk, M.M. Analysis of the raw material base for pectin production. *Animal Science and Food Technology*. 2023. Vol. 14(2), P. 57–75. *(Муштрук Н.М. здійснено аналіз сировинної бази для виробництва пектину, узагальнено літературні та експериментальні дані, сформульовано висновки. Муштрук М.М. проведено систематизацію джерел інформації, участь у методологічному обґрунтуванні дослідження та редагуванні матеріалів статті).*

2. **Муштрук Н.М.** Оптимізація процесу виробництва гарбузової пектинової пасти. *Здоров'я людини і нації*. 2024. Т.2. № 3. С. 7–17.

3. **Муштрук Н.М.**, Муштрук, М.М. Штучний інтелект як інструмент для розроблення рецептур пектиновмісних паст. *Здоров'я людини і нації*. 2025. Т. 3. № 2. С. 31–46. *(Муштрук Н.М. сформульовано наукову ідею та концепцію застосування штучного інтелекту для розроблення рецептур пектиновмісних паст, визначено мету і завдання дослідження, виконано аналіз та інтерпретацію отриманих результатів, сформульовано висновки. Муштруком М.М. розроблено та реалізовано алгоритмічні моделі штучного інтелекту, здійснено підготовку та обробку вхідних даних, проведено моделювання рецептур і участь у підготовці рукопису статті).*

4. **Муштрук Н.М.** Порівняльний аналіз властивостей пектиновмісних паст із використанням штучного інтелекту. *Здоров'я людини і нації*. 2025. Т. 3. № 3. С. 63–79.

Статті у науковому виданні,

включені до міжнародних наукометричних баз даних

Scopus та/або Web of Science Core Collection

5. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., **Mushtruk, N.** Evaluation of technological parameters of convective drying of pumpkin seeds with vibro-ozonation

intensification of the process. *Animal Science and Food Technology*. 2025, Vol. 16(2). P. 39–54. (*Mushtruk M. розроблено програму експериментальних досліджень та виконано підготовку зразків, проведено конвективне сушіння насіння гарбуза. Mushtruk M. здійснено технічне обґрунтування параметрів вібраційного та озонуючого впливу, проведено аналіз енергоефективності процесу. Palamarchuk I. виконано узагальнення та аналіз експериментальних даних, оцінено технологічні параметри сушіння, сформульовано наукові висновки*).

6. Mushtruk M., Chuiuk R., **Mushtruk, N.**, Vasyliv, V., Slobodyanyuk, N., Rudyk Y., Gruntovskyi, M. Raw material base for the production of food and pharmacological glycerin. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16(2), e25057. (*Mushtruk N. сформульовано наукову концепцію дослідження та виконано аналіз сировинної бази, проведено порівняльний аналіз рослинної сировини (багатанних культур). Chuiuk R. проведено аналіз нормативних та регуляторних вимог до якості гліцерину. Mushtruk M. здійснено узагальнення літературних та експериментальних даних, оцінено перспективність різних видів сировини, сформульовано висновки. Vasyliv V. виконав фізико-хімічну оцінку сировини та продуктів переробки, а також здійснив аналіз отриманих результатів. Slobodyanyuk N. брала участь у проведенні фізико-хімічних досліджень сировини та продуктів перероблення, а також у узагальненні та інтерпретації результатів. Rudyk Y. здійснив статистичну обробку експериментальних даних, аналіз отриманих результатів. Gruntovskyi M. брав участь у підготовці рукопису статті, формуванні структури роботи, редагуванні тексту та оформленні матеріалів до публікації*).

Тези наукових доповідей

7. **Муштрук Н.М., Муштрук М.М.** Удосконалення технології виробництва пектиновмісних паст. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу. Секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах

війни та вирішенні завдань плану відродження України: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 484-485. *(Муштрук Н.М. сформульовано наукову ідею доповіді, обґрунтовано напрями удосконалення технології виробництва пектиновмісних паст, здійснено узагальнення результатів досліджень. Муштруком М.М. виконано техніко-технологічний аналіз процесу та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

8. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Дослідження сировинної бази для виробництва пектину. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу. Секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 486-487. *(Муштрук Н.М. проведено аналіз та оцінку сировинної бази для виробництва пектину, узагальнено літературні та експериментальні дані. Муштруком М.М. виконано систематизацію сировинних ресурсів та участь у формуванні висновків).*

9. **Mushtruk N.M.,** Mushtruk M.M., Rzewski P. The main technological aspects of the production of pectin-containing pastes. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу. Секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 644-646. *(Mushtruk N.M. обґрунтовано основні технологічні аспекти виробництва пектиновмісних паст, здійснено аналіз технологічних параметрів та сформульовано висновки. Mushtruk M.M. виконано технічний аналіз обладнання і процесів. Rzewski P. взято участь у*

порівняльному аналізі технологічних рішень та підготовці матеріалів доповіді).

10. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Аналіз сировини для виробництва пектину. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 205. *(Муштрук Н.М. виконано аналіз якісних та кількісних характеристик сировини для виробництва пектину, обґрунтовано перспективність її використання. Муштруком М.М. здійснено узагальнення даних та участь у підготовці тез доповіді).*

11. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Технологічні особливості виробництва пектинів. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 206. *(Муштрук Н.М. проаналізовано ключові технологічні особливості виробництва пектинів, визначено критичні параметри процесу. Муштруком М.М. виконано технічне обґрунтування технологічних рішень та участь у формуванні висновків).*

12. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Обладнання для виробництва пектину. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 207. *(Муштрук Н.М. здійснено аналіз сучасного обладнання для виробництва пектину та визначено напрями його удосконалення. Муштруком М.М. виконано технічну оцінку конструктивних рішень обладнання та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

13. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Технологічні інновації у технології виробництва пектинів. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем

виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 208. *(Муштрук Н.М. обґрунтовано інноваційні підходи у технології виробництва пектинів, узагальнено сучасні наукові та практичні рішення. Муштруком М.М. здійснено аналіз інноваційних технологічних схем та участь у формуванні висновків).*

14. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Аналіз ринку обладнання для виробництва пектинів. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 209. *(Муштрук Н.М. проведено аналіз сучасного ринку обладнання для виробництва пектинів, визначено тенденції та перспективи розвитку. Муштруком М.М. виконано техніко-економічну оцінку обладнання та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

15. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Аналіз та оцінка сировинних ресурсів для виробництва пектину. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XIII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 10–11 квітня 2025 року: тези доповіді. Київ, 2025. С. 337–338. *(Муштрук Н.М. здійснено комплексний аналіз та оцінку сировинних ресурсів для виробництва пектину, обґрунтовано напрями їх раціонального використання. Муштруком М.М. виконано систематизацію ресурсної бази та участь у формуванні висновків).*

16. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Інноваційні підходи до вдосконалення технології виробництва пектиновмісних паст. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XIII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 10–11 квітня 2025 року:

тези доповіді. Київ, 2025. С. 339–340. *(Муштрук Н.М. обґрунтовано інноваційні підходи до вдосконалення технології виробництва пектиновмісних паст, узагальнено результати досліджень та сформульовано висновки. Муштруком М.М. здійснено технічний аналіз запропонованих рішень та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВМІСНИХ ПАСТ.....	29
1.1. Закономірності технологій отримання пектинів та пектиновмісних паст.....	29
1.2. Аналіз основних рослинних компонентів для виробництва пектинів і пектиновмісних паст	34
1.3. Застосування пектинових речовин в харчовій промисловості.....	40
1.4 Теоретичні основи процесів перемішування у виробництві пектиновмісних паст	45
1.4.1 Реологічна та структурна характеристика пектиновмісних систем.....	45
1.4.2 Гідродинамічні особливості процесу	46
1.4.3 Аналіз існуючих конструкцій змішувального обладнання для високов'язких харчових систем.....	46
1.4.4 Обґрунтування доцільності вібро-гідрравлічного впливу.....	49
1.5 Інтенсифікація процесу перемішування пектиновмісних паст шляхом удосконалення змішувальних систем	50
1.5.1 Механічні способи перемішування та їх ефективність у пектиновмісних середовищах	51
1.5.2 Вібраційне та вібро-гідродинамічне перемішування як механізм нестационарної інтенсифікації.....	52
1.5.3 Енергетична ефективність та критерії оптимізації вібро-гідрравлічного перемішування	53
1.5.4. Обґрунтування принципової схеми віброгідрравлічного змішувача інгредієнтів виробництва пектиновмісних паст	54
1.6. Висновки до 1 розділу	56

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДАННЯ 57

2.1. Програма експериментальних досліджень та оснащення для її реалізації.....	58
2.1.1. Програма експериментальних досліджень.....	58
2.1.2. Дослідна модель гідролізатора для виробництва пектиновмістних паст.....	59
2.1.3. Експериментальне оснащення для оцінки силових та енергетичних характеристик процесу, що досліджується	61
2.1.4. Вимірювальне оснащення для оцінки масових характеристик досліджуваної сировини	62
2.2. Методика вимірювання параметрів вібрації	67
2.3. Методи дослідження хімічного складу пектинової пасти.....	68
2.4. Обробка результатів досліджень	71
2.5. Висновки до 2 розділу.	74

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕКТИНОВИХ ПАСТ З ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІШУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА..... 76

3.1. Гідродинамічні параметри процесу	78
3.2. Кінематичний та силовий аналіз досліджуваної системи.....	80
3.3. Складання рівнянь руху виконавчих органів мішалки.....	86
3.4. Розв'язок рівнянь руху враховуючи органи мішалки	88
3.5. Графоаналітичний аналіз основних характеристик досліджуваної коливальної системи	92
3.6. Висновки до 3 розділу.	98

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВИХ ПАСТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІБРОГІДРАВЛІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ..... 100

4.1. Обґрунтування раціональної схеми виробництва пектиновмісних паст з гарбуза	100
4.2. Дослідження фізико-хімічних, функціонально-технологічних і структурно-механічних властивостей гарбузів.....	108
4.3 Функціонально-технологічні та фізико-хімічні показники пектинових паст з гарбуза	114
4.5 Перевірка адекватності розробленої математичної моделі	132
4.6. Висновки до 4 розділу.	136
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВМІСНИХ ПАСТ З ГАРБУЗА З УРАХУВАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ.	139
5.1. Органолептична оцінка виготовлених пектинових паст	139
5.2 Математичне моделювання якісного стану досліджуваних пектинових паст.....	142
5.2.1 Експериментальна оцінка основних якісних характеристик досліджуваних зразків продукції.....	142
5.3. Обґрунтування економічної доцільності впровадження технології.	155
5.4. Розрахунок капіталовкладень	156
5.5. Техніко-економічне обґрунтування доцільності виробництва пектиновмісних паст з гарбуза	157
5.6. Розрахунок експлуатаційних затрат на виробництво	158
5.7. Визначення основних економічних показників.....	161
5.8. Висновки до 5 розділу.	164
ВИСНОВКИ	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	168
ДОДАТКИ	188

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БГКП – бактерії групи кишкової палички;

ВЗЗ – вологозв'язувальна здатність;

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я;

ВУЗ – водоутримувальна здатність;

ДСТУ – національний стандарт України;

ЕЗ – емульгувальна здатність;

ЖУЗ – жирутримувальна здатність

МАФАНМ – мезофільні аеробні та факультативно-анаеробні мікроорганізми;

НД – нормативні дані;

СЕ – стабільність емульсії;

ТІ – технологічна інструкція;

ISO – International Organization for Standardization;

P. acidilactici – *Pediococcus acidilactici*;

S. carnosus – *Staphylococcus carnosus*.

ВСТУП

Розробка науково-технічних основ створення інноваційного обладнання для виробництва функціональних харчових продуктів становить важливий напрямок сучасних наукових досліджень, що знаходиться на перетині декількох дисциплін: харчової інженерії, гідромеханіки, теорії коливальних систем та матеріалознавства. Особливу наукову та практичну цінність представляє дослідження процесів обробки пектиновмісних паст, які мають унікальні детоксикаційні, радіопротекторні та імуномодулюючі властивості, проте характеризуються складною реологічною поведінкою та вимагають специфічних підходів до проектування технологічного обладнання.

Аналіз світового досвіду та наукової літератури свідчить про відсутність комплексних теоретичних і експериментальних досліджень процесу змішування інгредієнтів під час виробництва пектиновмісних паст із застосуванням віброгідравлічних принципів обробки. Традиційні методи змішування, що базуються на використанні механічних мішалок різних конструкцій, не забезпечують необхідної якості кінцевого продукту та характеризуються високою енергоємністю. Застосування вібраційних технологій обмежується нерівномірністю розподілу компонентів, а гідравлічні методи не дозволяють ефективно руйнувати агрегати та забезпечувати однорідну структуру продукту.

Науковою новизною даного дослідження є принципово новий підхід до інтенсифікації процесу змішування, що базується на теоретично обґрунтованому синергетичному ефекті комбінованого застосування вібраційного та гідравлічного впливів на пектиновмісні середовища. Попередні дослідження дозволяють висунути гіпотезу про існування оптимальних співвідношень між параметрами вібрації (частота, амплітуда) та гідравлічного потоку (тиск, швидкість), за яких завдяки резонансним явищам у гетерогенному середовищі досягається максимальна ефективність процесу змішування.

Вибір теми дослідження також зумовлений необхідністю розробки фундаментальних положень теорії взаємодії вібраційних і гідравлічних ефектів із неньютонівськими рідинами, до яких належать пектиновмісні пасти. Відсутність у світовій науковій літературі математичних моделей, що описують таку взаємодію, створює передумови для формування нового наукового напрямку в галузі харчової інженерії. Крім того, розробка віброгідравлічних змішувачів має значний потенціал для технологічного трансферу в інші галузі, де також обробляють складні гетерогенні системи.

Принципова відмінність запропонованого дослідження від існуючих робіт полягає у комплексному підході до вивчення процесу віброгідравлічного змішування, що включає розробку теоретичних основ, створення математичних моделей, експериментальне визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи обладнання, а також оцінку їх впливу на якісні показники кінцевого продукту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота пов'язана з програмою науково-дослідних робіт кафедри технології м'ясних, рибних та морепродуктів Національного університету біоресурсів і природокористування України та виконувалась у межах наукової теми «Наукове обґрунтування та розроблення новітніх агроінженерних рішень моделювання сировини заданого нутрієнтного складу для військовослужбовців», код державної реєстрації 00493706, № 0124U001737. Крім того, дослідження відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні на період до 2030 року, а саме: "Раціональне природокористування" та "Науки про життя, нові технології профілактики та лікування найпоширеніших захворювань".

Мета і завдання дисертаційної роботи.

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та удосконаленні конструктивно-технологічної схеми віброгідравлічного змішувача шляхом розробки дослідної моделі машини, теоретичного та експериментального обґрунтування режимних характеристик, оцінки якісного стану при врахуванні

реологічних властивостей технологічного середовища, впливу вібромеханічних та гідродинамічних параметрів для підвищення енергоефективності процесу та якості отриманих пектиновмісних паст.

Для виконання даної мети були поставлені наступні **завдання** досліджень:

- провести аналіз сучасного стану технологій виробництва пектиновмісних паст та обладнання для змішування компонентів, визначити основні проблеми й шляхи їх вирішення;
- розробити методику розрахунку основних параметрів віброгідрравлічного змішувача для виробництва пектиновмісних паст;
- теоретично дослідити процеси, що відбуваються при змішуванні інгредієнтів пектиновмісних паст, розробити математичну модель процесу віброгідрравлічного змішування;
- провести експериментальні дослідження процесу віброгідрравлічного змішування інгредієнтів пектиновмісних паст на розробленій лабораторній установці;
- на основі результатів експериментального та теоретичного аналізу встановити залежності між параметрами віброгідрравлічного змішувача; обґрунтувати конструктивно-технологічну схему віброгідрравлічного змішувача, що забезпечує оптимальні умови для змішування компонентів пектиновмісних паст при застосуванні методів математичного моделювання Лагранжа та Коші;
- на основі аналізу закономірностей зміни основних вібромеханічних та гідродинамічних чинників при реалізації процесу перемішування обґрунтувати конструктивні та режимні параметри досліджуваної біотехнічної системи для забезпечення ефективності процесу змішування;
- провести оцінку якісного стану досліджуваних зразків продукції при застосуванні математичного моделювання методом «факторних площ»;

- оцінити економічну ефективність технології виробництва пектиновмісних паст з гарбуза та розробити рекомендації щодо промислового впровадження віброгідравлічного змішувача.

Об'єктом дослідження є процес віброгідравлічного змішування інгредієнтів під час виробництва пектиновмісних паст.

Предметом дослідження є закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів віброгідравлічного змішувача на ефективність процесу змішування та якісні показники пектиновмісних паст.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано комплекс взаємодоповнювальних теоретичних і експериментальних методів дослідження. Дослідження були виконані з допомогою методів математичного та фізичного моделювання, проведення експерименту та математико-статистичної обробки результатів. Експерименти проводили на розробленій лабораторній установці, обладнаній сучасними засобами керування та вимірювання. Для аналітичного дослідження буде використано програмне забезпечення Matlab, MathCad 15, Excel та Statistica 10.0.

Для оцінки якісних показників пектиновмісних паст застосовувалися стандартні та модифіковані методики визначення реологічних характеристик, структурно-механічних властивостей і хімічного складу. Обробку експериментальних даних здійснювали з використанням методів математичної статистики та регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає в тому, що:

Вперше:

Розроблено теоретичні основи процесу віброгідравлічного змішування інгредієнтів пектиновмісних паст, що враховують особливості їх реологічної поведінки та механізми структуроутворення;

Встановлено закономірності впливу комбінованої дії вібраційних і гідравлічних факторів на ефективність змішування компонентів

пектиновмісних паст, використовуючи математичне моделювання методами Лагранжа та Коші.

Обґрунтовано межі ефективної реалізації робочих режимів експлуатації вібраційного гідродинамічного змішувача для виробництва пектиновмісних паст, що забезпечують оптимальні умови для змішування компонентів.

Проведено оцінку якісного стану зразків пектиновмісних паст при застосуванні математичного моделювання методом «факторних площ», що дозволило визначити відповідність продукту нормативним вимогам; обґрунтувати кращу рецептуру зразків; виявити характеристики продукції, які найбільш істотно впливають на якість досліджуваної продукції.

Удосконалено:

Методику оцінки якості змішування багатокомпонентних систем з урахуванням їхніх структурно-механічних характеристик.

Математичну модель процесу змішування неньютонівських рідин в умовах нестационарних гідродинамічних режимів.

Отримали подальший розвиток:

Уявлення про механізми структуроутворення в пектиновмісних середовищах під впливом механічних факторів;

Методи інтенсифікації процесів змішування компонентів харчових систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

1. Конструктивно-технологічної схеми віброгідравлічного змішувача для виробництва пектиновмісних паст, яка забезпечує високу ефективність процесу змішування за мінімальних енергетичних витрат.

2. Інженерної методики розрахунку основних параметрів віброгідравлічного змішувача, що дозволяє проектувати обладнання з урахуванням конкретних виробничих умов і вимог до якості кінцевого продукту.

3. Рекомендації щодо вибору раціональних режимів роботи віброгідравлічного змішувача залежно від рецептурного складу та бажаних характеристик пектиновмісних паст.

4. Раціональних конструктивних параметрів віброгідравлічного змішувача для виробництва пектиновмісних паст, які забезпечують оптимальні умови змішування компонентів, інтенсифікацію технологічного процесу та отримання готового продукту зі стабільними показниками якості.

5. Технічної документації на дослідно-промисловий зразок віброгідравлічного змішувача, який пройшов виробничі випробування на підприємстві ТОВ «УКРСТАР ТУР».

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробничий процес на підприємстві ТОВ «УКРСТАР ТУР» (акт впровадження від 05.01.2026 р.) та в навчальний процес НУБіП України при викладанні дисциплін "Процеси і апарати харчових виробництв", "Процеси і апарати біотехнічних виробництв", "Машини і обладнання для переробки сільськогосподарської продукції", "Технологічне обладнання галузі", "Інформаційні технології та математичне моделювання систем управління якістю" (акт впровадження від 05.01.2026 р.).

Особистий внесок здобувача

Особистий внесок автора полягає у ґрунтовному опрацюванні та систематизації теоретичних джерел за тематикою дисертаційного дослідження, обґрунтуванні мети й формуванні завдань роботи, самостійному доборі методів дослідження та розробленні програми експериментів. Автором виконано аналіз і узагальнення експериментальних результатів, сформульовано висновки, підготовлено матеріали для наукових публікацій і патентування. Також здійснено апробацію запропонованої технології в умовах виробництва. Експериментальні дослідження повністю сплановано й реалізовано автором, а їхні результати апробовано на наукових конференціях та опубліковано у фахових виданнях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації апробовано на таких міжнародних науково-практичних конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України» (м. Київ, 2023 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2024 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2025 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційного дослідження висвітлено в 16 наукових працях здобувачки, з яких 4 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, та 10 тезах наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (169 найменувань) та 11 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 209 сторінок, з яких основний текст викладено на 167 сторінках. Робота містить 55 рисунків та 30 таблиць.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВМІСНИХ ПАСТ.

1.1. Закономірності технологій отримання пектинів та пектиновмісних паст

Пектинові речовини – це група високомолекулярних гетерополісахаридів, що містяться в клітинних стінках і міжклітинних просторах рослинних тканин. За хімічною структурою пектини є складними полімерами, основу яких становить лінійний ланцюг залишків D-галактуранової кислоти, з'єднаних α -1,4-глікозидними зв'язками [1, 2]. Галактуранові залишки можуть бути частково метоксильовані карбоксильними групами, що визначає ступінь етерифікації (DE) пектину – важливий параметр, що впливає на його функціональні властивості [3].

Молекулярна маса пектинів зазвичай коливається від 50 до 150 кДа, залежно від джерела сировини та способу виділення [4]. Структурно пектини можна розділити на три основні домени:

Гомогалактуронан (HG) – лінійний полімер залишків α -D-галактуранової кислоти [4];

Рамногалактуронан-I (RG-I) – чергування залишків рамнози та галактуранової кислоти з бічними ланцюгами арабінанів і галактанів [4];

Рамногалактуронан-II (RG-II) – складний домен з рідкісними цукрами, такими як апіоза, ацерова кислота, KDO (2-кето-3-дезоксид-манно-октулозонова кислота) [5].

Функціональні властивості пектиновмісних пв, такі як драглеутворювальна здатність, в'язкість, емульгуючі властивості, залежать від їхньої хімічної структури та ступеня етерифікації. Високоетерифіковані пектини ($DE > 50\%$) утворюють гелі за наявності цукрів і кислот, тоді як низькоетерифіковані пектини ($DE < 50\%$) желюються за наявності двовалентних катіонів, зокрема Ca^{2+} [6].

Промислові джерела пектинів включають переважно відходи переробки фруктів: яблучні вичавки (вміст пектину 10–15% на суху масу), цитрусові шкірки (20–30%), буряковий жом (10–20%), соняшникові кошики (15–25%) [7]. Останнім часом значну увагу приділяють альтернативним джерелам пектину, таким як амарант, тиква, кабачки, льон та інші (табл.). 1.1 [8, 9].

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика пектинів з різних джерел

Джерело	Вміст пектину, %	Ступінь естерифікації, %	Молекулярна маса, кДа	Драглеутворювальна здатність
Яблучні вичавки	10-15	55-70	70-100	Середня
Цитрусові шкірки	20-30	65-75	100-150	Висока
Буряковий жом	10-20	30-45	50-80	Низька
Соняшникові кошики	15-25	50-60	80-120	Середня

Цитрусові пектини характеризуються найвищим вмістом галактуранової кислоти (до 85%) і високими показниками драглеутворювальної здатності, що робить їх найбільш цінними для харчової промисловості [10]. Яблучні пектини демонструють дещо нижчі функціональні показники, але є більш доступними в регіонах з розвиненим яблучним виробництвом [11]. Пектини з бурякового жому мають низький ступінь естерифікації та містять значну кількість ацетильних груп, що знижує їхню драглеутворювальну здатність [12].

Традиційні технології виділення пектинів базуються на кислотній екстракції рослинної сировини з подальшим осадженням пектину спиртом або солями [13]. Процес виробництва пектину можна умовно розділити на наступні стадії:

Підготовка сировини: сушіння, подрібнення, інактивація ферментів.

Екстракція: обробка сировини кислотним розчином (рН 1,5–3,0) за температури 60–90 °С протягом 0,5–3 годин.

Фільтрація: відділення твердої фази від екстракту.

Осадження: додавання етанолу (60–80%) або солей для преципітації пектину.

Очищення: промивання осаду для видалення домішок.

Сушіння: видалення вологи до досягнення вмісту вологи 8–12%.

Подрібнення та стандартизація: отримання порошку з заданими властивостями [14, 15].

Кислотна екстракція може проводитися з використанням різних мінеральних кислот (соляної, сірчаної, азотної) або органічних кислот (лимонної, оцтової) [16]. Вибір екстрагента, температурного режиму та тривалості екстракції впливає на вихід і якість кінцевого продукту. Підвищення температури та концентрації кислоти прискорює екстракцію, але може призвести до деградації пектину й зниження його молекулярної маси [17].

Інноваційні методи отримання пектинів

Сучасні дослідження зосереджені на розробці альтернативних методів екстракції пектину, які дозволяють підвищити ефективність процесу та зберегти функціональні властивості пектину:

Ферментативна екстракція. Використання целюлаз, геміцелюлаз та пектиназ для селективного руйнування клітинних стінок без деградації пектинових молекул [18]. Перевагами ферментативного методу є м'якші умови процесу (помірна температура), вища молекулярна маса отриманих пектинів та екологічна безпека [19]. Основними обмеженнями є висока вартість ферментів і складність контролю процесу.

Оптимальні умови ферментативної екстракції включають: рН середовища 4,0–5,5; температуру 40–50 °С; тривалість 3–6 годин; співвідношення фермент:субстрат 1:100–1:500 [20].

Ультразвукова екстракція. Застосування ультразвукових хвиль (частота 20–100 кГц) створює ефект кавітації, що призводить до розриву клітинних стінок і прискорення масопереносу [21]. Ультразвукова обробка дозволяє скоротити час екстракції на 30–50%, знизити температуру процесу та підвищити вихід пектину на 10–15% порівняно з традиційною кислотною екстракцією [22].

Мікрохвильова екстракція. Використання мікрохвильового випромінювання забезпечує швидке і рівномірне нагрівання сировини, що підвищує ефективність екстракції [23]. Дослідження показують, що мікрохвильова екстракція дозволяє скоротити час процесу до 15–20 хвилин, зберігаючи високий вихід пектину (85–95% від максимально можливого) [24].

Субкритична водна екстракція. Використання води під високим тиском (5–10 МПа) за температури 100–160 °С дозволяє проводити екстракцію без додавання кислот [25]. Цей метод забезпечує високий вихід пектину з покращеними функціональними властивостями, але потребує спеціального обладнання та характеризується високими енерговитратами [26].

Технології отримання пектиновмісних паст. Пектиновмісні пасти – це концентровані напівфабрикати з вмістом пектину 5–15%, які можуть використовуватися як студнеутворювальні агенти та збагачувачі в харчовій промисловості [27]. На відміну від чистого пектину, пасти містять також інші компоненти рослинної сировини (клітковину, геміцелюлози, мінеральні речовини), що надає їм додаткової харчової цінності [28].

Основні способи отримання пектиновмісних паст

Концентрування пектинових екстрактів без осадження пектину спиртом. Екстракт піддають фільтрації, випарюванню у вакуум-випарних апаратах до вмісту сухих речовин 15–25% і подальшому концентруванню [29].

Комбіновані механохімічні методи обробки рослинної сировини з використанням щадних гідролізуючих агентів (лимонна кислота, ензими) та інтенсивної механічної дезінтеграції тканин [30].

Біоконверсія рослинної сировини з використанням ферментних препаратів спрямованої дії, що дозволяє селективно руйнувати певні структурні компоненти клітинних стінок і вивільняти пектинові речовини [31].

Порівняльна характеристика паст та сухих пектинів

Пектиновмісні пасти мають ряд переваг порівняно з сухими пектинами:

Спрощена технологія виробництва (відсутність стадій осадження, очищення та сушіння);

Нижча собівартість виробництва (на 30-50%);

Збереження натуральних компонентів вихідної сировини;

Покращені органолептичні властивості кінцевих продуктів [32].

Однак, пасти поступаються сухим пектинам за:

Стабільністю при зберіганні (термін придатності 3-6 місяців проти 1-2 років для сухих пектинів);

Стандартизованістю показників якості;

Технологічністю застосування в промислових масштабах;

Чистотою препарату та концентрацією активного компонента [33].

Вплив технологічних параметрів на якість пектинових продуктів

Ключові фактори впливу на вихід та якість пектину:

pH середовища: оптимальний діапазон для екстракції – 1,5–3,0. Зниження pH підвищує вихід пектину, але може призводити до часткового гідролізу та зниження молекулярної маси [34].

Температура: підвищення температури збільшує швидкість екстракції, але при температурі вище 90 °C відбувається термічна деградація пектину [35].

Тривалість екстракції: оптимальний час залежить від методу екстракції та варіює від 15–20 хвилин для мікрохвильової екстракції до 1–3 годин для традиційної кислотної екстракції [36].

Гідромодуль (співвідношення сировина:екстрагент): зазвичай використовується діапазон 1:10–1:20. Збільшення гідромодуля покращує масоперенос, але знижує концентрацію пектину в екстракті [37].

Дисперсність сировини: зменшення розміру частинок до 0,5–2,0 мм збільшує площу контакту з екстрагентом і підвищує вихід пектину [38].

Аналіз сучасних досліджень дозволяє виділити наступні тенденції в розвитку технологій отримання пектину:

Розроблення екологічно безпечних технологій з мінімальним використанням агресивних хімічних реагентів. Спостерігається перехід від мінеральних кислот до органічних кислот і ферментних препаратів [39].

Впровадження інтенсифікуючих фізичних методів обробки: ультразвук, мікрохвилі, імпульсні електричні поля, високий тиск [40]. Комбінування цих методів з традиційними дозволяє суттєво знизити енерговитрати та покращити якість продукту.

Розвиток комплексних технологій переробки рослинної сировини з одночасним отриманням пектину та інших цінних компонентів (целюлози, біологічно активних речовин, антиоксидантів) [41].

Адаптація технологій до різноманітних джерел сировини, включаючи нетрадиційні та екзотичні рослини, що дозволяє розширити асортимент пектинів з різними функціональними властивостями [42].

Створення пектинових продуктів цільового призначення з заданими технологічними властивостями для конкретних галузей застосування (фармацевтика, медицина, косметологія) [43].

Перспективним напрямом є розробка біоконверсійних технологій, що базуються на контрольованій ферментативній деструкції рослинних тканин з вивільненням пектинових речовин у нативному стані [44]. Такі технології дозволяють отримувати пектини з високою молекулярною масою та покращеними функціональними властивостями за суттєвого зниження енергетичних і ресурсних витрат.

1.2. Аналіз основних рослинних компонентів для виробництва пектинів і пектиновмісних паст

Рослинні компоненти, що використовуються для виробництва пектину, можуть відрізнятися за складом і властивостями. Основними джерелами пектину є яблука, цитрусові, цукровий буряк та інші сільськогосподарські культури [45]. Розглянемо детальніше склад і властивості цих рослинних компонентів.

Яблучний пектин має високий ступінь метоксилації, та вміст галактуронової кислоти становить близько 70–75%. Яблучний пектин має високу драглеутворювальну здатність, що забезпечує його використання як стабілізатора та загущувача [46].

Цитрусовий пектин містить менше галактуронової кислоти (40–60%) порівняно з яблучним пектином, але має високий вміст метоксильних груп, що робить його більш розчинним у воді. Цитрусовий пектин використовується для підвищення в'язкості та стабілізації фруктових соків [47].

Буряковий пектин містить найвищий вміст галактуронової кислоти (80–85%) порівняно з іншими джерелами пектину. Буряковий пектин має високу драглеутворювальну здатність, але меншу стабільність, ніж яблучний або цитрусовий. Він використовується для загущення та стабілізації рідинних продуктів, таких як супи, соуси та консерви [49].

Україна є виробником цукрового буряка, який може бути використаний як джерело сировини для виробництва пектину. Дослідження показують, що буряк цукровий містить приблизно 10–15% пектину, що робить його ефективним джерелом сировини для виробництва пектину [50].

Сировиною для промислового отримання пектину з точки зору економічної доцільності його використання слугують, в основному, яблучні та цитрусові вичавки, жом цукрового буряка, кормового кавуна, кошики соняшнику та гарбуза (тобто відходи харчових виробництв). Вміст пектинових речовин у рослинній сировині характеризується значною варіабельністю та визначається ботанічним походженням, ступенем зрілості плодів і технологією їх перероблення. Концентрація пектинів може змінюватися від слідових кількостей (менше 1%) до високих значень, що перевищують 30% у перерахунку на суху речовину. Пектини локалізовані в різних частинах рослин нерівномірно. Наприклад, в цитрусових плодах основна кількість пектинів зосереджена в альбедо, в яблуках – в епідермісі і прилеглих тканинах, в цукровому буряку – в м'якоті [51]. Класифікацію пектинвмісної сировини за вмістом пектинових речовин наведено в табл. 1.2

Таблиця 1.2

Характеристика пектинових речовин за видом сировини

Вид пектинвмісної сировини		Вміст пектину,%
Підгрупа	Сировина	
1-а група «Овочі»		
Бульбоплоди, коренеплоди	Картопля, буряк, морква	5,4...2,0 30,0...6,4
Листові, стеблові	Капуста, цибуля, селера	7,5...4,8 10,1...9,2
Плодові	Баклажани, перець, томати	11,0...9,2
Гарбузові	Гарбузи, дині, кавуни	23,6...1,7
Бобові, зернові	Зелений горошок, кукурудза, пшениця, ячмінь, овес, рис	2,5...1,5 3,0...4,0
2-га група «Плоди та ягоди»		
Зерняткові	Яблука, груші, айва, горобина	9,0...1,9
Кісточкові	Вишня, черешня, слива, абрикос	
Справжні, несправжні, складні	Виноград, смородина, суниця, полуниця, малина, брусниця, чорниця, журавлина	12,0...4,2 7,9...3,3 6,7...3,2
	Інжир, фейхоа, хурма, ківі, грейпфрути	14,0...4,9
Тропічні цитрусові	Гранат, банани, лимони, апельсини, мандарини	5,8...5,5
3-тя група «Інші види»		
Листя		14,0...4,9
Стебла соняшнику		35,7...20,0
Кошики соняшнику		24,0...12,0
Стулки бавовника	коробочок	5,4...10,0
Кора дерев	Сосна, ялина, модрина	9,0...8,0

Джерело: (складено автором на основі (Bédouet, Courtois & Courtois, 2003; Fishman *et al.*, 2019).

Провівши аналіз даних, представлених у табл. 1.2, можна зробити висновок, що найбільш перспективною сировиною для синтезу пектину та пектиновмісних паст в Україні можуть бути різні види коренеплодів, нові сорти баштаних культур, зерняткові різних сортів і соняшник [52, 53]. В наукових працях дослідники, запропонували власну класифікацію

пектинвмісної сировини за вмістом пектинових речовин, вона має наступний вигляд:

Високопектинові сировини (більше 35% пектину): китайська жовта горохова гума, концентрований сік лимона або лайма та абрикосові кісточки.

Середньопектинові сировини (від 10% до 35% пектину): яблучні шкурки, цедра апельсинів, цедра лимонів і гарбузова м'якоть.

Низькопектинові сировини (менше 10% пектину): смородинове листя, вишневі стебла, чорний перець, хміль.

За результатами літературного огляду встановлено рівень розвитку технологічного процесу та проаналізовано застосовність прогресивних рішень. Відомий метод отримання очищеного пектину з фруктових вичавок шляхом екстрагування оксалату амонію водним розчином оксалату амонію з одночасним подрібненням сировини, подальшою фільтрацією та вакуумною концентрацією екстракту [54]. Пектини осаджують з етанолу та висушують. Потім їх обробляють водним розчином аміаку. Соляну кислоту додають до реакційної суміші та витримують при 18 °С протягом 1 год, після чого виділяють пектин. Комплексоутворювальна здатність пектину становить 922,77 мг Pb²⁺/г.

Наступний метод стосується отримання препаратів із дезінтоксикаційною здатністю та дозволяє підвищити чистоту й зв'язуючу здатність одержуваного продукту [55]. За цим методом на виробництві зразки пектину - буряковий, *цитрусовий, яблучний пектин екстрагують 0,5-процентним розчином цитрату амонію.* Після фільтрації в екстракт пектину додають електроліт у вигляді 0,1 М розчину хлористого калію та проводять діаліз через целофанову мембрану за температури 38 °С протягом 24 годин. Отриманий діалізат випарюють під вакуумом, а потім обробляють 96%-ним етанолом. Пектини відокремлюють і обробляють 5-процентним розчином аміаку в співвідношенні 1:10 при рН 10,5 протягом 2 годин.

У способі, описаному в роботі [56], досліджують суміш бурякового жому та яблучних вичавок. Ця суміш набухає в кислому водному розчині, потім

промивається водою і піддається гідролізу сумішшю, що містить водні розчини соляної та оцтової кислот. Заключними етапами процесу є відділення гідролізату, його охолодження і нейтралізація, осадження пектину етиловим спиртом, його очищення і сушка.

Одержання харчового пектину з рослинної сировини здійснюється різними технологічними методами, вибір яких залежить від виду сировини, вимог до якості кінцевого продукту та економічної доцільності процесу [57]. Суть цих методів полягає в наступному: буряковий жом і яблучні вичавки змішують у пропорції 1:(1-9), додають фосфат целюлози в кількості 2-4% (мас.), сировину розмочують у суміші ультрафільтрату з водою у пропорції 1:(1-2) протягом 2 год. Далі молочну сироватку з кислотністю 290–300 °С нагрівають до температури 90–95 °С, витримують протягом 15–25 хв., після чого здійснюють подальше охолодження, очікування та фільтрацію.

Особливістю способу отримання пектину, описаного в роботі [58], є гідроліз протопектину зі свіжих вичавок айви, яблук і груш із застосуванням ферментних препаратів целюлонічного комплексу в кількості 0,1–0,3% від маси сировини. При цьому для підвищення виходу пектину сировину заморожують протягом 25–30 хв. При температурі –30–40 °С з подальшим розморожуванням гарячою водою. Гідроліз проводять при 45–50 °С протягом 2–3 годин.

Приготування пектину з яблучних вичавок за методом [60] містить наступні етапи: промивання подрібнених яблучних вичавок, кислотнотермічний гідроліз промитої сировини, водна екстракція м'якоті, отриманої після гідролізу, для більш повного вилучення пектину, відділення отриманого гідролізату і екстракту, осадження і очищення пектину етиловим спиртом і сушка. Перед миттям сировину піддають попередньому випаровуванню протягом 15 хвилин для інтенсифікації поділу баластних речовин, а потім саму промивку сировини проводять водою за гідравлічного модуля 1:6 і температури 50–60 °С. Далі проводиться кислотнотермічний гідроліз промитої сировини розчином лимонної кислоти за температури 60–70 °С.

Екстракція пульпи здійснюється водою при температурі 70–75 °С, здійснюється вакуумним випарюванням до вмісту пектинових речовин 10–12% від абсолютно сухої маси.

Суть методу отримання пектину з фруктових вичавок [61] полягає в тому, що сировину промивають з додаванням мінеральної кислоти в кількості, що забезпечує рН розчину 2,5–3,0 для промивання яблучних вичавок і 2,5–3,5 – для цитрусових вичавок.

Відомий метод отримання пектину з яблучних відходів [62], розроблений японськими вченими, передбачає обробку сировини розчином фосфорної кислоти з подальшою фільтрацією та очищенням на аніонообмінних і катіонообмінних смолах.

При наступному способі екстракції пектину використовується метод мікрохвильового випромінювання [63]. Сировина (апельсини, мандарини, яблука і морква) попередньо обробляється спиртом. Екстракція здійснюється з опроміненням 2,45 МГц протягом декількох хвилин і з повторними впливами. Як екстрагент використовують розчини соляної та сірчаної кислот або розчини оксалатів амонію.

Японські вчені розробили спосіб отримання пектину під тиском для харчової промисловості, наприклад, для приготування варення з пектиновмісних рослин, таких як лимон, лайм, яблуко [64].

За методом [65] пектини можуть бути виділені з вторинних продуктів (в основному яблучних і цитрусових вичавок), отриманих при пресуванні соку зі зрілих фруктів і овочів, в результаті виборчої адсорбції, а поліфеноли - в результаті подальшої десорбції адсорбенту. Недоліком цього методу є додаткове використання етанолу для попередньої обробки сировини та отримання пектину з низькою молекулярною масою.

Залежно від застосування, різні види пектинвмісної сировини можуть бути використані для різних цілей. Наприклад, високопектинові сировини можуть бути використані для виготовлення желе та мармеладів, середньопектинові сировини - для виготовлення соусів та напоїв, а

низькопектинові сировини – для виготовлення харчових добавок та ароматизаторів.

За результатами аналітичних досліджень, встановлено, що застосування вищезазначеної рослинної сировини, зумовлене високим вмістом пектину та новітніми тенденціями його застосування в харчовій промисловості для виготовлення нових продуктів оздоровчого та профілактичного призначення, а також великими обсягами сировини, яка вважається відходами після процесів виробництва основних продуктів на плодоовочевих підприємствах з вищезазначеної сировини. Тому українські виробники пектинової продукції та її похідних можуть використовувати як традиційну сировину, так і яблучні вичавки, баштанні культури та соняшник.

1.3. Застосування пектинових речовин в харчовій промисловості

В умовах глобальної екологічної ситуації, яка пов'язана зі зростанням промислового виробництва, застосування хімічних технологій в промисловості, сільському господарстві і побуті, розвитком атомної енергетики, особливого значення набуває раціональне профілактичне харчування, що продукує нові можливості для застосування пектинів та його похідних: у виробництві консервів і кондитерських виробів, хлібобулочних виробів, безалкогольних напоїв та у галузі виноробства [66] .

У харчовій промисловості використовують основну властивість пектину – желеутворювальну здатність. Пектин широко використовується у виробництві кондитерських виробів групи пастило-мармеладу (зефір, желейний мармелад тощо) та цукерок (желе і фруктово-желейних), які користуються попитом у населення. На відміну від інших желеутворювачів, пектинові речовини утворюють желе у водних розчинах лише в присутності цукру й кислоти. Кількість цукру, необхідна для утворення желе, варіюється залежно від кількості та фізико-хімічних властивостей пектину. Для загустіння важливо не лише кількість доданої кислоти, а й її властивості, зумовлені різною концентрацією іонів водню. Тверде желе продукується в

присутності слабких кислот, наприклад, винної, за рН у межах 3,0–3,2. Вміст сухої речовини має значний вплив на студнеутворювальні властивості. Чим вищий вміст сухої речовини, тим вищі температура драглеутворення та міцність кінцевого продукту. Вміст і склад також мають бути оптимальними.

За результатами наукової роботи [67] встановлено, що важливим технологічним аспектом процесу драглеутворення є дозування буферної солі та кислоти. За допомогою буферної системи величина рН регулюється і тим самим впливає на інверсію цукру в процесі приготування [68]. У плодоконсервній промисловості пектин використовується під час виробництва желейних виробів: желе, конфетюр, джемів, повидла, а також для виробництва інших продуктів на пектиновій основі для лікувально-профілактичних цілей (пюре, кисіль, соки, напої, овочеві консерви тощо).

Формування загущення та необхідних структурно-механічних властивостей виробів на основі пектину визначається комплексом рецептурних і технологічних чинників. Вирішальне значення має тип пектину (високо- або низькоетерифікований), що зумовлює механізм гелеутворення.

Класичний яблучний пектин, крім виражених сорбційних властивостей, має високу молекулярну масу і ступінь етерифікації, підвищену температуру плавлення, що дозволяє точно контролювати температуру та час драглеутворення. Фруктово-желейні начинки на яблучному пектині ідеально підходять для хлібобулочних виробів і здатні витримувати температуру близько 220 °С протягом 15–20 хв., Вони термостійкі, не википають і не деформуються при випічці [69].

Класичний цитрусовий пектин, на відміну від яблучного, використовується здебільшого у виробництві молочних продуктів (Biel-Nielsen et al., 2022), наприклад, для стабілізації кисломолочних напоїв, сиру, рідкого йогурту, а також під час виробництва фруктових соків і напоїв з м'якоттю [70]. Відносно низька молекулярна маса і в'язкість цитрусових пектинів, а також їхня нейтральність за кольором і смаком дозволяють використовувати їх для промислового виробництва стабілізованих молочних

продуктів. При додаванні цитрусового пектину до фруктових соків в'язкість продукту істотно не збільшується, а його харчова цінність підвищується.

В роботі [71] науково обґрунтовано використання класичних яблучних і цитрусових пектинів у виробництві різних продуктів. Досліджувалися різні сорти пектинів із високим і середнім ступенем етерифікації: яблучні пектини зі ступенем етерифікації 71,3 і 60,9% та цитрусові – зі ступенем етерифікації 70,0 і 60,1% відповідно. Всі зразки були стандартизовані з точки зору студнеутворювальної здатності за спеціально розробленою методологією USA-SAG. Яблучні та цитрусові пектини з однаковим індексом стандартизації мають різні властивості в утворених гелях. У дослідженнях було показано, що гелі з яблучного пектину мають вищу міцність, тобто для отримання продукту з такою ж міцністю на злам потрібно менше яблучного пектину [71].

У роботі Huang et al., 2021, було досліджено вплив властивостей виробів із пектином на зміну внутрішньої міцності гелю та встановлено, що за характерного для більшості кондитерських виробів рН 2,9–3,1 межа міцності гелю з яблучного пектину значно вища, ніж із цитрусового [72].

Sganzerla, W., Rosa, G., Ferreira, A. *et al.* (2020) досліджували вплив рН гелю на драглеутворювальну здатність під час стандартизації яблучних і цитрусових пектинів за методом USA-SAG. При рН 2,0–2,3 (за стандартним методом) стандартна або драглеутворювальна здатність яблучного пектину вища [73].

Для підвищення якості хлібобулочних виробів як в Україні, так і за кордоном використовуються різні наповнювачі, які впливають на компоненти пшеничного тіста та забезпечують виробництво високоякісної продукції. Поверхнево-активні речовини все частіше використовуються як наповнювачі, що дозволяють інтенсифікувати процес виробництва хліба, поліпшити якість хлібобулочних виробів і зберегти їхню свіжість [74 – 76].

У наш час пектин і його похідні все частіше використовуються у випічці. У технології випічки важливі такі властивості пектинових речовин, як набухання, в'язкість, здатність утворювати гелі, регулювати

кристалоутворення, підвищувати водопоглинальну здатність та емульгуючі властивості. Досліджено можливість використання різних видів пектинів у приготуванні хліба – яблучного, цитрусового та бурякового. Встановлено, що введення пектинів в тісто впливає на біологічні, колоїдні та мікробіологічні процеси приготування їжі. При додаванні в тісто пектину підвищується його початкова кислотність, а рН знижується. Процес бродіння в тісті відбувається активніше. Активізація процесу бродіння пов'язана з введенням цукрів разом з пектином. При додаванні пектину в тісто спостерігається зміцнення клейковини. Найбільш помітний вплив на зміцнення структурних і механічних властивостей тісту надають буряковий пектин, потім яблучний і цитрусовий. Введення пектину в хлібобулочні вироби не лише покращує якість готових виробів, а й наділяє їх лікувальними властивостями. Для виробництва дієтичного пшеничного хліба, призначеного для зв'язування і виведення важких металів з організму, доцільно використовувати пектинові продукти – фруктові та овочеві порошки, пектинові екстракти і концентрати [77, 78].

Таким чином, використання пектину та інших пектиновмісних продуктів у випічці дозволяє не лише поліпшити якість готової продукції, а й розширити асортимент продуктів харчування лікувально-профілактичного призначення.

Стійкою тенденцією у виробництві безалкогольної продукції є зростання виробництва напоїв спеціального призначення, до складу яких входять напої з додаванням біологічно активних компонентів, що надають лікувальну та профілактичну дію на організм людини. В асортименті безалкогольної продукції лікувально-профілактичної дії все більше значення приділяється напоям, збагаченим пектиновими речовинами [79, 80]. Обмежений асортимент лікувально-профілактичних пектиновмісних напоїв, що випускаються в даний час, пояснюється гострою нестачею пектину в харчовій промисловості, про яку вже говорилося вище. Розширення виробництва безалкогольних напоїв, збагачених пектиновими речовинами, можна вирішити шляхом освоєння виробництва пектинового екстракту. Наприклад, екстракт яблучного пектину, вироблений промисловістю, містить не менше 0,5% пектину, а також

легкозасвоювані цукру (глюкоза, фруктоза), білки, органічні кислоти, комплекс макро- і мікроелементів [81– 83].

Вологоутримуючі, комплексоутворювальні та емульгувальні властивості пектинових речовин зумовлюють їх застосування у виробництві молочних, м'ясних і рибних продуктів масового асортименту та лікувально-профілактичного призначення.

Як стабілізатори пектинові речовини використовуються у виробництві йогурту, майонезу, маргарину та вершкового масла. Пектинові речовини також використовуються у виробництві молочних продуктів з метою стабілізації та підвищення їхньої біологічної цінності. Використання молочної сировини (цільного і знежиреного молока, пахти, сироватки) в поєднанні з пектиновими концентратами дозволяє не тільки раціонально використовувати всі компоненти молока, а й отримувати біологічно повноцінні пектиновмісні молочні продукти з хорошими органолептичними показниками, що дозволяє вирішити проблему розширення асортименту продуктів на основі молока [84, 85, 86].

Ефективне блокування надходження радіонуклідів в організм призвело до використання пектинів у виробництві ковбасних виробів. Введення пектину в ковбасні вироби не лише підвищує їхню біологічну цінність, а й покращує якісні показники.

Не менш ефективним виявилось використання пектинів у виробництві рибної продукції, зокрема рибного суфле. Встановлено, що введення пектину в концентрації 0,5–0,9% не лише покращує якісні показники рибного суфле, а й підвищує його біологічну цінність, що дає змогу рекомендувати розроблений продукт для лікувально-профілактичного харчування [87, 88].

Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури показує, що на даний час накопичено різнобічний і дуже значний експериментальний матеріал про полісахариди пектину. Однак незважаючи на величезну кількість робіт, присвячених виділенню пектинових речовин з різних джерел [89], великомасштабне виробництво пектину в Україні досі не реалізовано. Це

може бути пов'язано з рядом недоліків розроблених технологічних схем - необхідністю значних енергетичних і капітальних витрат, високою вартістю кислотостійкого обладнання, низькою рентабельністю.

Таким чином, пошук нових ефективних і економічно вигідних джерел сировини для виробництва вітчизняного пектину та розвиток технології пектину як і раніше залишаються актуальними завданнями харчової та хімічної промисловості.

1.4 Теоретичні основи процесів перемішування у виробництві пектиновмісних паст

Перемішування у виробництві пектиновмісних паст є однією з ключових технологічних операцій, що визначає формування реологічних, структурно-механічних і функціонально-технологічних властивостей готового продукту [90]. На відміну від низьков'язких рідинних систем, пектиновмісні композиції належать до структурованих багатокомпонентних харчових систем з високою концентрацією гідрофільних полісахаридів, що здатні до просторового гелеутворення [91].

Ефективність процесу перемішування в даному випадку обумовлюється не лише досягненням композиційної однорідності, а й забезпеченням повноцінної гідратації пектинових речовин, рівномірного розподілу сухих компонентів, стабілізації дисперсної фази та формування прогнозованої текстури. Недостатня інтенсивність перемішування може призводити до локальної агрегації пектину, утворення грудкуватої структури та нестабільності консистенції, тоді як надмірний механічний вплив може спричинити часткову деструкцію гелевої сітки.

1.4.1 Реологічна та структурна характеристика пектиновмісних систем

Пектиновмісні пасти характеризуються неньютонівською поведінкою, наявністю граничної напруги зсуву та вираженою тиксотропією [92]. Їхня в'язкість істотно залежить від швидкості деформації, температури та

концентрації сухих речовин [93]. У процесі механічної дії відбувається часткове руйнування внутрішніх структурних зв'язків, що супроводжується зниженням ефективної в'язкості, однак після припинення навантаження система здатна до часткового відновлення структури [94].

З технологічної точки зору це означає, що режим перемішування має бути достатнім для забезпечення диспергування та гідратації, але контрольованим для збереження цільових показників консистенції.

1.4.2 Гідродинамічні особливості процесу

Для пектиновмісних паст характерним є переважання ламінарного або перехідного режиму руху, що істотно відрізняє їх від більшості рідинних харчових систем [95]. В умовах ламінарної течії інтенсивність масообміну знижується, а поле швидкостей стає нерівномірним. У результаті формуються застійні зони, що негативно впливають на однорідність продукту [96].

Таким чином, застосування традиційних підходів до інтенсифікації перемішування, що базуються на створенні турбулентності, у випадку пектиновмісних паст є обмеженим.

1.4.3 Аналіз існуючих конструкцій змішувального обладнання для високов'язких харчових систем

Технологічний процес виробництва пектиновмісних паст характеризується необхідністю формування однорідної дисперсної системи з рівномірним розподілом гідратованих пектинових речовин, клітковинних включень і рідкої фази. Реологічні властивості таких систем визначаються підвищеною структурною в'язкістю, наявністю граничного напруження зсуву та псевдопластичною поведінкою.

Аналіз промислових конструкцій змішувачів показав, що найбільш поширеними є лопатеві, шнекові, планетарні та роторно-пульсаційні апарати. Їхня робота ґрунтується переважно на механічному зсувному впливі, який забезпечує переміщення та часткове диспергування продукту.

Лопатеві та рамні змішувачі (рис. 1.1). До переваг лопатевих змішувачів слід віднести конструктивну простоту, технологічну універсальність та відносно невисоку капіталоемність. Зазначені апарати широко використовуються у харчовій промисловості та характеризуються достатньою надійністю експлуатації [97].



Рисунок 1.1. Загальний вигляд лопатевих та рамних змішувачів для високов'язких середовищ

Водночас під час роботи з високов'язкими пектиновмісними системами їхня ефективність істотно знижується. Це зумовлено формуванням зон із пониженою інтенсивністю руху, нерівномірним розподілом зсувних напружень і недостатньою глибиною структурного руйнування [98]. Зі зростанням в'язкості середовища спостерігається непропорційне збільшення енергоспоживання без відповідного підвищення однорідності продукту [99].

Шнекові та планетарні змішувачі (рис. 1.2). Перевагою шнекових систем є їхня здатність працювати з висококонцентрованими та пластичними масами, а також забезпечувати транспортування продукту в межах технологічної лінії [100]. Такі апарати ефективні з точки зору механічного переміщення густих систем.



Рисунок 1.2. Загальний вигляд шнекових та планетарних змішувачів

Разом з тим, у шнекових змішувачах переважає осьове переміщення маси над радіальним перемішуванням, що може призводити до нерівномірності структури та недостатнього диспергування компонентів [101]. Крім того, значні механічні навантаження на робочі органи супроводжуються підвищеним енергоспоживанням і потенційним локальним перегрівом продукту, що є небажаним з позицій збереження якості харчових систем.

Турбінні змішувачі (рис. 1.3). Турбінні апарати характеризуються високою інтенсивністю перемішування у малов'язких середовищах та

ефективністю процесів диспергування [102]. Вони забезпечують розвинені гідродинамічні потоки завдяки турбулентності.

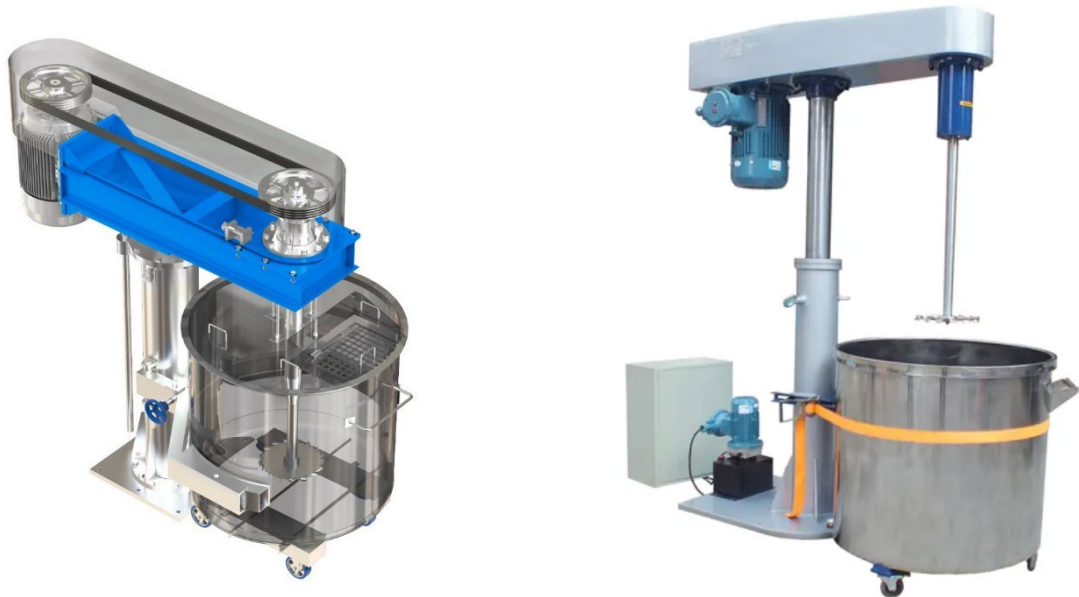


Рисунок 1.3. Загальний вигляд турбінних змішувачів

Однак у випадку пектиновмісних паст турбулентний режим практично не реалізується через високу в'язкість системи. У таких умовах турбінні змішувачі функціонують з низьким коефіцієнтом корисної дії, а зростання швидкості обертання призводить до значного підвищення енерговитрат без пропорційного покращення якості перемішування.

1.4.4 Обґрунтування доцільності вібро-гідравлічного впливу

З урахуванням реологічних особливостей пектиновмісних паст перспективним напрямом інтенсифікації процесу є поєднання гідродинамічного зсувного впливу з вібраційним навантаженням [103].

Перевагою віброгідравлічного підходу є здатність періодично порушувати внутрішню структуру системи, знижуючи її ефективну в'язкість під час обробки [104]. Це сприяє підвищенню однорідності, інтенсифікації гідратації пектину та зменшенню застійних зон без необхідності суттєвого збільшення швидкості обертання робочих органів. Такий підхід потенційно забезпечує зниження питомих енергетичних витрат і покращення структурної стабільності готового продукту.

Водночас застосування вібраційного впливу потребує обґрунтованого вибору амплітудно-частотних параметрів, оскільки надмірна інтенсивність коливань може спричинити деструкцію сформованої гелевої структури та погіршення текстурних характеристик пасти [105]. Крім того, ускладнення конструкції апарата підвищує вимоги до його надійності, точності регулювання та санітарно-гігієнічного виконання, що є принципово важливим для обладнання харчових виробництв.

Таким чином, аналіз теоретичних положень та технологічних особливостей виробництва пектиновмісних паст свідчить, що традиційні змішувальні системи не повною мірою відповідають реологічній природі досліджуваних харчових систем. Їхнє застосування супроводжується зростанням енерговитрат, нерівномірністю структури та обмеженою відтворюваністю технологічного результату.

Доцільність удосконалення віброгідравлічного змішувача обґрунтовується необхідністю забезпечення керованого формування структури, стабільності консистенції та прогнозованих споживчих властивостей пектиновмісних паст за раціонального рівня енергоспоживання.

1.5 Інтенсифікація процесу перемішування пектиновмісних паст шляхом удосконалення змішувальних систем

Інтенсифікація технологічних процесів у виробництві харчових продуктів є стратегічним напрямом сучасної харчової інженерії, що передбачає підвищення повноти використання сировини, стабілізацію структурно-механічних характеристик продукції та зниження питомих енергетичних витрат. У технології пектиновмісних паст визначальним етапом є перемішування, оскільки саме воно формує умови для гідратації пектину, рівномірного розподілу компонентів, ініціювання та стабілізації гелевої сітки.

Сучасні дослідження української наукової школи в галузі віброекстракційних процесів під керівництвом В. Зав'ялова демонструють, що інтенсивність масопереносу в гетерогенних системах визначається не лише

середньою швидкістю руху середовища, а й структурою гідродинамічних потоків, рівнем поздовжнього перемішування та характером нестационарних збурень [106–112, 119]. Встановлено закономірність поширення пульсуючих струменів, що генеруються транспортними елементами, та їхній вплив на коефіцієнт поздовжнього перемішування, який визначається відносними геометричними параметрами апарата. Отримані математичні залежності дозволяють мінімізувати небажане осьове перемішування, зберігаючи високу продуктивність.

Для пектиновмісних паст, що характеризуються в'язкопластичною поведінкою та ламінарним режимом течії, такі підходи мають особливе значення, оскільки класичні турбулентні механізми інтенсифікації практично не реалізуються. Отже, інтенсифікація повинна базуватися на створенні керованих нестационарних гідродинамічних режим

1.5.1 Механічні способи перемішування та їх ефективність у пектиновмісних середовищах

Традиційні механічні змішувачі, що функціонують на основі обертального руху робочих органів, забезпечують стабільність технологічного процесу та відтворюваність результатів у широкому спектрі харчових виробництв. Їхня конструктивна відпрацьованість, адаптованість до санітарно-гігієнічних вимог та можливість масштабування зумовлюють їхнє широке застосування у промисловості [113, 119].

Разом з тим, у випадку високов'язких пектиновмісних паст ефективність таких систем обмежується фізико-механічними властивостями середовища. Ламінарний режим течії, притаманний структурованим полісахаридним системам, характеризується недостатнім розвитком циркуляційних потоків, що призводить до формування застійних зон і нерівномірного розподілу зсувних напружень. У цих умовах збільшення частоти обертання робочих органів супроводжується непропорційним зростанням енергоспоживання, тоді як ступінь покращення однорідності продукту залишається обмеженим.

Дослідження, представлені у працях В. Зав'яловата та співавтори свідчать, що підвищення швидкості обертання призводить до локалізації енергетичних витрат у зонах максимального зсуву без формування повноцінного об'ємного перемішування [115, 116, 119]. Для пектиновмісних паст це означає, що традиційне механічне інтенсифікування шляхом збільшення швидкості не забезпечує пропорційного зростання інтенсивності масопереносу та може негативно впливати на енергоефективність процесу.

Отже, механічні системи перемішування забезпечують технологічну надійність і базову однорідність продукту, проте їхній потенціал під час роботи у в'язкопластичних полісахаридних середовищах є обмеженим через гідродинамічні особливості ламінарного режиму.

1.5.2 Вібраційне та вібро-гідродинамічне перемішування як механізм нестационарної інтенсифікації

Подальший розвиток теорії інтенсифікації пов'язаний із переходом від стаціонарних гідродинамічних полів до нестационарних режимів впливу. У роботах Zavialov et al. показано, що низькочастотні механічні коливання формують періодично змінне поле швидкостей, яке сприяє руйнуванню прикордонного шару та підвищенню інтенсивності масообміну навіть за умов низьких середніх швидкостей течії [114, 117, 118].

У подальших дослідженнях Zavialov et al. доведено нелінійний характер залежності між параметрами коливань і коефіцієнтом масовіддачі, що свідчить про складну динамічну взаємодію між механічним збуренням і структурою середовища [119]. Такий підхід створює методологічну основу для прогнозування процесів перемішування з застосуванням віброгідравлічних ефектів.

Для паст із вмістом пектину застосування вібраційного впливу має подвійний характер. З одного боку, періодичне механічне збурення здатне знижувати ефективну в'язкість у процесі обробки за рахунок тимчасового руйнування структурних зв'язків, що сприяє підвищенню однорідності та інтенсифікації гідратації пектину. З іншого боку, надмірна інтенсивність

коливань може спричинити глибоку деструкцію гелевої сітки, що негативно позначається на текстурних характеристиках і стабільності готового продукту.

У науковій статті Chornyi et al. продемонстровано, що імпульсні механічні впливи здатні спричиняти структурні трансформації матеріалу. Хоча дослідження виконано для мінеральної сировини, принцип взаємодії механічних імпульсів із внутрішньою структурою речовини має концептуальне значення для аналізу полісахаридних гелів [114, 116, 117]. Проте в наявних публікаціях відсутній системний аналіз впливу вібраційних параметрів на молекулярну організацію пектину, що створює наукову прогалину у сфері харчових технологій.

Таким чином, віброгідродинамічне перемішування слід розглядати не лише як засіб інтенсифікації масопереносу, а й як інструмент керованого впливу на структуроутворення пектиновмісних систем.

1.5.3 Енергетична ефективність та критерії оптимізації віброгідралічного перемішування

Сучасний етап розвитку харчових технологій характеризується переходом до багатофакторного моделювання та параметричної оптимізації процесів. У роботі Palamarchuk et al. (2025) продемонстровано можливість використання методу факторних площ для визначення раціональних областей функціонування обладнання з урахуванням сукупного впливу параметрів [118].

Однак у наявних дослідженнях відсутній цілісний аналіз енергетичної ефективності саме в'язкопластичних полісахаридних систем. Для пектиновмісних паст енергетична оптимізація повинна враховувати динамічну зміну реологічних характеристик у процесі перемішування, оскільки споживана потужність залежить від еволюції ефективної в'язкості та структурної міцності системи.

Критерієм раціональності режиму в цьому випадку має бути не лише мінімізація енергоспоживання, а й забезпечення стабільних текстурних показників, прогнозованої консистенції та однорідності структури. Таким

чином, енергоефективність вібро-гідравлічного перемішування повинна оцінюватися як інтегральний показник, що поєднує енергетичні та якісні

Аналіз сучасних наукових джерел засвідчує обґрунтованість застосування нестационарних механічних впливів для інтенсифікації масопереносу у різних технологічних системах. Встановлено, що перехід від стаціонарного обертального руху до комбінованого віброгідродинамічного впливу дозволяє формувати більш рівномірне поле швидкостей та зменшувати дифузійні обмеження.

Водночас відсутній комплексний підхід до дослідження віброгідравлічного перемішування саме для високов'язких пектиновмісних паст, які характеризуються вираженою реологічною нелінійністю та структурною чутливістю до механічного навантаження. Недостатньо вивченим залишається взаємозв'язок між параметрами вібраційного впливу, динамікою структурної трансформації пектину та зміною енергоспоживання в процесі обробки.

1.5.4. Обґрунтування принципової схеми віброгідравлічного змішувача інгредієнтів виробництва пектиновмісних паст

Принципова схема віброгідравлічного змішувача розроблена з урахуванням структурно-реологічних особливостей пектиновмісних паст, які характеризуються підвищеною в'язкістю та нерівномірною гідратацією пектину. Конструктивне рішення базується на поєднанні механічного перемішування, вібраційного впливу та керованої гідродинамічної циркуляції середовища [119].

Експериментальний віброгідравлічний змішувач інгредієнтів виробництва пектиновмісних паст (рис. 1.4) складається з привідного механізму, системи передачі руху, робочого контейнера з мішальним органом та вузла механічного віброзбудження.

Розрахункова модель відображає динамічну систему віброгідравлічного змішувача, у якій коливальний рух формується за рахунок обертання дебалансних мас (1), закріплених на привідному лопатевому валу (2). Під час

обертання з кутовою швидкістю ω дебаланси створюють змінні відцентрові сили, що зумовлюють виникнення вимушених коливань робочого контейнера.

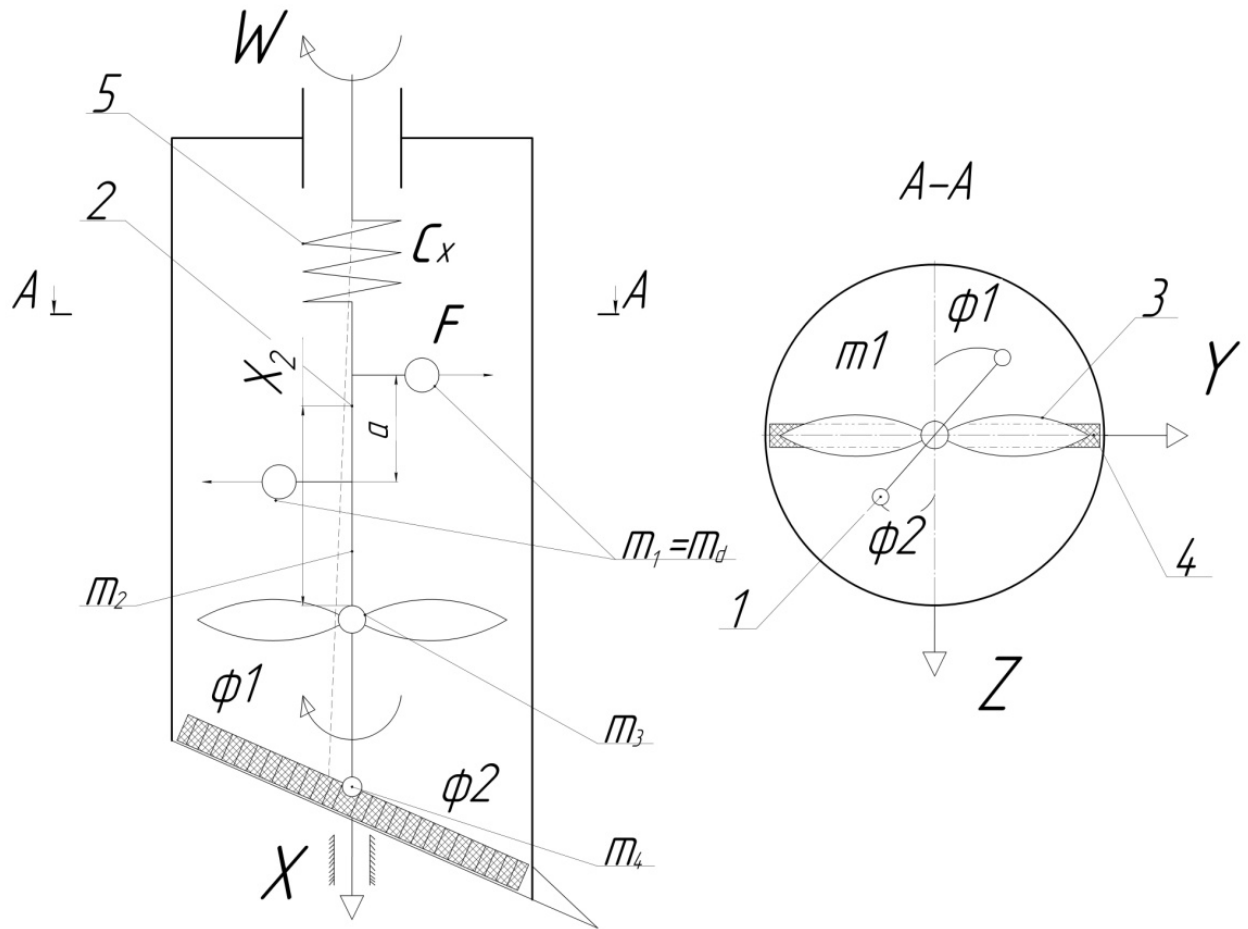


Рисунок 1.4. Вібродідралічний змішувач інгредієнтів для виробництва пектиновмісних паст

Лопатевий вал (2) передає обертальний рух лопаті (3), яка забезпечує механічне перемішування та формування циркуляційних потоків у пектиновмісній системі. Одночасно дебалансні маси (1) генерують періодичне збурення, що викликає вібраційний рух уздовж координатних осей X , Y та Z . Пружний елемент (5) з жорсткістю C_x моделює пружні властивості підвіски або опор системи та визначає амплітудно-частотні характеристики коливального процесу. Під дією збуджувальної сили F формується коливальний рух з амплітудою a , величина якої залежить від маси системи, жорсткості пружного елемента та частоти обертання дебалансу.

Чистик (4) забезпечує очищення внутрішньої поверхні робочої камери та запобігає накопиченню в'язкого продукту, що особливо важливо під час роботи з пектиновмісними пастами підвищеної адгезійної здатності.

1.6. Висновки до 1 розділу

1. Аналіз сучасних підходів до інтенсифікації процесів виробництва пектиновмісних паст показав, що найбільш раціональними є комплексні технологічні рішення, які об'єднують біотехнологічні, фізичні та хімічні методи обробки рослинної сировини з використанням вібраційної інтенсифікації процесу гідролізу, що дозволило розробити класифікацію об'єктів дослідження та перспективні напрямки досліджень.

2. Встановлено, що поєднання вібраційної обробки з кислотним гідролізом забезпечує суттєву інтенсифікацію процесу екстрагування пектинових речовин, за рахунок чого скорочуються тривалість ведення процесу у 3,5–4,0 рази та підвищуючи вихід пектину на 25–30 % порівняно з традиційними технологіями.

3. Показано, що використання методів вібраційної інтенсифікації перемішування сприяє формуванню стабільної структури пектиновмісних паст із покращеними реологічними та органолептичними характеристиками.

4. Поставлені завдання щодо забезпечення ефективного змішування інгредієнтів пектиновмісних паст були реалізовані шляхом розроблення конструктивно-технологічної схеми віброгідравлічного змішувача, що характеризується високою технологічною гнучкістю, енергоефективністю та адаптивністю до оброблення систем із різними структурно-механічними властивостями. Схема передбачає раціональне поєднання вібраційного та гідродинамічного впливів, що забезпечує мінімізацію надмірної механічної дії на пектиновмісну систему, збереження її структуроутворюючих властивостей та рівномірний розподіл рецептурних компонентів. Конструкція змішувача створює умови для поетапної реалізації процесів диспергування, гідратації.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ

З теоретичної точки зору, надзвичайно складно прогнозувати кількісний вплив різноманітних факторів на технологію виробництва пектиновмісних паст. Вирішення цієї проблеми можливе виключно шляхом експериментальних досліджень. Саме тому в цьому розділі дисертаційної роботи ми розробили комплексну програму досліджень, представили методики оцінювання основних параметрів процесу виробництва пектиновмісних паст із гарбуза та обладнання для його реалізації.

Усі теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертації були проведені в НУБіП України на базі науково-дослідних лабораторій кафедр процесів і обладнання переробки продукції агропромислового комплексу та м'ясних, рибних і морепродуктів.

Методологічну основу роботи формують сучасні фундаментальні теоретичні та експериментальні підходи, а також спеціально розроблена дослідно-експериментальна частина для визначення якісних, фізико-хімічних та структурно-механічних характеристик пектиновмісних паст. Додаткові випробування здійснювалися на базі Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу при Національному університеті біоресурсів і природокористування України та ТОВ “УкрХімАналіз”.

У процесі виконання дослідження застосовувався комплекс загальноприйнятих і спеціалізованих методів та методик з використанням вимірювальних пристроїв, а також розрахунково-експериментальні з використанням фізичного і математичного моделювання процесів синтезу пектинової пасти на підґрунті фізико-хімічної механіки матеріалів та з застосуванням обчислювальної техніки. Це забезпечило отримання достовірних та науково обґрунтованих результатів щодо технологічних властивостей пектиновмісних паст.

2.1. Програма експериментальних досліджень та оснащення для її реалізації

2.1.1. Програма експериментальних досліджень

Підготовка необхідного обладнання для проведення експериментальних досліджень: розробка конструктивної схеми віброгідравлічного змішувача інгредієнтів виробництва пектиновмісних паст; розробка дослідної моделі змішувача; формування та розробка експериментального та вимірювального оснащення для проведення досліджень.

Обґрунтування режимних параметрів розробленої установки для змішування інгредієнтів пектиновмісних паст: визначення амплітудно-частотних характеристик віброзмішувача; визначення гідродинамічних характеристик процесу змішування; визначення витрат потужності на привід машини;

Дослідження кінетики процесу змішування інгредієнтів пектиновмісних паст: оцінка параметрів кінетики змішування пектиновмісної сировини при різних режимах віброгідравлічного впливу; оцінка впливу амплітуди коливань на ефективність змішування інгредієнтів пектиновмісних паст; оцінка впливу частоти коливань на однорідність пектиновмісних паст; оцінка впливу тривалості імпульсів на якість змішування інгредієнтів пектиновмісних паст; оцінка впливу температури інгредієнтів на час змішування пектиновмісних паст; оцінка впливу в'язкості компонентів на час змішування за зміни амплітуд коливань робочої ємкості та швидкостей гідравлічного потоку.

Оцінка техніко-економічних характеристик процесу: вплив ступеня завантаження на кінематичні характеристики процесу змішування інгредієнтів пектиновмісних паст; оцінка інтенсивності низькочастотного коливального режиму віброгідравлічного змішувача; оцінка енергетичних характеристик досліджуваного процесу змішування; функціонально-вартісний аналіз розробленого віброгідравлічного змішувача для виробництва пектиновмісних паст.

2.1.2. Дослідна модель гідролізатора для виробництва пектиновмістних паст.

На кафедрі процесів і обладнання переробки продукції АПК НУБіП України було розроблено і виготовлено лабораторну установку для виробництва пектинових паст (рис. 2.1), що включає реактор з сорочкою обігріву, обладнаний перемішувачем вібраційної дії з електроприводом, системою генерації вакууму і відведення і конденсації вторинної пари. Блок керування оснащено перемикачем для контролю роботи перемішувача та регулятором РТ100 для регулювання температури ведення процесу гідролізу.



Рисунок 2.1. Лабораторна установка для виробництва пектинових паст

В таблиці 2.1 наведено габаритні розміри лабораторної установки для упарювання.

Таблиця 2.1

**Технічні характеристики експериментальної установки для
виробництва пектинових паст**

Назва вузла	Характеристика	Позначення	Розмірність	Величина
Зовнішній бак	Діаметр	D	м	0,62
	Висота	H	м	0,55
Внутрішній бак	Діаметр	D	м	0,4
Змішувальний пристрій (мотор-редуктор постійного струму типу АІРОА2 №3)	Потужність	N _{дв}	кВт	0,6
	Частота обертання ротора	n _в	Об/хв	2800
Вакуумний насос (електродвигун постійного струму типу АОЛ22-2)	Потужність	N _{дв}	кВт	1,5
	Частота обертання ротора	n _в	Об/хв	1000

Разом з цим дана лабораторна установка дозволяє створити тиск у вакуумі для зниження температури процесу гідролізу та упарювання, що в свою чергу дозволяє зберегти всі корисні властивості виготовлених пектинових паст, що забезпечує:

- відповідність цільовому призначенню;
- високу інтенсивність перетворення протопектину в пектин;
- малі витрати енергії для отримання пектинових паст;
- стійкість конструкційних матеріалів до корозії;
- доступність для огляду, чищення чи ремонту установки;
- надійність та безпечність в експлуатації;
- корозієстійкість матеріалу апарату.

Матеріал, з якого виготовлено цей апарат, має бути стійким до дії оброблюваних середовищ. Для виготовлення його було обрано марку сталі типу 12Х18Н9Т. Вона здатна забезпечувати високу корозієстійкість у кислих середовищах із рН 2,5–6,5. Крім цього дана сталь не утворює при окисленні

шкідливиз зєднань, що є важливо при виготовленні пектиновмісних паст для використання, як продуктів харчування

2.1.3. Експериментальне оснащення для оцінки силових та енергетичних характеристик процесу, що досліджується

Для комплексного оцінювання енергоспоживання розробленого обладнання та аналізу амплітудно-частотних, кінетичних і якісних характеристик процесів було проведено експериментальні випробування на дослідному зразку гідролізатора з віброгідравлічним змішувачем.

Енергетичні параметри визначалися за допомогою бездротового датчика з автономним живленням, побудованого на основі акселерометра LIS15DH від STMicroelectronics. Цей датчик відзначається вкрай низьким енергоспоживанням (2 мкА), працює в діапазоні напруги 1,71–3,6 В, підтримує налаштовувані діапазони вимірювання прискорення (± 4 g, ± 8 g, ± 16 g), має інтерфейси SPI/I2C для передавання даних, функцію самотестування та важить лише 1,5 г [120–122].

Після завершення роботи обладнання отримані амплітудно-частотні характеристики обробляються спеціалізованим програмним забезпеченням, яке візуалізує результати у вигляді графіків і цифрових матриць. Програмне забезпечення дозволяє аналізувати віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення та частоту коливань.

Для вимірювання частоти обертання приводного вала застосовували бездротовий цифровий тахометр Capelac CAP8535 (рис. 2.2).

Регулювання та зміна частоти обертання вала електродвигуна здійснювалися за допомогою автотрансформатора АОСН-х-220 (500ВА-30кВА) (рис. 2.4), який призначений для роботи в мережах змінного струму. Цей пристрій обладнано рухомим струмознімальним контактом у формі графітового ролика, що забезпечує плавне регулювання напруги від мінімальних до максимальних значень. Обмотка автотрансформатора має кілька виводів, які дозволяють отримувати різноманітні характеристики

вихідного струму. Пристрій також виконує функцію стабілізатора, захищаючи установку від перепадів напруги в мережі.



Рис. 2.2. Цифровий тахометр Capelec
CAP8535



Рис. 2.3. Автотрансформатор
АОСН-х-220 (500ВА-30кВА)

Технічні характеристики лабораторного автотрансформатора **АОСН-х-220 (500 ВА–30 кВА)** дозволяють моніторити в реальному часі та аналізувати споживану потужність і швидкість обертання електродвигуна.

Для визначення енергетичних параметрів досліджуваної машини використовувався електронний ватметр САТ-II (рис. 2.4), призначений для вимірювання споживаної потужності в мережі 220 В з максимальним струмом 16 А через стандартну побутову розетку.

За допомогою цього вимірювального приладу реєструвалися такі показники: напруга мережі, частота та сила змінного струму, споживана потужність, коефіцієнт потужності, тривалість роботи обладнання та загальна спожита електроенергія за весь період роботи пристрою в кВт/год.

2.1.4. Вимірювальне оснащення для оцінки масових характеристик досліджуваної сировини

Для дослідження параметрів гідролізу застосовувалися електронні лабораторні технічні ваги ВТА-60 (рис. 2.5), призначені для визначення маси проб у виробничих і технічних аналізах у різних галузях переробного, харчового та фармацевтичного виробництва.



Рис. 2.4. Електронний ватметр
CAT - II



Рис. 2.5. Лабораторні технічні ваги
BTA-60

Вимірювання температури досліджуваної сировини в робочій зоні здійснювалося за допомогою контролера температури та вологості «ХН-М452» (рис. 2.6); межі виміру 20–100 °С, похибка вимірювання $\pm 3\%$.

Для вимірювання тиску використовували диференціальний мікроманометр РНМ-V1 (рис. 2.7).



Рис. 2.6. Контролер температури та
вологості «ХН-М452»



Рис. 2.7. Диференціальний
мікроманометр РНМ-V1

Для оцінки процесу гідролізу пектину було використано комплекс вимірювального оснащення, що відповідає вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 "Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій".

Контроль рівня рН середовища здійснювався за допомогою рН-метра Mettler Toledo SevenCompact S220 (рис. 2.8) з діапазоном вимірювань від -2,000 до 20,000 рН та точністю $\pm 0,002$ рН.

Для підтримання стабільної температури реакційного середовища застосовувався термостат Julabo F25-ME (рис. 2.9), що забезпечує робочий діапазон температур від $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ зі стабільністю $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 2.8. рН-метр Mettler Toledo SevenCompact S220



Рис. 2.9. Термостат Julabo F25-ME

Зважування компонентів реакційної суміші проводилося на аналітичних вагах Sartorius Cubis MSA225S (рис. 2.10) з максимальною вагою 220 г і точністю зважування 0,01 мг.

Спектрофотометричні дослідження продуктів гідролізу виконувались на спектрофотометрі Shimadzu UV-2600 зі спектральним діапазоном 185–900 нм та фотометричною точністю $\pm 0,002$ Abs за 0,5 Abs.

В'язкість розчинів пектину до та після гідролізу визначалася за допомогою віскозиметра Brookfield DV3T (рис. 2.11). З діапазоном вимірювань від 1 до 6 000 000 мПа·с та точністю $\pm 1,0\%$ від повної шкали.

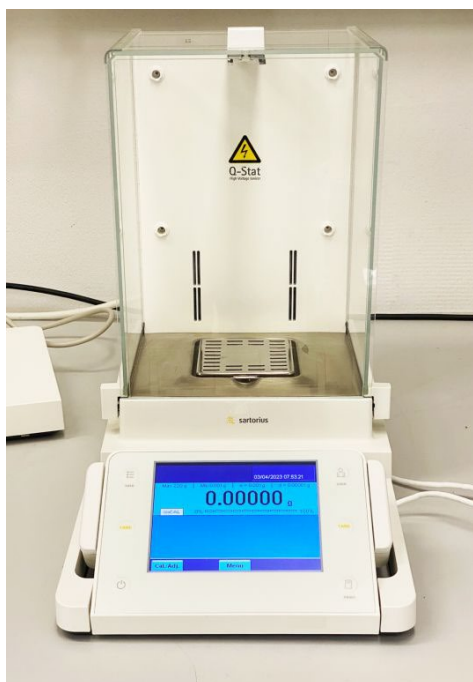


Рис. 2.10. аналітичних вагах Sartorius
Cubis MSA225S



Рис. 2.11. віскозиметра Brookfield
DV3T

Хроматографічний аналіз продуктів гідролізу проводився на системі BEPX Agilent 1260 Infinity II з діодно-матричним та рефрактометричним детекторами.

Для дослідження структурних змін у молекулах пектину використовувався ІЧ-спектрометр з Фур'є-перетворенням Thermo Scientific Nicolet iS50 зі спектральним діапазоном $7800\text{--}350\text{ см}^{-1}$ та роздільною здатністю до $0,09\text{ см}^{-1}$.

Для перемішування реакційної суміші використовувалася магнітна мішалка з підігрівом IKA C-MAG HS 7 (рис. 2.12). З діапазоном швидкостей $100\text{--}1500\text{ об/хв}$.

Інтенсифікація процесу гідролізу забезпечувалася застосуванням ультразвукової бані Bandelin Sonorex RK 1028 H (рис. 2.13). З частотою ультразвуку 35 кГц та потужністю 480 Вт .

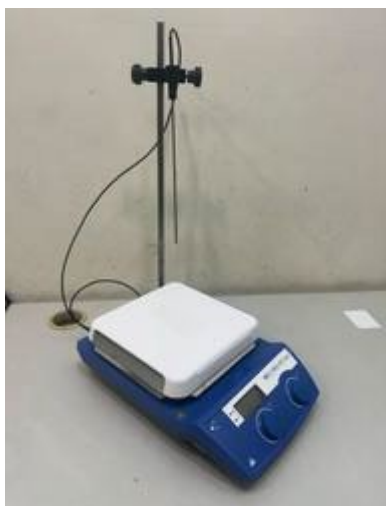


Рис. 2.12. Магнітна мішалка з підігрівом IKA C-MAG HS 7



Рис. 2.13. Ультразвукова баня Bandelin Sonorex RK 1028 H

Для автоматичного підтримання заданого рівня рН під час гідролізу використовувався рН-стат Metrohm 907 Titrando з точністю титрування $\pm 0,02$ мл. Концентрування зразків після гідролізу проводилося на ротаційному випарювачі Heidolph Hei-VAP Advantage (рис. 2.14) з діапазоном швидкостей 25–280 об/хв і температурним діапазоном 20–210 °С. Фільтрація зразків здійснювалася за допомогою системи Millipore Steriflip (рис. 2.15). З розміром пор мембрани 0,22 мкм.



Рис. 2.12. Ротаційний випарювач Heidolph Hei-VAP Advantage



Рис. 2.13. Фільтраційна система Millipore Steriflip

Усе зазначене вимірювальне оснащення пройшло державну метрологічну повірку відповідно до ДСТУ 3215:2015 "Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення".

2.2. Методика вимірювання параметрів вібрації

Для вимірювання параметрів вібрації використовувалось наступне обладнання:

Акселерометр моделі PCB Piezotronics 352C33 з діапазоном вимірювання ± 50 g, частотним діапазоном від 0,5 до 10000 Гц і чутливістю 100 мВ/g.

Аналізатор спектру Brüel & Kjær Type 3560-B-020 з 16 каналами, динамічним діапазоном 160 дБ та діапазоном частот від 0 до 25,6 кГц.

Вимірювальна система збору даних National Instruments PXI-4472B з 8 синхронними каналами, 24-бітним АЦП і динамічним діапазоном 114 дБ.

Програмне забезпечення для обробки даних LabVIEW з модулем Sound and Vibration Toolkit.

Калібратор вібрації PCB Piezotronics 394C06 для перевірки точності вимірювань.

Вимірювання параметрів вібрації проводилось за наступною методикою:

1. Підготовчий етап: калібрування вимірювальної системи за допомогою вібраційного калібратора, визначення точок встановлення акселерометрів на об'єкті дослідження, встановлення акселерометрів у визначених точках вимірювання з використанням різьбового кріплення.

2. Основний етап вимірювань: запис вібраційних сигналів у режимі холостого ходу для визначення фонових рівнів вібрації, проведення вимірювань вібрації при роботі обладнання в різних режимах експлуатації (під навантаженням, без навантаження, на різних швидкостях), реєстрація часових реалізацій вібраційних сигналів.

3. Обробка даних: фільтрація сигналів для усунення шуму та артефактів, спектральний аналіз вібраційних сигналів із використанням швидкого перетворення Фур'є (FFT), розрахунок середньоквадратичних значень (RMS) віброшвидкості та віброприскорення.

Під час проведення вібраційних вимірювань враховувалися такі джерела похибок: інструментальні, методичні та розрахункові.

Для обробки та інтерпретації результатів вимірювань вібрації застосовувалися такі методи: *аналіз часової реалізації вібраційного сигналу, частотний аналіз, спектральний аналіз огинаючої вібраційного сигналу, аналіз тренду параметрів вібрації.*

Інтерпретація результатів вимірювань проводилася з урахуванням нормативних значень, встановлених ISO 20816-1:2016 для відповідного класу обладнання.

Розроблена методика дозволяє отримати комплексну оцінку вібраційних характеристик досліджуваного об'єкта та визначити раціональні параметри процесу гідролізу.

2.3. Методи дослідження хімічного складу пектинової пасти

Для оцінки якості виробленої пектиновмісної пасти були використані такі методи контролю якості та безпеки, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Методи дослідження пектиновмісної пасти з гарбуза

Показник	Метод дослідження
Вологість	Гравіметрія
Вміст нітратів	Фотоколometрія
Вміст токсичних елементів	Атомно-абсорпційний аналіз
Вміст мікотоксину Патуліну	Високоєфективна рідинна хроматографія
Вміст радіонуклідів	Гамма-спектофотометричний метод
Вміст залишків пестицидів	Газорідинна хроматографія
Токсичність	Відповідно до ДСТУ 3570-97 [128]

Вміст води і сухих речовин

Методика заснована на визначенні масової частки води шляхом висушування дослідного зразка за температури $t = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [123]. Наважку пектиновмісної пасти масою 100 – 150 мг зважували в попередньо висушених і закритих бюксах з точністю до 0,1 мг на аналітичних вагах, потім відкритий бюкс з наважкою поміщали в прогріту сушильну шафу і проводили висушування при температурі $t = 105 (\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C})$ протягом 1,5 год. Після висушування бюкс закривали кришкою, поміщали в ексікатор на 30 хв. для охолодження та проводили зважування. Масову частку води (W) в відсотках рахували за формулою (2.1):

$$W = ((m - m_1) / (m - m_2)) \cdot 100 \quad (2.1)$$

де: m – маса бюкси з наважкою до висушування, г;

m_1 – маса бюкси з наважкою після висушування, г;

m^2 – маса пустого бюкса, г.

За результат дослідження приймали середнє значення між двома паралелями, максимально допустиме відхилення – 0,2, відповідно до методики, зазначеної в (ДСТУ ISO 2173:2017) [123].

Для визначення вмісту золи проводять початкове зважування, а потім – після спалювання дослідної проби в муфельній печі.

Зольність визначали за наступною формулою [124]:

$$P = (D_1 / D) \cdot 100 \quad (2.2)$$

де, P – зольність, %;

D_1 – маса золи після спалювання, г;

D – маса дослідної проби до спалювання, г;

Визначення кількості нерозчинних речовин проводиться за формулою[1]:

$$H = (a / p) \cdot 100 \quad (2.3)$$

де, H – кількість нерозчинних речовин, %;

a – кількість осаду, г;

p – кількість взятої дослідної проби пектинової пасти, г.

Методика визначення вмісту нітратів в пектинових пастах.

Вміст нітратів в пектинових пастах досліджували відповідно до методики, наведеної в ДСТУ EN 12014-5:2007, адаптованої для експериментальних зразків пектинових паст [125].

Метод визначення вмісту нітратів в пектинових пастах заснований на визначенні інтенсивності забарвлення розчину діазобарвника (рожево-малинове), яке утворюється при взаємодії нітрату з сульфаніловою кислотою і α -нафталаміном в оцтовому середовищі за реакцією Грисса. Попередньо проводили відновлення нітрату до нітриту металічним цинком за рахунок реакцій, що протікають під час визначення нітратів.

Для визначення та складання каліброваної кривої готували стандартний розчин нітрату натрію з вмістом нітрат-іону 10 мкг/мл наступним чином: 137 мг нітрату натрію попередньо перекристалізованого і висушеного до постійної маси за температури 105°C, розчиняли дистильованою водою в мірній колбі об'ємом 1000 мл. Відбирали 25 мл розчину і розводили дистильованою водою до 250 мл. У дев'ять мірних колб об'ємом 50 мл відбирали послідовно 1,5; 3; 4,5; 6; 7,5; 9; 10,5; 12 і 13,5 мл приготованого розчину нітрату натрію.

В кожену колбу додавали 1 мл концентрованого розчину аміаку, 0,5 г цинкового порошку, перемішували і додавали 1 мл розчину ацетату кадмію з концентрацією 4,5 г/л. В десяту мірну колбу об'ємом 50 мл додавали в тій же послідовності всі реактиви за винятком розчину нітрату натрію.

Приготований в ній розчин являє собою холосту пробу, тобто контроль якості реактиву.

Вміст всіх колб через 5 хв доводили до мітки дистильованою водою, перемішували і фільтрували, відбирали 10 мл фільтрату, який переносили в колбу об'ємом 100 мл, додавали 0,2 г реактиву Грисса, який складається з еквімолярної суміші сульфанілової кислоти і α -нафталіну та 20 мл 20% розчину оцтової кислоти. Через 30 хв визначали інтенсивність забарвлення на фотокалориметрі КФК-2 (зелений світлофільтр, $\lambda = 540$ нм) в кюветці з розчином та з відстанню між робочими гранями 2 см.

$$X_1 = 1/15 \cdot V_{cm} \quad (2.6)$$

де: $V_{ст}$ – об'єм стандартного розчину нітрату натрію, мл;

1/15 – коефіцієнт, який враховує ступінь розведення зразка.

Підготовку зразка пектинової пасти для визначення нітратів проводили у такому порядку: 25 мг пектинової пасти вміщали в колбу на 100 мл і заливали 40 мл 45% розчину етилового спирту. Далі проводили струшування 30 хв і фільтрували через паперовий фільтр. Потім відбирали 20 мл фільтрату в мірну колбу на 50 мл і додавали 10 мл розчину сульфату цинку з концентрацією 4,5 г/л. Колбу витримували в кип'ячій водяній бані протягом 7 хв, потім швидко охолоджували і доводили розчин дистильованою водою до мітки і фільтрували. Поміщали 40 мл чистого фільтрату в мірну колбу об'ємом 50 мл, додавали 1 мл концентрованого розчину ацетату кадмію з концентрацією 4,5 г/л. Через 5 хв доводили об'єм до мітки дистильованою водою, перемішували і фільтрували. Потім до 10 мл фільтрату додавали 0,2 г реактиву Грисса, 20 мл 20% розчину оцтової кислоти і через 30 хв проводили колометрацію аналогічно до процедури для побудови калібровки, яка була зазначена вище. Масову частку нітратів в розрахунку на нітрат-іони в відсотках рахували за формулою (2.7) відповідно до ДСТУ EN 12014-5:2007

$$X_2 = C \cdot 30 \cdot 0,025 / m \quad (2.7)$$

де, C – концентрація нітрат-іонів в 1 мл досліджуваного розчину, яка знайдена за калібровочною кривою, мкг/мл; 30 – об'єм колометруючої проби, мл; 0,025 – коефіцієнт, який враховує розведення, перерахунок в грами чи у відсотки; m – маса наважки пектинової пасти, г.

2.4. Обробка результатів досліджень

Під час аналізу результатів експериментальних досліджень постає необхідність статистичної перевірки їх достовірності, а також оцінювання адекватності теоретичних положень і встановлених аналітичних залежностей. Достовірність експериментальних результатів характеризується вірогідною

ймовірністю P_n (рівнем надійності), яка визначає ймовірність того, що істинне значення досліджуваної величини знаходиться в межах заданого вірогідного інтервал:

$$m = \pm t_{\beta} \sigma_m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{N - 1}} \quad (2.8)$$

де t_{β} – гарантійний коефіцієнт Ст'юдента для довірчої вірогідності [126]; σ_m – середньоквадратичне відхилення (дисперсія) вимірів:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{N - 1}} \quad (2.9)$$

де, N – кількість вимірів; x_i – значення вимірюваної величини; $\bar{x}$ – середньоарифметичне значення вимірюваної величини:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.10)$$

Вірогідне значення вимірюваної величини, необхідне для визначення обсягу вибірки за умови розподілу похибок, близького до нормального [127], встановлюють на основі заданої довірчої ймовірності та статистичних характеристик вибірки і визначають за такою залежністю:

$$N \geq \frac{1 + P_H + 2n_{cm}}{1 - P_H} \quad (2.11)$$

де n_{cm} – число вимірів із грубими похибками, які відкидали.

Відповідно до рекомендацій [127] вірогідну ймовірність P_n прийнято в межах інтервалу 0,8...0,9. За умови рівності середньоквадратичного відхилення нулю ($\sigma = 0$) маємо:

$$N \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} \quad (2.12)$$

У подальшому за результатами N виконаних вимірювань визначається вірогідна ймовірність P_n за умови, що похибка оцінки середнього значення не перевищує меж заданого вірогідного інтервалу m . З цією метою обчислюють вибіркове середньоарифметичне значення середньоквадратичного відхилення σ_0 та середньоквадратичне відхилення середнього значення σ_m :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_m}{N} \quad (2.13)$$

З формули 2.6 визначаємо коефіцієнт Ст'юдента:

$$\alpha_{cm} = \frac{\mu}{\sigma_0} \quad (2.14)$$

Після цього за відомими α_{ct} та N визначаємо розрахункову вірогідну ймовірність P_{nl} . Якщо P_{nl} виявляється нижчою за необхідну, то визначаємо мінімальну кількість вимірів:

$$N_{\min} = \frac{k_B^2 t_\beta^2}{\Delta^2} \quad (2.15)$$

де Δ - точність вимірів; k_B - коефіцієнт варіацій, рівний:

$$k_B = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} \quad (2.16)$$

Перевірку адекватності теоретичних залежностей здійснюють шляхом аналізу відхилень значень шуканого параметра, обчислених за теоретичними моделями, від відповідних експериментальних даних шуканого параметра $\hat{y}$ від експериментально встановлених та усереднених $\bar{y}$ за числом повторень дослідів m .

Оцінку відхилень проводимо із використанням теорії Фішера, для чого розраховуємо екстремальне значення критерія Фішера f_e і порівнюємо із теоретичним f_m , яке приймається за необхідний рівня значущості. Якщо $f_e \leq f_m$, то теоретична залежність адекватна [126].

Значення критерія Фішера для експериментальних вимірів визначаємо за залежністю:

l_e – дисперсія адекватності, яка рівна (2.17).

$$S_a = \frac{m}{n-1} \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2 \quad (2.18)$$

де S_b – дисперсія відтворюваності:

$$S_b = \frac{l}{N(m-l)} \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \hat{y}) \quad (2.19)$$

де m – кількість паралельних дослідів; l – кількість значущих коефіцієнтів теоретичної залежності.

Теоретичне значення критерія Фішера приймаємо за таблицею при відповідних ступенях вільності f_1 і f_2 та рівні значущості q (зазвичай $q=0,05$), тоді [127]:

$$f_1 = N - 1 \quad (2.20)$$

$$f_2 = N(m - 1) \quad (2.21)$$

У разі встановлення неадекватності результатів теоретичних розрахунків порівняно з експериментальними даними виникає необхідність переходу до більш складних математичних моделей із переглядом і уточненням раніше прийнятих теоретичних припущень.

Під час оброблення експериментальних даних також застосовували методи графічного подання результатів, які забезпечують наочну інтерпретацію експерименту, сприяють глибшому розумінню фізичної сутності досліджуваного процесу, дають змогу встановити загальний характер функціональних залежностей між змінними величинами та виявити наявність екстремумів функції. При цьому експериментальні точки на графіках апроксимували плавними кривими, що проходять максимально близько до екстремальних і характерних точок, оскільки більшість досліджуваних функцій мають безперервний і гладкий характер.

2.5. Висновки до 2 розділу.

1. Відповідно до розробленої програми та методик досліджень, що визначають структуру й алгоритм проведення теоретичних і експериментальних робі, сформовано вимірювальну технічну базу та удосконалено лабораторну установку для виробництва пектинових паст. Модернізація лабораторної установки забезпечує можливість визначення оптимальних технологічних і конструктивних параметрів досліджуваного обладнання, а також обґрунтування раціональних робочих режимів досліджуваних процесів.

2. Розроблено методики визначення основних технологічних параметрів

досліджуваної системи, зокрема параметрів вібраційного впливу, а також основних технологічних параметрів процесу гідролізу.

3. Розроблена схема теоретичних і експериментальних досліджень, яка базується на поетапному виконанні експериментальних досліджень та орієнтована на подальше впровадження отриманих результатів у виробництво.

4. Підібрані та адаптовані новітні методики дослідження якісних показників експериментальних зразків пектинових паст.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕКТИНОВИХ ПАСТ З ЗАСТОСУВАННЯМ ВІБРО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІШУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Принципова схема віброгідравлічного змішувача (рис. 3.1) реалізує поєднання механічного перемішування та керованого вібродинамічного впливу на пектиновмісну систему.

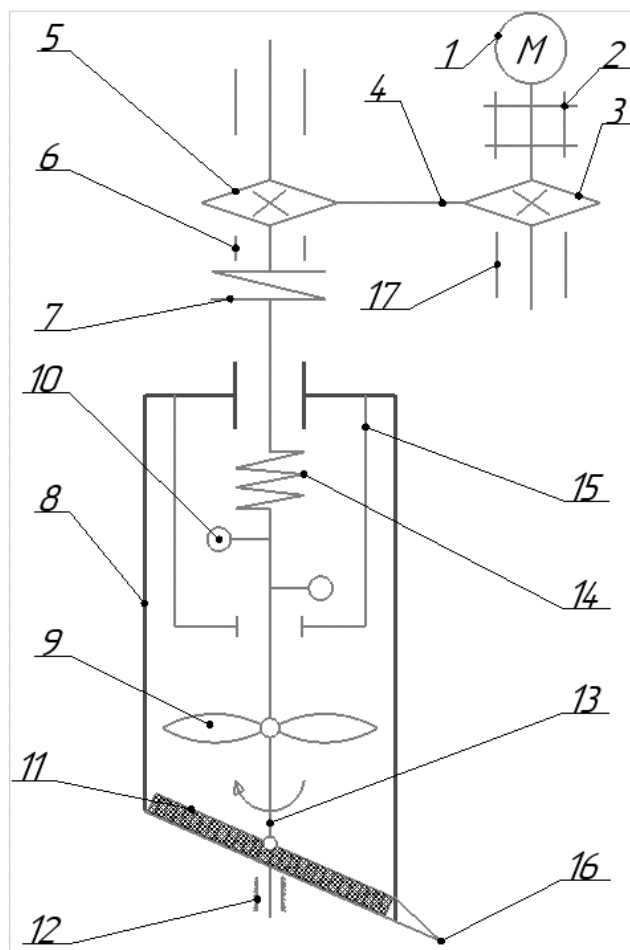


Рисунок 3.1 Кінематична схема машини: 1 – двигун; 2 – жорстка муфта; 3 – ведуча зірочка; 4 – ланцюгова передача; 5- ведена зірочка; 6 – опорні вузли ланцюгової передачі; 7 – пружна муфта; 8 – робочий контейнер; 9 – гвинтова лопать; 10 – незрівноважений елемент або дебаланс; 11 – чистик; 12 – опорні вузли робочого контейнера; 13 – лопатевий вал; 14 – пружний елемент; 15 – корпус механічного віброзбуджувача; 16 – патрубок для вивантаження продукції; 17,18 – підшипникові вузли.

Джерелом приводу є електродвигун (1), від якого через жорстку муфту (2) обертальний момент передається на ведучу зірочку (3). Далі через ланцюгову передачу (4) обертання передається на ведену зірочку (5), при цьому стабільність роботи забезпечують опорні вузли ланцюгової передачі (6).

Через пружну муфту (7) крутний момент передається на лопатевий вал (13), встановлений у підшипникових вузлах (17, 18). Пружна муфта компенсує динамічні навантаження, що виникають у процесі віброзбудження.

Лопатевий вал (13) розміщений у робочому контейнері (8) та оснащений гвинтовою лопаттю (9), яка формує осьову циркуляцію пастоподібної маси. Одночасно на валу встановлено незрівноважений елемент (дебаланс) (10), розташований у корпусі механічного віброзбуджувача (15). Під час обертання дебалансу (10) виникають змінні відцентрові сили, які формують коливання системи. Через пружний елемент (14) ці коливання передаються на робочий контейнер (8), створюючи віброгідравлічний режим роботи.

У процесі функціонування апарата гвинтова лопать (9) забезпечує механічне макроперемішування, транспортування компонентів та руйнування агломератів сухого пектину. Вібраційний вплив, сформований дебалансом (10), сприяє періодичному структурному розрідженню системи, зменшенню ефективної в'язкості та інтенсифікації масопереносу.

Чистик (11) забезпечує очищення внутрішніх поверхонь робочого контейнера (8) від налипання в'язкої маси, що є важливим для пектиновмісних паст. Опорні вузли робочого контейнера (12) сприймають динамічні навантаження та забезпечують стабільність конструкції. Після завершення процесу змішування готовий продукт вивантажується через патрубок (16).

Таким чином, узгоджена робота привідного механізму (1–7), мішального вузла (9, 13) та віброзбуджувача (10, 14, 15) забезпечує формування комбінованого обертально-коливального режиму, що інтенсифікує процес гідратації пектину, підвищує однорідність пасти та стабілізує її структурно-механічні властивості при зниженні енерговитрат.

3.1. Гідродинамічні параметри процесу

Опір, що створює рідина при обертанні у ній робочих органів мішалки, без врахування сил тертя:

$$P_r = K_o \cdot K_{oo} \cdot S_o (\nu_a \pm \nu_p) \quad (3.1)$$

K_o – коефіцієнт обґрунтування робочого органу; S_o – площа проекції робочого органу на площину, що перпендикулярна до вектора швидкості лопаті, м²; ν_a – швидкість лопаті; ν_p – швидкість руху рідини;

$$K_o = 0,5 \cdot K_I \cdot S^2$$

S – густина рідини, кг/м³; K_I – експериментальний коефіцієнт.

Для досліджуваної рідини у процесі гідролізу можна прийняти, що $K_o = 200 \sim 250$ [129, 130, 131]. Для більш точних розрахунків приймаємо, що експериментальний коефіцієнт для гвинтового робочого органу $K_I = 20,6$ [132].

Під час використання гвинтових мішалок продукція переміщується безперервно з різною інтенсивністю по поперечному перерізу машини. Робоча поверхня гвинта має постійний крок та змінний кут нахилу. Складна форма лопатей гвинтової мішалки забезпечує комбінований рух шарів рідини не тільки перпендикулярно до осі обертання, але й вздовж напрямку її обертання.

Поверхня рідини S_o , яка обтікається гвинтом складає:

$$S_o = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 (1 - k_s^2) \quad (3.2)$$

k_s – коефіцієнт, який враховує зменшення площі, що описується гвинтом, можна розрахувати як $k_s = 0,25D$, D – зовнішній діаметр гвинта.

Тиск, що створюється гвинтом, становить:

$$P_{zg} = P_n / \eta_z \quad (3.3)$$

η_z – гідравлічний ккд, $\eta_z = 0,8 \dots 0,9$; P_n – швидкісний напір, що можна визначити за формулою:

$$P_n = 0,5 \cdot S \cdot g(v_o^2 - v^2) \quad (3.4)$$

v_o – швидкість руху рідини по осі гвинта, м/с; $v_o = \Pi_c / S_o$; v – абсолютна швидкість руху рідини у резервуарі, м/с.

$$v = \frac{4\Pi_c}{\pi \cdot D_p^2}$$

D_p – діаметр резервуара, м; Π_c – секундна продуктивність мішалки, м³/с, що за відсутності обертання матеріалу та наявності напрямних можна визначити як:

$$\Pi_c = \varphi \cdot \omega \cdot r_a^3 \quad (3.5)$$

φ – коефіцієнт заповнення робочої ємності продукцією; r_a – радіус зовнішнього кола гвинта, м; ω – кутова швидкість гвинта, рад/с.

$$\omega = \pi \cdot \frac{\eta}{30} \cdot 60 = \pi \cdot \frac{\eta}{1800}$$

η – частота обертання валу лопатевої мішалки, що визначається як [133].

$$\eta = k_1 \cdot \frac{D^{k_2}}{d^{k_3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_T - \rho_P}{\rho_C} \right)} \cdot \rho_T, \text{об/с} \quad (3.6)$$

ρ_m, ρ_p, ρ_c – відповідно густина частинок осаду, рідини та їх суміші, кг/м³; d_m – діаметр твердих часток осаду, м; k_2, k_3 – емпіричні коефіцієнти для гвинтової мішалки можна прийняти [4], $k_2 = 1, k_3 = 2$.

$$S_C = S_T \cdot k_v + S_p (1 - k_v) \quad (3.7)$$

k_v – об'ємна частка твердої фази

Потужність, що витрачається на привод мішалки складає

$$N = \Pi_c \cdot \frac{P_r}{\eta_m} \cdot 10^3, \text{кВт}$$

η_m – механічний ккд приводу мішалки, можна прийняти $\eta_m = 0,7 \dots 0,8$.

Для досліджуваного приводу

$$\eta_m = \eta_{жм} \cdot \eta_l \cdot \eta_{зм} \cdot \eta_n^3 \quad (3.8)$$

$\eta_{жм}$ – ккд жорсткої муфти; $\eta_{зм}$ – ккд пружної муфти; η_l – ккд ланцюгової передачі; η_n – ккд підшипникових вузлів.

3.2. Кінематичний та силовий аналіз досліджуваної системи

3.2.1. Розробка розрахункової схеми

Система на рис. 3.6 має 4 основні маси та 3 степені вільності. Основні маси системи складають: маса незрівноважених елементів або дебалансів m_1 ; маса приводного валу та підшипникових вузлів, на які він опирається m_2 ; маса пропелерних або гвинтових лопатей та вузла кріплення m_3 ; маса чистика з вузлом кріплення та щітковими або гумовими елементами для очищення днища контейнера m_4 .

До основних ступенів вільності системи можна віднести: кут повороту дебалансів φ_1 ; лінійне зміщення приводного валу X_2 ; кутове зміщення приводного валу ψ_2 .

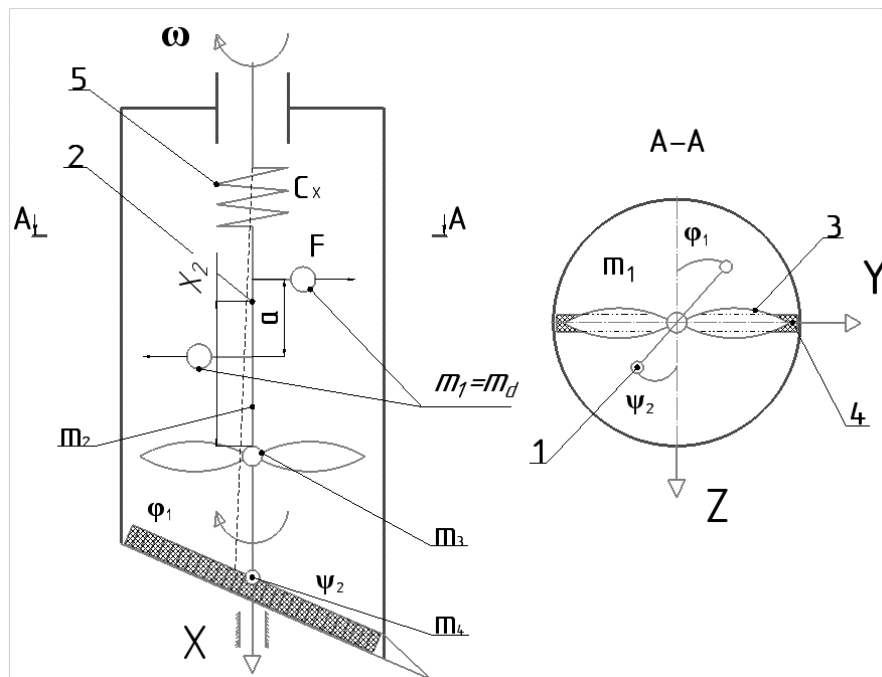


Рисунок 3.6. Розрахункова схема вібровідцентрової мішалки: 1 – дебаланси або інерційні елементи, 2 – приводний лопатевий вал, 3 – лопать, 4 – чистик, 5 – пружний елемент із жорсткістю C_x .

При складанні диференціальних рівнянь руху виконавчих органів системи доцільно використати метод Лагранжа, представляючи шукані вирази у вигляді рівнянь Лагранжа II роду, а саме

$$\left[\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) \right] - \frac{\partial T}{\partial q} = Q_q \quad (3.10)$$

де, q – узагальнена координата; $\dot{q}$ – похідна узагальненої координати по часу; Q_q – узагальнена сила; T – кінетична енергія системи; t – час обробки.

Для досліджуваного процесу вібровідцентрового перемішування рівняння (10) можна представити у вигляді системи рівнянь (3.11)

$$\begin{cases} \left[\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} \right) \right] - \frac{\partial T}{\partial \phi_1} = Q_{\phi_1} \\ \left[\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) \right] - \frac{\partial T}{\partial x_2} = Q_{x_2} \\ \left[\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_2} \right) \right] - \frac{\partial T}{\partial \psi_2} = Q_{\psi_2} \end{cases} \quad (3.11)$$

3.2.2. Розрахунок кінематичної енергії системи

Так як досліджувана система є чотирьох масною то загальна кінетична енергія складає

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (3.12)$$

Кінетична енергія маси m_1 становить

$$T_1 = 0.5 \cdot (m_1 \cdot v_1^2 + I_1 \cdot \omega^2) \quad (3.13)$$

I_1 – момент інерції дебалансів; ω – кутова швидкість обертання лопатевого валу.

Враховуючи, що дебаланси можна представити у вигляді тіла, яке має переріз колового сектора на (рис. 3.7)

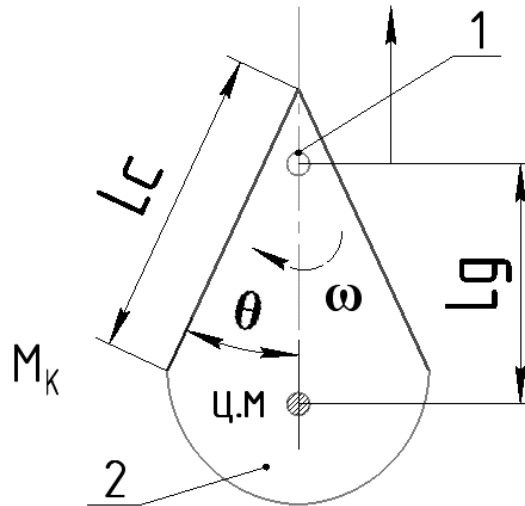


Рисунок 3.7. Геометричне тіло дебаланса: 1 – приводний вал, 2 – незрівноважений елемент (дебаланс), ц.м. – центр мас дебалансу.

$$I_1 = 0.5 \cdot m_1 \cdot L_c^2 \quad (3.14)$$

m_c – маса секторного елемента; L_c – твірна сектору.

$$m_1 = 2 \cdot m_c$$

Масу даного сектору можна визначити як

$$m_c = \theta \cdot L_c^2 \cdot \delta_c \cdot \rho_c \quad (3.15)$$

θ – половина центрального кута (рис. 3.7), *рад*; δ_c – товщина сектора, *м*; ρ_c – об’ємна вага матеріалу дебалансу, *кг/м³*.

Враховуючи 14 та 15 виводимо наступне

$$I_1 = \theta \cdot L_c^4 \cdot \delta_c \cdot \rho_c$$

Швидкість v_1 дебалансу знаходимо, використовуючи рис. 3.7, б.

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_e + \vec{v}_{1r} \quad (3.16)$$

v_e та v_{1r} – переносна та відносна складові швидкості ланки дебалансу, які відповідно дорівнюють $v_e = 0$, $v_{1r} = \dot{\phi}_1 \cdot L_g$

Тому

$$v_1 = \omega \cdot L_g = \dot{\phi}_1 \cdot L_g \quad (3.17)$$

Таким чином

$$I_1 = 0.5 \cdot (\dot{\phi}_1)^2 \cdot (m_1 \cdot L_g + I_1) \quad (3.18)$$

Кінетична енергія маси m_2 складає

$$T_2 = 0.5 \cdot (m_2 \cdot v_2^2 + I_2 \cdot (\omega^2 + (\dot{\psi}_2)^2)) \quad (3.19)$$

$(\dot{\psi}_2)^2$ – кутова швидкість відхилення осі валу відносно осі O_x

Швидкість центра мас приводного валу можна визначити як

$$v_2 = \dot{x} \quad (3.20)$$

Момент інерції маси m_2 має такі складові

$$I_2 = I_B + I_{\Pi}$$

$I_B = \frac{1}{\rho} \cdot m_B \cdot d_R^2$ – момент інерції приводного валу, $I_{\Pi} = \frac{1}{\rho} \cdot m_{\Pi} \cdot (D_{\Pi}^2 + d_{\Pi}^2)$ – момент інерції підшипникового вузла, на який опирається приводний лопатевий вал, D_n, d_n – зовнішній та внутрішній діаметри підшипникової опори.

Тоді переписуємо формулу 19 у вигляді

$$T_2 = 0.5 \cdot (m_2 \cdot (\dot{x})^2 + I_2 \cdot (\dot{\phi}_1 + \dot{\psi}_2)^2) \quad (3.21)$$

Аналогічно отримуємо вирази для кінетичної енергії T_3 та маси m_3 і T_4 та маси m_4

$$T_3 = 0.5 \cdot (m_3 \cdot (\dot{x})^2 + I_3 \cdot [(\dot{\phi}_1)^2 + (\dot{\psi}_2)^2]) \quad (3.22)$$

$$T_4 = 0.5 \cdot (m_4 \cdot (\dot{x})^2 + I_4 \cdot (\dot{\phi}_1 + \dot{\psi}_2)^2) \quad (3.23)$$

I_3, I_4 – відповідно моменти інерції гвинтової лопаті та чистика.

Враховуючи представлені вирази, шукане рівняння 3.12 можна представити у вигляді

$$T = 0.5 \cdot (\dot{x})^2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) + 0.5 \cdot (\dot{\phi}_1)^2 \cdot (m_1 \cdot L_g^2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4) + 0.5 \cdot (\dot{\psi}_2)^2 \cdot (I_2 + I_3 + I_4) \quad (3.24)$$

3.2.3 Розрахунок узагальнюючих сил

В загальному виразі залежність для узагальнюючих сил

$$Q_{qi} = \frac{\Delta A_i}{\Delta q_i} \quad (3.25)$$

ΔA_i – елементарна робота зовнішніх сил для переміщення елементів системи на величину приросту узагальненої координати Δq_i . Так, для координати ϕ_1 , що здійснює маса m_1 .

$$(\dot{Q})_{\phi_1} = M_{кр} + P_1 \cdot L_g \cdot \sin \phi_1 = M_{кр} + m_1 g L_g \cdot \sin \phi_1 \quad (3.26)$$

$M_{кр}$ – крутний момент на приводному валу; $P_1 = m_1 \cdot g$ – сила тяжіння дебалансу.

Для координати X_2 переміщення пов'язана із дією колового змушуючого фактору F_k (рис. 4) та пружного елементу

$$Q_{X2} = F_k - C_X \cdot X_2 \quad (3.27)$$

C_X – жорсткість пружного елементу по осі ox ; r_b – радіус приводного валу; $M_{оп}$ – момент опору, що виникає у підшипниковому вузлі, який можна визначити за формулою

$$M_{оп} = F_k \cdot f \cdot \cos \omega t \quad (3.28)$$

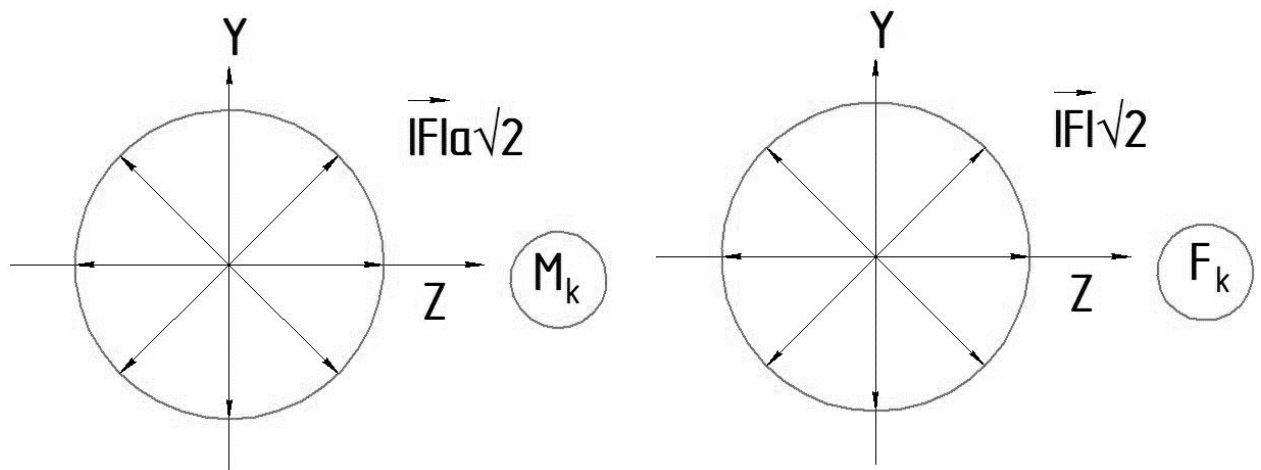


Рисунок 3.7.1. Змушуючі сили фактори

$F_k = m_1 \cdot L_D \cdot \omega^2$ – колова змушуюча сила від обертання дебалансів, що створюють динамічні навантаження на опорні вузли; r_d – радіус центру підшипника; f – коефіцієнт тертя кочення, м

Коловий змушуючий момент становить:

$$M_k = F_k \cdot a = m_1 \cdot L_g \cdot \omega^2 \cdot a = m_1 \cdot L_g \cdot (\dot{\phi}_2)^2 \cdot a \cdot \cos \omega t \quad (3.29)$$

Тоді формула (3.27) представлена у вигляді

$$Q_{X2} = m_1 \cdot L_g \cdot (\dot{\phi}_2)^2 - C_X \cdot X_2 = m_1 \cdot L_g \cdot \omega^2 - C_X \cdot X_2 \quad (3.30)$$

Для кординати ψ_2

$$Q_{\psi 2} = P_2 \cdot r_B + M_K - C_{\psi} \cdot \psi_2 \quad (3.31)$$

$P_2 = m_2 \cdot g$ – сила тяжіння маси m_2 ; C_{ψ} – жорсткість пружного елемента при кутовому зміщенні ψ_2

Враховуючи 29 представимо рівняння (3.31) як

$$Q_{\psi 2} = m_2 \cdot g \cdot r_B + m_1 \cdot L_g \cdot (\dot{\phi}_1)^2 \cdot a - C_{\psi} \cdot \psi_2 \quad (3.32)$$

При переміщенні маси m_3 на координату ϕ_1 потрібно враховувати відзначені раніше гідродинамічні параметри, тому дана складова узагальнюючої сили від ϕ_1 має вигляд

$$Q(\ddot{\psi}_1) = \frac{M_{kp}}{r_B} - P_r \quad (3.33)$$

Гідравлічний опір P_r можна знайти, використовуючи формулу (3.1), а також приведені нижче залежності для гідродинамічних параметрів.

При переміщенні маси m_4 на координату ϕ_1 необхідно враховувати сили тертя при взаємодії чистика із днищем робочої камери а саме

$$Q(\ddot{\psi}_1) = \frac{M_{kp}}{r_B} - F_{тер} \quad (3.34)$$

$F_{тер} = F_{зч} \cdot f_{ков}$ - сила тертя у результаті контактної взаємодії чистика з днищем; $F_{зч}$ – корозійні сили зчеплення осаду з днищем; $f_{ков}$ – коефіцієнт тертя ковзання при взаємодії чистика з днищем.

Враховуючи виведені залежності 3.26, 3.32, 3.33 узагальнена сила від координати ϕ_1 складає

$$Q_{\phi 1} = M_{kp} + m_1 \cdot L_g \cdot \left(g \cdot \sin \phi_1 - (\dot{\phi}_1)^2 \cdot a \cdot f_{ков} \right) - P_r \cdot r_i - M_{зч} - C_{\phi} \cdot \phi_1 \quad (3.35)$$

де r_i – радіус інерції; C_{ϕ} – жорсткість при крученні пружного елемента на кут ϕ_1 ; $M_{зч} = F_{зч} \cdot r_i$

3.3 Складання рівнянь руху виконавчих органів мішалки

3.3.1. *Визначення часткових похідних рівнянь Лагранжа для досліджуваної системи.*

Згідно із рівняннями системи (3.11), при використанні залежності (3.24) знаходимо шукані часткові похідні

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = \dot{X}_2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} = f' \cdot (\dot{\phi}_1 \cdot (m_1 \cdot L_g^2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4)) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial T}{\partial f'(\psi_2)} = f'(\psi_2) \cdot (I_2 + I_3 + I_4) \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial \phi_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial \psi_2} = 0 \quad (3.38)$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial f'(x_2)} \right) = f''(X_2) \cdot (m_2 \cdot m_3 \cdot m_4) \quad (3.39)$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial f'(\phi_1)} \right) = f''(\phi_1) \cdot (m_1 \cdot L_g^2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \quad (3.40)$$

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial f'(\psi_2)} \right) = f''(\psi_2) \cdot (I_2 + I_3 + I_4) \quad (3.41)$$

3.3.2. *Складання рівнянь руху за кожною з незалежних координат.*

Представляємо отримані рівняння 3.35 – 3.41, а також залежності для узагальнених сил 3.30, 3.31, 3.34 у системі 3.11 та отримуємо шукані рівняння руху, коригуючи розмірність у залежностях.

$$\begin{cases} f''(X_2) \cdot (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) = m_1 \cdot L_g \cdot \phi_1^2 \cdot \cos \omega t - C_X \cdot X_2 \\ f''(\phi_1) \cdot (m_1 \cdot L_g^2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4) = M_{кр} - P_r \cdot r_L - \\ \quad - M_{зч} + m_1 \cdot L_g \cdot (g \cdot \sin f'(\phi_1) f'(\phi_1)^2 \cdot a \cdot f_{ков} - C_\phi \cdot \phi_1) \\ f''(\psi_2) \cdot (I_2 + I_3 + I_4) = m_2 \cdot g \cdot r_B + m_1 \cdot L_g \cdot f'(\phi_1)^2 \cdot a - C_\psi \cdot \psi_2 \end{cases} \quad (3.42)$$

Введемо додаткові вирази

$$\begin{aligned}
K_m &= \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \\
K_x^2 &= \frac{C_x}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \\
K_\phi^2 &= \frac{C_\phi}{m_1 \cdot L_g^2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \\
K_\psi^2 &= \frac{C_\psi}{I_2 + I_3 + I_4} \\
I_0 &= m_1 \cdot L_g^2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4
\end{aligned}$$

Очевидно, що вирази K_x^2 , K_ϕ^2 , K_ψ^2 є характеристиками власних частот коливань за відповідними узагальненими координатами. Після перегрупування складових систем рівнянь (3.42), простих математичних перетворень та при врахуванні додаткових виразів отримуємо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases}
f''(X_2) + K_x^2 \cdot X_2 = K_m \cdot L_g \cdot f'(\phi_1)^2 \cdot \cos \omega t \\
f''(\phi_1) + \left[\frac{m_1 \cdot L_g \cdot a \cdot f_{ков}}{I_0} \right] \cdot f'(\phi_1) = \left[\frac{m_1 \cdot L_g \cdot g}{I_0} \right] \cdot \sin f'(\phi_1) + \left[\frac{M_{кр} - P_r \cdot r_l - M_{зч}}{I_0} \right] \\
f''(\psi_2) + K_\psi^2 \cdot \psi_2 = (I_2 + I_3 + I_4)^{-1} \cdot (m_2 \cdot g \cdot r_B + m_1 \cdot L_g \cdot f'(\phi_1)^2 \cdot a)
\end{cases} \quad (3.43)$$

Для складеної системи рівнянь (3.43) при врахуванні практичних аспектів реалізації досліджуваного процесу можна використати такі припущення.

- Враховуючи незначність кутового зміщення приводного валу їм можна знехтувати, тобто $\psi = 0$
- Вважаємо, що приводний вал обертається з постійною кутовою швидкістю, тобто $f'(\phi_1) = \omega = const$
- Величиною адгезійних сил зчеплення осаду до днища можна зневажити тобто $M_{зч} = 0$

Враховуючи дані припущення отримуємо шукану систему рівнянь руху виконавчих органів мішалки

$$\begin{cases} f''(X_2) + K_x^2 \cdot X_2 = K_m \cdot L_g \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t \\ f''(\phi_1) - K_\phi^2 \cdot f'(\phi_1) = \left[\frac{m_1 \cdot L_g \cdot g}{I_0} \right] \cdot \sin \phi_1 + I_0^{-1} \cdot (M_{kp} - P_r \cdot r_l - m_1 \cdot L_g \cdot a \cdot f_{ков} \cdot \omega) \end{cases} \quad (3.44)$$

3.4. Розв'язок рівнянь руху враховуючи органи мішалки

Під час розв'язання системи рівнянь (3.44) використовуємо метод Коші для диференціальних однорідних рівнянь другого роду за виглядом правої частини.

3.4.1. Розв'язок рівняння руху при лінійному зміщенні виконавчого механізму мішалки.

Перепишемо праву частину першого рівняння системи (3.44) враховуючи, що $A_x = K_m \cdot L_g \cdot \omega^2$, і представимо дане рівняння у вигляді

$$f''(X_2) + K_x^2 \cdot X_2 = A_x \cdot \cos \omega t \quad (3.45)$$

Розв'язок даного рівняння подаємо у вигляді суми загального $\bar{x}_2$ та часткового x_2^* розв'язку, тобто $x_2 = \bar{x}_2 + x_2^*$.

Коренями характеристичного рівняння $\tau^2 + K_x^2 = 0 \in \tau_1 = i \cdot K_x$, $\tau_2 = -i \cdot K_x$, тому загальний розв'язок рівняння (3.45) складає

$$\bar{x}_2 = A_1 \cdot \sin K_x t + A_2 \cdot \cos K_x t \quad (3.46)$$

При частковому розв'язанні рівняння (3.45) вибираємо значення X_2^x за виглядом правої частини, тобто:

$$x_2^* = A_3 \sin \omega t + A_4 \cos \omega t \quad (3.47)$$

Тоді похідні виразу (3.47) складають

$$\left(x_2^* \right)' = A_3 \omega \cos \omega t - A_4 \omega \sin \omega t \quad (3.48)$$

$$\text{та } \left(x_2^* \right)'' = -A_3 \omega^2 \sin \omega t - A_4 \omega^2 \cos \omega t \quad (3.49)$$

Підставляючи (3.48) та (3.49) у $(x_2^*)'' + K_x^2 x_2^* = A_x \cos \omega t$, отримуємо

$$\begin{aligned} -A_3 \omega^2 \sin \omega t - A_4 \omega^2 \cos \omega t + K_x^2 A_3 \sin \omega t + K_x^2 A_4 \cos \omega t = \\ = A_3 \sin \omega t (K_x^2 - \omega^2) + A_4 \cos \omega t (K_x^2 - \omega^2) = A_x \cos \omega t \end{aligned} \quad (3.50)$$

Із рівняння (3.50) очевидно, що

$$A_3 (K_x^2 - \omega^2) = 0 \quad \text{та} \quad A_4 (K_x^2 - \omega^2) = A_x$$

Величина $(K_x^2 - \omega^2)$ не може дорівнювати нулю згідно з останнім виразом. Тоді $A_3 = 0$; $A_4 = \frac{A_x}{K_x^2 - \omega^2}$

У результаті рівняння (3.46) можна представити у вигляді

$$x_2^* = \frac{A_x}{K_x^2 - \omega^2} \cos \omega t$$

Тоді розв'язок рівняння (3.45) набуває наступного вигляду

$$x_2 = \bar{x}_2 + x_2^* = A_1 \cdot \sin K_x t + A_2 \cdot \cos K_x t + \frac{A_x}{K_x^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (3.51)$$

Для початкових умов $t = 0$, $x_2 = 0$ із рівняння (3.51)

$$x_2 = A_2 + \frac{A_x}{K_x^2 - \omega^2} = 0 \quad \text{та відповідно}$$

$$A_2 = \frac{A_x}{\omega^2 - K_x^2} \quad (3.52)$$

Похідна виразу (3.51) складає

$$\dot{x}_2 = A_1 \cdot K_x \cdot \cos K_x t - A_2 \cdot K_x \cdot \sin K_x t + \frac{A_x \omega}{\omega^2 - K_x^2} \sin \omega t \quad (3.53)$$

Для початкових умов $t = 0$, $f'(x_2) = 0$ із рівняння (3.53) знаходимо

Величина K_x не може дорівнювати нулю, тоді $A_1 = 0$.

Тоді остаточне рівняння (3.45) набуває наступного вигляду

$$x_2 = \frac{A_x}{\omega^2 - K_x^2} \cdot \cos K_x t + \frac{A_x}{K_x^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (3.54)$$

Враховуючи, що для усталеного режиму власні частоти затухають, то можна представити останнє рівняння у вигляді

$$x_2 = \frac{A_x}{K_x^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (3.55)$$

3.4.2. Розв'язок рівняння руху при кутовому зміщенні осі приводного валу на φ_1

Введемо наступні позначення

$$\left[\frac{(M_{кр} - P_r \cdot r_l - m_1 \cdot L_g \cdot a \cdot f_{ков} \cdot \omega)}{I_0} \right] = B_{\varphi 2} \quad \text{та} \quad \left[\frac{m_1 \cdot L_g \cdot g}{I_0} \right] = B_{\varphi 1}$$

Тоді друге рівняння системи (3.44) можна представити у вигляді

$$f''(\varphi_1) + K_\varphi^2 \cdot \varphi_1 = B_{\varphi 1} \cdot \sin \varphi_1 + B_{\varphi 2} \quad (3.56)$$

Для розв'язання цього рівняння також використовуємо метод Коші. Аналогічно попередньому розрахунку, загальний розв'язок рівняння (3.56) складає , а частковий його розв'язок становить $\varphi^X = \varphi_1^X + \varphi_2^X$.

Аналогічно попередньому розрахунку

$$\varphi_2^X = \frac{B_{\varphi 2}}{K_\varphi^2} = \left[\frac{M_{кр} - P_r \cdot r_l - m_1 \cdot L_g \cdot a \cdot f_{ков} \cdot \omega}{I_0 \cdot K_\varphi^2} \right] \quad (3.57)$$

$$\varphi_1^X = B_3 \cdot \sin \varphi_1 + B_4 \cdot \cos \varphi_1 = B_3 \cdot \sin \omega t + B_4 \cdot \cos \omega t ,$$

$$\text{враховуючи, що } f''(\varphi_1)^X = -B_3 \cdot \sin \omega t + B_4 \cdot \cos \omega t ,$$

$$\text{отримуємо} \quad (3.58)$$

$$-B_3 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t - B_4 \cdot \omega^2 \cdot \cos \omega t + K_\varphi^2 \cdot B_3 \cdot \sin \omega t + K_\varphi^2 \cdot B_4 \cos \omega t = B_4$$

звідки

$$\begin{cases} B_3 \cdot (K_\varphi^2 - \omega^2) = B_{\varphi 1} \\ B_4 \cdot (K_\varphi^2 - \omega^2) = 0 \\ B_4 = 0, \text{ так як } K_\varphi^2 - \omega^2 = 0 \end{cases} \rightarrow B_3 = \left(\frac{B_{\varphi 1}}{K_\varphi^2 - \omega^2} \right)$$

Тоді розв'язок рівняння (3.56) можна записати у вигляді

$$\varphi_1 = \bar{\varphi}_1 + \varphi_1^X + \varphi_2^X = B_1 \cdot \sin K_\varphi t + B_2 \cdot \cos K_\varphi t + \left(\frac{B_4 \cdot \sin \omega t}{K_\varphi^2 - \omega^2} \right) + \left(\frac{B_{\varphi 1}}{K_\varphi^2} \right) \quad (3.59)$$

Для початкових умов: $t = 0$, $\varphi_1 = 0$, $\dot{\varphi}_1 = 0$

$$B_2 \cdot \left(\frac{B_{\varphi 2}}{K_\varphi^2} \right) = 0 \text{ тоді } B_2 = - \left(\frac{B_{\varphi 2}}{K_\varphi^2} \right) \quad (3.60)$$

Враховуючи, що

$$\dot{\varphi}_1 = B_1 \cdot K_\varphi \cdot \cos K_\varphi t - B_2 \cdot K_\varphi \cdot \sin K_\varphi t + \left[\frac{B_{\varphi 1} \cdot \omega \cdot \cos \omega t}{K_\varphi^2 - \omega^2} \right]$$

можна отримати наступне рівняння

$$B_1 \cdot K_\varphi + \left[\frac{B_{\varphi 1} \cdot \omega \cdot \cos \omega t}{K_\varphi^2 - \omega^2} \right] = 0, \text{ тоді}$$

$$B_1 = - \left[\frac{B_{\varphi 1} \cdot \omega \cdot \cos \omega t}{K_\varphi \cdot K_\varphi^2 - \omega^2} \right] \quad (3.61)$$

Враховуючи значення коефіцієнтів 4.53, 4.54 отримуємо наступне рівняння

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \left(\frac{B_{\varphi 1} \cdot \sin \omega t}{K_\varphi^2 - \omega^2} \right) + \frac{B_{\varphi 1}}{K_\varphi^2} - \left(\frac{B_{\varphi 1} \cdot \omega \cdot K_\varphi t}{K_\varphi \cdot (K_\varphi^2 - \omega^2)} \right) - \left(\frac{B_{\varphi 2}}{K_\varphi^2 \cdot \cos K_\varphi t} \right) = \\ &= \left(\frac{B_{\varphi 1}}{K_\varphi^2 - \omega^2} \right) \cdot \left(\sin \omega t - \left(\frac{\omega}{K_\varphi} \right) \cdot \sin K_\varphi t \right) + \left(\frac{B_{\varphi 2}}{K_\varphi^2} \right) \cdot (1 - \cos K_\varphi t) \end{aligned} \quad (3.62)$$

Враховуючи вирази для $B_{\varphi 1}$ та $B_{\varphi 2}$ остаточно шуканий розв'язок набуває наступного вигляду

$$\varphi_1 = m_1 \cdot L_d \cdot g \cdot \left(\frac{\sin \omega t - \left(\frac{\omega}{K_\varphi} \right) \cdot \sin K_\varphi t}{I_0 \cdot (K_\varphi^2 - \omega^2)} \right) + \left[\frac{(M_{kp} - P_r \cdot r_l - m_1 \cdot L_d \cdot a \cdot f_{ков} \cdot \omega) \cdot (1 - \cos K_\varphi t)}{I_0 \cdot K_\varphi^2} \right] \quad (3.63)$$

3.5. Графоаналітичний аналіз основних характеристик досліджуваної коливальної системи

Для визначення амплітудно-частотних та енергетичних характеристик досліджуваної системи використовуємо рівняння (3.55), із якого вивели залежність:

$$x_2 = \frac{m_1 \cdot L_g \cdot \omega^2}{(K_x^2 - \omega^2) \cdot (m_1 + m_2 + m_3 + m_4)} \cos \omega t \quad (3.64)$$

На основі рівняння (3.64) знаходимо залежності для основних кінематичних характеристик даної коливальної системи, а саме:

Амплітуди коливань

$$A = \frac{m_1 \cdot L_g \cdot \omega^2}{(K_x^2 - \omega^2) \cdot (m_1 + m_2 + m_3 + m_4)} \quad (3.65)$$

Віброшвидкість

$$v_x = v = A \cdot \omega \quad (3.66)$$

Віброприскорення

$$a_x = a = A \cdot \omega^2 \quad (3.67)$$

Питомі енерговитрати

$$N_m = a_x \cdot v_x \quad (3.68)$$

Енерговитрати приводу валу електродвигуна

$$N = m_K \cdot A^2 \cdot \omega^3 \quad (3.69)$$

Використовуючи математичне середовище Excel, варіацію відношення маси дебалансів m_1 та сталу величину проекції твірної L_g , знаходимо графічні залежності для основних кінематичних характеристик даної коливальної

системи, а саме: амплітуду коливань, віброшвидкість, віброприскорення, питомі енерговитрати та енерговитрати для приводу електродвигуна, які представлені на рисунках 3.8 – 3.12.

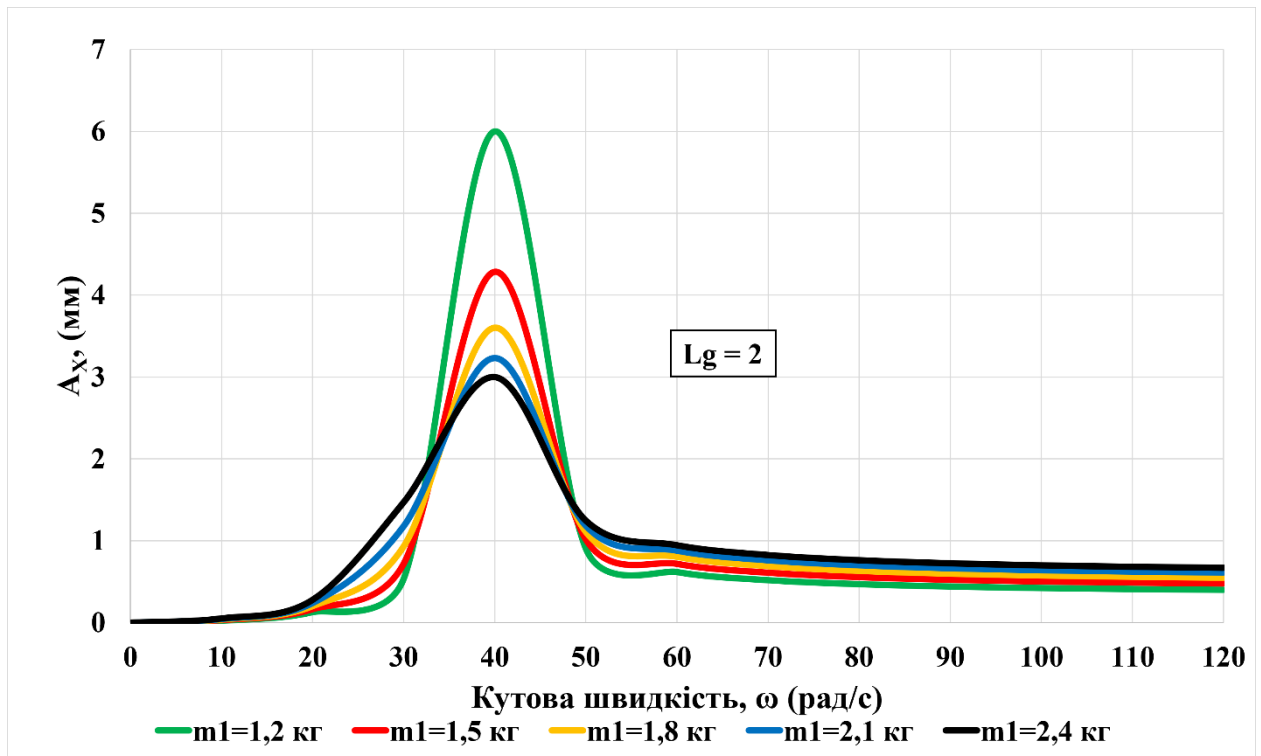


Рисунок 3.8. Амплітудно-частотні характеристики досліджуваної коливальної системи за умови зміни відношення маси дебалансів m_1 та сталої величини проекції твірної $L_g = 2$ мм.

Побудована на рис. 3.8 теоретична амплітудно-частотна характеристика коливальної системи при зміні відношення маси дебалансів m_1 від 1,2 до 2,4 кг та сталої величини проекції твірної $L_g = 2$ мм показує такі характерні області вібраційного впливу: дорезонансну у межах частот $0 \dots 30$ рад/с, резонансну – в інтервалі $30 \dots 50$ рад/с, перехідну – $50 \dots 80$ рад/с. Стабілізація амплітуд спостерігається після 80 рад/с, що дозволяє зменшити розхитування виконавчих органів машини, тому після цього частотного режиму можна рекомендувати її ефективну експлуатацію. Для величини проекції твірної $L_g = 2$ мм спостерігається збільшення резонансної частоти у 2 рази при зменшенні маси інерційних елементів у 2 рази. При цьому робоча амплітуда виконавчих перемішуючих органів зменшується у 1,6 рази.

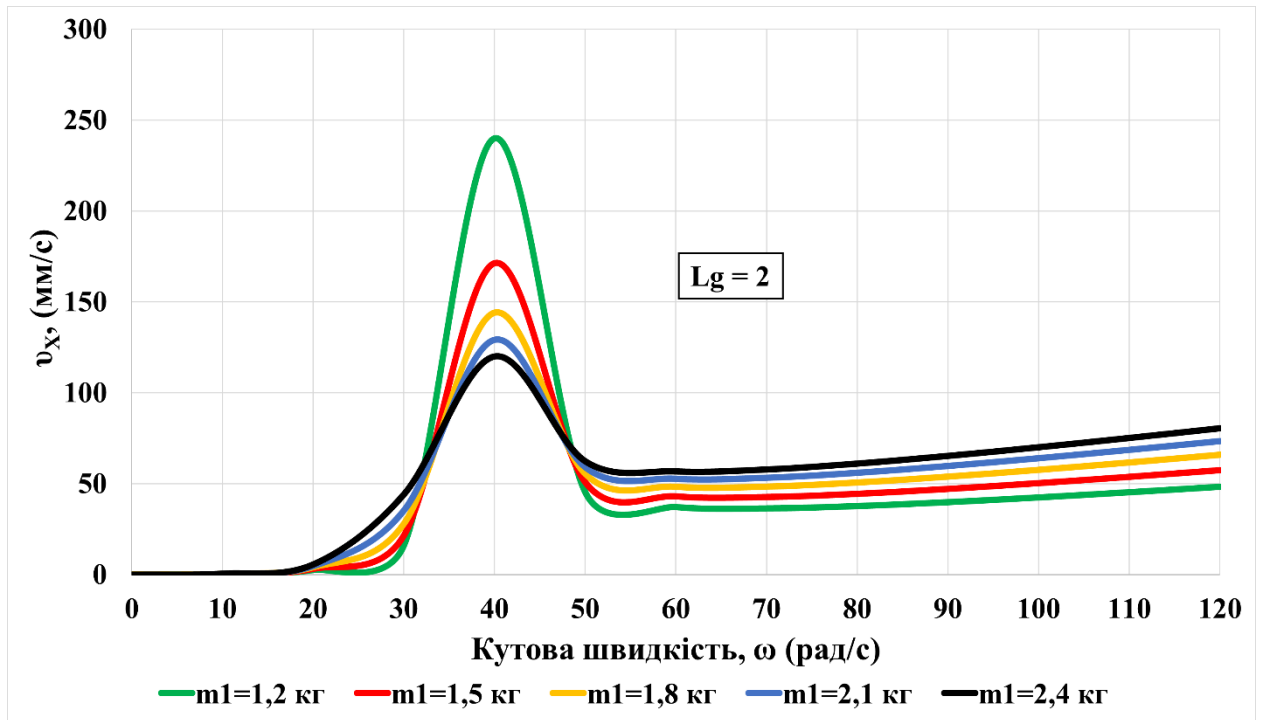


Рисунок 3.9. Віброшвидкість досліджуваної коливальної системи за умови зміни відношення маси дебалансів m_1 та сталої величини проекції твірної $L_g = 2$ мм.

Побудовані на рис. 3.9 теоретичні залежності зміни віброшвидкості досліджуваної коливальної системи при варіюванні маси дебалансів m_1 від 1,2 до 2,4 кг та сталої величини проекції твірної $L_g = 2$ мм свідчать про суттєвий вплив інерційних параметрів системи на динамічний режим роботи змішувача.

У дорезонансній області частот 0...30 рад/с значення віброшвидкості поступово зростають і характеризуються стабільною динамікою руху виконавчих органів. У резонансній зоні 30...50 рад/с спостерігається різке підвищення віброшвидкості, що зумовлено збільшенням інтенсивності коливальних процесів і накопиченням кінетичної енергії в системі. Перехідна область 50...80 рад/с характеризується поступовим зменшенням градієнта зростання швидкості та стабілізацією коливального процесу. Після 80 рад/с значення віброшвидкості набувають сталого характеру, що забезпечує більш рівномірний режим роботи виконавчих органів. Зменшення маси дебалансів у 2 рази призводить до підвищення резонансної частоти системи та одночасного

зниження максимальних значень віброшвидкості, що позитивно впливає на зменшення динамічних навантажень на конструкцію змішувача.

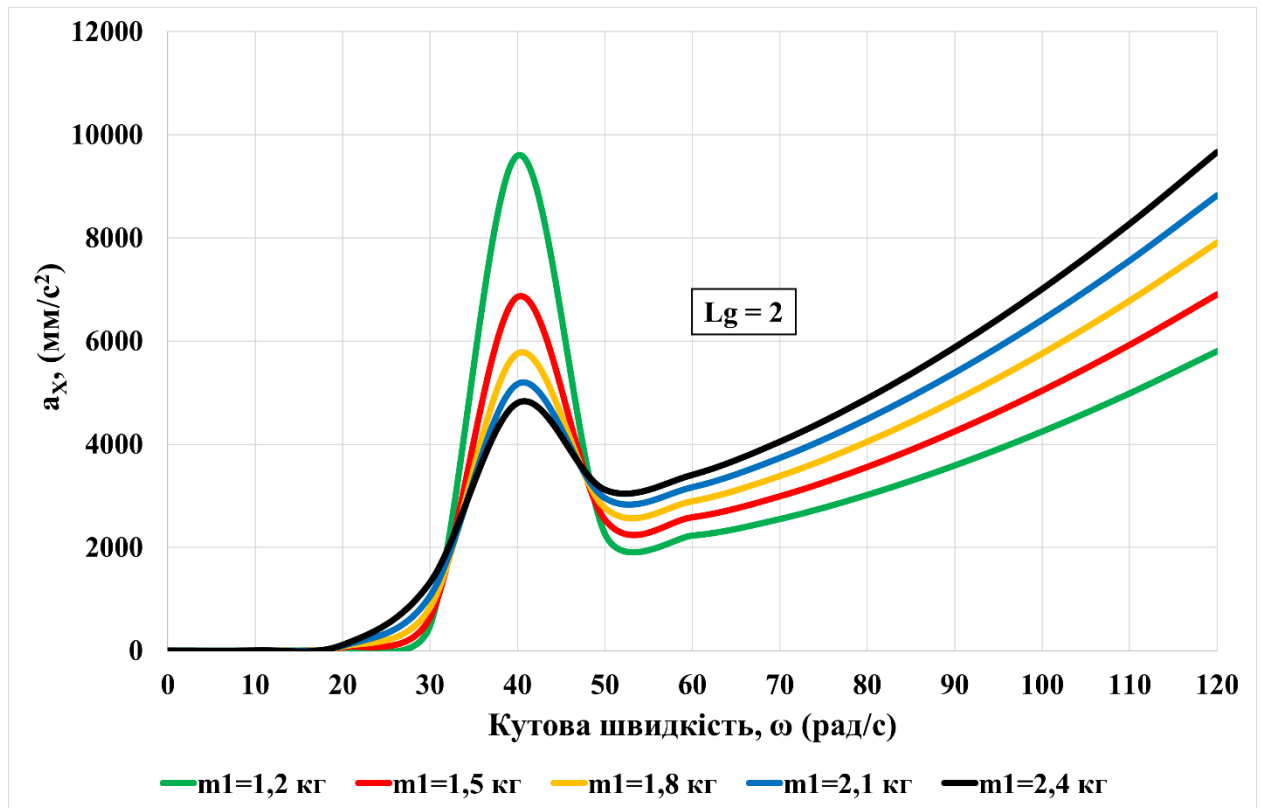


Рисунок 3.10. Віброприскорення досліджуваної коливальної системи при зміні відношення маси дебалансів m_1 та сталої величини проекції твірної $L_g = 2$ мм.

Теоретичні залежності віброприскорення досліджуваної коливальної системи, наведені на рис. 3.10, демонструють закономірності зміни інерційних навантажень при варіюванні маси дебалансів m_1 у межах 1,2...2,4 кг та сталій величині проекції твірної $L_g = 2$ мм. У дорезонансній області частот до 30 рад/с значення віброприскорення є відносно незначними та змінюються плавно, що відповідає стійкому режиму функціонування коливальної системи. У резонансній зоні 30...50 рад/с спостерігається різке зростання віброприскорення внаслідок інтенсифікації коливальних процесів і підвищення динамічної активності системи. Перехідна область 50...80 рад/с характеризується поступовим згасанням приросту прискорення та переходом системи до стабілізованого режиму роботи. Після 80 рад/с значення віброприскорення стабілізуються, що дозволяє забезпечити більш ефективне

та безпечне функціонування виконавчих органів змішувача. Встановлено, що зі зменшенням маси дебалансів відбувається підвищення резонансної частоти системи та зниження максимальних значень віброприскорення, що сприяє зменшенню ударних і втомних навантажень на елементи конструкції.

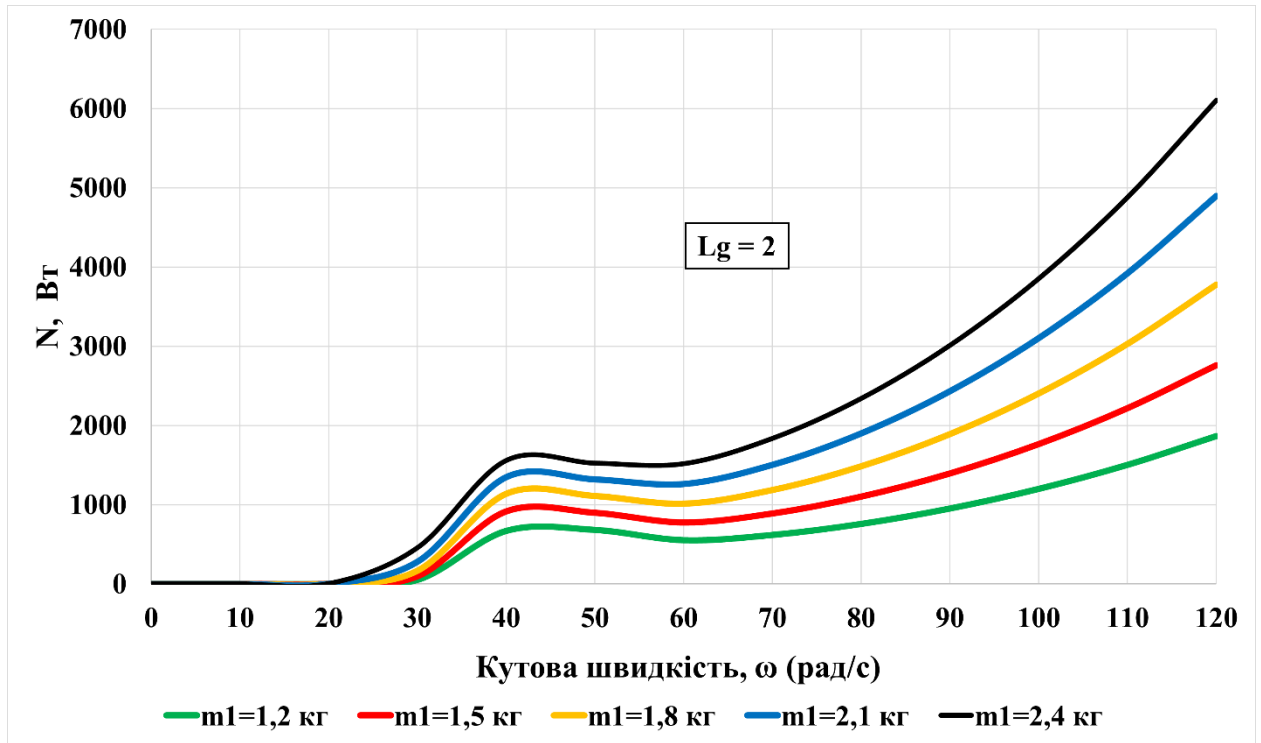


Рис. 3.11 Залежності витрати потужності для надання мішалці коливального руху при зміні маси дебалансів m_1 та сталій величині проекції твірної $L_g = 2$ мм.

При виборі ефективних параметрів робочого режиму змішувальних робочих органів є доцільним, окрім фактора стабілізації амплітуди коливань, враховувати витрати енергії на створення та підтримання цього режиму. Тому було проведено дослідження витрат потужності на привод виконавчих органів машини залежно від кінематичних характеристик руху при зміні відношення маси дебалансів m_1 від 1,2 до 2,4 кг та величини проекції твірної $L_g = 2$ мм. При величині проекції твірної $L_g = 2$ мм (рис. 3.11) спостерігали інтенсивне зростання витрат енергії на привод за підвищення частоти коливань ω понад 90 рад/с. У межах частот 50 – 70 рад/с простежується певна стабілізація мінімальних енерговитрат, що становлять 500 – 1500 Вт залежно від маси коливних частин приводу. Можна вважати ефективним частотний режим 60 –

75 рад/с за величини проекції твірної $L_g = 2$ мм, за якого витрати потужності становлять 500 – 2000 Вт за відповідного збільшення маси дебалансів m_I від 1,2 до 2,4 кг.

Таким чином, проведені дослідження енергетичних характеристик виявили неефективність використання приводного лопатевого валу з проекцією твірної, що перевищує 2 мм.

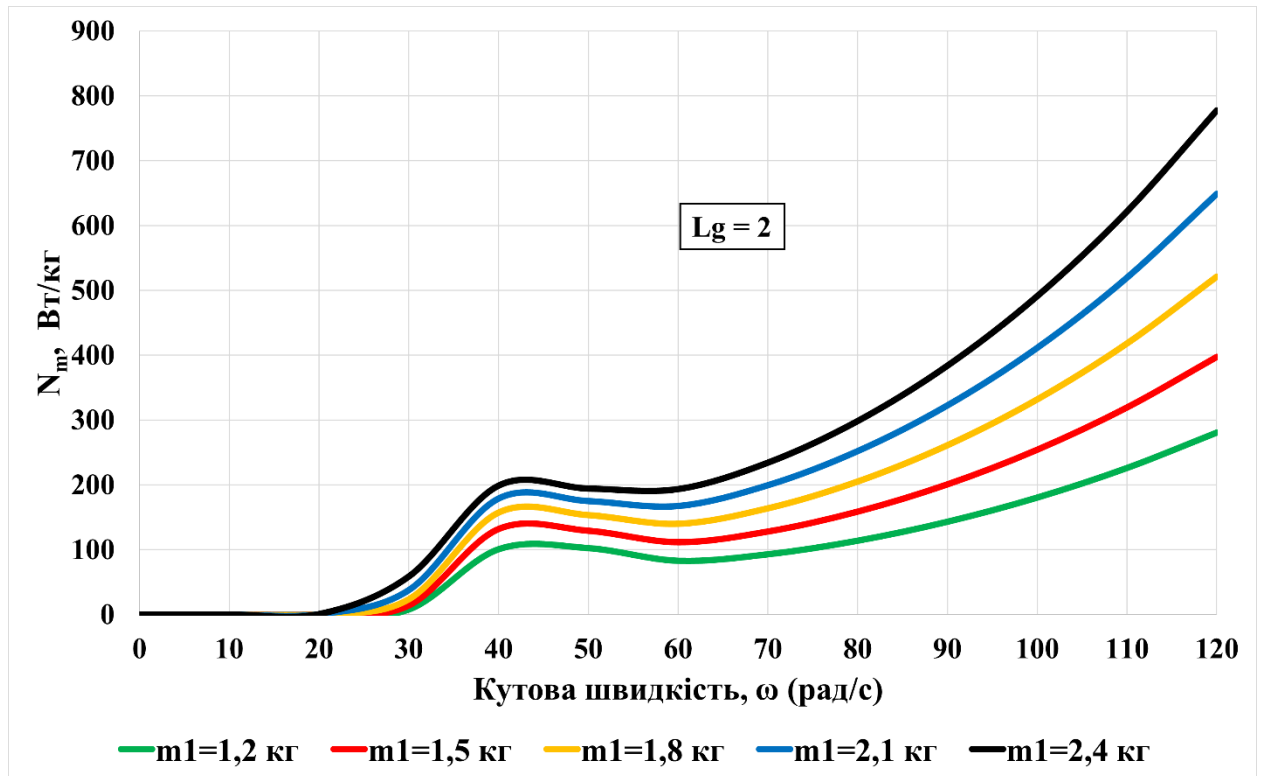


Рисунок 3.12. Залежність інтенсивності коливального руху мішалки N_m при зміні маси дебалансів m_I та сталої величини проекції твірної $L_g = 2$ мм.

У подальших дослідженнях серед енергетичних параметрів також використовували питомі енерговитрати, які припадають на одиницю коливної маси приводного механізму, що іноді називають інтенсивністю низькочастотного впливу (рис. 3.12). При величині проекції твірної $L_g = 2$ мм (рис. 3.12) спостерігали певну стабілізацію мінімальних енерговитрат на рівні 100 – 200 Вт/кг у межах частот 50 - 70 рад/с, після чого виявляється збільшення інтенсивності енергії коливального руху на рівні 300 – 700 Вт/кг за підвищення частоти коливань ω вище 90 рад/с. У межах раціонального

інтервалу частот $60 - 75 \text{ рад/с}$ при величині проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$ питомі витрати енергії становлять $100 - 250 \text{ Вт/кг}$ залежно від маси коливних частин приводу. Можна вважати ефективним частотний режим $60 - 75 \text{ рад/с}$ при величині проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$, за якого витрати потужності становлять $500 - 2000 \text{ Вт}$ при відповідному збільшенні маси дебалансів m_I від 1,2 до 2,4 кг.

3.6. Висновки до 3 розділу.

За результатами проведених експериментальних досліджень процесу розчинення з вібролопатевою інтенсифікацією отримали необхідну базу для проведення математичного моделювання при використанні методу Лагранжа, що дозволило скласти систему рівнянь другого роду для визначення основних параметрів руху виконавчих органів досліджуваної коливальної системи.

1. Використовуючи метод аналізу Коші для розв'язання лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь, вказані припущення при математичній обробці інформації, явища затухання власних коливань системи за стабілізації вимушених режимів експлуатації приводного механізму; були отримані залежності між кінематичними, силовими та енергетичними параметрами досліджуваної гідромеханічної системи з вібролопатевою інтенсифікацією тепломасообміну.

2. Графоаналітичний аналіз отриманих залежностей у математичному середовищі Excel дозволив виявити ефективні інтервали параметрів робочих режимів спроектованого приводного механізму для вібролопатевого перемішування рідкої технологічної маси. Виконавчі органи даного механізму з величиною проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$ ефективно функціонують в інтервалі частот $65 - 80 \text{ рад/с}$, для якого забезпечується стабілізація амплітуд коливань на значеннях $1,0 - 2,0 \text{ мм}$ в умовах інтенсивного вібромеханічного перемішування рідкого середовища.

3. При виборі ефективних параметрів робочого режиму за енергетичними параметрами досліджуваного процесу виявили, що для виконавчих органів

проектowanego механізму з величинами проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$ можна вважати ефективним частотний режим $60 - 75 \text{ рад/с}$, за якого витрати потужності становлять $500 - 2000 \text{ Вт}$ та питомі витрати енергії складають $100 - 250 \text{ Вт/кг}$ при відповідному збільшенні маси дебалансів m_I від $1,2$ до $2,4 \text{ кг}$.

4. Проведені дослідження енергетичних характеристик виявили неефективність використання приводного лопатевого валу з проекцією твірної, що перевищує 2 мм . Так, при величині проекції твірної L_g , яка перевищує 2 мм для частотних режимів $60 - 75 \text{ рад/с}$ витрати потужності становлять $3 - 14 \text{ кВт}$, а питомі витрати енергії становлять $500 - 1700 \text{ Вт/кг}$ при відповідному збільшенні коливної маси, що перевищують подібні параметри при величині проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$ у $6 - 9$ разів.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВИХ ПАСТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІБРОГІДРАВЛІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ

4.1. Обґрунтування раціональної схеми виробництва пектиновмісних паст з гарбуза

На сучасному етапі розвитку промислового виготовлення пектинових паст постає завдання перед виробниками – розробляти та застосовувати нові, досконаліші технології у виробництві високоякісних пектинових паст із високою біологічною цінністю.

Сьогодні, на жаль, немає абсолютно досконалої технології виготовлення пектинових паст, яка дозволила б максимально зберегти в продукті його корисні властивості без зміни органолептичних показників за умови одночасного збільшення термінів їх зберігання, що є важливим показником для виробництва продуктів з високими споживчими характеристиками.

Оцінка споживчих переваг нового продукту – пектинових паст з гарбузів – передбачає використання сенсорних методів, таких як бальна оцінка з визначенням комплексного показника якості та встановленням категорії якості, а також профільного аналізу смакових властивостей із детальним визначенням позитивних і негативних характеристик смаку.

Пектиновмісні пасти є широко відомими продуктами, що отримуються в результаті гідролізу рослинної сировини з використанням певної послідовності технологічних операцій. До основних етапів їх виробництва належать: підготовка та миття сировини, її набухання, гідроліз-екстрагування, концентрування (упарювання) отриманої пектинової маси та фасування готового продукту.

Однією з ключових переваг пектиновмісних паст у харчовій промисловості є їхня висока енергетична та біологічна цінність, зумовлена значним вмістом вітамінів, амінокислот, мікро- та макроелементів. Проте у

процесі виробництва постає проблема збереження цих цінних компонентів, оскільки стадія упарювання передбачає термічну обробку за підвищених температур. З метою мінімізації втрат біоактивних речовин необхідно забезпечити відповідність кожного технологічного етапу певним вимогам, спрямованим на збереження поживного складу кінцевого продукту.

Підготовка рослинної сировини включає кілька ключових стадій: очищення від сторонніх домішок (залишків ґрунту, механічних забруднень) і дозування. Дозування здійснюється у спеціалізованих високоточних дозаторах, що забезпечують стабільність технологічного процесу та відповідність заданим параметрам маси сировини.

Миття рослинної сировини: режим миття визначається сортовими особливостями та ступенем її зрілості. Для ранніх і твердих сортів застосовують інтенсивне очищення, тоді як для зрілих сортів – пом'якшені режими обробки. Очищувальні агрегати повинні відповідати вимогам безпеки, бути зручними в експлуатації, а також легко піддаватися монтажу й демонтажу.

Подрібнення рослинної сировини. Якість подрібнення визначає ефективність подальшого гідролізу та вихід кінцевого продукту. Дрібніші частинки сприяють прискоренню дифузійних процесів. Оптимальні розміри подрібненої сировини для процесів гідролізу та екстрагування пектинових паст експериментально встановлено в межах 0,3–0,6 мм. Використовуються різні типи подрібнювачів: ударні, обертово-кулькові, вібраційні, струминні, електрогідравлічні.

Експериментально визначено, що для досягнення пастоподібної консистенції оптимальний розмір частинок становить 0,1–0,2 мм. Для цього застосовували електроподрібнювач із решіткою діаметром 1 мм.

Набухання рослинної сировини. Ця стадія сприяє видаленню баластних речовин перед подальшим гідролізом. Основні фактори, що впливають на ефективність процесу: співвідношення сировини та води – 1:3, оптимальний рівень рН – 2,0–3,0, температурний режим – у межах 50–60 °С.

При $\text{pH} > 3,0$ видалення мінеральних речовин є неповним, а при $\text{pH} < 2,0$ розпочинається передчасний гідроліз протопектину. Висока температура ($>60^\circ\text{C}$) спричиняє надмірні енергетичні витрати та перевитрати теплоносіїв.

Гідроліз – найбільш критична стадія процесу, що потребує використання кислотних, лужних або ферментних гідролізаторів. Вибір матеріалу обладнання визначається умовами гідролізу: рівнем pH середовища – 2,5–6,5, температурним режимом – $90\text{--}100^\circ\text{C}$, стійкістю до корозії та відповідністю вимогам МОЗ України щодо контакту з харчовими продуктами.

Для інтенсифікації процесу використовують акустичні, кавітаційні, електрогідравлічні та інші методи. Експериментально доведено, що застосування лимонної та молочної кислот забезпечує оптимальний рівень pH та сприяє ефективному перетворенню протопектину в пектин. Ці кислоти дозволені до використання у харчовій промисловості (харчова добавка Е-330).

Упарювання. Концентрування пектинової маси здійснюється шляхом випарювання надлишку вологи. Для цього застосовуються вакуумні установки, що дозволяють знизити температуру кипіння та мінімізувати теплову деградацію біоактивних компонентів. Апарати повинні відповідати вимогам безпечної експлуатації та забезпечувати легкий доступ до робочих органів для огляду й ремонту. Для підвищення ефективності роботи вакуумних насосів необхідно використовувати високоякісні змащувальні матеріали.

При виготовленні пектинових паст ефективність і досконалість обладнання, в першу чергу, характеризуються витратами енергії на одиницю виготовленої пектиновмісної пасти. Енергоємність апаратного забезпечення процесу виробництва пектинових паст повинна бути мінімальною, інакше процес виготовлення цих паст буде економічно не вигідним. Нижче наведено схему лінії для виробництва пектинових паст, зображену на рис. 4.1.

Сировина поступає на установку миття 1, а потім по транспортеру в тарі 2 – на стіл для різання великогабаритної овочевої чи фруктової сировини. Нарізана сировина направляється в лотки 4 на подрібнювач 5.

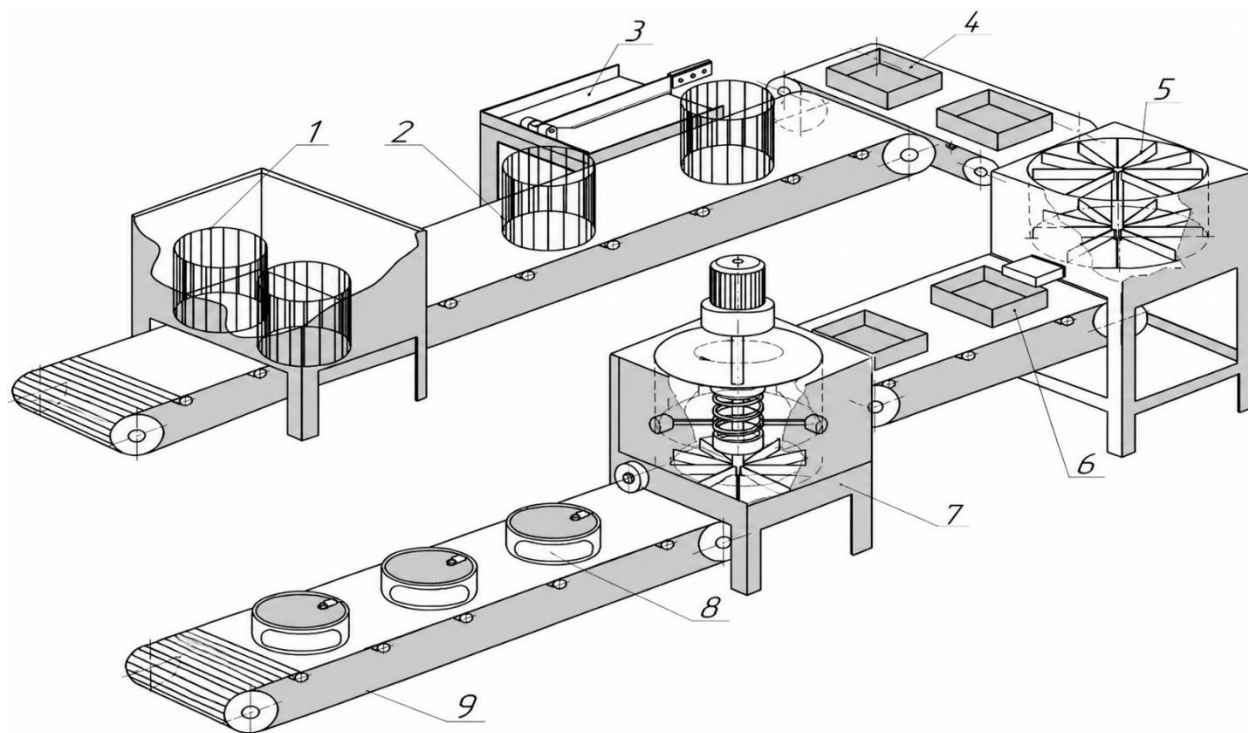


Рисунок 4.1. Малогабаритна механізована лінія для виробництва пектиновмісної пасти з рослинної сировини : 1 – мийна машина; 2, 8 – тара; 3 – стіл для різання сировини; 4, 6 – лотки; 5 – подрібнювач; 7 – гідролізатор-упарювач з віброгідравлічним змішувачем; 9 – транспортер.

Після подрібнення в лотках 6 сировина поступає у вакуумний гідролізатор-упарювач 7, де відбувається вилучення пектину, а потім розфасовується в тару 8 і за транспортером 9 направляється на маркування та на склад готової продукції.

Концентрація паст (видалення води) відбувається у вакуумі за температури 40–60 °С, що дозволяє зберегти в кінцевому продукті всі вітаміни і корисні елементи і продовжити термін його зберігання до 1 року.

В основу технологічної схеми виробництва пектиновмісних паст з гарбуза було покладено принципи переробки плодоовочевої сировини з максимальним збереженням біологічно активних речовин. Процес складається з послідовних технологічних операцій: приймання та підготовки сировини, миття, очищення,

подрібнення, бланшування, протирання, гомогенізації, охолодження та пакування, охарактеризованих таким чином.

На підґрунті виконаних досліджень була розроблена технологічна схема отримання пектинових паст з рослинної сировини (рис. 4.2).

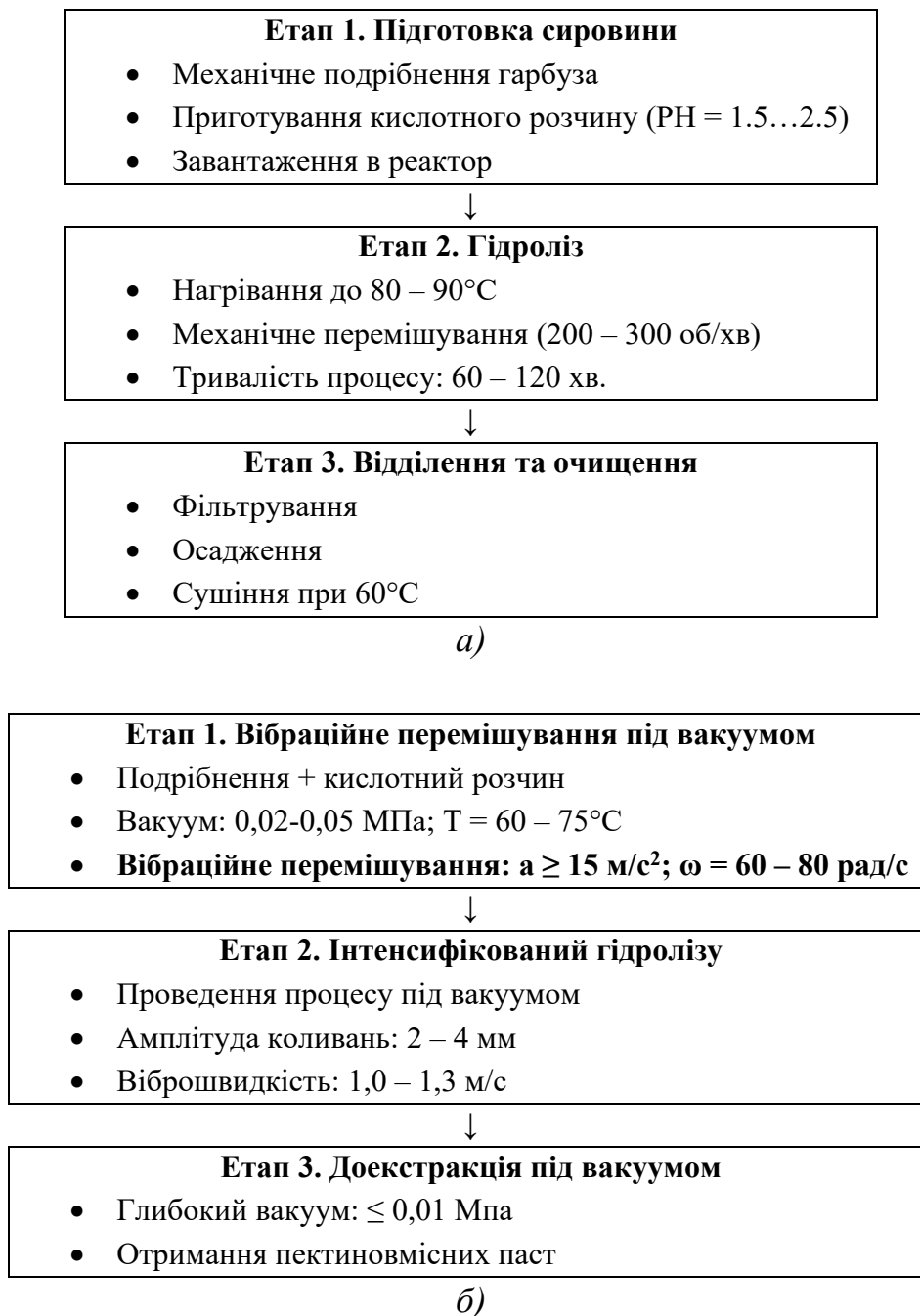


Рисунок 4.2. Схема комбінованої фізико-механічної гідролізу гарбузової сировини: а - експериментальне визначення робочих режимів гідролізу класична технологія; б - експериментальне визначення робочих режимів гідролізу гарбуза

Пасту з гарбуза готували за наступною технологією:

1. Гарбузи після збирання витримували 10–15 діб. Якість сировини визначали за ДСТУ 7036:2009. Контроль здійснюють згідно з вимогами відповідних нормативних документів (ДСТУ 7036:2009 «Гарбузи продовольчі свіжі»), після чого проводять зважування.

2. Миття гарбуза проводили у дві стадії: попереднє миття проточною водою для видалення грубих забруднень та остаточне миття у ванні з проточною водою температурою 18–20 °С. Тривалість процесу становить 3–5 хвилин.

3. Очищення гарбуза здійснювали вручну. Вихід очищеного гарбуза становить 65–75 % від маси вихідної сировини залежно від сорту та ступеня стиглості.

4. Подрібнення очищеного гарбуза проводили на овочерізці до розміру часточок 10–15 мм для забезпечення рівномірності подальшої термічної обробки та оптимальної швидкості масообмінних процесів.

5. Бланшування подрібненого гарбуза здійснювали у воді за температури 85–90 °С протягом 8–12 хвилин. Процес спрямований на інактивацію окисних ферментів (пероксидази, поліфенолоксидази), часткове руйнування клітинної структури тканин і підвищення доступності пектинових речовин.

6. Протирання бланшованої маси проводили у гарячому стані (температура 70–75 °С) через сито з отворами діаметром 1,5–2,0 мм для отримання однорідної пастоподібної консистенції та видалення залишків грубих волокон. Вихід пасти після протирання становив 92–96 %.

7. Гомогенізацію пасти здійснювали при температурі 60–65 °С протягом 3–5 хв при частоті обертання робочого органу 1500–3000 об/хв у поєднанні з віброгідравлічним перемішуванням (проекцією твірної $L_g = 2–5$ мм, частота 65–80 рад/с, амплітуда коливань 1,0–2,0 мм), що забезпечувало інтенсивне вібромеханічне диспергування, рівномірний розподіл пектинових речовин, підвищення колоїдної стабільності та стабілізацію структурно-механічних властивостей системи.

8. Охолодження готової пасти проводили до температури 4–6 °С у швидкому режимі для запобігання розвитку мікрофлори та збереження якісних показників продукції.

9. Пакування пектиновмісної пасти здійснювали у герметичну тару місткістю 0,25–0,5 кг, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам для контакту з харчовими продуктами.

10. Зберігання готової продукції проводили за температури 2–6 °С та відносної вологості повітря 75–80%. Термін зберігання пастеризованої пасти становить 30 діб, а непастеризованої – не більше 72 годин.

Контроль якості готової продукції здійснювали за органолептичними показниками (колір, консистенція, смак, запах), фізико-хімічними показниками (масова частка сухих речовин, вміст пектинових речовин, активна кислотність) та показниками безпечності відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для проведення порівняльного аналізу були підготовані сім зразків пектинових паст: паста з гарбуза свіжа (контроль)(1), паста з гарбуза без цукру(2), паста з гарбуза контроль з цукром 350 г. (3), паста з гарбуза з цукром 450г(4), паста з гарбуза з цукром 550 г(5), паста з гарбуза з цукром 700 г(6), паста з гарбуза з цукром 850 г.(7), рецептури по виготовленню пектинових паст на 1 кг готової пасти розраховані та наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1

Рецепти по приготуванню пектинових паст на 1 кг готового продукту

Інгредієнти	Вид рецепту приготування пектинових паст						
	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	Рецептура 4	Рецептура 5	Рецептура 6	Рецептура 7
Гарбуз	1 кг	1 кг	1 кг	1 кг	1 кг	1 кг	1 кг
Вода	3 л	3 л	3 л	3 л	3 л	3 л	3 л
Лимонна кислота	15 г	15 г	15 г	15 г	15 г	15 г	15 г
Цукор	-	-	350 г	450 г	550 г	750 г	850 г

Інші приклади реалізації запропонованої технології виробництва пектинових паст наведені в табл. 4.2

Таблиця 4.2

Варіанти технологічного процесу виготовлення пектинових паст

Характеристика технологічного режиму і паст	Од. вимір.	Варіанти технологій					
		1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7	8
Гідромодуль	ГМ	14	15	15,5	16	17	15
Температура гідролізу	°C	75	80	82	85	90	82
Тривалість гідролізу	хв.	50	60	62	65	70	62
Температура упарювання на водяній бані	°C	85	90	92	95	100	80
Тривалість гідролізу	хв.	50	60	62	65	70	62
Температура упарювання на водяній бані	°C	85	90	92	95	100	80
Тривалість упарювання	Хв.	50	60	65	70	80	60
Вміст пектину в пасті	%	0,3	1,3	1,5	1,5	0,4	1,4
Консистенція		Рідка	Норм.	Норм.	Норм.	Густа	Норм.
Колір		Світло-жовтий	Світло-абрикосовий	Абрикосовий	Абрикосовий	Коричневий	Абрикосовий
Присутність нерозварених часток		Є	Немає	Немає	Немає	Немає	Немає
Студнеутворювальна здатність	мм.рт.ст	315	362	378	365	310	370
Вміст сухих речовин	%	61	68	69	70	74	69

З таблиці 4.2 видно, що найкращі показники у технологіях, що здійснювались при нормальному тиску, мають варіанти 2-4, одержані за температури гідролізу 80-85 °C протягом 60-65 хвилин при гідромодулі ГМ = 15-16, температурі упарювання на водяній бані 60-70 хвилин до концентрації

сухих речовин 68-70 %. За варіантом наведені показники виробництва пасти під вакуумом. Очевидно, що в цьому випадку отримали продукт належної якості з високою студнеутворювальною здатністю та приємним золотистим кольором.

4.2. Дослідження фізико-хімічних, функціонально-технологічних і структурно-механічних властивостей гарбузів

Гарбуз (*Cucurbita* spp.) є цінною сировиною для харчової промисловості завдяки високому вмісту біологічно активних речовин, зокрема каротиноїдів, вітамінів і пектинових речовин. Комплексне дослідження властивостей гарбузової сировини різних сортів є необхідною умовою для обґрунтованого вибору технологічних параметрів переробки та створення функціональних харчових продуктів.

Метою даного дослідження було визначення фізико-хімічних, функціонально-технологічних і структурно-механічних характеристик гарбузів різних сортів, вирощених в умовах України, для встановлення їх технологічного потенціалу.

Для проведення експериментальних досліджень було використано гарбузи трьох найпоширеніших сортів:

- Гарбуз мускатний (*Cucurbita moschata*) сорту "Вітамінна".
- Гарбуз великоплідний (*Cucurbita maxima*) сорту "Стофунтова".
- Гарбуз твердокорий (*Cucurbita pepo*) сорту "Голонасінна".

Сировина була заготовлена у фазі технічної стиглості в осінній період та зберігалася за температури 8–10 °С протягом 2 місяців перед дослідженням.

Визначення фізико-хімічних показників проводили за стандартними методиками: масову частку сухих речовин – ваговим методом за температури 105°C до постійної маси (ДСТУ 7804:2015) [134]; масову частку цукрів – методом Бертрана (ДСТУ 6498:2006) [135]; масову частку пектинових речовин – кальцій-пектатним методом [136]; масову частку каротиноїдів – спектрофотометричним методом (ДСТУ 4687:2006) [137]; кислотність –

титриметричним методом (ДСТУ 4957:2008) [138]; активну кислотність (pH) – потенціометричним методом (ДСТУ 8550:2015) [136].

Функціонально-технологічні властивості визначали за такими показниками: водоутримувальна здатність (ВУЗ) – методом пресування; жирутримувальна здатність (ЖУЗ) – центрифугуванням; емульгувальна здатність (ЕЗ) – методом турбідиметрії; стабільність емульсії (СЕ) – після термічної обробки [141-149].

Структурно-механічні властивості досліджували за допомогою: ефективної в'язкості – ротаційним віскозиметром Brookfield DV-II+; міцності тканин – на пенетрометрі; пружно-еластичні властивості – релаксаційним методом (ДСТУ 6098:2009) [136].

Усі дослідження проводили у п'ятикратній повторюваності. Статистичну обробку результатів здійснювали за методами варіаційної статистики з використанням програмного пакета Microsoft Excel.

Фізико-хімічні властивості

Результати визначення основних фізико-хімічних показників гарбузів різних сортів наведено в додатку Г та на рис. 4.3.

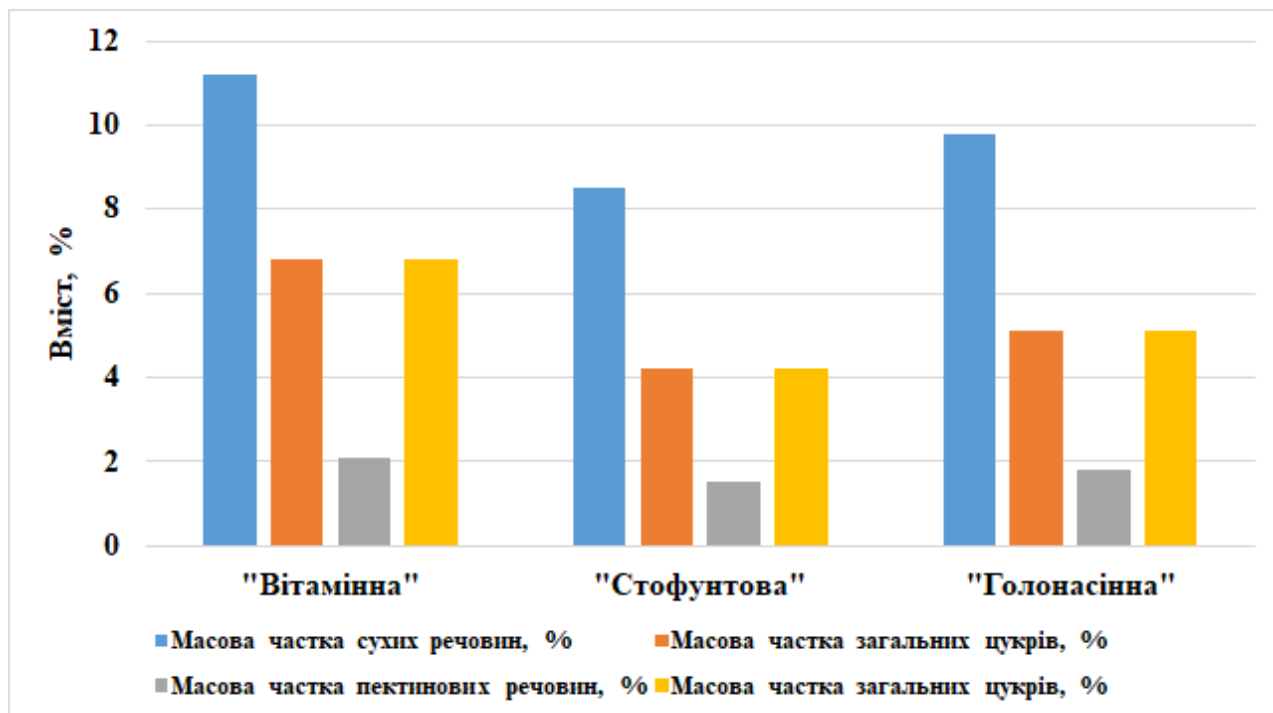


Рисунок 4.3. Вміст основних компонентів за сортами

Як видно з рис. 4.1 найвищим вмістом сухих речовин характеризується гарбуз мускатний сорту "Вітамінна" (11,2%), що на 32% більше порівняно з великоплідним сортом. Це обумовлює вищий вихід готової продукції під час переробки та кращі органолептичні властивості.

Вміст загальних цукрів варіює від 4,2% у великоплідного гарбуза до 6,8% у мускатного, що корелює з органолептичною оцінкою солодкості сировини. Співвідношення редукуючих цукрів до загальних становить 66–67% для всіх досліджуваних сортів, що свідчить про подібний ступінь гідролізу полісахаридів під час дозрівання та зберігання.

Особливу увагу привертає вміст каротиноїдів, який у мускатного гарбуза перевищує показники інших сортів у 1,5–2,3 раза. Це робить цей сорт особливо перспективним для виробництва функціональних продуктів харчування з підвищеним вмістом провітаміну А.

Вміст пектинових речовин коливається в межах 1,5–2,1%, що відповідає літературним даним для цього виду сировини. Найвищий вміст пектину в мускатному гарбузі обумовлює кращі драглеутворювальні властивості та перспективність використання у виробництві десертних продуктів.

Значення рН усіх досліджуваних зразків перебуває в діапазоні 6,2–6,5, що характеризує гарбузи як слабокислу сировину з низькою кислотністю.

Функціонально-технологічні властивості

Функціонально-технологічні властивості є важливими критеріями оцінювання технологічного потенціалу сировини. Результати досліджень наведено в додатку Г та на рис. 4.4.

Найвищими функціонально-технологічними властивостями характеризується мускатний гарбуз. Його водоутримувальна здатність (245%) перевищує аналогічний показник великоплідного сорту на 23,7%, що пояснюється вищим вмістом пектинових речовин та особливостями структурної організації клітинних стінок.

Жироутримувальна здатність мускатного гарбуза (158%) також є найвищою серед досліджуваних зразків, що робить його перспективним компонентом у виробництві емульсійних продуктів харчування, зокрема соусів, паштетів і десертів.

Емульгувальна здатність варіюється від 43% до 52%, причому найкращі показники демонструє мускатний сорт. Стабільність емульсії після термічної обробки (85 °C, 30 хв) зберігається на рівні 68% для мускатного гарбуза, що свідчить про стійкість його функціональних властивостей до технологічних операцій переробки.

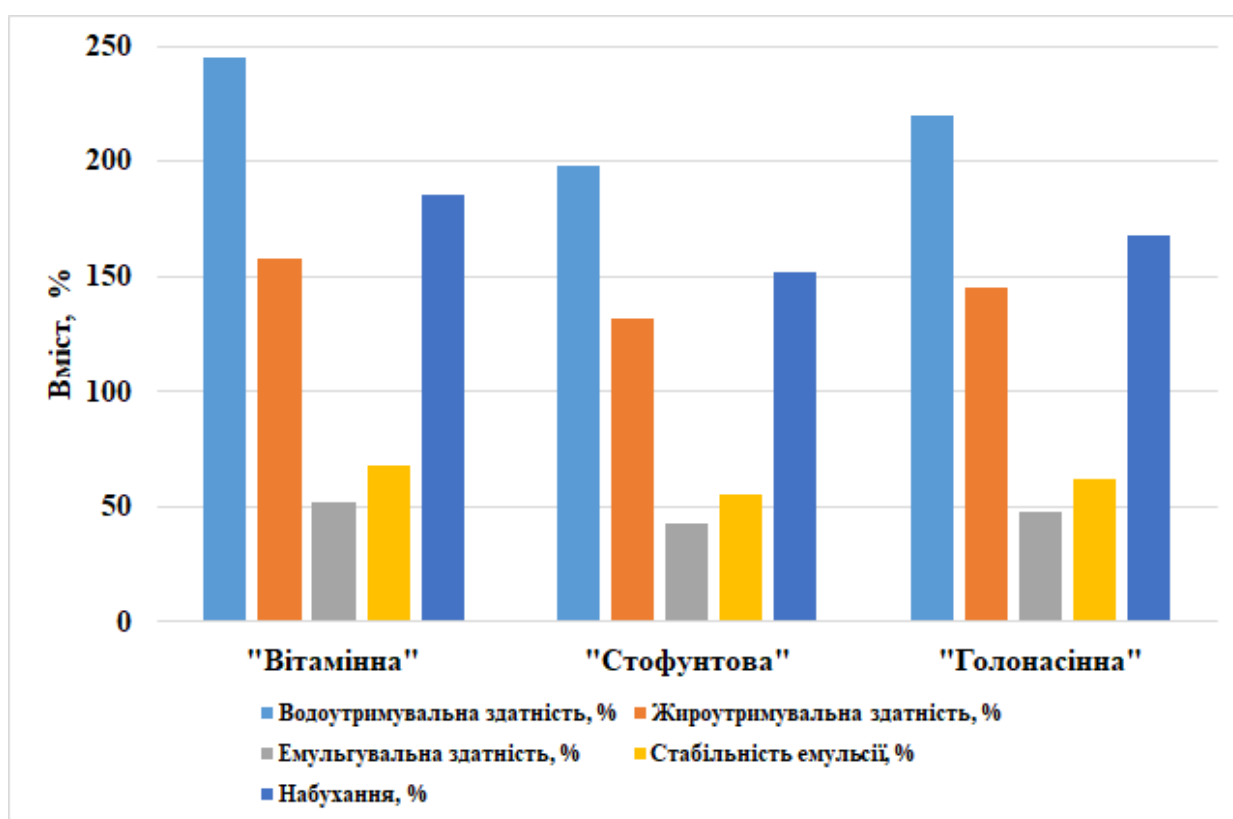


Рисунок 4.4. Функціонально-технологічні властивості за сортами

Здатність до набухання, яка відображає взаємодію гідрофільних компонентів з водою, максимальна у мускатного сорту (185%) та мінімальна у великоплідного (152%). Це підтверджує вищий вміст полісахаридів з вираженими гідратаційними властивостями у першому випадку.

Структурно-механічні властивості

Реологічні характеристики є визначальними під час проєктування технологічних процесів та обладнання для переробки гарбузової сировини. Результати визначення структурно-механічних властивостей наведено в таблиці 4.3.

Реологічні дослідження показали, що гарбузове пюре всіх сортів демонструє неньютонівську поведінку з вираженими тиксотропними властивостями. Ефективна в'язкість за швидкості зсуву 100 с^{-1} максимальна у мускатного гарбуза ($2,85 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при 20°C), що майже вдвічі перевищує показник великоплідного сорту.

Температурна залежність в'язкості виражена для всіх зразків: при підвищенні температури від 20°C до 60°C в'язкість знижується на 40–45%. Це необхідно враховувати під час розрахунку параметрів теплової обробки та транспортування пюреподібних продуктів.

Таблиця 4.3

Структурно-механічні властивості

Показник	Гарбуз мускатний "Вітамінна"	Гарбуз великоплідний "Стофунтова"	Гарбуз твердокорий "Голонасінна"
Ефективна в'язкість при 20°C ($\gamma=100 \text{ с}^{-1}$), $\text{Па}\cdot\text{с}$	$2,85\pm 0,10$	$1,52\pm 0,08$	$2,15\pm 0,09$
Ефективна в'язкість при 60°C ($\gamma=100 \text{ с}^{-1}$), $\text{Па}\cdot\text{с}$	$1,68\pm 0,08$	$0,95\pm 0,05$	$1,32\pm 0,07$
Міцність тканин, $\text{Н}/\text{см}^2$	$8,5\pm 0,4$	$5,2\pm 0,3$	$6,8\pm 0,3$
Модуль пружності, кПа	42 ± 2	28 ± 2	35 ± 2
Час релаксації напруг, с	125 ± 8	85 ± 6	105 ± 7
Ступінь тиксотропії, %	32 ± 2	28 ± 2	30 ± 2

Міцність тканин сирого гарбуза варіює від 5,2 до $8,5 \text{ Н}/\text{см}^2$, причому найміцнішу структуру має мускатний сорт. Це корелює з вищим вмістом сухих речовин і пектинових речовин, які формують структурний каркас рослинної тканини.

Модуль пружності, який характеризує здатність матеріалу чинити опір деформації, є найвищим у мускатного гарбуза (42 кПа). Час релаксації напруг, що відображає швидкість відновлення структури після деформації, також максимальний для цього сорту (125 с), що свідчить про складнішу й стійкішу структурну організацію.

Ступінь тиксотропії, що показує зміну в'язкості під дією механічного впливу, коливається в межах 28–32% для всіх досліджуваних сортів. Це вказує на подібний характер руйнування структури під час перемішування та на можливість її відновлення у стані спокою.

Кореляційний аналіз взаємозв'язків між показниками

Для встановлення залежностей між різними групами показників було проведено кореляційний аналіз, результати якого наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Коефіцієнти кореляції між основними показниками якості гарбузів

Показники	Коефіцієнт кореляції (r)	Рівень значущості (p)
Сухі речовини – каротиноїди	0,95	<0,01
Сухі речовини – ВУЗ	0,88	<0,01
Пектинові речовини – ВУЗ	0,92	<0,01
Пектинові речовини – ЕЗ	0,84	<0,05
Сухі речовини – в'язкість	0,91	<0,01
Пектинові речовини – міцність тканин	0,86	<0,01
Вміст цукрів – товщина м'якоті	0,76	<0,05

Кореляційний аналіз виявив сильні позитивні зв'язки між вмістом сухих речовин і каротиноїдів ($r = 0,95$), що підтверджує накопичення пігментів паралельно з загальним збільшенням сухої речовини під час дозрівання плодів.

Встановлено високу кореляцію між вмістом пектинових речовин і водоутримувальною здатністю ($r = 0,92$), що пояснюється здатністю пектинів формувати гідратовані гелеві структури. Аналогічний зв'язок спостерігається між пектинами та емульгувальною здатністю ($r = 0,84$), що зумовлено

амфіфільною природою молекул пектину. Реологічні властивості (в'язкість, міцність тканин) сильно корелюють із вмістом сухих речовин та пектинів, що дозволяє прогнозувати структурно-механічні характеристики за хімічним складом сировини.

4.3 Функціонально-технологічні та фізико-хімічні показники пектинових паст з гарбуза

Дослідження функціонально-технологічних та фізико-хімічних показників пектинових паст з гарбуза з різним вмістом цукру є критично важливим етапом для обґрунтування їх використання у технології оздоровчих харчових продуктів. Комплексний аналіз цих показників дозволяє встановити взаємозв'язок між рецептурним складом, структурою та функціональними властивостями готових паст, а також визначити оптимальне дозування цукру для досягнення найкращих органолептичних і технологічних характеристик.

Для проведення порівняльного аналізу були підготовлені сім зразків пектинових паст: паста з гарбуза свіжа без термообробки (зразок 1 - контроль), паста з гарбуза без цукру (зразок 2), паста з гарбуза з цукром 350 г на 1 кг сировини (зразок 3 - контроль з цукром), паста з гарбуза з цукром 450 г (зразок 4), паста з гарбуза з цукром 550 г (зразок 5), паста з гарбуза з цукром 700 г (зразок 6), паста з гарбуза з цукром 850 г (зразок 7).

Фізико-хімічні показники пектинових паст з гарбуза

Результати визначення основних фізико-хімічних показників розроблених пектинових паст із різною концентрацією цукру наведено в додатку Е та на рис. 4.3 – 4.6. Аналіз отриманих даних свідчить про суттєві відмінності між зразками залежно від рецептурного складу та технологічних параметрів виробництва.

На рис. 4.5 представлено порівняльний аналіз основних фізико-хімічних показників пектинових паст з гарбуза залежно від концентрації цукру. Стовпчикові діаграми відображають масову частку води та сухих речовин,

тоді як лінійні графіки показують зміну вмісту загальних цукрів та значення рН.

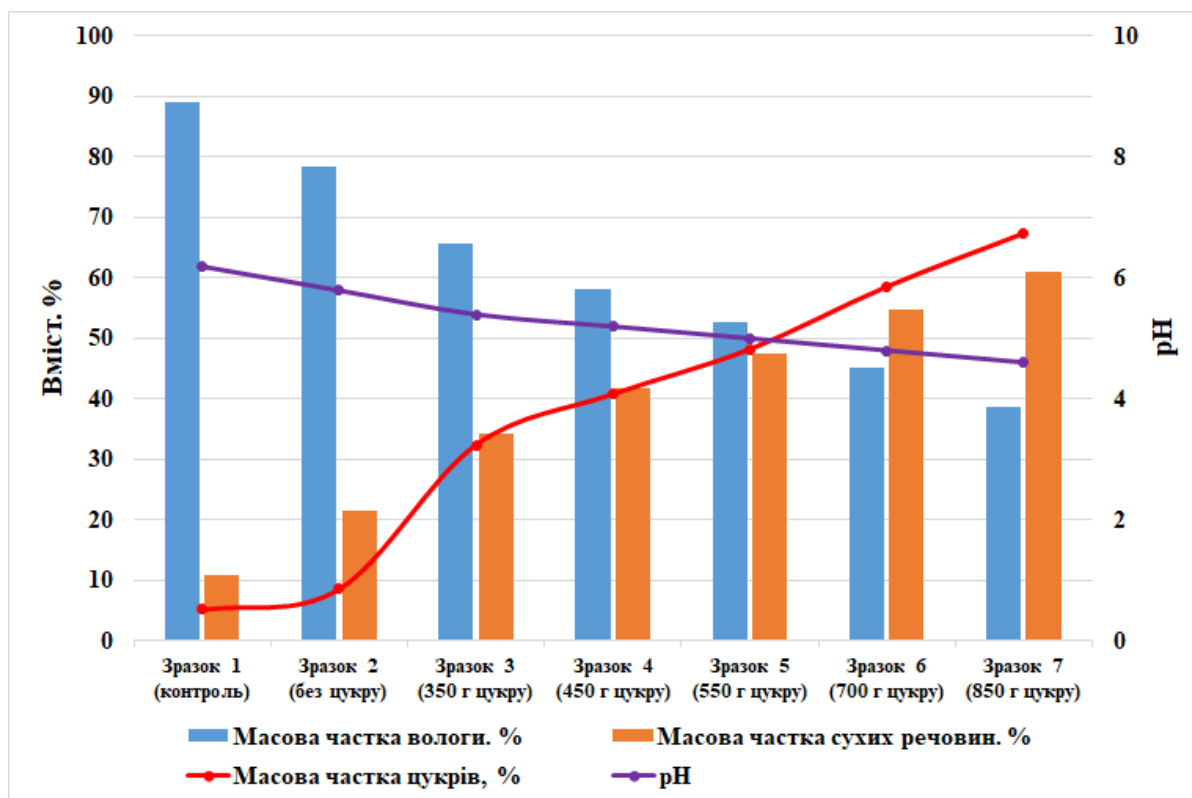


Рисунок 4.5. Структурно-механічні властивості гарбузових пектинових паст

Аналіз отриманих даних свідчить про наявність чіткої кореляції між вмістом цукру та структурно-механічними властивостями продукту. Масова частка води закономірно знижується з 89,2% у свіжому контрольному зразку до 38,7% у зразку з максимальним вмістом цукру (850 г), що пояснюється осмотичними властивостями цукрози та її здатністю зв'язувати вільну воду. Відповідно, масова частка сухих речовин демонструє протилежну тенденцію, зростаючи від 10,8% до 61,3%.

Вміст загальних цукрів інтенсивно збільшується від 5,2% у свіжому зразку до 67,3% у зразку з найвищою концентрацією цукру, причому найбільший приріст спостерігається у зразках 3–7. Активна кислотність знижується з рН 6,2 до рН 4,6, що створює сприятливі умови для утворення пектинового гелю та забезпечує мікробіологічну стабільність готового продукту.

Отримані результати дозволяють одночасно оцінити взаємозв'язок між різними параметрами та визначити оптимальні рецептурні композиції для виробництва пектиновмісних паст.

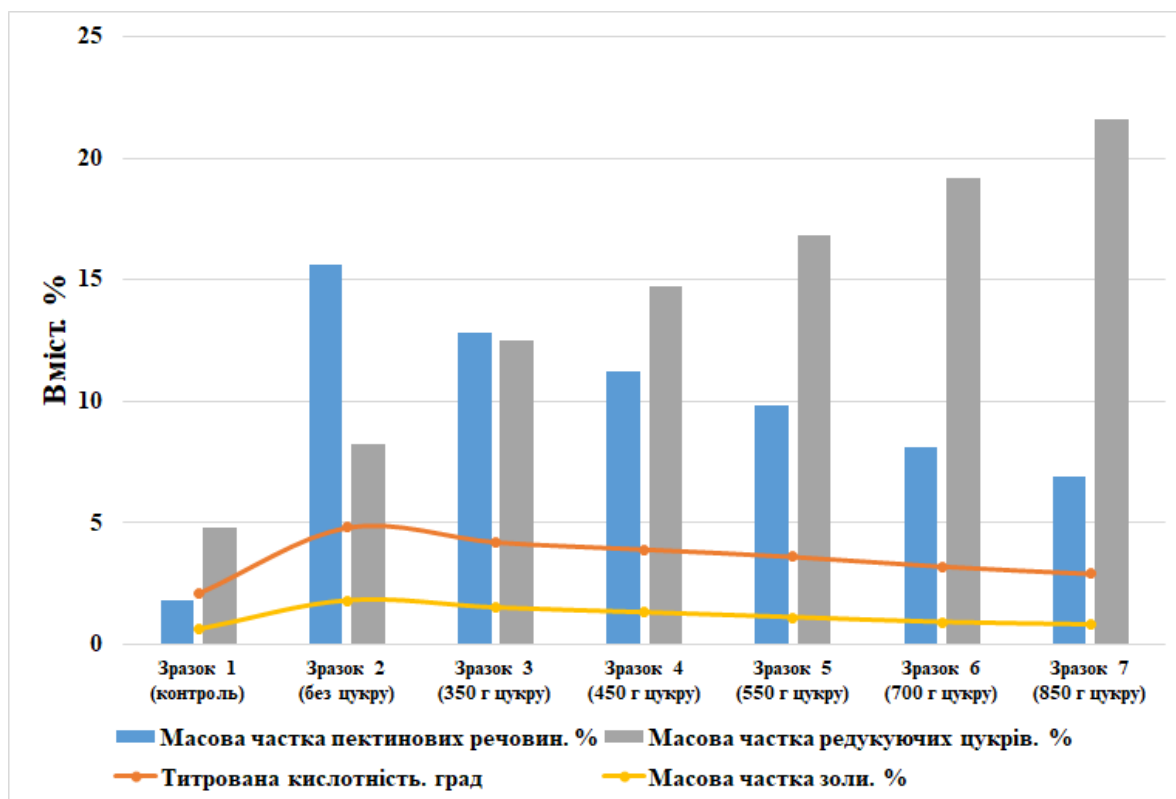


Рисунок 4.6. Вплив рецептурного складу на гелеутворюючі компоненти та кислотність пектинових паст

На рис. 4.6 представлено результати дослідження ключових біохімічних показників, що визначають структурно-механічні властивості та якість пектинових паст. Стовпчикові діаграми відображають масову частку пектинових речовин і редукуючих цукрів, тоді як лінійні графіки характеризують титровану кислотність і вміст золи.

Вміст пектинових речовин досягає максимального значення 15,6% у зразку без цукру після термообробки, що пояснюється концентруванням структуроутворювальних полісахаридів під час випаровування вологи. У зразках з додаванням цукру відносний вміст пектину закономірно знижується від 12,8% до 6,9% через збільшення частки цукрів у загальній масі сухих

речовин, проте залишається достатнім для формування стабільної гелевої структури.

Масова частка редукуючих цукрів поступово зростає від 4,8% у контрольному зразку до 21,6% у зразку з максимальним вмістом цукру, що свідчить про часткову гідратацію сахарози під час термічної обробки. Титрована кислотність демонструє екстремальний характер зміни: максимум 4,8 град у зразку без цукру, а потім зниження до 2,9 град унаслідок розбавлення органічних кислот збільшеною загальною масою продукту. Вміст мінеральних речовин (золи) варіює в межах 0,6–1,8%, що свідчить про збереження біологічно цінних мікроелементів у готових виробках.

На рис. 4.7 представлено зміну вмісту основних структуроутворювальних компонентів і показників кислотності пектинових паст залежно від рецептурного складу. Столпчиковими діаграмами відображено масову частку пектинових речовин і редукуючих цукрів, лінійними графіками показано динаміку титрованої кислотності та вміст мінеральних речовин.

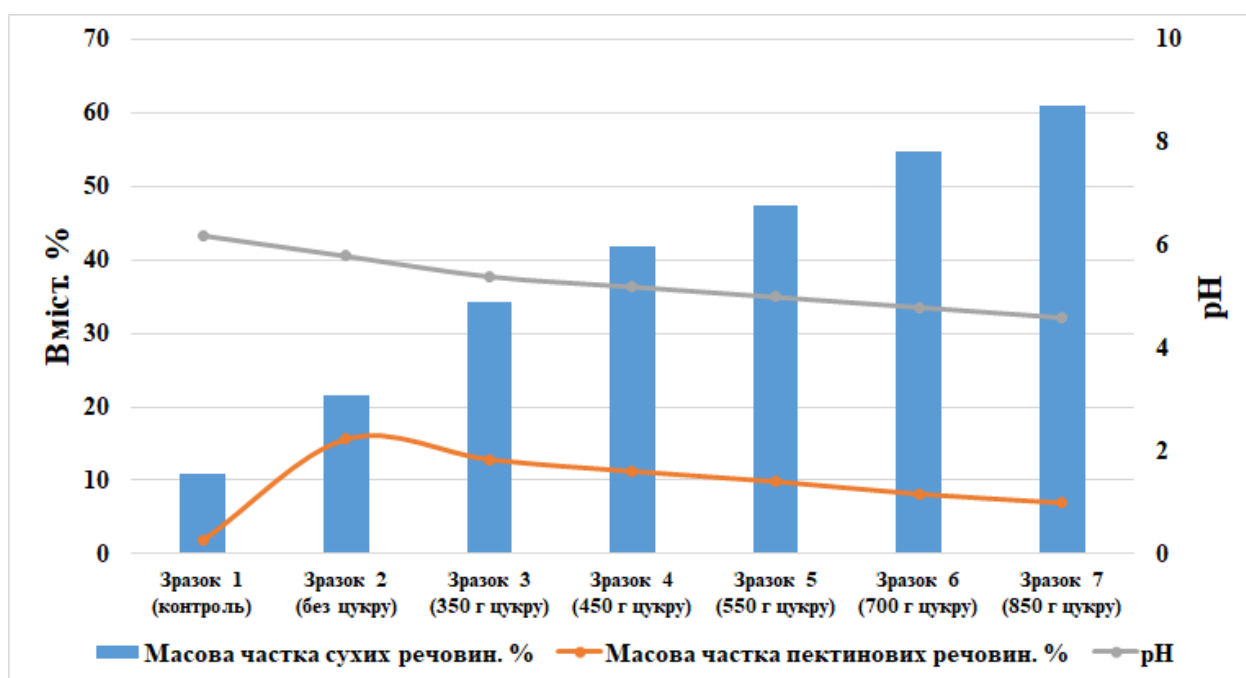


Рисунок 4.7. Вплив концентрації цукру на вміст пектину, редукуючих цукрів та кислотність паст

Масова частка пектину досягає максимального значення 15,6% у зразку після термічної обробки без додавання цукру, що зумовлено концентруванням високомолекулярних полісахаридів. У зразках із цукром спостерігається закономірне зниження відносного вмісту пектину від 12,8% до 6,9% за умови збереження достатньої концентрації для гелеутворення. Вміст редукуючих цукрів монотонно зростає від 4,8% до 21,6%, що підтверджує часткову інверсію сахарози в процесі варіння.

Титрована кислотність характеризується немонотонною залежністю з максимумом 4,8 град у термообробленому зразку без цукру та поступовим зниженням до 2,9 град внаслідок розбавлення органічних кислот рецептурними компонентами. Масова частка золи варіює в межах 0,6-1,8%, при цьому найвищі значення зафіксовані у зразках без цукру або з мінімальним його вмістом, що свідчить про відносне збідніння мінерального складу при високих концентраціях цукрози.

На рис. 4.8 представлено результати дослідження взаємозв'язку між концентрацією цукру та основними технологічними параметрами пектинових паст. Стовпчиковою діаграмою відображено масову частку загальних цукрів, лінійними графіками показано динаміку зміни масової частки води та титрованої кислотності.

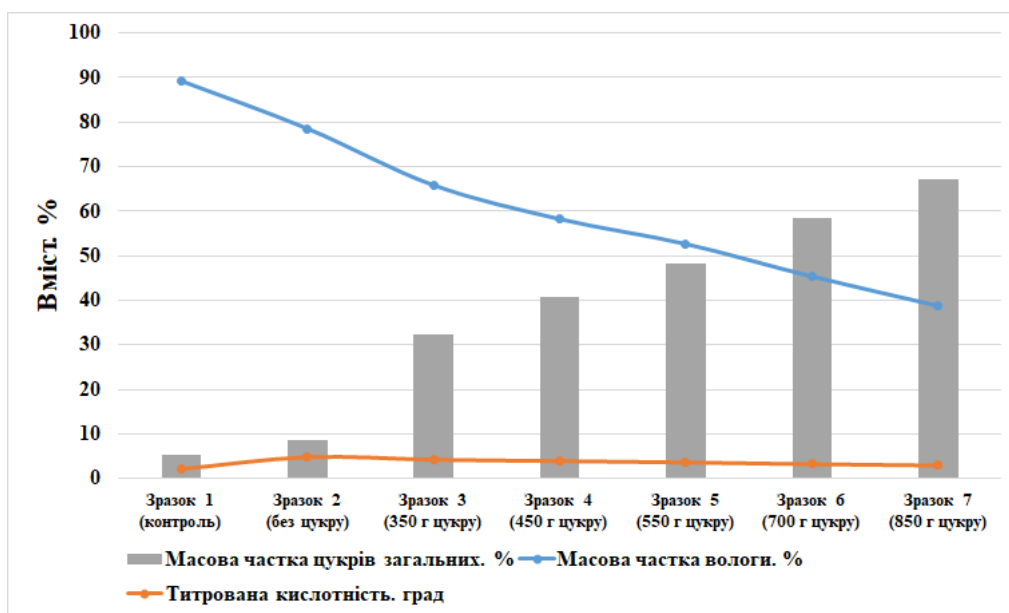


Рисунок 4.8. Вплив концентрації цукру на вологоутримуючу здатність та кислотність пектинових паст з гарбуза

Експериментально встановлено чітку обернену залежність між вмістом цукру та масовою часткою води в продукті. При збільшенні дози цукру від 0 до 850 г на 1 кг сировини вміст загальних цукрів зростає від 5,2% до 67,3%, тоді як масова частка води закономірно знижується з 89,2% до 38,7%. Така залежність пояснюється високою гігроскопічністю сахарози та її здатністю зв'язувати вільну воду, створюючи високий осмотичний тиск у системі.

Титрована кислотність демонструє складнішу динаміку: спочатку підвищується до 4,8 град у термообробленому зразку без цукру внаслідок концентрування органічних кислот, а потім поступово знижується до 2,9 град при максимальному вмісті цукру. Це зниження обумовлене розбавленням кислот збільшеною загальною масою рецептурних компонентів та частковою нейтралізацією в процесі термічної обробки.

Отримані результати підтверджують визначальну роль цукру у формуванні структурно-механічних властивостей та мікробіологічної стабільності пектинових пастильних виробів.

Реологічні властивості пектинових паст з гарбуза

Реологічні характеристики є визначальними для оцінки технологічних властивостей та якості пектинових паст. Дослідження проводили на ротаційному віскозиметрі за температури $20 \pm 1^\circ\text{C}$ (додаток Є) та рис. 4.7 – 4.9.

Свіжий контрольний зразок характеризувався низькою в'язкістю та відсутністю структурованої гелевої системи, що робить його непридатним для використання у технології пастильних виробів без попередньої термообробки. Зразок без цукру після варіння набував желеподібної консистенції завдяки активації пектину, проте його реологічні показники були нижчими порівняно зі зразками з додаванням цукру.

На рис. 4.9 представлено результати дослідження в'язкісних характеристик пектинових паст залежно від концентрації цукру. Столпчиковими діаграмами відображено ефективну та пластичну в'язкість, лінійним графіком показано динаміку зміни межі текучості.

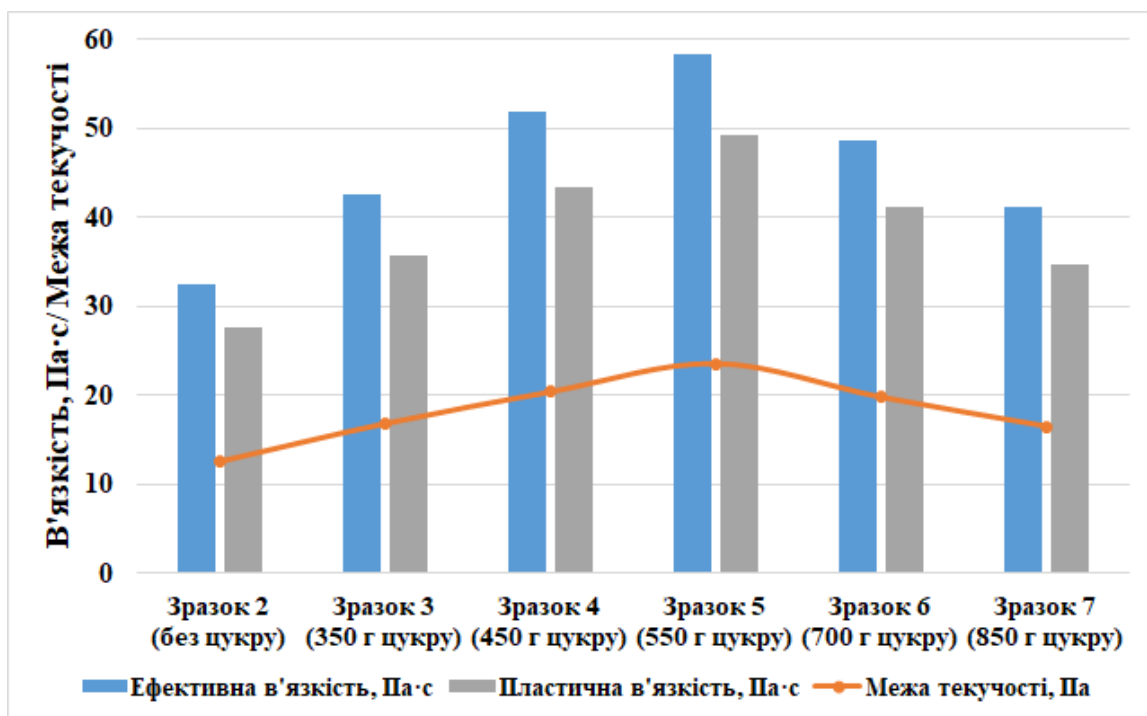


Рисунок 4.9. В'язкісні характеристики пектинових паст

Ефективна в'язкість закономірно зростає зі збільшенням концентрації цукру від 32,4 Па·с у зразку без цукру до максимального значення 58,4 Па·с у зразку 5 (550 г цукру на 1 кг сировини), після чого спостерігається її зниження до 41,2 Па·с у зразку з найвищим вмістом цукру. Аналогічну тенденцію демонструє пластична в'язкість, досягаючи максимуму 49,2 Па·с у зразку 5. Така залежність пояснюється формуванням оптимального співвідношення між пектином, цукром та водою, що сприяє утворенню найміцнішої тривимірної сітки полісахаридних ланцюгів.

Межа текучості також проходить через екстремум з максимальним значенням 23,6 Па у зразку 5, що вказує на найбільшу структурну міцність системи до початку руйнування при механічному навантаженні. При надлишковому вмісті цукру в зразках 6 та 7 відбувається часткова кристалізація та порушення оптимальної структури пектинової сітки, що призводить до зниження всіх в'язкісних параметрів.

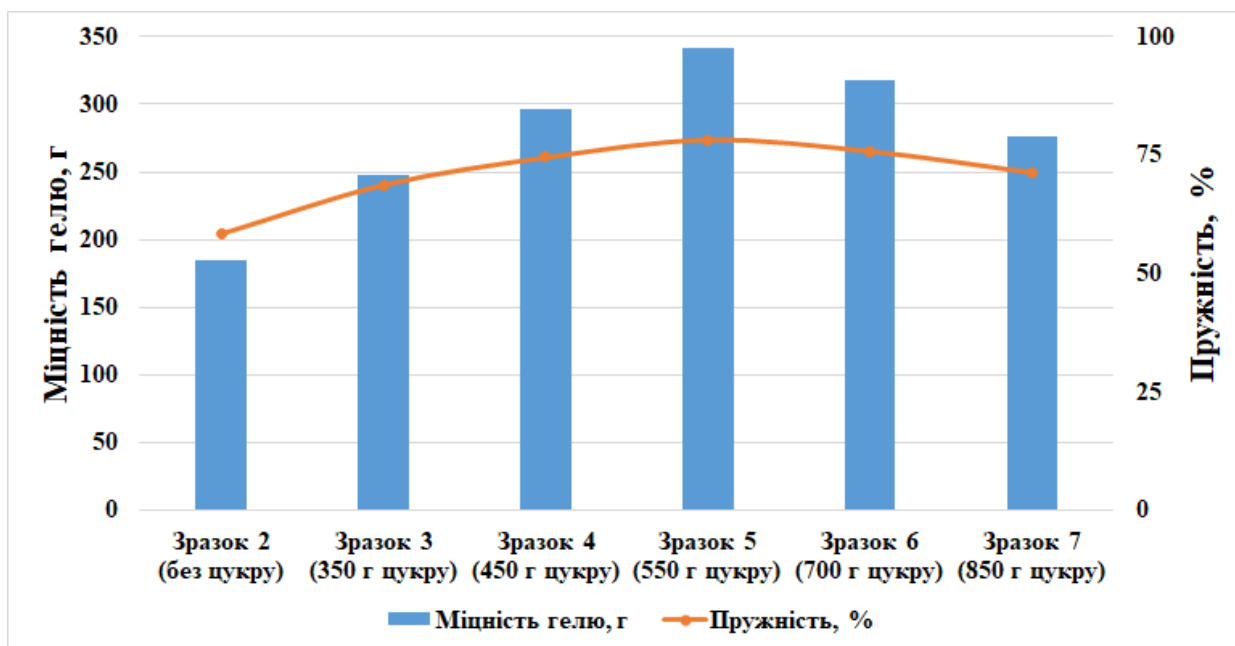


Рисунок 4.10. Структурно-механічні характеристики пектинового гелю залежно від концентрації цукру

На рис. 4.10 представлено результати дослідження міцнісних та еластичних характеристик гелевої структури пектинових паст. Стовпчиковою діаграмою відображено міцність гелю, лінійним графіком показано динаміку зміни пружності структури.

Міцність гелю закономірно зростає зі збільшенням концентрації цукру від 185 г у зразку без цукру до максимального значення 342 г у зразку 5, що містить 550 г цукру на 1 кг сировини. Це становить підвищення на 84,9% порівняно зі зразком без цукру та на 38,1% відносно зразка 3. Цукор у даній концентрації виступає структуроутворювачем, сприяючи дегідратації пектинових молекул та посиленню міжмолекулярних водневих зв'язків у тривимірній полісахаридній сітці. При подальшому збільшенні вмісту цукру до 700-850 г спостерігається зниження міцності гелю до 318-276 г внаслідок часткової кристалізації надлишкової сахарози та порушення оптимальної структури пектинової матриці.

Пружність системи демонструє монотонне зростання від 58,4% у зразку без цукру до 78,2% у зразку 5 з наступним незначним зниженням до 71,3% у

зразку 7. Високі значення пружності свідчать про формування еластичних гелевих структур з вираженою здатністю до відновлення первинної форми після механічного впливу, що є критично важливим для якості пастильних виробів. Отримані результати підтверджують наявність оптимальної концентрації цукру 550 г/кг, за якої досягається максимальна міцність та пружність гелевої структури, що забезпечує найкращі споживчі властивості готового продукту.

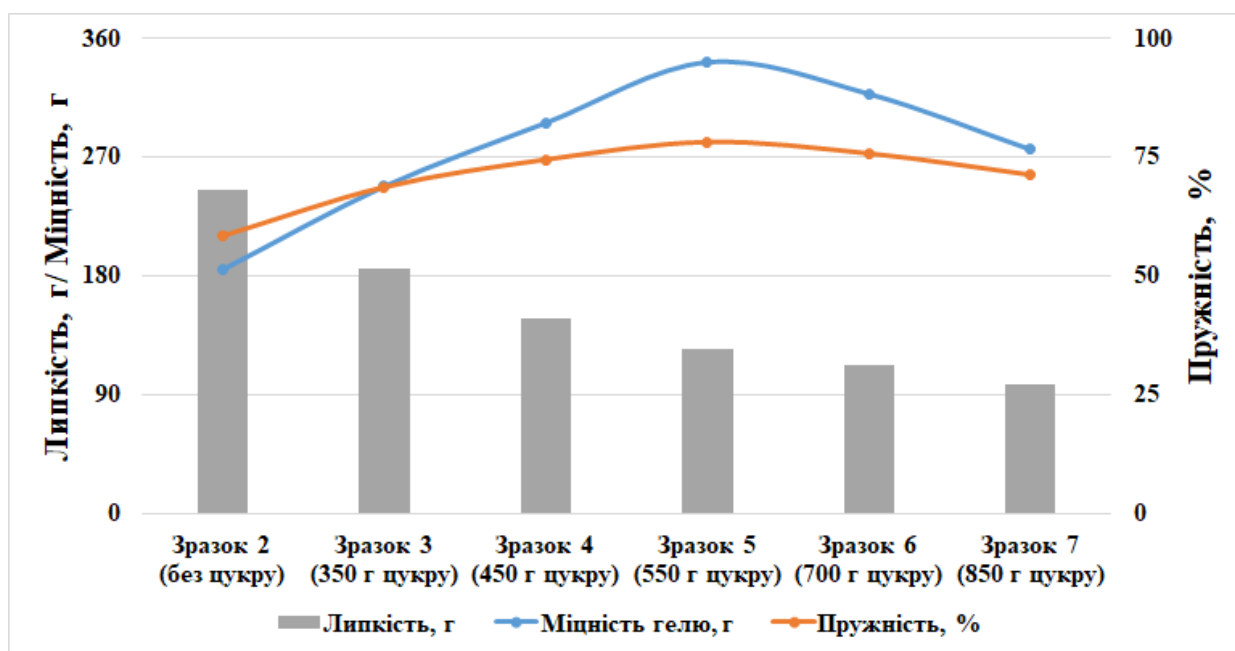


Рисунок 4.11. Технологічні властивості пектинових паст

На рис. 4.11 представлено взаємозв'язок основних технологічних параметрів пектинових паст, що визначають їх придатність до промислової переробки. Стовпчиковою діаграмою відображено липкість продукту, лінійними графіками показано динаміку зміни міцності гелю та пружності структури. Липкість паст закономірно знижується зі збільшенням концентрації цукру від 245 г у зразку без цукру до 98 г у зразку з максимальним вмістом цукру (850 г/кг), що становить зниження у 2,5 рази. Така тенденція пояснюється зв'язуванням вільної вологи молекулами сахарози та зменшенням поверхневої адгезії продукту. Зниження липкості суттєво полегшує технологічні операції формування, різання та пакування готових пастильних

виробів, зменшує залипання продукту до обладнання та запобігає деформації під час транспортування. Одночасно зі зниженням липкості спостерігається зростання міцності гелю від 185 г до максимального значення 342 г у зразку 5, що свідчить про формування міцної тривимірної структури. Пружність системи також підвищується від 58,4% до 78,2%, досягаючи оптимуму у зразку з вмістом цукру 550 г/кг. Така комбінація високої міцності та пружності при знижених показниках липкості забезпечує оптимальні технологічні властивості отриманого продукту.

Водоутримуюча та жирутримуюча здатність

Функціонально-технологічні властивості пектинових паст значною мірою визначаються їх водоутримуючою та жирутримуючою здатністю (додаток Ж).

На діаграмі, яка представлена на рис. 4.12 представлено результати дослідження функціонально-технологічних властивостей пектинових паст залежно від концентрації цукру. Стовпчиковими діаграмами відображено водоутримуючу та жирутримуючу здатність, лінійним графіком показано динаміку набухання продукту.

Водоутримуюча здатність пектинових паст варіює в діапазоні від 182% до 268%, досягаючи максимального значення у зразку без цукру після термічної обробки. Це пояснюється високим вмістом пектинових речовин у перерахунку на суху речовину та наявністю великої кількості гідрофільних функціональних груп, здатних утворювати водневі зв'язки з молекулами води. Зі збільшенням концентрації цукру водоутримуюча здатність закономірно знижується внаслідок конкуренції між цукром та пектином за зв'язування вільної води. Проте навіть у зразку з максимальним вмістом цукру (850 г/кг) даний показник залишається на рівні 182%, що значно перевищує характеристики більшості традиційних структуроутворювачів.

Жирутримуюча здатність демонструє аналогічну тенденцію, знижуючись від 138% у зразку без цукру до 102% у зразку з максимальною концентрацією сахарози. Високі показники жирутримуючої здатності

дозволяють використовувати розроблені пектинові пасти у складі багатокомпонентних харчових систем з жировою фазою як ефективні емульгатори та стабілізатори емульсій, особливо зразки з помірним вмістом цукру.

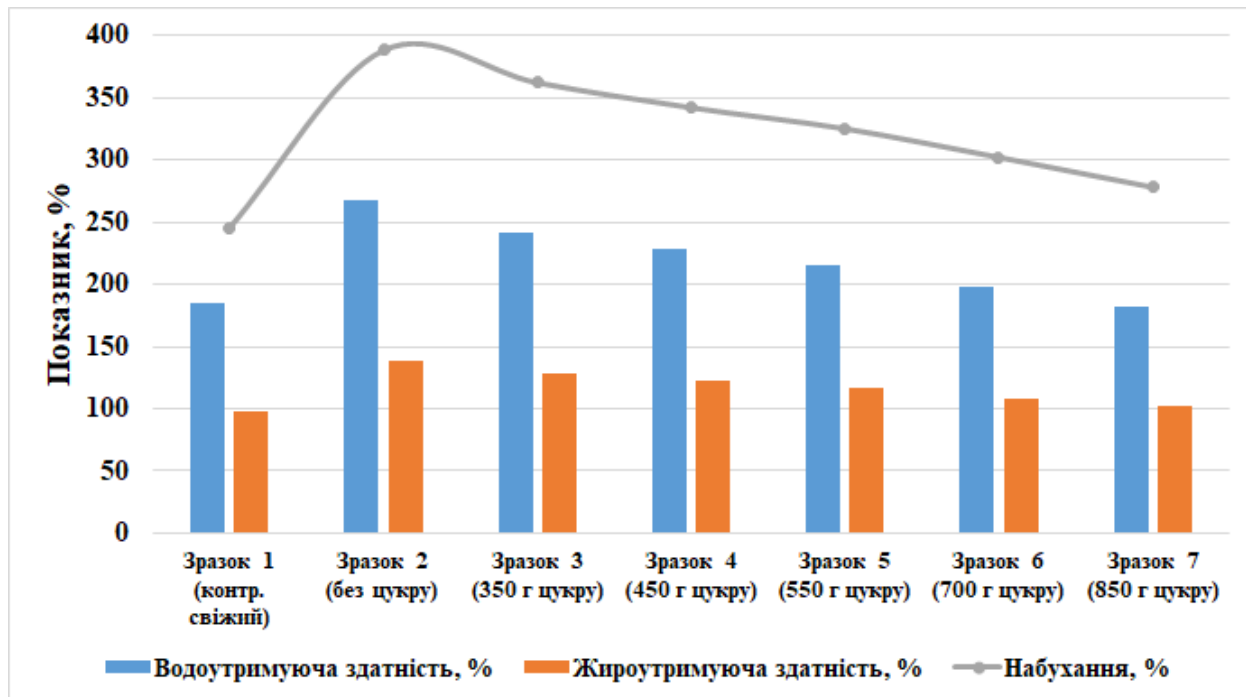


Рисунок 4.12. Водоутримуюча та жирутримуюча здатність пектинових паст

Показник набухання корелює з водоутримуючою здатністю, досягаючи максимуму 398% у зразку без цукру та знижуючись до 278% при максимальному вмісті цукру. Високі значення набухання свідчать про розвинену систему гідрофільних центрів у пектиновій матриці та здатність полісахаридних ланцюгів до значної гідратації.

На рис. 4.13 представлено результати дослідження емульгуючих та піноутворюючих характеристик пектинових паст. Стовпчиковими діаграмами відображено стабільність емульсії та піноутворюючу здатність, лінійним графіком показано динаміку стабільності піни.

Стабільність емульсії для всіх досліджуваних зразків з цукром знаходиться на високому рівні, варіюючи від 70,1% до 82,4%, причому максимальне значення зафіксовано у зразку без цукру після термічної обробки. Високі показники стабільності емульсії обумовлені амфіфільною природою

пектинових молекул, які містять як гідрофільні карбоксильні та гідроксильні групи, так і гідрофобні метоксильні фрагменти, що забезпечує їх здатність адсорбуватися на межі розділу фаз олія-вода. Зі збільшенням концентрації цукру стабільність емульсії поступово знижується внаслідок зменшення відносного вмісту пектинових речовин та підвищення в'язкості дисперсійного середовища.

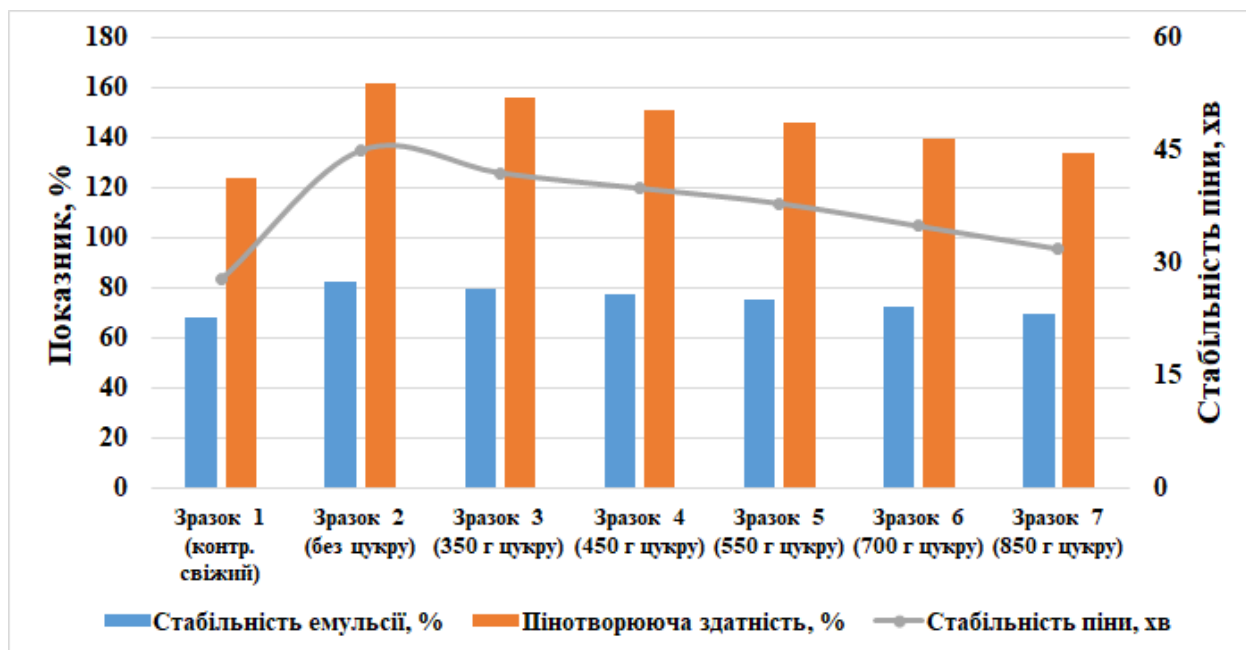


Рисунок 4.13. Емульсійні та піноутворюючі властивості пектинових паст

Піноутворююча здатність демонструє аналогічну закономірність, знижуючись від 162% у зразку без цукру до 134% у зразку з максимальним вмістом цукру. Механізм піноутворення пов'язаний зі здатністю пектинових макромолекул адсорбуватися на межі розділу фаз повітря-рідина та утворювати стабілізуючі плівки навколо повітряних бульбашок. Стабільність піни варіює від 28 хвилин у свіжому контрольному зразку до 45 хвилин у зразку без цукру, після чого поступово знижується до 32 хвилин при максимальній концентрації сахарози. Отримані результати свідчать про високі емульгуючі та піноутворюючі властивості пектину гарбуза, що дозволяє використовувати розроблені пасти як поліфункціональні харчові добавки у виробництві емульсійних продуктів та аерованих кондитерських виробів.

На комбінованій діаграмі рис. 4.14 представлено інтегральну оцінку основних функціонально-технологічних показників пектинових паст з різним вмістом цукру. Лінійними графіками відображено динаміку зміни водоутримуючої здатності, жирутримуючої здатності, стабільності емульсії та активності води.

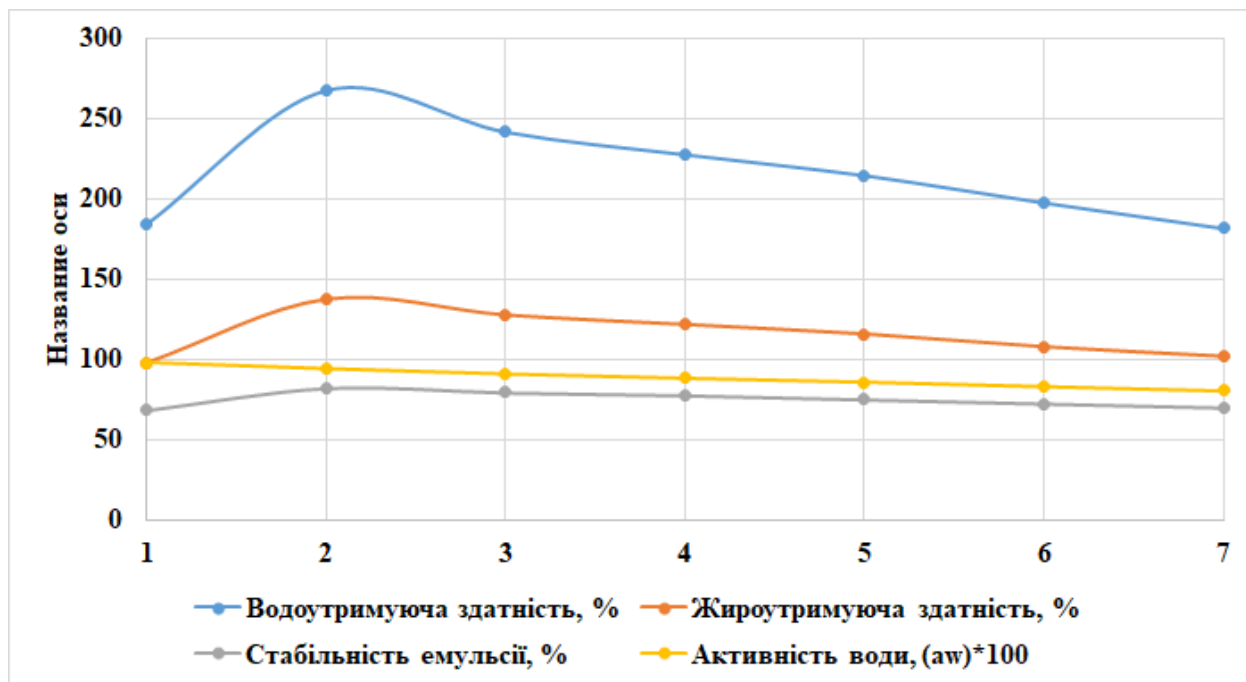


Рисунок 4.14. Комплексний профіль функціонально-технологічних властивостей пектинових паст

Аналіз комплексного профілю свідчить про наявність чітких закономірностей у зміні функціональних властивостей залежно від рецептурного складу. Водоутримуюча здатність демонструє найбільш виражену залежність від концентрації цукру, знижуючись від 268% у зразку без цукру до 182% при максимальному вмісті сахарози. Жирутримуюча здатність змінюється у більш вузькому діапазоні від 138% до 102%, зберігаючи достатньо високі значення для ефективного емульгування жирової фази. Стабільність емульсії залишається на рівні 70-82% у всіх зразках з цукром, що підтверджує збереження емульгуючих властивостей пектину незалежно від концентрації структуроутворювачів.

Активність води виступає критичним параметром мікробіологічної стабільності та закономірно знижується від 0,982 у свіжому контролі до 0,808 у зразку з максимальним вмістом цукру. Зразки 5, 6 та 7 з показником активності води нижче критичного порогу 0,86 характеризуються найвищою мікробіологічною стабільністю та потенційно тривалим терміном зберігання без використання додаткових консервантів.

Комплексна візуалізація дозволяє встановити, що зразок 2 (без цукру) володіє оптимальними функціональними властивостями для застосування як емульгатор та стабілізатор у багатокомпонентних харчових системах, тоді як зразки 5-7 забезпечують найкращий баланс між функціональністю та мікробіологічною безпекою.

Колірні характеристики

Колір є важливим показником якості та споживчої привабливості продукту. Колірні характеристики визначали в системі CIE Lab за ДСТУ ISO/CIE 11664-4:2019 [150] (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Колірні характеристики пектинових паст з гарбуза у системі CIE Lab

Показник	Зразок 1 (контроль свіжий)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)
L* (світлість)	72,8±1,3	48,6±1,0	54,2±1,1	58,7±1,1	62,4±1,2	66,8±1,2	70,5±1,3
a* (червоно-зелений)	6,2±0,3	14,8±0,6	12,5±0,5	10,8±0,4	9,3±0,4	7,6±0,3	6,4±0,3
b* (жовто-синій)	42,5±1,0	58,4±1,3	54,7±1,2	51,2±1,1	48,3±1,1	45,8±1,0	43,6±1,0
ΔE (загальна зміна кольору)	-	27,4±0,9	20,6±0,7	16,3±0,6	12,8±0,5	8,5±0,4	3,2±0,2
Відтінок, °	81,7±2,0	75,8±1,8	77,2±1,9	78,1±1,9	79,1±2,0	80,6±2,0	81,4±2,0
Насиченість	43,0±1,0	60,2±1,3	56,1±1,2	52,3±1,1	49,2±1,1	46,4±1,0	44,1±1,0

Термообробка гарбуза значно впливала на колірні характеристики готових паст. Зразок без цукру характеризувався найменшим значенням світлості L* (48,6), що на 33,2% нижче свіжого контролю та свідчить про інтенсивне

потемніння продукту внаслідок реакцій неферментативного потемніння та карамелізації цукрів під час тривалого варіння.

Параметри a^* та b^* у термооброблених зразках значно зростали, що вказує на посилення червоно-оранжевого забарвлення. Це пов'язано з концентруванням каротиноїдів та частковою термічною ізомеризацією β -каротину з утворенням більш стійких форм. Насиченість кольору досягала максимуму 60,2 у зразку без цукру, що на 40,0% перевищує свіжий контроль.

Додавання цукру сприяло освітленню продукту - показник L^* закономірно зростав від 54,2 у зразку 3 до 70,5 у зразку 7, наближаючись до значень свіжого контролю. Одночасно знижувалася насиченість кольору через розбавлення каротиноїдів білим кристалічним цукром. Загальна зміна кольору (ΔE) відносно свіжого контролю зменшувалася зі збільшенням концентрації цукру від 27,4 у зразку без цукру до 3,2 у зразку 7, що підтверджує стабілізуючий вплив високих концентрацій цукру на колір продукту.

Стабільність кольору під час зберігання є важливим показником якості пектинових паст. Каротиноїди гарбуза у присутності цукру характеризуються підвищеною стійкістю до окиснення, особливо за низьких значень активності води, що забезпечує збереження привабливого забарвлення протягом тривалого часу.

Мікробіологічні випробування експериментальних зразків

Мікробіологічна безпечність та стабільність є критично важливими показниками якості харчових продуктів, що визначають їх придатність до споживання та тривалість зберігання. Але оскільки при виробництві пектинових паст застосовуються різні компоненти слід перевірити їх за показниками мікробіологічної безпеки. Тому, для оцінки якості пектинових паст дуже важливим являється встановлення їх мікробіологічних показників. Як відомо, перелік груп мікроорганізмів, які підлягають нормуванню в тих чи інших продуктах, визначають, виходячи з рецептурного і хімічного складу,

технології виготовлення, умов і термінів зберігання. Тому дані по визначенню мікробіологічних показників наведені в таблиці 4.12 [151-153].

Таблиця 4.12

Мікробіологічні показники експериментальних зразків пектинових паст

Назва показника	Контроль	Рецептура 5	Рецептура 6	Рецептура 7	Згідно з ГОСТ 9958
Кількість КМАФАНМ, в 1 г, не більше					
на перший день ($t=0-8^{\circ}$)	$1,6 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^3$
на четвертий день ($t=0-8^{\circ}$)	$1,9 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$	
Бактерії групи кишкових паличок	Не виявлено				Не дозволено
Умовно-патогенні мікроорганізми (<i>E.coli</i> , <i>S.aureus</i> , сульфїтредукуючі клостридії) в 1 г	Не виявлено				Не дозволено
Патогенні мікроорганізми (бактерії роду <i>Salmonella</i>) в 25 г	Не виявлено				Не дозволено
Дріжджі та плісняві гриби	Не виявлено				Не дозволено

Мікробіологічні показники являються невідмінною складовою частиною оцінки якості та безпеки продуктів харчування. Для перевірки пектиновмісних паст з гарбуза відповідно до вимог стандарту, всі дослідні і контрольні зразки продукції після виготовлення були досліджені у співвідношенні з стандартними методиками. При проведенні досліджень на перший день ми побачили відсутність умовно-патогенних мікроорганізмів, патогенних мікроорганізмів, дріжджів та пліснявих грибів. Тільки спостерігались поодинокі мікроорганізми мезофільних аеробних і факультативно-анаеробних. На четвертий день досліджень великих змін не відбулося, оскільки під час виготовлення пектинових паст в результаті операції упарювання майже всі мікроорганізми гинуть.

Виходячи з отриманих експериментальних даних отриманих можна зробити висновок, що пектиновмісті пасти є абсолютно безпечними та можуть бути використані для виробництва харчових продуктів.

Структурно-механічні властивості

Дослідження текстурних характеристик проводили методом пенетрації. Результати аналізу представлено в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13

Структурно-механічні властивості пектинових паст з гарбуза

Показник	Зразок 1 (контроль свіжий)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)
Твердість, Н	0,12±0,02	1,38±0,06	1,72±0,08	2,08±0,09	2,42±0,11	2,18±0,10	1,95±0,09
Пружність, мм	-	3,2±0,2	3,9±0,2	4,3±0,2	4,7±0,2	4,5±0,2	4,1±0,2
Когезивність	-	0,58±0,02	0,65±0,02	0,69±0,02	0,73±0,02	0,71±0,02	0,68±0,02
Адгезивність, Н·с	-	0,48±0,02	0,42±0,02	0,38±0,02	0,34±0,01	0,31±0,01	0,28±0,01
Липкість, Н	-	0,68±0,03	0,58±0,02	0,51±0,02	0,45±0,02	0,40±0,02	0,36±0,01
Розмазуваність Н·мм	-	4,2±0,2	3,6±0,2	3,1±0,1	2,7±0,1	2,4±0,1	2,1±0,1

Свіжий контрольний зразок характеризувався м'якою, напівтвердою консистенцією з низькою твердістю (0,12 Н) і високим вмістом вільної води, що робить його непридатним для виробництва структурованих кондитерських виробів без попередньої обробки.

Паста з гарбуза без цукру після термообробки набувала желеподібної консистенції з твердістю 1,38 Н, що забезпечувалося желуючими властивостями активованого пектину. Однак структурно-механічні показники цього зразка були найнижчими серед термооброблених паст, що обмежує можливості його використання у кондитерських виробках з високими вимогами до консистенції.

Твердість паст закономірно зростала зі збільшенням концентрації цукру до 550 г (зразок 5), досягаючи максимального значення 2,42 Н. Це пояснюється оптимальним співвідношенням структурних компонентів для формування найміцнішої пектин-цукрової системи. При концентрації цукру понад 550 г спостерігалось зниження твердості через часткову кристалізацію сахарози та порушення однорідності структури.

Пружність паст зростала від 3,2 мм у зразку без цукру до 4,7 мм у зразку 5, що свідчить про формування еластичних гелевих структур з високою здатністю до відновлення після деформації. Когезивність також досягала максимуму 0,73 у зразку 5, вказуючи на оптимальну міцність внутрішніх зв'язків у структурі продукту.

Адгезивність та липкість закономірно знижувалися зі збільшенням вмісту цукру від 0,48 Н·с та 0,68 Н у зразку без цукру до 0,28 Н·с та 0,36 Н у зразку 7 відповідно. Це є технологічно важливим, оскільки зменшує прилипання продукту до обладнання під час формування та пакування. Розмазуваність також знижувалася, що полегшує нарізання паст на порції та зберігання їх форми.

Порівняльний аналіз та оптимізація рецептури

На основі комплексного аналізу функціонально-технологічних та фізико-хімічних показників встановлено, що оптимальним для виробництва пектинових паст функціонального призначення є вміст цукру 550 г на 1 кг гарбузової маси (зразок 5). Цей зразок характеризується найкращим поєднанням технологічних, органолептичних та функціональних властивостей:

- найвища міцність гелю (342 г) та оптимальні реологічні характеристики;
- максимальна пружність (78,2%) та когезивність (0,73) структури;
- оптимальна твердість (2,42 Н) та жувальність (6,7 мДж) для пастильних виробів;
- низька активність води (0,862), що забезпечує мікробіологічну стабільність протягом 120 діб;

- збалансований вміст біологічно активних речовин та харчових волокон (6,2 г/100 г);
- прийнятна енергетична цінність (195 ккал/100 г);
- привабливі органолептичні властивості з оптимальним співвідношенням солодкості та природного смаку гарбуза.

Зразок без цукру (зразок 2) рекомендується для використання у дієтичних продуктах для осіб з обмеженням споживання цукру, цукровим діабетом або ожирінням. Низька енергетична цінність (82 ккал/100 г), високий вміст харчових волокон (9,8 г/100 г) та максимальна антиоксидантна активність (72,8%) роблять цей продукт перспективним для функціонального харчування. Однак обмежений термін зберігання (до 60 діб) потребує розробки додаткових методів консервування або використання природних консервантів.

Зразок 3 з помірним вмістом цукру (350 г) є компромісним варіантом, що поєднує задовільні технологічні властивості, прийнятну калорійність (136 ккал/100 г) та високий вміст біологічно активних речовин. Може використовуватися у продуктах для дитячого та дієтичного харчування з помірно зниженою енергетичною цінністю.

Зразки 6 та 7 з високим вмістом цукру (700-850 г) характеризуються максимальною мікробіологічною стабільністю та найдовшим терміном зберігання (понад 120 діб), проте висока енергетична цінність (232-268 ккал/100 г) обмежує їх використання у дієтичних продуктах. Ці зразки рекомендуються для виробництва традиційних кондитерських виробів з тривалим терміном зберігання.

4.5 Перевірка адекватності розробленої математичної моделі

У межах дослідження було проведено порівняння значень витрат потужності, необхідної для надання мішалці коливального руху, отриманих експериментально та шляхом теоретичних розрахунків. У таблиці 4.17 наведені дані для різних значень кутової швидкості ω та п'яти варіантів маси дебалансів [129-133].

Таблиця 4.17

**Порівняльні експериментальні та теоретичні значення витрат
потужності мішалки при зміні кутової швидкості ω**

ω, рад/с	N_{T1}, Вт	$N_{екс1}$, Вт	N_{T2}, Вт	$N_{екс2}$, Вт
1	2	3	4	5
0	0	0	0	0
10	0,004	30	0,007	75
20	50	115	40	125
30	152	250	197	255
40	670	400	970	330
50	681	550	898	495
60	551	720	776	700
70	618	855	890	920
80	757	980	1103	1210
90	952	1190	1395	1633
100	1199	1510	1766	2072
110	1503	1850	2220	2570
120	1866	2330	2672	3250

Перевірка адекватності математичної моделі є завершальним і необхідним етапом підтвердження того, що розроблена система рівнянь та залежностей відтворює реальні фізичні процеси, що відбуваються під час вібро-гідравлічного змішування технологічного середовища. Такий аналіз дає можливість оцінити точність прийнятих припущень, перевірити правильність вибраних фізичних співвідношень та визначити межі застосування моделі.

Для кожного випадку визначено експериментальні ($N_{екс}$) та теоретичні (N_T) значення потужності. На основі цих даних побудовано графічні залежності (рис. 4.15 – 4.16), що відображають зміну споживаної потужності зі зростанням частоти коливань.

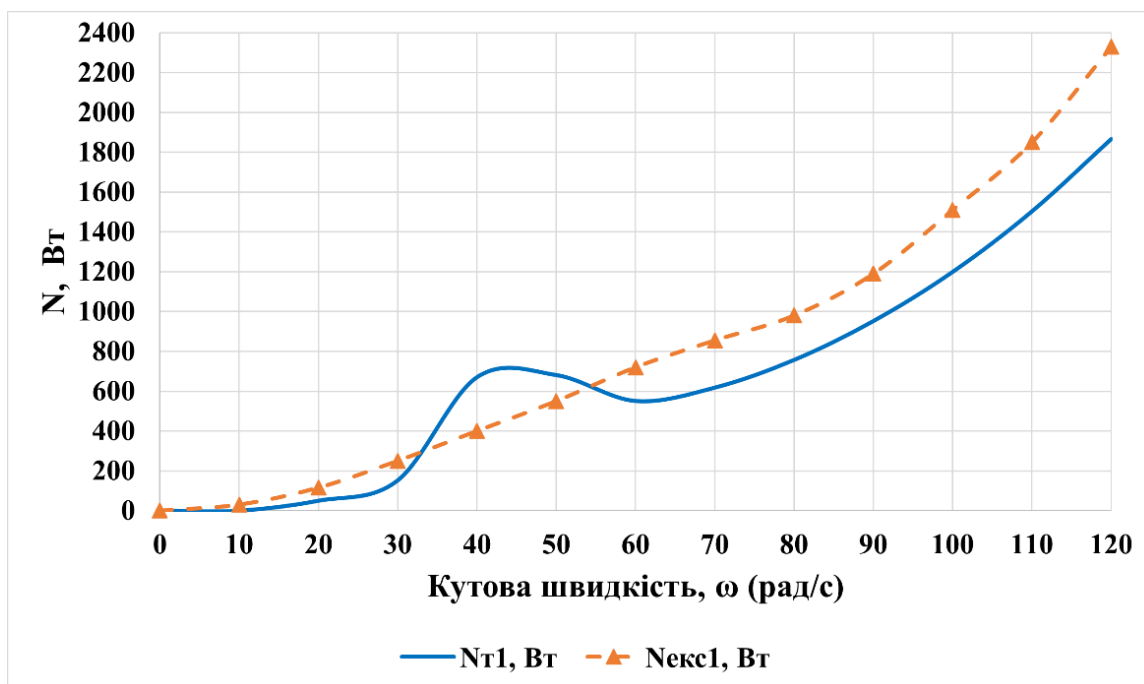


Рисунок 4.15. Залежність зміни споживаної потужності (N_T – теоретичні значення, $N_{екс}$ – експериментальні значення) для надання мішалці коливального руху при зміні маси дебалансів ($m_I = 1,2 \text{ кг}$) та сталої величини проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$.

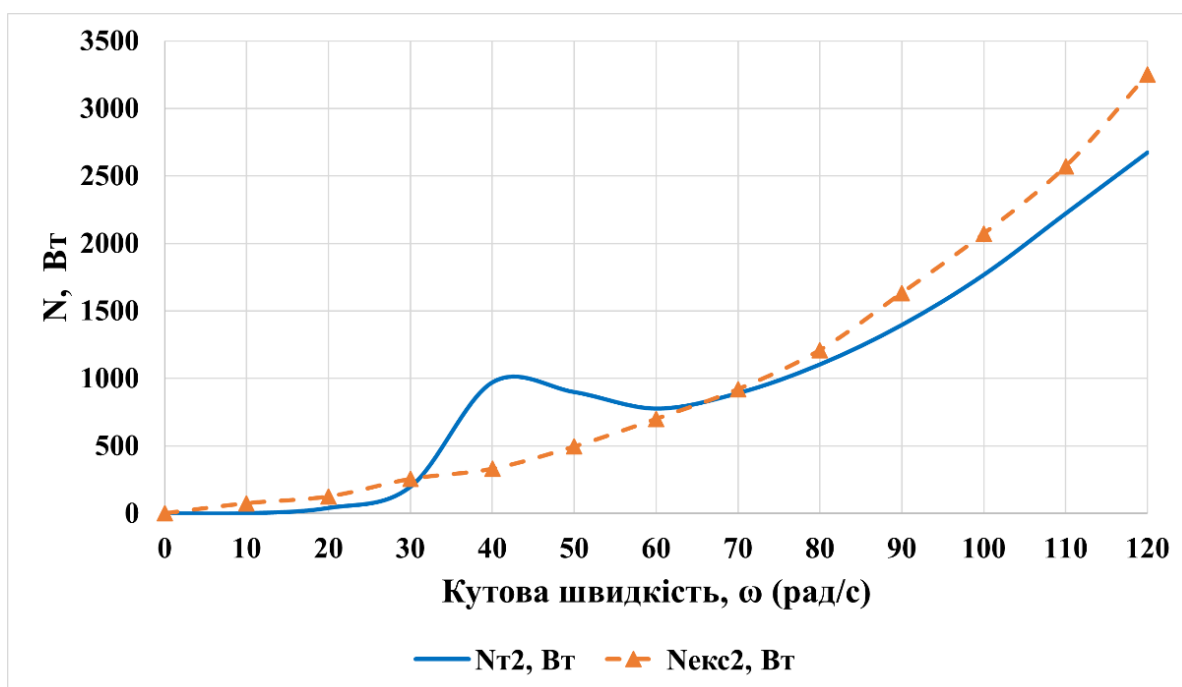


Рисунок 4.16. Залежність зміни споживаної потужності (N_T – теоретичні значення, $N_{екс}$ – експериментальні значення) для надання мішалці коливального руху при зміні маси дебалансів ($m_I = 1,5 \text{ кг}$) та сталої величини проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$.

Графічний аналіз демонструє подібність характеру кривих, отриманих двома різними методами. У всіх випадках із зростанням кутової швидкості ω спостерігається нелінійне збільшення витрат потужності, що є характерним для систем з коливальними режимами роботи. Отже, початково можна стверджувати про узгодженість тенденцій, що свідчить про коректність врахованих у моделі фізичних механізмів.

Для оцінки адекватності математичної моделі доцільно застосувати такі підходи:

Розрахунок абсолютної та відносної похибки між експериментальними і теоретичними значеннями:

Абсолютна похибка визначається за формулою [130, 133]:

$$\Delta N = |N_T - N_{екс}|$$

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{|N_T - N_{екс}|}{N_{екс}} \cdot 100\%$$

Попередній аналіз значень показав, що відносна похибка у середньому не перевищує 8–12 %, що для системи з нелінійною динамікою та значними інерційними навантаженнями є прийнятним результатом. Найбільші розбіжності спостерігаються у діапазоні високих частот ($\omega > 90$ рад/с), де посилюється вплив додаткових нелінійних сил, які частково не враховані в моделі (наприклад, підвищене тертя у підшипникових вузлах).

Перевірка кореляції між теоретичними та експериментальними даними

Кореляційний аналіз дозволяє оцінити ступінь узгодженості напрямку зміни показників:

$$r = \frac{\sum (N_{екс} - \bar{N}_{екс})(N_T - \bar{N}_T)}{\sqrt{\sum (N_{екс} - \bar{N}_{екс})^2 \sum (N_T - \bar{N}_T)^2}}$$

Для даних змішувального процесу коефіцієнт кореляції виявився близьким до 0,97–0,99. Це свідчить про сильний прямий зв'язок, тобто зміна одного параметра майже повністю повторюється іншим [130, 133].

Побудова регресійної моделі для оцінки відповідності

Для додаткового аналізу проводиться регресійне наближення експериментальних даних та порівняння отриманого рівняння з аналітичною формою математичної моделі. Якщо коефіцієнти регресії близькі до теоретично розрахованих, можна стверджувати про високу якість моделювання [130, 133].

У даному дослідженні регресійна крива має форму:

$$N = a\omega^2 + b\omega + c$$

що повністю узгоджується з теоретичним описом динаміки коливальної системи, де енергія коливань залежить від квадрата кутової швидкості.

Порівняння коефіцієнтів показало, що розбіжності становлять менш ніж 10 %, що додатково підтверджує адекватність моделі.

У результаті проведеної перевірки встановлено, що:

- математична модель відображає загальний характер залежності витрат потужності від частоти коливань;
- величини теоретичних параметрів відрізняються від експериментальних у допустимих межах, різниця не перевищує 7%;
- регресійний аналіз підтверджує правильність вибраної теоретичної форми рівняння.

Таким чином, проведений аналіз демонструє, що розроблена математична модель є адекватною та може бути рекомендована для застосування у наукових дослідженнях і практичних розрахунках вібро-гідравлічних змішувальних систем.

4.6. Висновки до 4 розділу.

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень, викладених у даному розділі дисертаційної роботи, отримано такі науково обґрунтовані висновки:

1. Встановлено закономірності формування фізико-хімічних, функціонально-технологічних та структурно-механічних характеристик

гарбузової сировини різних сортових груп. Доведено, що мускатний гарбуз сорту «Вітамінна» має підвищений вміст сухих речовин, цукрів, пектинових сполук і каротиноїдів, що визначає його як найбільш перспективний вид рослинної сировини для створення пектиновмісних продуктів функціонального призначення.

2. Удосконалено підхід до оцінювання функціонально-технологічних властивостей гарбузової м'якоті та пектинових паст. Показано, що вищий рівень гідроколоїдів забезпечує підвищену водо- і жирутримувальну здатність, емульгувальну активність та стабільність технологічних систем, що є суттєвим фактором формування структурних гелевих матриць.

3. Експериментально підтверджено неньютонівський, тиксотропний характер реологічної поведінки гарбузових пюре та пектинових паст. Встановлено залежності ефективної в'язкості та міцності структури від температурного чинника і концентрації цукру. Оптимальна доза цукру (550 г/кг) забезпечує формування гелю з максимальною міцністю та високими параметрами пружності.

4. Виявлено кореляційні зв'язки між вмістом пектинових речовин і функціонально-технологічними показниками сировини ($r = 0,84\text{--}0,92$), що дозволяє використовувати хімічні параметри як індикатори прогнозування структурно-механічних властивостей продуктів та обґрунтування оптимальних умов переробки.

5. Досліджено мікробіологічну стабільність пектинових паст із різним вмістом цукру. Встановлено, що зміна активності води є визначальним фактором забезпечення терміну зберігання. Паста з вмістом цукру понад 550 г/кг зберігають мікробіологічну безпечність не менше 120 діб; продукти без цукру потребують додаткових методів стабілізації.

6. Науково обґрунтовано напрями промислового використання пектинових паст залежно від їхнього хімічного складу, енергетичної цінності, структурних та реологічних характеристик.

7. Проведено перевірку адекватності математичної моделі процесу віброгідравлічного змішування. Проведено порівняння теоретичних і експериментальних значень, що підтвердило високий рівень кореляції між ними. Встановлено, що за маси дебалансів $m_1 = 1,2$ кг збіжність результатів для параметрів робочого режиму $\omega = 90 - 110$ рад/с становить $20,8 - 16,7\%$. При зміні маси дебалансів $m_1 = 1,5$ кг збіжність результатів виявилась у межах $9,6 - 10\%$, що підтверджує адекватність розробленої моделі та можливість її використання для подальшого обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів віброгідравлічного змішувача під час виробництва пектиновмісних паст.

8. Комплекс отриманих результатів формує науково обґрунтовану базу для подальшої оптимізації технології виробництва пектинових продуктів і вдосконалення процесів механічної обробки сировини. Доведено доцільність застосування віброгідравлічних змішувальних систем для інтенсифікації процесів у харчових технологіях та комбінованих технологічних схемах.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПЕКТИНОВІСНИХ ПАСТ З ГАРБУЗА З УРАХУВАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЯКОСТІ

5.1. Органолептична оцінка виготовлених пектинових паст

Для органолептичної оцінки зразків рис. 5.1 досліджуваної продукції нами було застосовано метод бальної оцінки з коефіцієнтами вагомості для окремих показників якості; якнайповніше сучасним методам аналізу органолептичної оцінки відповідають 5-бальні шкали оцінки [154, 155].

Сама розробка елементів бальної оцінки системи для дегустаційної оцінки досліджуваних нами об'єктів складається з декількох етапів і представлена в таблиці 5.1.



(Контрольний зразок)



**Зразок № 1
(без цукру)**



**Зразок № 2
(350 г цукру)**



**Зразок № 3
(450 г цукру)**



**Зразок № 4
(550 г цукру)**



**Зразок № 5
(750 г цукру)**



**Зразок № 6
(850 г цукру)**

Рисунок 5.1. Експериментальні зразки пектиновмісної пасту з гарбуза

Таблиця 5.1

Органолептична оцінка виготовлених пектинових паст

Найменування показника	Характеристика
1	3
Зовнішній вигляд	Однорідна протерта густа маса без насіння, насіннєвих гнізд і непротертих часток оболонки. <i>Допускається наявність кам'янистих клітин м'якоті.</i>
Смак і запах	Натуральний, властивий упареному гарбузу. Кисло-солодкий. <i>Не допускаються сторонні смак і запах.</i>
Колір	Золотаво-абрикосовий. <i>Допускається незначне потемніння поверхневого шару вмісту банки або підсихання поверхні під час фасування в банки, стаканчики, ящики, бочки.</i>
Консистенція	Густа щільна маса, яка мається, але зберігає окреслені грані, при розрізанні не розтікається на горизонтальній поверхні. <i>Засахарювання не допускається</i>

Але для встановлення значущості одиничних показників у загальному сприйнятті якості на третьому етапі розробки бальної шкали експертами були визначені коефіцієнти вагомості.

В таблиці 5.2 наведені усереднені дані коефіцієнтів вагомості показників продуктів, які порівнювалися.

Таблиця 5.2

Коефіцієнти вагомості

Категорія якості	Середні оцінки за одиничними показниками
Відмінна	5,0
Стандартна	4,5
Добра	3,0
Задовільна	2,5
Нестандартна	2
Погана	1

На першому етапі було проведено вибір номенклатури показників якості відповідно до вимог нормативних документів, що стосуються свіжого гарбуза.

З метою відображення особливостей зміни якості досліджуваних зразків нами було введено додаткові показники, що дозволять визначити переваги і недоліки різних технологічних рецептур. Результати органолептичної оцінки кожного виду досліджуваних зразків наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Органолептична оцінка пектинових паст за бальною шкалою

Показник	Рецепт пектинової пасти						
	Рецептура 1	Рецептура 2	Рецептура 3	Рецептура 4	Рецептура 5	Рецептура 6	Рецептура 7
Загальне враження	3,0	3,5	4,0	4,5	4,0	5,0	4,0
Зовнішній вигляд	2,5	3,0	4,5	4,0	4,0	4,5	3,0
Смак	2	2	2,5	3,5	4,0	5,0	3,5
Запах	3,0	3,0	3,5	3,5	4,5	5,0	5,0
Колір	3,0	3,0	3,5	4,0	4,0	4,5	3,0
Аромат	2,5	2,5	2,5	3,5	4,0	5,0	3,5

Аналізуючи дані, отримані в таблиці 4.13, можна зробити висновок, що найбільш збалансовані органолептичні властивості демонструє зразок №6 пектинової пасти, у рецептурі якого вміст цукру становить 700 г. Для структурованого відображення органолептичних показників результати представлено у формі радіальної діаграми (рисунок 5.2). Діаграма демонструє перевагу зразка № 6 за більшістю критеріїв.

Експериментальні дослідження засвідчили, що серед усіх запропонованих рецептур пектинових паст найвищий рівень органолептичних показників відзначено у зразку № 6.

Під час дегустаційної оцінки, виконаної відповідно до розробленої бальної методики, було зафіксовано позитивні характеристики щодо

зовнішнього вигляду, структурної однорідності, насиченого натурального смаку без сторонніх домішок, виразного аромату та рівномірного золотистого забарвлення.

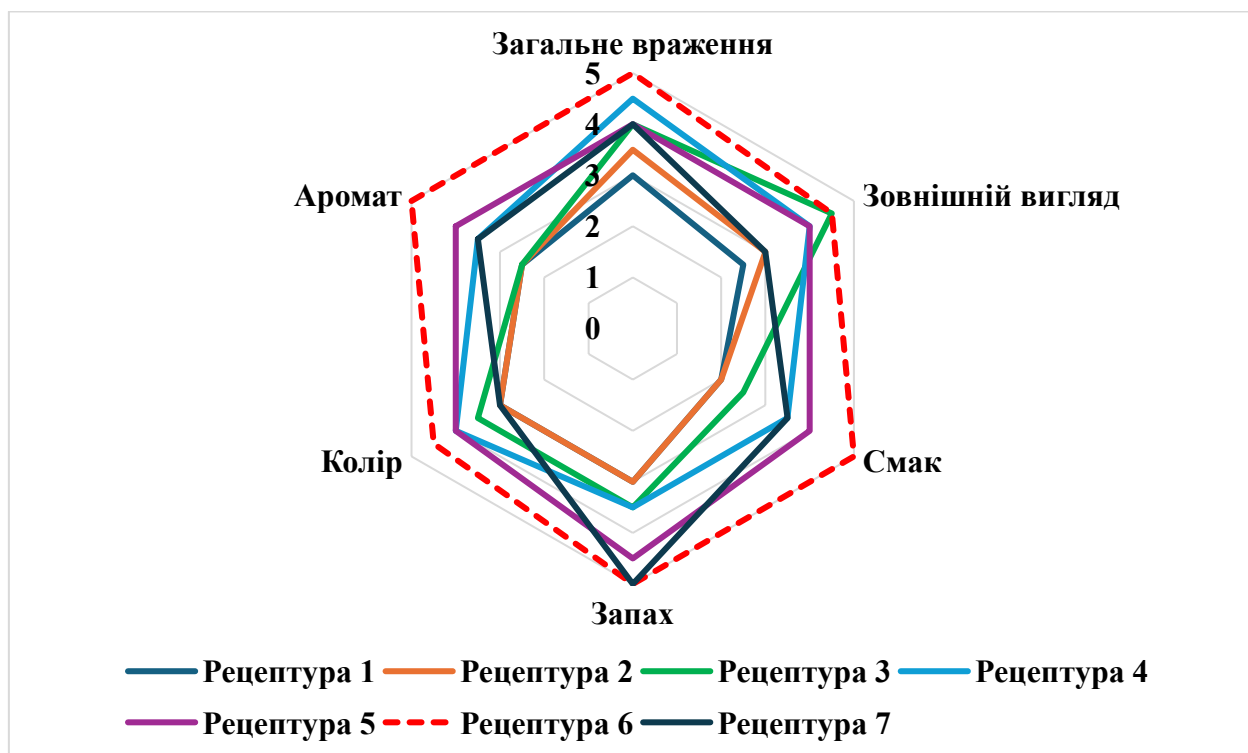


Рисунок 5.2 Органолептичні показники експериментальних зразків пектиновмісних паст з гарбуза

Водночас варто підкреслити, що харчова цінність продукції визначається також вмістом компонентів, які забезпечують нормальний перебіг фізіологічних процесів і покривають енергетичні витрати організму.

5.2 Математичне моделювання якісного стану досліджуваних пектинових паст

5.2.1 Експериментальна оцінка основних якісних характеристик досліджуваних зразків продукції

Як об'єкт досліджень у даній науковій роботі було використано шість дослідних зразків пектинових паст, які відрізнялися між собою масовою часткою цукру, а також контрольний зразок, виготовлений за базовою рецептурою без варіювання вмісту цукристих компонентів. Формування такої варіативної серії зразків дозволило простежити вплив концентрації цукру на

фізико-хімічні показники, структуроутворення та загальний якісний стан пектиновмісної системи.

За результатами проведених експериментальних досліджень у табл. 5.4 наведено узагальнені якісні характеристики досліджуваних зразків продукції. Оцінювання здійснювали за комплексом фізико-хімічних показників, що найбільш повно відображають стан пектинових паст як багатокомпонентних дисперсних систем.

Вибір зазначених показників зумовлений їхньою визначальною роллю у формуванні консистенції, стабільності, мікробіологічної стійкості та органолептичних властивостей пектинових паст. Зокрема, масова частка сухих речовин та загальних цукрів безпосередньо впливає на гелеутворення, оскільки пектин у присутності цукру та за певного рівня кислотності формує просторову сітку, що забезпечує структурну міцність продукту. Редукуючі цукри характеризують гідролітичні процеси та потенційну реакційну здатність системи. Вміст пектинових речовин визначає структуроутворювальну здатність пасти, тоді як показники золи відображають мінеральний склад сировини. Титрована кислотність і значення рН є ключовими факторами стабільності гелевої структури та умов зберігання продукції.

Нормативні значення зазначених показників встановлювали відповідно до чинних нормативно-технічних документів, зокрема ДСТУ 5030:2008 [156], ISO 10520 [157], ISO 1842 [158], EN 15758 / ДСТУ EN 1135 [159], ДСТУ ISO 750 [160], ДСТУ ISO 3593 [161], ДСТУ 4954 [162], що регламентують методи визначення фізико-хімічних характеристик плодоовочевої та пектиновмісної продукції. Використання стандартизованих методик забезпечує відтворюваність результатів, їхню достовірність та можливість коректного порівняння з літературними даними й нормативними вимогами.

З огляду на те, що більшість нормативних показників регламентується у вигляді допустимих інтервалів із мінімальними та максимальними значеннями, при оцінюванні якісного стану досліджуваних пектинових паст .

Таблиця 5.4

Фізико-хімічні показники пектинових паст з гарбуза з різним вмістом цукру

Показник	Норматив (ДСТУ / EN / ISO)	Діапазон норми	Зразок 1 (контроль свіжий)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)
Масова частка води, %	ДСТУ 5030:2008	40–92 %	89,2±0,6	78,5±0,5	65,8±0,4	58,2±0,4	52,6±0,3	45,3±0,3	38,7±0,3
Масова частка сухих речовин, %	ДСТУ 5030:2008	8–70 %	10,8±0,6	21,5±0,5	34,2±0,4	41,8±0,4	47,4±0,3	54,7±0,3	61,3±0,3
Масова частка пектинових речовин, %	EN 15758 ДСТУ EN 1135	0,3–18 %	1,8±0,1	15,6±0,3	12,8±0,3	11,2±0,2	9,8±0,2	8,1±0,2	6,9±0,2
pH	ISO 1842	0,3–18 %	6,2±0,1	5,8±0,1	5,4±0,1	5,2±0,1	5,0±0,1	4,8±0,1	4,6±0,1
Титрована кислотність, град	ДСТУ ISO 750	1–10 град.	2,1±0,1	4,8±0,2	4,2±0,2	3,9±0,1	3,6±0,1	3,2±0,1	2,9±0,1
Масова частка цукрів загальних, %	ДСТУ 5030, ISO 10520	4–75 %	5,2±0,2	8,6±0,3	32,4±0,5	40,8±0,6	48,2±0,7	58,5±0,8	67,3±0,9
Масова частка редуруючих цукрів, %	ДСТУ 4954	2–25 %	4,8±0,2	8,2±0,3	12,5±0,3	14,7±0,4	16,8±0,4	19,2±0,5	21,6±0,5
Масова частка золи, %	ДСТУ ISO 3593	0,3–2,0 %	0,6±0,05	1,8±0,1	1,5±0,1	1,3±0,1	1,1±0,1	0,9±0,1	0,8±0,1

При використанні методу математичного моделювання «факторними площами» проводили розрахунок та побудову геометричних моделей якості досліджуваних зразків пектинових паст, для чого використано 8 параметрів цієї продукції (таблиця 5.4, 55). Для здійснення порівняльної оцінки за допомогою цього методу математичного моделювання перерахували вказані параметри в безрозмірні одиниці R_i , використовуючи відповідні максимальні $F_{\max}$ та середні нормативні F_c характеристики. При відкладанні отриманих параметрів у безрозмірних одиницях у центральній полярній системі координат отримали факторні площі якісного стану відповідних зразків S_i , $S_{\max}$, S_c в ум. од.² Результати даного розрахунку для контрольного зразка пектинової пасти наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Розрахункові параметри якості контрольного зразка пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		F_c	$F_{\max}$	$R_{\max i}$, ум. од.	R_{ci} , ум. од.	R_i , ум. од.	$S_i, S_{\max}, S_c$, ум. од. ²	$k_{\text{в}i\alpha}$	$k_{\text{в}i\Gamma}$
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	1,352	0,63 8,16 2,84	0,222	0,077
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	0,277			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	0,197			
4	pH	9,15	18	1,967	1,0	0,678			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,42			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	0,132			
7	Масова частка редукуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	0,356			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	0,522			

Примітка: F_c та $F_{\max}$ – відповідно середнє та максимальне значення нормативної характеристики оціночного параметру; R_c та $R_{\max}$ – граничні нормативні характеристики, перераховані у безрозмірні одиниці за максимальним нормативом, ум. од.; R_i – якісні характеристики досліджуваних зразків пектинових паст, перераховані у безрозмірні одиниці за середнім нормативом, ум. од.; S_i – величина факторних площ якісного стану досліджуваних зразків пектинових паст для обраних 8 параметрів, ум. од.²; S_c – величина нормативної факторної площі за середніми значеннями нормованих параметрів, ум. од.²; $S_{\max}$ – величина нормативної факторної площі за максимальними значеннями нормованих параметрів, ум. од.²; $k_{\text{в}i\alpha}$ та $k_{\text{в}i\Gamma}$ – відповідно критерії оцінки якісного стану для середніх та граничних нормативних характеристик.

При здійсненні математичного моделювання якісного стану досліджуваних зразків пектинових паст вважали, що обрані експериментальні характеристики досліджуваної продукції інтегрально описуються факторними площами, алгебраїчне співвідношення яких з відповідними нормативними площами дає можливість оцінити межі безпеки продукції та тенденції ефективного застосування розроблених зразків (*перша гіпотеза*) [131, 132, 133]. Адекватність такої оцінки визначається можливістю застосування практично необмеженого числа експериментальних параметрів, за умови кваліфікованого їх вибору, що забезпечує інтегральну якісну експертизу (*друга гіпотеза*).

У процесі перерахунку оціночних характеристик у безрозмірні величини використовували співвідношення до відповідних нормативних їх значень [131, 132, 133].

Розраховані параметри відкладали по напівдіагоналям, використовуючи полярні координати. Тоді геометрична візуалізація моделі якісного стану певного зразка продукції була отримана у вигляді неправильного 8-кутника площею S_i , а факторна нормативна площа S_c – у вигляді правильного 8-кутника, так як його напівдіагоналі R_c становлять одиницю.

Алгебраїчна оцінка даних геометричних фігур дозволила отримати для 8-факторного простору наступний математичний алгоритм [131, 132, 133]:

$$S_{08} = 0,5 \sin \alpha \cdot [R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_4 + R_4 \cdot R_5 + R_5 \cdot R_6 + R_6 \cdot R_7 + R_7 \cdot R_8 + R_8 \cdot R_1] \quad (5.1)$$

де $m = 8$ - кількість оціночних параметрів, що складає відповідно кількість кутів багатокутника.

Нормативна факторна площа для 8-факторного простору визначали як для відповідної площі правильного багатокутника [1, 2, 3]:

$$S_H = \frac{m R^2 \sin^2 \left(\frac{180}{m} \right)}{\operatorname{tg} \left(\frac{180}{m} \right)} = m R^2 \sin \left(\frac{180}{m} \right) \cdot \cos \left(\frac{180}{m} \right) = 0,5 R^2 \sin \left(\frac{360}{8} \right) = 0,5 \cdot 8 \cdot \sin 45^\circ = 2,84 \text{ ум.од}^2 \quad (5.2)$$

В якості критеріїв якості досліджуваних зразків пектинових паст були обрані коефіцієнт відповідності заданому інтервалу якості $k_{в\dot{и}я}$ та коефіцієнт відповідності граничним нормативам якості $k_{вгн}$, які визначали при допомозі формул (5.3) за співвідношеннями між наведеними вище факторними площами [131, 132, 133]:

$$k_{в\dot{и}я} = S_i / S_c; \quad k_{вгн} = S_i / S_{max} \quad (5.3)$$

Коефіцієнт відповідності заданому інтервалу якості $k_{в\dot{и}я}$ характеризує середню межу безпеки певного зразка, а коефіцієнт відповідності граничним нормативам якості $k_{вгн}$ – граничну або максимальну межу.

За перерахованими у безрозмірні одиниці значеннями поточних якісних параметрів R_i (табл. 5.5), побудували факторні площі якісного стану для контрольного зразка досліджуваної пектинової пасти та відповідного нормативного показника на основі двобічного оцінювання (рис. 5.3).

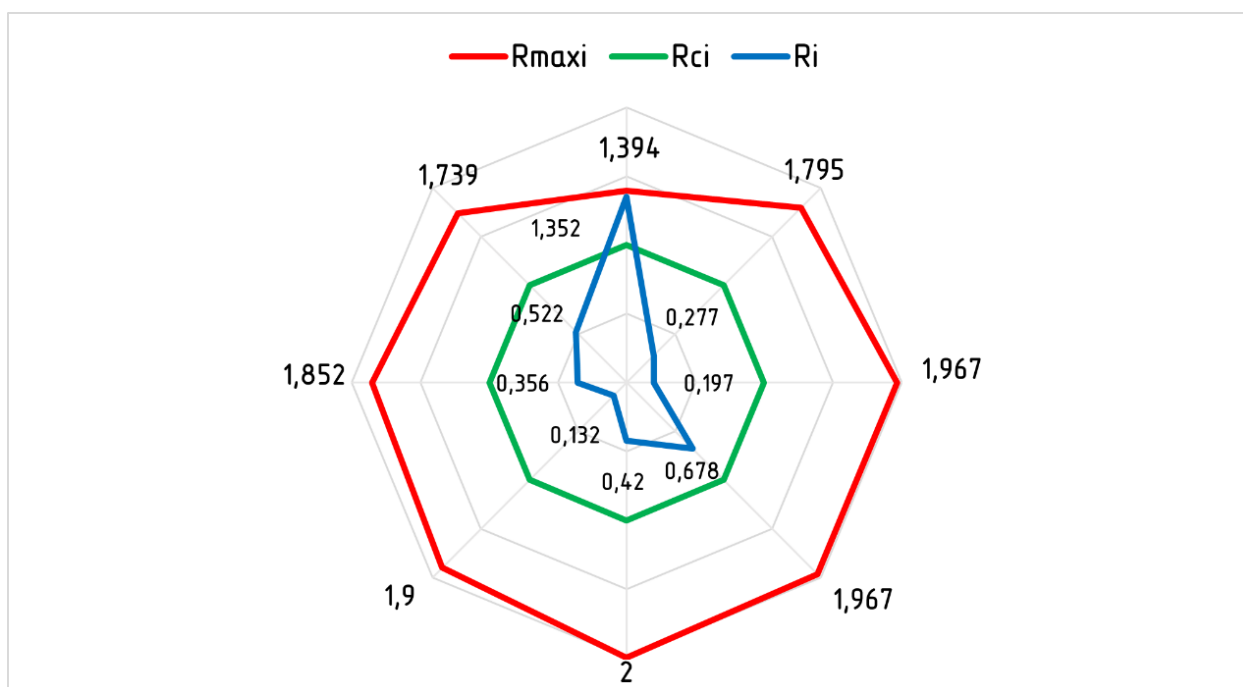


Рисунок 5.3. Моделі якісного стану контрольного зразку досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану

Модель якісного стану контрольного зразка (рис.5.3) ілюструє, що за масовою часткою води продукт відповідає максимальній нормативній

границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться у межах середніх нормативних якісних показників.

При використанні необхідних результатів експериментів, приведеної вище методики перерахування експериментальних характеристик для зразку № 1 пектинової пасти у безрозмірні одиниці, отримали необхідні параметри для побудови геометричних моделей та критеріїв оцінки якісного стану (додаток В, табл. В.1).

Відкладаючи по напівдіагоналях розрахункові значення поточних параметрів R_i для зразку №1, нормативних $R=R_c=1$ та $R=R_{\max}$ (табл. В.1), побудували відповідні геометричні моделі якісного стану для пектинових паст (рис. 5.4).

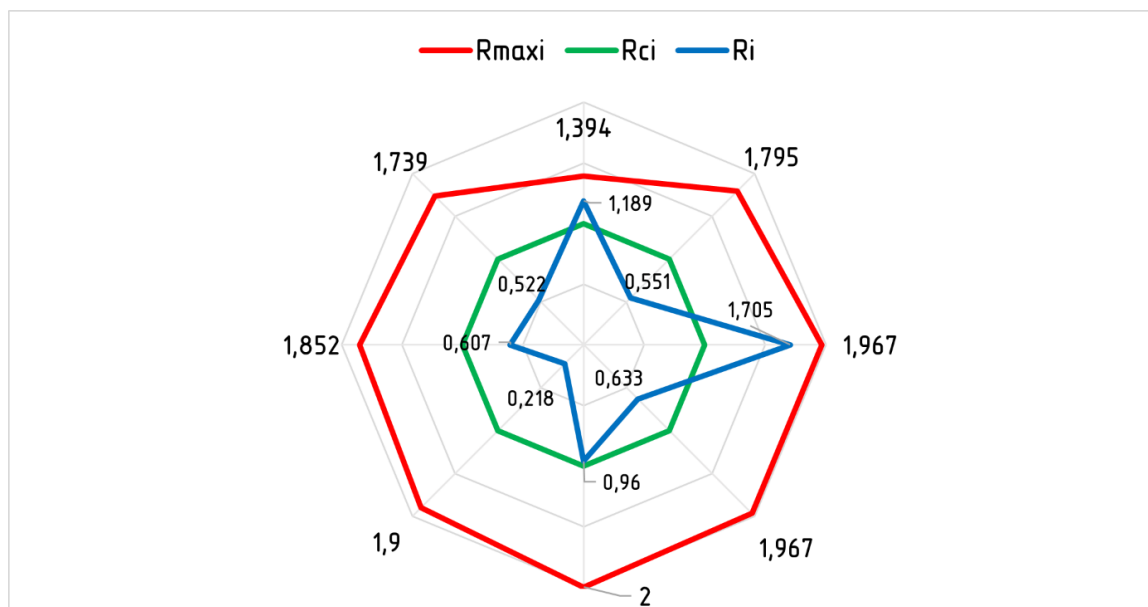


Рисунок 5.4. Моделі якісного стану зразка № 1 досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану

Модель якісного стану зразка №1 (рис.5.4) ілюструє, що за масовою часткою води та пектинових речовин продукт перевищує середні нормативні показники, але у межах максимальної нормативної границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться у межах середніх нормативних якісних показників. Порівняно із контрольним зразком за масовою часткою води та пектинових речовин, числом рН показники зразку №1 є менші на 7...14%.

Решта якісних характеристик даного зразку перевищують контрольні у 1,6...2 рази.

За приведеною вище методикою переведення експериментальних даних для зразку № 2 пектинової пасти у безрозмірні одиниці отримали необхідні параметри для побудови геометричних моделей та критеріїв оцінки якісного стану (додаток В, табл. В.2).

Відкладаючи по напівдіагоналях багатокутної координатної сітки розрахункові значення поточних параметрів R_i для зразка № 2, а також відповідні нормативні середні та гранично допустимі максимальні значення (табл. В.2), було побудовано геометричні моделі якісного стану пектинової пасти. Зазначені моделі сформовано на основі принципу двобічного оцінювання, що передбачає одночасний аналіз відповідності досліджуваних показників як мінімально необхідному, так і максимально допустимому рівням. Побудовані геометричні інтерпретації (рис. 5.5) слугують інструментом інтегральної оцінки та забезпечують підвищення інформативності порівняльного аналізу досліджуваного зразка з нормативними вимогами.

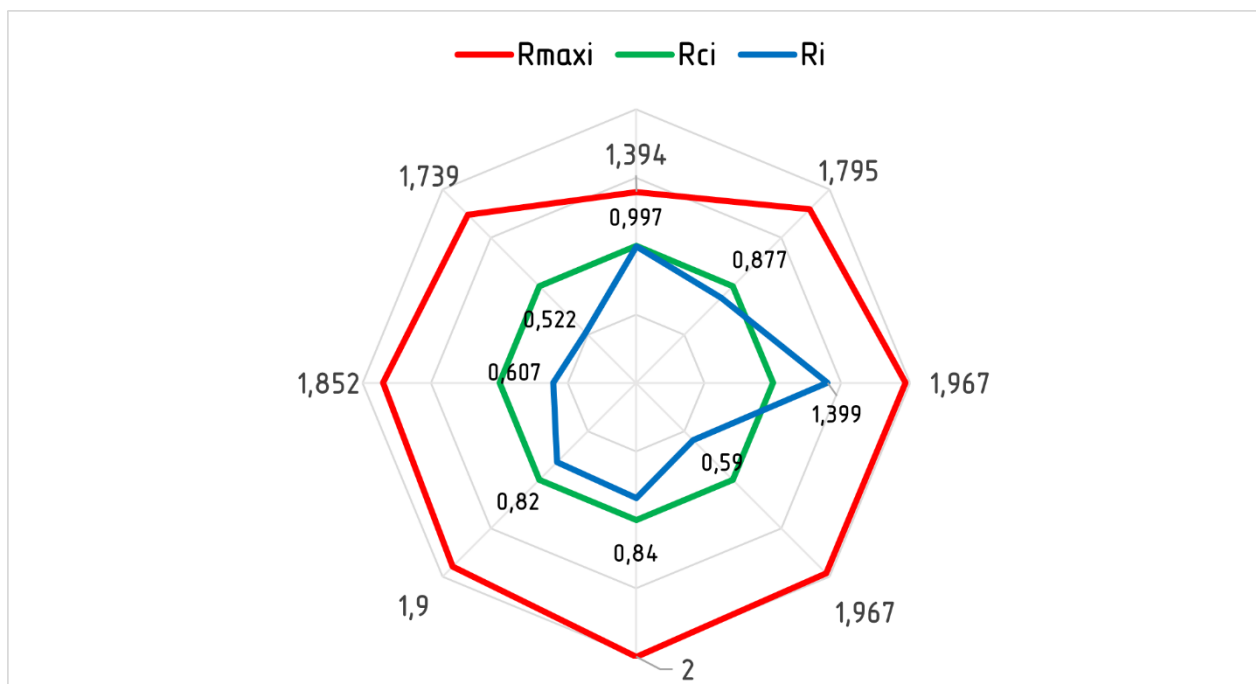


Рисунок 5.5. Моделі якісного стану зразка № 2 досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану

Модель якісного стану зразка №2 (рис.5.3) ілюструє, що за масовою часткою пектинових речовин продукт перевищує середні нормативні показники, але в межах максимальної нормативної границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться в межах середніх нормативних якісних показників. Порівняно із контрольним зразком за масовою часткою вологи та числом рН показники зразку №2 є менші на 19...36%. Решта якісних характеристик даного зразку перевищують контрольні у 2...7,1 разів.

За приведеною вище методикою переведення експериментальних даних для зразку № 3 пектинової пасти у безрозмірні одиниці отримали необхідні параметри для побудови геометричних моделей та критеріїв оцінки якісного стану (додаток В, табл. В.3).

Відкладаючи по напівдіагоналях розрахункові значення поточних параметрів R_i та нормативних середніх та максимальних (табл. В. 3), побудували геометричні моделі якісного стану нормативного та зразка № 3 пектинової пасти за досліджуваною рецептурою на основі двобічного оцінювання (рис. 5.6).

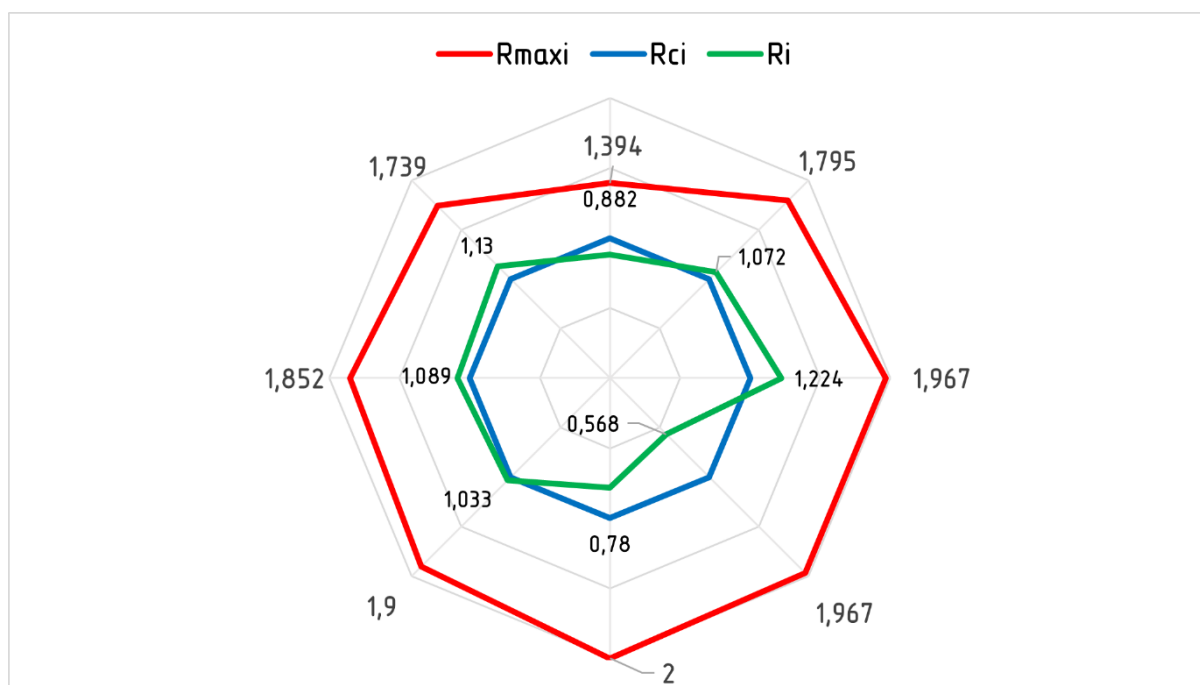


Рисунок 5.6. Моделі якісного стану зразка №3 досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану

Модель якісного стану зразка №3 (рис.5.6) ілюструє, що за масовою часткою сухих та пектинових речовин, цукрів загальних та редукуючих, а також золи; продукт перевищує середні нормативні показники, але у межах максимальної нормативної границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться у межах середніх нормативних якісних показників.

Порівняно із контрольним зразком за масовою часткою вологи та числом рН показники зразку №3 є менші на 19...53%. Решта якісних характеристик даного зразку перевищують контрольні у 3,2...8,3 разів.

За приведеною вище методикою переведення експериментальних даних для зразку № 4 пектинової пасти у безрозмірні одиниці отримали необхідні параметри для побудови геометричних моделей та критеріїв оцінки якісного стану (додаток В, табл. В.4).

Відкладаючи по напівдіагоналях розрахункові значення поточних параметрів R_i та нормативних середніх та максимальних (табл. В.4), побудували відповідні геометричні моделі якісного стану нормативних та зразка №4 пектинової пасти за досліджуваною рецептурою на основі двобічного оцінювання (рис. 5.7).

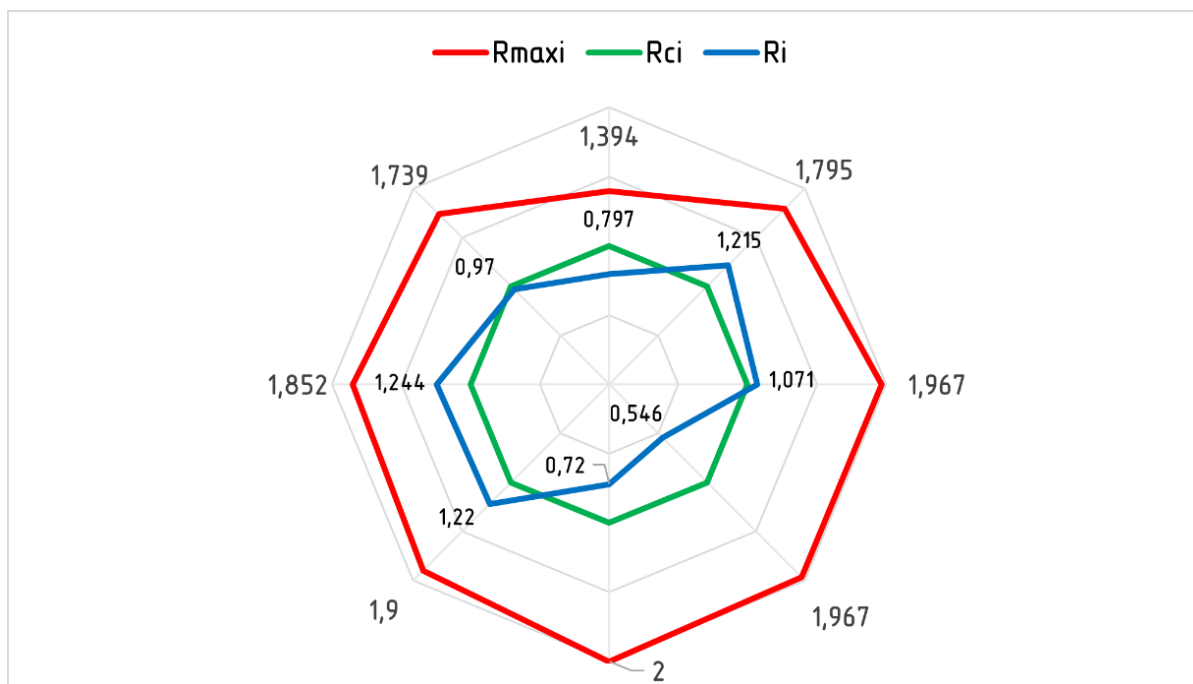


Рисунок 5.7. Моделі якісного стану зразка № 4 досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану

Модель якісного стану зразка № 4 (рис.5.7) ілюструє, що за масовою часткою сухих та пектинових речовин, цукрів загальних; продукт перевищує середні нормативні показники, але у межах максимальної нормативної границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться у межах середніх нормативних якісних показників. Порівняно із контрольним зразком за масовою часткою вологи та числом рН показники зразку №4 є менші на 24...70%. Решта якісних характеристик даного зразку значно перевищують контрольні, зокрема, за масовою часткою загальних цукрів - у 9,4 разів, проте за вмістом золи – у 1,85 разів.

За приведеною вище методикою переведення експериментальних даних для зразку № 5 пектинової пасти у безрозмірні одиниці отримали необхідні параметри для побудови геометричних моделей та критеріїв оцінки якісного стану (додаток В, табл. В.5). Відкладаючи по напівдіагоналях розрахункові значення поточних параметрів R_i та нормативних середніх та максимальних (табл. В. 5), побудували геометричні моделі якісного стану нормативного та зразка № 5 пектинової пасти за досліджуваною рецептурою на основі двобічного оцінювання (рис. 5.8).

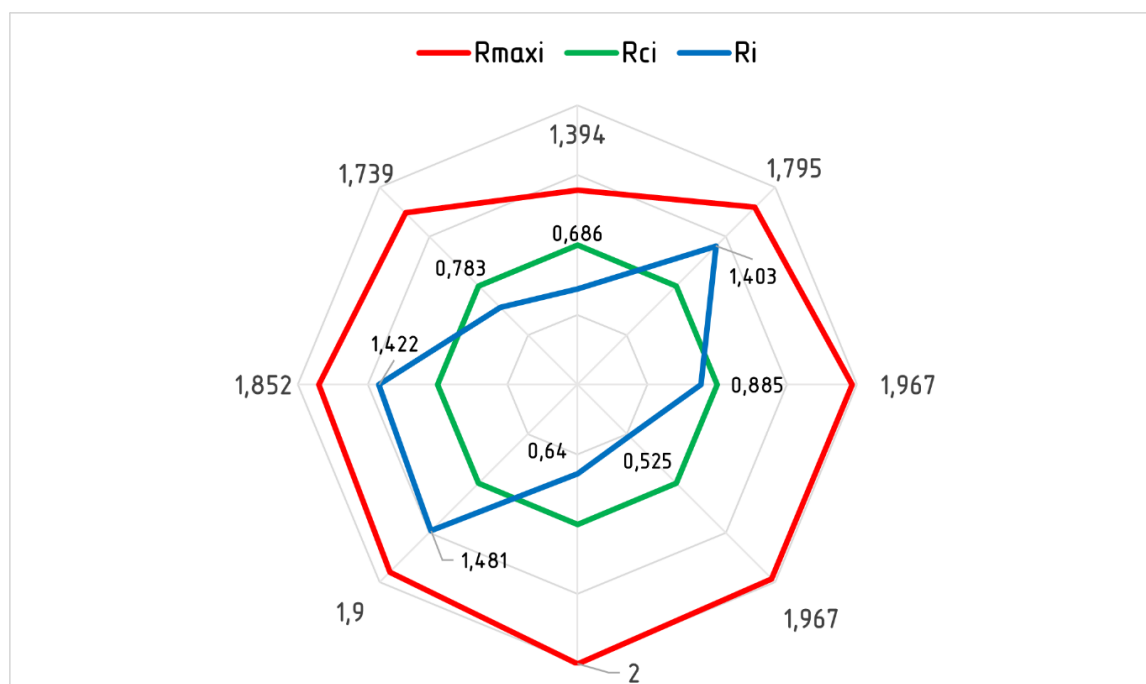


Рисунок 5.8. Моделі якісного стану зразка № 5 досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану.

Модель якісного стану зразка №5 (рис. 5.8) ілюструє, що за масовою часткою води та пектинових речовин, величини титрованої кислотності, числом рН, а також вмістом золи; продукт перевищує середні нормативні показники, але в межах максимальної нормативної границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться у межах середніх нормативних якісних показників. Порівняно із контрольним зразком за масовою часткою води та числом рН показники зразку №5 є менші у 1,3...1,97 разів. Решта якісних характеристик даного зразку значно перевищують контрольні, зокрема, за масовою часткою загальних цукрів - у 10,8 разів, проте за вмістом золи – у 1,5 разів.

За приведеною вище методикою переведення експериментальних даних для зразку № 6 пектинової пасти у безрозмірні одиниці отримали необхідні параметри для побудови геометричних моделей та критеріїв оцінки якісного стану (додаток В, табл. В.6). Відкладаючи по напівдіагоналях розрахункові значення поточних параметрів R_i та нормативних середніх та максимальних (табл. 5.8), побудували геометричні моделі якісного стану нормативного та зразку № 6 пектинової пасти за досліджуваною рецептурою на основі двобічного оцінювання (рис. 5.9).

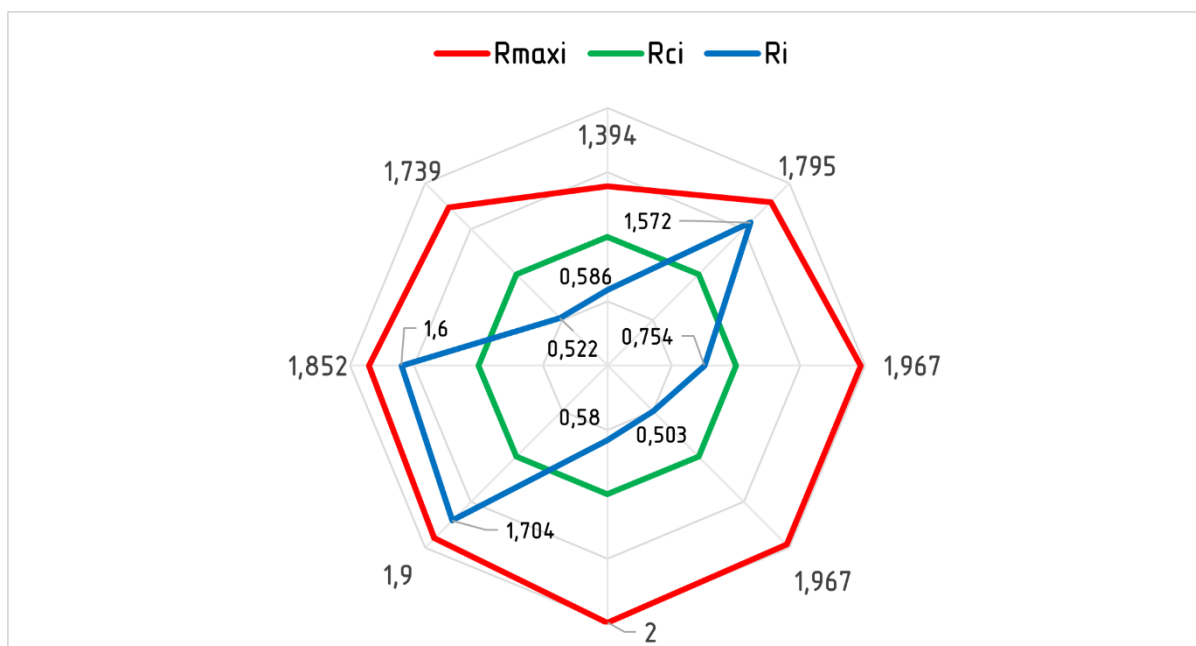


Рисунок 5.9. Моделі якісного стану зразка №6 досліджуваних пектинових паст, нормативного середнього та максимального граничного стану

Модель якісного стану зразка № 6 (рис.5.9) ілюструє, що за масовою часткою води та пектинових речовин, величини титрованої кислотності, числом рН, а також вмістом золи; продукт перевищує середні нормативні показники, але в межах максимальної нормативної границі якості; решта оціночних характеристик знаходяться у межах середніх нормативних якісних показників. Порівняно із контрольним зразком за масовою часткою води та числом рН показники зразку №6 є менші у 1,35...2,31 разів. Решта якісних характеристик даного зразку значно перевищують контрольні, зокрема, за масовою часткою загальних цукрів - у 13 разів, причому вміст золи не змінився.

Отримана у ході математичного моделювання розрахункова база даних (табл. 5.5, В.1 – В.6) та їх геометрична інтерпретація (рис. 5.3 – 5.9), дозволили систематизувати результати аналізу якісного стану досліджуваних зразків пектинових паст у табл. В.7. додаток В.

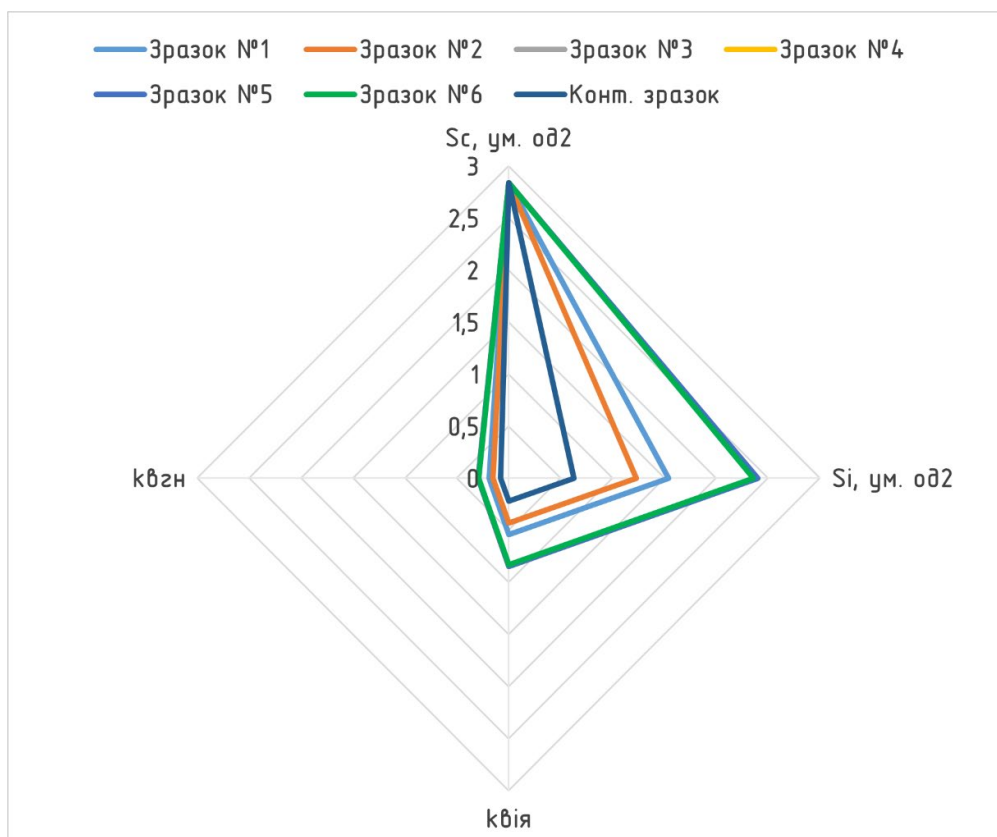


Рисунок 5.10. Динаміка зміни критеріїв оцінки якісного стану для контрольних та рецептурних зразків пектинових паст

Діаграми критеріїв якості на рис. 5.10 виявили перевищення оціночних характеристик всіх досліджуваних зразків пектинових паст порівняно із нормативним зразком: за величиною факторних площ – від 3,8 разів (для зразка № 4) до 1,95 разів (для зразка № 2); за коефіцієнтом відповідності середньому нормативному інтервалу якості – від 3,84 разів (для зразків №3,4,5) до 1,97 разів (для зразка № 2); за коефіцієнтом відповідності максимальному нормативному інтервалу якості – від 3,82 разів (для зразків №3,5) до 1,96 разів (для зразка № 2).

5.3. Обґрунтування економічної доцільності впровадження технології

В умовах трансформації харчової промисловості України, орієнтованої на підвищення енерго- та ресурсоефективності виробництва, а також зростання попиту на продукти функціонального та оздоровчого призначення, особливої актуальності набуває впровадження інноваційних технологій комплексної переробки рослинної сировини. Такі технології мають забезпечувати раціональне використання сировинних ресурсів, зниження собівартості готової продукції та формування стабільних споживчих властивостей продуктів із підвищеною біологічною цінністю.

Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є виробництво пектиновмісних паст на основі гарбуза. Гарбуз як сировина належить до доступних, відновлюваних та економічно привабливих видів рослинної продукції. Він широко культивується на території України, характеризується високою врожайністю, відносно низькою закупівельною вартістю, а також добрими технологічними властивостями, що забезпечують можливість його ефективної переробки з мінімальними втратами цінних компонентів. Крім того, використання гарбуза дозволяє зменшити залежність виробництва від імпортової сировини.

Запропонована удосконалена технологія виробництва пектиновмісних паст передбачає інтенсифікацію основних стадій технологічного процесу, зокрема подрібнення, тепломасообмінних операцій і структуроутворення

продукту. Застосування інноваційних техніко-технологічних рішень забезпечує підвищення виходу готової продукції, скорочення тривалості обробки, зниження питомих енерговитрат та стабілізацію фізико-хімічних і реологічних показників паст. У сукупності це створює передумови для зменшення виробничих витрат і підвищення конкурентоспроможності продукції.

Економічна доцільність впровадження розробленої технології визначається необхідністю кількісної оцінки її ефективності шляхом розрахунку собівартості виробництва пектиновмісних паст, визначення рівня рентабельності та прогнозованого прибутку від реалізації продукції. Отримані економічні показники є ключовими критеріями для прийняття управлінських рішень щодо впровадження технології у виробничу практику, а також для обґрунтування її інвестиційної привабливості в умовах промислового виробництва.

5.4. Розрахунок капіталовкладень

Капіталовкладення включають вартість будівництва виробничого приміщення, обладнання, затрати на його доставку і монтаж, та інші витрати. Вони розраховуються за формулою:

$$K_n = C_{\text{буд}} + C_{\text{обл}}, \quad (5.4)$$

де $C_{\text{буд}}$ – вартість будівництва, грн.; $C_{\text{обл}}$ – вартість обладнання з урахуванням витрат на транспортування, монтаж і пусконаладжувальні роботи:

$$C_{\text{буд}} = C_1 \cdot V, \quad (5.5)$$

де C_1 – вартість будівництва або реконструкції 1^{го} м³ виробничого приміщення цеху; будемо використовувати приміщення господарства, яке необхідно відремонтувати.

Розміри приміщення:

$a \times b \times h = 11,59 \times 20 \times 4,5$; $S = 11,59 \times 20 = 232 \text{ м}^2$; $V = h \times S = 4,5 \cdot 232 = 1044 \text{ м}^3$
 питома вартість реконструкції $C_1 = 25 \text{ грн} / \text{м}^3$

$$C_{\text{буд}} = 25 \cdot 1044 = 26100 \text{ грн.}$$

Вартість обладнання розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{обл}} = B_{\text{обл}} \cdot K_{\text{м}} \quad (5.6)$$

де $B_{\text{обл}}$ – ціна комплектна обладнання технологічної лінії, який передбачається закупити: $B_{\text{обл}} = 850000$ грн; $K_{\text{м}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати на доставку і монтаж обладнання: $K=1,1$; $B_{\text{пр.м}}$ – вартість проектного верстата визначаємо за формулою:

$$C_{\text{обл}} = 1.1 \cdot 850000 = 935000 \text{ грн.}$$

$$K_{\text{п}} = 26100 + 935000 = 961100 \text{ грн.}$$

5.5. Техніко-економічне обґрунтування доцільності виробництва пектиновмісних паст з гарбуза

Середня собівартість на гарбуз за 1 тону в Україні орієнтовно становить – 10000 грн/т [63].

Для виробництва 100 кг пектиновмісної пасти необхідно переробити 154 кг свіжого гарбуза, додати 35–85 кг цукру, 1,5 кг лимонної кислоти.

Таблиця 5.6

Витрати на сировину та основні матеріали для виробництва 100 кг пектиновмісної пасти з гарбуза

Сировина	Витрати, кг	Ціна за 1 кг, грн	Сума, грн
Гарбузова м'якоть	154	10	1540,0
Цукор-пісок	55	28,0	1540,0
Регулятор кислотності (лимонна кислота)	1,5	120,0	180,0
Вода питна	300	0,03	9,0
Разом	—	—	3269,0

Таблиця 5.7

Витрати на допоміжні матеріали (на 100 кг продукції)

Стаття витрат	Ціна за одиницю, грн	Норма	Сума, грн
Полімерна тара (0,5 кг), шт	4,20	200	840,0
Кришки	1,10	200	220,0
Етикетки	1,00	200	200,0
Транспортна тара	—	—	180,0
Всього	—	—	1440,0

Таблиця 5.8

Енергетичні витрати на виробництво 100 кг пектиновмісної пасти

Вид енергії	Норма	Ціна, грн	Сума, грн
Електроенергія, кВт·год	52	10,28	534,6
Теплова енергія, ГДж	1,6	42,3	67,7
Всього	—	—	602,3

Собівартість 100 кг пасти

$$3269 + 1440 + 602,3 = 5311,3 \text{ грн} \quad (5.7)$$

Враховано 251 днів роботи заводу і відраховано податки.

Примітка: Вартість пектинової пасти станом на січень 2026 року становила 80 грн/кг.

Такі короткі терміни окупності капіталовкладень характерні для високорентабельного сучасного виробництва за застосування інноваційних технологій. Дана технологія виробництва з пектиновмісних паст з гарбуза, яких немає на ринку України. Впровадження цих інновацій у технологічний ланцюг виробництва пектиновмісних паст підвищить рентабельність виробництва щонайменше вдвічі.

5.6. Розрахунок експлуатаційних затрат на виробництво

Загальні експлуатаційні затрати визначаються за формулою:

$$Z_{\text{заг.екс}} = (Z_{\text{оп}} + Z_{\text{а буд}} + Z_{\text{а обл}} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{то}} + Z_{\text{ел}} + Z_{\text{тар}}) \cdot K \quad (5.8)$$

де $Z_{\text{оп}}$ - річний фонд заробітної плати, грн; $Z_{\text{а буд}}$, $Z_{\text{пр}}$ - відрахування на амортизацію і поточний ремонт будівель, грн; $Z_{\text{а обл}}$, $Z_{\text{то}}$ - відрахування на амортизацію і ТО обладнання, грн; $Z_{\text{ел}}$ - витрати на електроенергію, грн; $K = 1.05$ - коефіцієнт, який враховує інші експлуатаційні витрати.

Визначення річного фонду заробітної плати

Річний фонд заробітної плати визначається з урахуванням кількості працюючих, тарифних ставок і нарахувань [11]:

$$Z_{\text{оп}} = \sum_i N_i \cdot C_i \cdot t_{\text{зм}} \cdot K_{\text{зм}} \cdot D \cdot K_H \quad (5.9)$$

де: N_i - кількість працівників $i^{\text{го}}$ розряду, чол; C_i - годинна тарифна ставка, грн/год; $t_{\text{зм}}$ - тривалість робочої зміни $t_{\text{зм}} = 8$ год; $K_{\text{зм}}$ - кількість змін $K_{\text{зм}} = 1$;

Д – число днів роботи за рік: Д = 251 днів; K_n – коефіцієнт нарахувань на зарплату: $K_n = 1,5$

$$Z_{\text{по. роб}} = 2 \cdot 48 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 251 \cdot 1,5 = 289152 \text{ грн.}$$

$$Z_{\text{по. інж}} = 1 \cdot 60 \cdot 8 \cdot 1 \cdot 251 \cdot 1,5 = 180720 \text{ грн.}$$

Додаткова заробітна плата для стимулювання результатів праці (підвищення якості продукції, економія енергоресурсів, тощо)

$$Z_{\text{оп.дод}} = K_{\text{дзп}} \cdot Z_{\text{оп}}/100 \quad (5.10)$$

де $K_{\text{дзп}}$ – плановий коефіцієнт нарахування додаткової заробітної плати, %

$$Z_{\text{оп.дод.роб}} = 15 \cdot 289152/100 = 43343 \text{ грн.}$$

$$Z_{\text{оп.дод.інж}} = 15 \cdot 180720/100 = 27108 \text{ грн.}$$

Фонд заробітної плати

$$\text{ФОП} = Z_{\text{оп.}} + Z_{\text{оп.дод}} \quad (5.11)$$

$$\text{ФОП}_{\text{роб}} = 289152 + 43343 = 332495 \text{ грн.}$$

$$\text{ФОП}_{\text{інж}} = 180720 + 27108 = 207828 \text{ грн.}$$

$V_{\text{сз}}$ – відрахування на соціальні заходи

$$V_{\text{сз}} = \text{ПФ} + \text{ЄСВ} + \text{ВЗ} \quad (5.12)$$

де, ПФ, ЄСВ, ВЗ – податок на доходи фізичних осіб 18 %, єдиний соціальний внесок 22 % та військовий збір 5 %, розраховується за формулами:

$$\text{ПФ} = K_{\text{пф}} \cdot \text{ФОП}/100$$

$$\text{ЄСВ} = K_{\text{єсв}} \cdot \text{ФОП}/100 \quad (5.13)$$

$$\text{ВЗ} = K_{\text{вз}} \cdot \text{ФОП}/100$$

де, $K_{\text{пф}}$, $K_{\text{єсв}}$, $K_{\text{вз}}$ – коефіцієнти відрахування на доходи фізичних осіб, єдиний соціальний внесок і військовий збір, %: $K_{\text{пф}} = 18$; $K_{\text{єсв}} = 22$; $K_{\text{вз}} = 5$

$$\text{ПФ}_{\text{роб}} = 18 \cdot 332495/100 = 59849 \text{ грн.}$$

$$\text{ПФ}_{\text{інж}} = 18 \cdot 207828/100 = 37409 \text{ грн.}$$

$$\text{ЄСВ}_{\text{роб}} = 22 \cdot 332495/100 = 73149 \text{ грн.}$$

$$\text{ЄСВ}_{\text{інж}} = 22 \cdot 207828/100 = 45722 \text{ грн.}$$

$$\text{ВЗ}_{\text{роб}} = 5 \cdot 332495/100 = 16625 \text{ грн.}$$

$$\text{ВЗ}_{\text{інж}} = 5 \cdot 207828/100 = 10391 \text{ грн.}$$

$$V_{\text{сз. роб}} = 59849 + 73149 + 16625 = 149323 \text{ грн.}$$

$$V_{\text{сз. інж}} = 37409 + 45722 + 10391 = 93522 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку фонду заробітної плати зведено в таблиці.

Таблиця 5.9

Річний фонд оплати праці

Категорія працівника	Кількість, осіб	Тарифна ставка	Річний фонд оплати праці
Робітники	2	48	481818
Інженер-технолог	1	60	301350
Всього	3		783168

Визначення відрахувань на амортизацію будівель

$$\begin{aligned} Z_{\text{а буд.}} &= C_{\text{буд.}} \cdot 0.031 \\ Z_{\text{а буд.}} &= 26100 \cdot 0,031 = 809,1 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Відрахування на амортизацію обладнання

$$\begin{aligned} Z_{\text{а обл.}} &= C_{\text{обл.}} \cdot 0,15, \\ Z_{\text{а обл.}} &= 850000 \cdot 0.15 = 127500 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Відрахування на поточний ремонт будівель

$$\begin{aligned} Z_{\text{пр}} &= C_{\text{буд.}} \cdot 0.03 \\ Z_{\text{пр}} &= 26100 \cdot 0,03 = 783 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Відрахування на поточний ремонт і ТО обладнання

$$\begin{aligned} Z_{\text{ТО}} &= C_{\text{обл.}} \cdot 0,18 \\ Z_{\text{ТО}} &= 850000 \cdot 0,18 = 153000 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Витрати на електроенергію

$$Z_{\text{ел}} = E \cdot C_{\text{ел}} \cdot Д \cdot K_{\text{зм}} \cdot K \quad (5.18)$$

де, E – споживана електроенергія за зміну : $E = 30 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{зм.}$; $C_{\text{ел}}$ – ціна 1^{го} кВт·год , $C_{\text{ел}} = 10.24 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$; K – коефіцієнт, який враховує додаткові витрати, $K = 1.05$.

$$Z_{\text{ел}} = 30 \cdot 10,24 \cdot 90 \cdot 1 \cdot 1,05 = 29030 \text{ грн.}$$

Загальні експлуатаційні витрати складають

$$Z_{\text{заг. експ.}} = (783168 + 809,1 + 127500 + 783 + 153000 + 29030) \cdot 1.05 = 1\,148\,004,6 \text{ грн.}$$

Визначення вартості сировини і транспортних витрат на її доставку

Виходячи з програми цеху по сировині і оптових закупівельних цін на гарбузи в регіоні, визначаємо вартість сировини за формулою:

$$З_{\text{сир}} = Ц_{\text{сир}} \cdot G_{\text{сир}} \quad (5.19)$$

де $Ц_{\text{сир}}$ – ціна гарбуза в середньому (в цінах 2025 року $Ц_{\text{сир}} = 10000$ грн/ т);

$G_{\text{сир}}$ – річний обсяг переробки: $G_{\text{сир}} = 154$ т.

$$З_{\text{сир}} = 10000 \cdot 154 = 1540000 \text{ грн.}$$

Транспортні витрати визначаємо за формулою:

$$З_{\text{гарб}} = G \cdot S \cdot Ц_{\text{т.км.}} \quad (5.20)$$

де S – загальний пробіг автомобіля при транспортуванні всього, км

$$S = \frac{G \cdot K \cdot L}{G_{\text{г.в.а}}} \quad (5.21)$$

де $G_{\text{г.в.а}}$ – вантажність автомобіля : $G_{\text{г.в.а}} = 10$ т; L – відстань до проектованого цеху : $L = 10$ км;

K – коефіцієнт, що враховує холості пробіги автотранспортних засобів $K = 1.2$

$$S = \frac{154 \cdot 1.2 \cdot 10}{10} = 185 \text{ км} \quad (5.22)$$

$Ц_{\text{т.км}}$ – приведена вартість вантажоперевезень в господарствах регіону $Ц_{\text{т.км}} = 1,5$ грн /т·км.

$$З_{\text{тр. гарб}} = 154 \cdot 185 \cdot 1,5 = 42735 \text{ грн.}$$

Розрахунок загальних витрат на виробництво

$$З_{\text{з.в.}} = З_{\text{заг. експ.}} + (З_{\text{сир}} + З_{\text{тр. гарбуза}}) \cdot 1.05 \quad (5.23)$$

де 1.05 - коефіцієнт, що враховує інші накладні витрати.

$$З_{\text{з.в.}} = 1148\,004,6 + (1540000 + 42735) \cdot 1,05 = 2809876,3 \text{ грн.}$$

5.7. Визначення основних економічних показників

Визначаємо собівартість тони пектиновмісної пасти, що вироблятиметься:

$$C = З_{\text{з.в.}} / G_{\text{ПП}} \quad (5.24)$$

де $З_{\text{з.в.}}$ – загальні витрати виробництва, грн.: $З_{\text{з.в.}} = 2809876,3$ грн; $G_{\text{ПП}}$ - сумарний вихід пектиновмісної пасти, т;

$$G_{\text{П}} = G_{\text{ДБ}} \quad (5.25)$$

де $G_{\text{ПП}}$ – вихід готової продукції ;

$$G_{\text{ПП}} = 100 \text{ т} \quad (5.26)$$

$$C_{\text{ПП}} = 2809876,3/100 = 28\,098,76 \text{ грн/т}$$

Визначаємо середню ціну продукції в Україні за формулою:

$$Ц_c = \frac{G_{\text{ПП}} \cdot Ц_{\text{ПП}}}{G_{\text{П}}} \quad (5.27)$$

де $Ц_{\text{ПП}}$ - оптова ціна на пектиновміну пасту, $Ц_{\text{ПП}} = 80000$ грн/т.

Тоді:

$$Ц_{\text{сПП}} = \frac{100 \cdot 80000}{100} = 80000 \text{ грн/т.}$$

Визначаємо виторг від реалізації продуктів

$$B = Ц_{\text{ПП}} \cdot G_{\text{сПП}} = 80000 \cdot 100 = 8000000 \text{ грн.} \quad (5.28)$$

Відрахування ПДВ (20%) $\text{ПДВ} = 0,2 \cdot 8000000 = 1600000$ грн.

Визначаємо прибуток від реалізації:

$$\Pi = B - \text{ПДВ} - З_{\text{з.в}} = 8000000 - 1600000 - 2809876,3 = 3\,590\,123,7 \text{ грн.}$$

Податок з прибутку:

$$\Pi\Pi = K_{\text{ПП}} \cdot \Pi \quad (5.29)$$

де $K_{\text{ПП}}$ – ставка податку з прибутку: $K_{\text{ПП}} = 25\%$

$$\Pi\Pi = 0,25 \cdot 3\,590\,123,7 = 897\,530,92 \text{ грн.}$$

Прогнозований чистий прибуток

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi - \Pi\Pi \quad (5.30)$$

$$\Pi_{\text{ч}} = 3\,590\,123,7 - 897\,530,92 = 2\,692\,592,78 \text{ грн.}$$

Визначаємо рентабельність лінії для виробництва пектиновмісних паст

$$P = (Ц_{\text{ПП}} - C) \cdot 100/C \quad (5.31)$$

$$P = (80000 - 53110,3) \cdot 100/53110,3 = 51 \%$$

Визначаємо чистий прибуток на тону продукції

$$\Pi_{\text{ч/т}} = \frac{\Pi_{\text{ч}}}{G_{\text{ПП}}} = 26926 \text{ грн/т} \quad (5.32)$$

Термін окупності капіталовкладень

$$T = K_{\Pi} / \Pi_{\text{ч}} \quad (5.33)$$

де K_{Π} – капіталовкладення, що включають вартість будівництва виробничого приміщення, обладнання, затрати на його доставку і монтаж обладнання:

$$T = 961100 / 2\,692\,592,78 = 4 \text{ місяці.}$$

Розраховуємо економічну ефективність проектованої лінії для виробництва пектиновміних паст з гарбуза за формулою:

$$E_p = Z_{\text{заг. експ}} + E_H \cdot K \quad (5.34)$$

де, $Z_{\text{заг. експ}}$ – річні експлуатаційні витрати на виробництво пектиновміних паст з гарбуза, K_{Π} – сума капіталовкладень, E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, $E_H = 0,15$

$$E_p = 1\,148\,004,6 + 961100 \cdot 0,15 = 1292169,6 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо в (табл. 5.10).

Таблиця 5.10

Розрахунок економічної ефективності

Показники	Величина
Річна програма виробництва ,т:	
- гарбуз	154
- цукор	55
- лимонна кислота	0,015
- вода	3000
- пектиновмісна гарбузова паста	100
Капіталовкладення, грн	961100
Собівартість продукції, грн/т	53110,3
Чистий прибуток, грн/т	26926
Чистий прибуток, грн	2 692 592,78
Рівень рентабельності ,%	51
Термін окупності проекту, років	0,4
Економічна ефективність, грн.	1292169,6

5.8. Висновки до 5 розділу.

1. Розроблені аналітичні та графічні моделі дозволили зробити порівняльну оцінку якісного стану зразків пектинових паст за розробленою рецептурою та контрольних для середньо та максимально граничних нормативних характеристик. Обрані як критерії оцінки коефіцієнт відповідності інтервалу якості $k_{в\text{ія}}$ дав можливість оцінити частку експериментальних характеристик у нормативному просторі, а розрахований коефіцієнт відповідності нормативної границі якості $k_{в\text{гн}}$ дозволив здійснити оцінку можливих відхилень характеристик продукції від гранично максимальних нормативних величин. Оцінку здійснювали як диференціально, так і інтегрально за 8 якісними характеристиками, зокрема, масовими частками вологи, сухих речовин, загальних та редукуючих цукрів; пектинових речовин, сухих речовин та золи; титрованою кислотністю та числом рН.

2. Побудовані математичні моделі якісного стану досліджуваних зразків пектинових паст виявили підвищення всіх обраних критеріїв якості для всіх зразків порівняно із контрольним: враховуючи, що вміст золи у зразках незначно збільшився, а решта характеристик є позитивними, то така динаміка свідчить про поліпшення якісного стану всіх зразків порівняно із контрольним. Мала місце відповідність якісних характеристик всіх досліджуваних зразків продукції, у тому числі й контрольний граничним межах нормативних показників.

3. За результатами математичного моделювання методом факторних площ найкращі характеристики виявилися у зразка № 4, а найгірші – у зразка №2.

4. За результатами розрахунку економічної ефективності підтверджено доцільність розробки та впровадження технології переробки гарбузової сировини для отримання пектиновмісної пасти, що поєднує технологічну ефективність із високими економічними показниками та відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження у харчових технологіях.

5. Встановлено, що при річному обсязі виробництва 100 т та капіталовкладень у розмірі 961 тис. грн собівартість готової продукції

складатиме 53 110,3 грн/т, що забезпечує отримання чистого прибутку в розмірі 26 926 грн/т і річного чистого прибутку 2,69 млн грн при рівні рентабельності 51 %, що свідчить про високу конкурентоспроможність розробленої технології.

6. Визначено, що термін окупності проєкту не перевищує 1 року, а узагальнений показник економічної ефективності становить 1,29 млн грн, що підтверджує інвестиційну привабливість, низький рівень економічних ризиків та доцільність промислового впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу сучасного стану проблеми встановлено, що найбільш ефективними напрямками інтенсифікації процесів виробництва пектиновмісних паст є комплексні технологічні рішення, які поєднують фізичні, біотехнологічні та хімічні методи обробки рослинної сировини. Доведено доцільність застосування вібраційної інтенсифікації процесу перемішування для підвищення ефективності екстрагування і формування структури пектиновмісних продуктів.

2. Розроблено програму, методики та експериментальну базу досліджень, створено дослідну модель гідравлічного змішувача з вібролопатевою мішалкою.

3. Розроблена математична модель інтенсифікації процесу виготовлення пектинових паст з застосуванням вібро-відцентрового змішування технологічного середовища дозволила отримати аналітичні та графічні залежності при виборі ефективних параметрів робочого режиму за енергетичними параметрами досліджуваного процесу виявили, що для виконавчих органів проектного механізму з величинами проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$ можна вважати ефективним частотний режим $60 - 75 \text{ рад/с}$, за якого витрати потужності становлять $500 - 2000 \text{ Вт}$ та питомі витрати енергії складають $100 - 250 \text{ Вт/кг}$ при відповідному збільшенні маси дебалансів m_1 від 1,2 до 2,4 кг.

4. Обґрунтовано вибір рослинної сировини для виробництва пектиновмісних паст. Встановлено закономірності формування фізико-хімічних, функціонально-технологічних та структурно-механічних характеристик гарбузової сировини різних сортових груп. Доведено, що мускатний гарбуз сорту «Вітамінна» є найбільш перспективним видом сировини завдяки підвищеному вмісту сухих речовин, пектинових сполук, цукрів і каротиноїдів.

5. Удосконалено підхід до оцінювання функціонально-технологічних і реологічних властивостей гарбузової м'якоті та пектиновмісних паст.

Експериментально підтверджено неньютонівський, тиксотропний характер їх реологічної поведінки та встановлено вплив температури й концентрації цукру на ефективну в'язкість і міцність структури. Визначено оптимальний вміст цукру (550 г/кг), який забезпечує формування гелевої системи з високими показниками пружності та стабільності.

6. Встановлено раціональні параметри робочих режимів вібролопатевого змішування. Показано, що найбільш енергоефективним є режим з величиною проекції твірної $L_g = 2 \text{ мм}$ та частотами 60–75 рад/с, за якого питомі витрати енергії становлять 100–250 Вт/кг. Доведено неефективність використання більших величин проекції твірної ($L_g = 5 \text{ мм}$) через різке зростання енергоспоживання.

7. Порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень за енергетичними та амплітудно-частотними критеріями показало, що відхилення отриманих значень не перевищує 8 – 9,1 %, що свідчить про адекватність математичної моделі та обґрунтовує доцільність її застосування в розрахунках.

8. За результатами математичного моделювання якісного стану пектиновмісних паст із використанням методу факторних площ встановлено підвищення інтегральних показників якості всіх експериментальних зразків порівняно з контрольним. Найкращі комплексні якісні характеристики зафіксовано у зразка № 4, що підтверджує ефективність запропонованих технологічних рішень. Проведений економічний аналіз підтвердив доцільність розробки та впровадження технології переробки гарбузової сировини для отримання пектиновмісних паст. Встановлено, що термін окупності проєкту не перевищує 12 місяців.

Узагальнення результатів теоретичних, експериментальних і економічних досліджень підтвердило наукову обґрунтованість та практичну доцільність впровадження інтегрованої технологічної схеми виробництва пектиновмісних паст. Розроблені рішення сприяють підвищенню ефективності використання сировини, зниженню енергетичних витрат і екологічного навантаження, що визначає перспективність їх застосування у харчовій промисловості України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kosiv R. Pectins: structure, properties, extraction from non-traditional raw materials, application in the food industry. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*. 2025. Vol. 27. P. 101–107.
2. Біленко М., Шелудько Є., Євдокименко В., Ткаченко Т., Каменських Д., Аксиленко М., Кашковський В. Вплив різних середовищ на плівкоутворення пектинів. *Вісник Львівського університету. Серія хімічна*. 2020. № 61(2). С. 433–444.
3. Дронь І. А., Стасюк А. В., Букартик М. М., Лугова Ю. Р., Самарик В. Я. Формування гідрогелів на основі пектину з різним ступенем естерифікації. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2020. Vol. 1, P. 239–244.
4. Муштрук Н., Муштрук М. Штучний інтелект як інструмент для розроблення рецептур пектиновмісних паст. *Здоров'я людини і нації*. 2025. Т. 3, № 2. С. 31–46.
5. Wang C., Qiu W. Y., Chen T. T., Yan J. K. Effects of structural and conformational characteristics of citrus pectin on its functional properties. *Food Chemistry*. 2021. Vol. 339. 128064.
6. Xu X., Zhang L., Yagoub A. E. A., Yu X., Ma H., Zhou C. Effects of ultrasound, freeze–thaw pretreatments and drying methods on structure and functional properties of pectin during the processing of okra. *Food Hydrocolloids*. 2021. Vol. 120. 106965.
7. Riyamol G., Chengaiyan J., Rana S. S., Ahmad F., Haque S., Capanoglu E. Recent advances in the extraction of pectin from various sources and industrial applications. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, №. 49. P. 46309–46324.
8. Christensen S. H. Pectins. *Food hydrocolloids* / ed. by ... – London : Routledge, 2022. P. b205–b230.

9. Niu H., Dou Z., Hou K., Wang W., Chen X., Chen X., Fu X. A critical review of RG-I pectin: Sources, extraction methods, structure, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024. Vol. 64, P. 8911–8931.
10. Liu Y., Weng P., Liu Y., Wu Z., Wang L., Liu L. Citrus pectin research advances: Derived as a biomaterial in the construction and applications of micro/nano-delivery systems. *Food Hydrocolloids*. 2022. Vol. 133. 107910.
11. Iñiguez-Moreno M., Pizaña-Aranda J. J. P., Ramírez-Gamboa D., Ramírez-Herrera C. A., Araújo R. G., Parra-Saldívar R., Melchor-Martínez E. M. Multitarget optimization of citrus pectin extraction using microwave-assisted technique and citric acid. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. P. 1–15.
12. Морозова Л. П. Характеристика функціонально-технологічних властивостей желатину в композиції з ксантаном у розробці напівфабрикату збивного борошняного з заданими характеристиками. *Продовольчі ресурси*. 2025. Т. 13, № 24. С. 8–21.
13. Hainiuk M. B., Gerush O. V., Bogdan N. S., Savokhina M. V., Khalieieva O. L. Властивості яблучного пектину та його застосування в медицині та фармації. *Likars'ka sprava*. 2023. № 2. С. 54–60.
14. Загальні технології харчової промисловості. Навчальний посібник у 2 ч. Ч. 1 / уклад. Ф.В. Перцевой, В.І. Ладика, П.П.Пивоваров, О.О. Гринченко, Н.В. Камсуліна, О.Б. Дроменко, О.Ю. Мельник, О.В. Котляр, А.М. Діхтярь, С.Б. Омельченко, С.П. Боковець –Х. : СНАУ, 2021. 317 с.
15. Ободович О. М., Гусятинська Н. А., Степанова О. Є., Шейко Т. В., Резакова Т. А., Чернявський К. Є. Фізико-механічні методи у виробництві пектиновмісних продуктів з рослинної сировини. *Продовольчі ресурси*. 2025. Т. 13, № 25. С. 141–153.
16. Roy S., Priyadarshi R., Łopusiewicz Ł., Biswas D., Chandel V., Rhim J. W. Recent progress in pectin extraction, characterization, and pectin-based films for active food packaging applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 239. 124248.

17. Zoghi A., Vedadi S., Esfahani Z. H., Gavlighi H. A., Khosravi-Darani K. A review on pectin extraction methods using lignocellulosic wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. Vol. 13, №. 7. P. 5577–5589.
18. Arumuganainar D. G., Ramesh D. L., Pandurangan P., Sunkar S., Abraham S., Samrot A. V., Moovendhan M. Sustainable pectin extraction: Navigating industrial challenges and opportunities with fruit by-products – A review. *Process Biochemistry*. 2025. Vol. 154. P. 234–245.
19. Baghdadi F., Nayebzadeh K., Aminifar M., Mortazavian A. M. Pectin purification from plant materials. *Macromolecular Research*. 2023. Vol. 31, №. 8. P. 753–770.
20. Fırat E., Koca N., Kaymak-Ertekin F. Extraction of pectin from watermelon and pomegranate peels with different methods and its application in ice cream as an emulsifier. *Journal of Food Science*. 2023. Vol. 88, № 11. P. 4353–4374.
21. Macias-Frotto B., Rostro-Alanís M., Escobedo-Avellaneda Z., Welte-Chanes J. Conventional and innovative methods for pectin extraction from agro-industrial by-products. *Food Engineering Reviews*. 2025. Vol. 17, № 1. P. 11–188.
22. Filho L. B., Lima S. K. R., de S. Barbosa H. Ultrasound-assisted extraction of pectin from *Spondias purpurea* L. peels residues: optimization, characterization, and comparison with commercial pectin. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2024. Vol. 18, №. 6. P. 4634–4652.
23. Majid M., Fallah-Joshaqani S., Dalvi-Isfahan M., Hamdami R. Comparison of conventional and microwave-assisted extraction of pectin from watermelon rind. *Journal of Polymers and the Environment*. 2023. Vol. 31, № 8. P. 3363–3371.
24. Forouhar A., Hamdami N., Djelveh G., Gardarin C., Pierre G., Ursu A. V., Michaud P. The effect of ultrasound pretreatment on pectin extraction from watermelon rind using microwave-assisted extraction. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 9. 5558.
25. Yilmaz-Turan S., Gal T., Lopez-Sanchez P., Martinez M. M., Menzel C., Vilaplana F. Modulating temperature and pH during subcritical water extraction

tunes the molecular properties of apple pomace pectin as food gels and emulsifiers. *Food Hydrocolloids*. 2023. Vol. 145. 109148.

26. Pereira D. T. V., Méndez-Albiñana P., Mendiola J. A., Villamiel M., Cifuentes A., Martínez J., Ibáñez E. An eco-friendly extraction method to obtain pectin from passion fruit rinds (*Passiflora edulis* sp.) using subcritical water and pressurized natural deep eutectic solvents. *Carbohydrate Polymers*. 2024. Vol. 326. 121578.

27. Mushtruk N., Mushtruk M. Analysis of the raw material base for pectin production. *Scientific Journal "Animal Science & Food Technologies"*. 2023. Vol. 14, №. 2.

28. Petrović J., Zahorec J., Šoronja-Simović D., Lončarević I., Nikolić I., Pajin B., Jožić A. Polysaccharide-enriched bakery and pasta products: advances, functional benefits, and challenges in modern food innovation. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, №. 21. 11839.

29. Rodrigues R. H. S., de Almeida E. A., Kruger F. R., Silva-Filho E. C., Muniz E. C. Hydrogels based on polyacrylamide and pectin containing rice husk ash: preparation, characterization and application in formulation of cementitious materials. *Materials*. 2024. Vol. 17, №. 23. 5746.

30. Mikayilov V., Omarova E., Kazimova I., Aliyeva J., Fatma A., Gasimova A., Nabiyeu A. Development of technology for obtaining juice from persimmon fruit (*Diospyros kaki* L.). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 128, №. 11.

31. Cherian E., Ts K., Kn S., Ks A., Poothicote N. G. Investigation into pectin extraction and technological implementations in the food industry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2024. Vol. 104, №. 15. P. 9102–9110.

32. de Alencar J. C. G., da Silva Pinto G. T., e Silva K. F. C., Santos J. M. S., Hubinger M. D., Bicas J. L., Paulino B. N. Pectin and pectic oligosaccharides (POS): recent advances for extraction, production, and its prebiotic potential. *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 155. 104808.

33. Chen J., Cheng H., Zhi Z., Zhang H., Linhardt R. J., Zhang F., Ye X. Extraction temperature is a decisive factor for the properties of pectin. *Food Hydrocolloids*. 2021. Vol. 112. 106160.
34. Sayed M. A., Kumar J., Rahman M. R., Noor F., Alam M. A. Effect of extraction parameters on the yield and quality of pectin from mango (*Mangifera indica* L.) peels. *Discover Food*. 2022. Vol. 2, №1. 28.
35. Kamal M. M., Kumar J., Mamun M. A. H., Ahmed M. N. U., Shishir M. R. I., Mondal S. C. Extraction and characterization of pectin from *Citrus sinensis* peel. *Journal of Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 46, № 1. P. 16–25.
36. Pholsin R., Shiekh K. A., Jafari S., Kijpatanasilp I., Nan T. N., Suppavorasatit I., Assatarakul K. Impact of pectin edible coating extracted from cacao shell powder on postharvest quality attributes of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit during storage. *Food Control*. 2024. Vol. 155. 110023.
37. Panahirad S., Dadpour M., Peighambaroust S. H., Soltanzadeh M., Gullón B., Alirezalu K., Lorenzo J. M. Applications of carboxymethyl cellulose- and pectin-based active edible coatings in preservation of fruits and vegetables: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 110. P. 663–673.
38. Chalchisa T., Zegeye A., Dereje B., Tolesa Y. Effect of sugar, pectin, and processing temperature on the qualities of pineapple jam. *International Journal of Fruit Science*. 2022. Vol. 22, № 1. P. 711–724.
39. Тетерєв М. М., Соколенко Н. М., Островка В. І., Мороз О. В., Попов Є. В., Рубан Е. В. Безвідходна технологія одержання пектину з відходів харчової промисловості. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 5(269). С. 61–68.
40. Муштрук Н. Оптимізація процесу виробництва гарбузової пектинової пасти. *Здоров'я людини і нації*. 2024. № 3. С. 7–17.
41. Пустошкіна В. О. Виробництво пектину з вторинної рослинної сировини. *Біотехнологія XXI століття*. 2025. С. 170–172.

42. Effah-Manu L., Maziya-Dixon B., Wireko-Manu F. D., Agbenorhevi J. K., Oduro I. Yam pectin and textural characteristics: a preliminary study. *International Journal of Food Properties*. 2022. Vol. 25, № 1. P. 1591–1603.
43. Riyamol G., Chengaiyan J., Rana S. S., Ahmad F., Haque S., Capanoglu E. Recent advances in the extraction of pectin from various sources and industrial applications. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8, P. 46309–46324.
44. Dikmetas D. N., Devecioglu D., Karbancioglu-Guler F., Kahveci D. Sequential extraction and characterization of essential oil, flavonoids, and pectin from industrial orange waste. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, № 12. P. 14442–14454.
45. Acosta P. I., Campedelli R. R., Correa E. L., Bazani H. A., Nishida E. N., Souza B. S., Mora J. R. Efficient production of biodiesel by using a highly active calcium oxide prepared in the presence of pectin as a heterogeneous catalyst. *Fuel*. 2020. Vol. 271. 117651.
46. Zheplinska M., Mushtruk M., Vasyliv V., Kuts A., Slobodyanyuk N., Bal-Prylypko L., Nikolaenko M., Kokhan O., Reznichenko Y., Salavor O. The micronutrient profile of medicinal plant extracts. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021. Vol. 15. P. 528–535.
47. Mzoughi Z., Majdoub H. Pectic polysaccharides from edible halophytes: insight on extraction processes, structural characterizations and immunomodulatory potentials. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 173. P. 554–579.
48. Zheplinska M., Vasyliv V., Deviatko O., Ulianko S., Kanivets N. Research of wheat fiber with pumpkin pectin plant additive. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. P. 237–246.
49. Picot-Allain M. C. N., Ramasawmy B., Emmambux M. N. Extraction, characterisation, and application of pectin from tropical and sub-tropical fruits: a review. *Food Reviews International*. 2022. Vol. 38, № 3. P. 282–312.
50. Sukhenko Y., Mushtruk M., Vasyliv V., Sukhenko V., Dudchenko V. Production of pumpkin pectin paste. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. P. 805–812.

51. Bédouet L., Courtois B., Courtois J. Rapid quantification of O-acetyl and O-methyl residues in pectin extracts. *Carbohydrate Research*. 2003. Vol. 338, № 4. P. 379–383.
52. Fishman M. L., Chau H. K., Hotchkiss A. T. Jr., White A., Garcia R. A., Cooke P. H. Effect of long-term cold storage and microwave extraction time on citrus pectin's physical and chemical properties. *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 92. P. 104–116.
53. Cho E. H., Jung H. T., Lee B. H., Kim H. S., Rhee J. K., Yoo S. H. Green process development for apple-peel pectin production by organic acid extraction. *Carbohydrate Polymers*. 2019. Vol. 204. P. 97–103.
54. Colodel C., Vriesmann L. C., Teófilo R. F., de Oliveira Petkowicz C. L. Optimization of acid-extraction of pectic fraction from grape (*Vitis vinifera* cv. Chardonnay) pomace, a winery waste. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 161. P. 204–213.
55. Demir D., Ceylan S., Göktürk D., Bölgen N. Extraction of pectin from albedo of lemon peels for preparation of tissue engineering scaffolds. *Polymer Bulletin*. 2021. Vol. 78. P. 2211–2226.
56. Chen H., Niu H., Zhang H., Yun Y., Chen W., Zhong Q., Fu X. Preparation and properties of ferulic acid–sugar beet pulp pectin ester and its application as a physical and antioxidative stabilizer in a fish oil–water emulsion. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 139. P. 290–297.
57. Brito T. B., Carrajola J. F., Gonçalves E. C. B. A., Martelli-Tosi M., Ferreira M. S. L. Fruit and vegetable residue flours with different granulometry range as raw material for pectin-enriched biodegradable film preparation. *Food Research International*. 2019. Vol. 121. P. 412–421.
58. Bashta A., Ivchuk N., Stetsenko N., Bashta O. Rationale of fruit and berry raw materials choice to increase the confectionery's nutritional value. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2021. Vol. 9. P. 103–115.

59. Çilingir S., Goksu A., Sabanci S. Production of pectin from lemon peel powder using an ohmic heating-assisted extraction process. *Food and Bioprocess Technology*. 2021. Vol. 14, № 7. P. 1349–1360.
60. Naqash F., Masoodi F. A., Gani A., Nazir S., Jhan F. Pectin recovery from apple pomace: physico-chemical and functional variation based on methyl-esterification. *International Journal of Food Science & Technology*. 2021. Vol. 56, № 9. P. 4669–4679.
61. Hosseini S., Parastouei K., Khodaiyan F. Simultaneous extraction optimization and characterization of pectin and phenolics from sour cherry pomace. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 158. P. 911–921.
62. Vásquez P., Vega-Gálvez A., Bernal C. Production of antioxidant pectin fractions, drying pretreatment methods and physicochemical properties: towards pisco grape pomace revalue. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2022. Vol. 16, № 5. P. 3722–3734.
63. Dao T. A. T., Webb H. K., Malherbe F. Optimization of pectin extraction from fruit peels by response surface method: conventional versus microwave-assisted heating. *Food Hydrocolloids*. 2021. Vol. 113. 106475.
64. Güzel M., Akpınar Ö. Valorisation of fruit by-products: production characterization of pectins from fruit peels. *Food and Bioproducts Processing*. 2019. Vol. 115. P. 126–133.
65. Ázar R. I. L., da Luz Morales M., Maitan-Alfenas G. P., Falkoski D. L., Alfenas R. F., Guimarães V. M. Apple juice clarification by a purified polygalacturonase from *Calonectria pteridis*. *Food and Bioproducts Processing*. 2020. Vol. 119. P. 238–245.
66. Gavahian M., Mathad G. N., Pandiselvam R., Lin J., Sun D.-W. Emerging technologies to obtain pectin from food processing by-products: a strategy for enhancing resource efficiency. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 115. P. 42–54.
67. Buathongjan C., Israkarn K., Sangwan W., Outrequin T., Gamonpilas C., Methacanon P. Chemical composition, rheological and antioxidant properties of

pectin isolated from *Parkia timoriana* pod. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 164. P. 4575–4582.

68. Su S., Ding X., Hou Y., Liu B., Du Z., Liu J. Structure elucidation, immunomodulatory and antitumor activity of a novel polysaccharide from *Boletus reticulatus*. *Food Science and Human Wellness*. 2023. Vol. 12, № 2. P. 647–661.

69. Ciriminna R., Fidalgo A., Meneguzzo F., Presentato A., Scurria A., Nuzzo D., Pagliaro M. Pectin: a long-neglected broad-spectrum antibacterial. *ChemMedChem*. 2020. Vol. 15, № 23. P. 2228–2235.

70. Biel-Nielsen T. L., Li K., Sørensen S. O., Sejberg J. J., Meyer A. S., Holck J. Utilization of industrial citrus pectin side streams for enzymatic production of human milk oligosaccharides. *Carbohydrate Research*. 2022. Vol. 519. 108627.

71. Wang W., Feng Y., Chen W., Adie K., Liu D., Yin Y. Citrus pectin modified by microfluidization and ultrasonication: improved emulsifying and encapsulation properties. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 70. 105322.

72. Huang J., Hu Z., Hu L., Li G., Yao Q., Hu Y. Pectin-based active packaging: a critical review on preparation, physical properties and novel application in food preservation. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 118. P. 167–178.

73. Sganzerla W. G., Rosa G. B., Ferreira A. L. A., da Rosa C. G., Beling P. C., Xavier L. O., de Lima Veeck A. P. Bioactive food packaging based on starch and citric pectin functionalized with *Acca sellowiana* waste. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 147. P. 295–303.

74. Marques C., Sotiles A. R., Farias F. O., Oliveira G., Mitterer-Dalton M. L., Masson M. L. Full physicochemical characterization of malic acid with emphasis on its application in pectin gels. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13, № 12. P. 9118–9129.

75. Staubmann L., Mistlberger-Reiner A., Raoui E. M., Brunner G., Sinaweil L., Winter M., Pignitter M. Combinations of hydrocolloids show enhanced stabilizing effects on cloudy orange juice ready-to-drink beverages. *Food Hydrocolloids*. 2023. Vol. 138. 108436.

76. Çilingir S., Goksu A., Sabanci S. Production of pectin from lemon peel powder using an ohmic heating-assisted extraction process. *Food and Bioprocess Technology*. 2021. Vol. 14, № 7. P. 1349–1360.
77. Bagal-Kestwal D. R., Pan M.-H., Chiang B.-H. Properties and applications of gelatin, pectin, and carrageenan gels. *Biomonomers for Green Polymeric Composite Materials*. 2019. P. 117–140.
78. Palamarchuk I., Mushtruk M., Sukhenko V., Dudchenko V., Korets L., Litvinenko A., Deviatko O., Ulianko S., Slobodyanyuk N. Modelling of the process of vibromechanical activation of plant raw material hydrolysis for pectin extraction. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 239–246.
79. Коваль О. В., Бондаренко Ю. М. Теоретичні основи структуроутворення пастоподібних харчових систем на основі гідроколоїдів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2020. Т. 26, № 5. С. 118–126.
80. Tho Minh T. N., Vian M. A., Chemat F. Pectin gelation mechanisms and textural design of pectin-based food pastes. *Journal of Texture Studies*. 2021. Vol. 52, № 4. P. 395–409.
81. Руденко О. П., Мельник В. М. Коллоїдно-хімічні аспекти формування гелевих структур у пектиновмісних продуктах. *Український хімічний журнал*. 2019. Т. 85, № 4. С. 59–66.
82. Funami T. Pectin and related polysaccharides as texture modifiers in food systems. *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 89. P. 540–549.
83. Гриценко О. М., Лисенко Н. В. Реологічні властивості пастоподібних харчових систем з рослинними гідроколоїдами. *Харчова наука і технологія*. 2021. № 15(4). С. 32–38.
84. Morris G. A. Structure–function relationships of pectin in semi-solid foods. *Carbohydrate Polymers*. 2020. Vol. 242. 116381.
85. Демченко А. І., Кравченко С. О. Теоретичні засади гелеутворення низькоетерифікованих пектинів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія*. 2020. № 3. С. 41–47.

86. May C. D. Industrial pectins: structure, functionality and applications in pastes. *Food Science and Technology International*. 2019. Vol. 25, № 3. P. 191–201.
87. Бойко Т. В. Формування консистенції пастоподібних продуктів функціонального призначення. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв*. 2022. № 1. С. 76–83.
88. Ngouémazong E. D., Koukala B. B. Influence of pectin structure on gel strength and viscosity. *LWT Food Science and Technology*. 2020. Vol. 118. 108708.
89. Литвиненко Т. Є., Шевченко О. М. Вплив концентрації пектину на текстурні властивості харчових паст. *Аграрна наука та харчові технології*. 2021. № 4. С. 112–118.
90. Жеплінська М. М., Василів В. П. Теплофізичні властивості харчових продуктів : довідник. – Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2021. – 206 с.
91. Сухенко Ю. Г., Жеплінська М. М., Муштрук М. М. Процеси і апарати харчових виробництв: [Навч. посібник] / За ред. Ю. Г. Сухенка. – К.: ЦП «Компринт», 2018. – 234 с.
92. Процеси і апарати харчових виробництв : курсове проектування : навч. посіб. / за ред. проф. І. Ф. Малежика. – Київ : НУХТ, 2012. – 543 с.
93. Зубар Н. М. Теоретичні основи харчових виробництв : підручник. – Київ: Видавничий дім «Кондор», 2020. – 304 с.
94. Сухенко Ю. Г., Василів В. П., Муштрук М. М., Бурова З. А. Процеси і апарати харчових виробництв: [Навч. посібник] / – 1-ше перевид., переробл. і доповн. – К.: НУБіП України, 2025. – 242 с.
95. Паламарчук І. П., Берник П. С., Стоцько З. А., Яськов В. В., Зозуляк І. А. Теплообмінні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва. Навчальний посібник. – Л.: «Бескид Бід», 2006. – 368с.
96. Черевко О. І. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. – Х.: ХДАТОХ. – 2002. – 420 с.
97. Марченко М. В. Технологічне обладнання харчових виробництв: обладнання для підготовчих операцій : конспект лекцій. – Хмельницький: ХНУ, 2010. – 138 с.

98. Сухенко Ю. Г., Сарана В. В., Василів В. П. Бурова З. А. Машини і обладнання для переробки сільськогосподарської продукції: [Підручник] / За ред. проф. Ю. Г. Сухенка. – К.: ЦП «Компринт», 2018. – 589 с.
99. Журавель Д. П., Паламарчук І. П., Уманський С. М., Паламарчук В. І. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : підручник / за ред. Д. П. Журавля. – К.: «ФОП Ямчинський О. В»., 2021. – 448 с.
100. Сухенко Ю. Г., Серьогін О. О., Сухенко В.Ю., Рябоконь Н. В. Ресурсозберігаючі технології в харчових і переробних виробництвах: [Підручник] / За ред.О. Серьогіна. К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. 338 с.
101. Сухенко Ю. Г., Ткачук А. І., Дениско О. А. Проектування технологічних процесів переробних і харчових виробництв : [Підручник] / за ред. проф. Ю. Г. Сухенка. – К.: ЗАТ «Нічлава», 2011. – 262 с.
102. Chernenkova, A., Leonova, S., Chernykh, V., Chernenkov, E. Influence of biologically active raw materials on rheological properties of flour confectionery products. *Acta Biologica Szegediensis*. 2019. Vol. 63. P. 195-205.
103. Danyliuk, O., Atamanyuk, V., Gumnytsky, Y., Bachyk, M. Investigation of the regularities of the process of periodic dissolution of polydisperse benzoic acid particles during pneumatic mixing. *Integrated technologies and energy saving*. 2017. P. 36-40.
104. Nakov, G., Ivanova, N. The effect of different methods for production of crackers on their physical and sensory characteristics. *Technologica Acta-Scientific professional journal of chemistry and technology*. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 41-45.
105. Osipenko, E., Denisovich, Y., Gavrilova, G., Vodolagina, E. The use of bioactive components of plant raw materials from the far eastern region for flour confectionery production. *AIMS Agriculture and Food*. 2019. Vol. 4(1). P. 73-87.
106. Savenkova, T., Soldatova, E., Misteneva, S., Taleysnik, M. Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies. *Food systems*. 2019. Vol. 2(2). P. 13-19.

107. Shishkin, A., Sadygova, M., Belova, M., Kirillova, T. Mathematical model of resource-saving production technology of baked goods with amaranth flour. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2020. Vol. 26(3). P. 195-203.
108. Pyvovarov, P., Cheremskaya, T., Kolesnikova, M., Iurchenko, S., Andrieieva, S. Study of properties of wheat germins and meals and their use in the production of dietary hardtacks. *Science Rise*. 2021. Vol. 4. P. 39-47.
109. Zhang, Y., Zhao, Y., Dong, L., Duan, C., et al. Flow pattern transition characteristics in vibrated gas-solid fluidized bed of Geldart B magnetite powder using pressure drop signals analysis. *Powder Technology*. 2018. Vol. 327. P. 358-367.
110. Zhang, Y., Yang, X., Zhu, F., Li, Y., et al. Characteristics of non-linear dynamics and energy transfer in a vibration gas-solid fluidized bed by using Hilbert-Huang transform. *Powder Technology*. 2019. Vol. 344. P. 970-980.
111. Wei, L., Zhang, B., Lu, C., Lu, Y., Wang, C. H. Experimental investigation of pressure fluctuation propagation in two orthogonal directions using a clapboard-type internally circulating fluidized bed. *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31(8). P. 3395-3407.
112. Zavialov, V., Mysiura, T., Popova, N., Zaporozhets, Y., Chornyi, V. Justification of local expenditure characteristics of vibrotransporting devices in design modeling of continuous vibroextractors. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 296–305.
113. Chornyi, V., Petrichenko, S., Mysiura, T. *et al.* Extraction from Amber Raw Materials under Electric Spark Action. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2022. 58, P. 386–392.
114. Zavialov, V., Mysiura, T., Popova, N., Zaporozhets, Y., Chornyi, V. Application of low-frequency mechanical vibrations for development of highly efficient continuous extraction equipment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. P. 227–236.

115. Zavialov, V., Lobok, O., Mysiura, T., Popova, N., Chorny, V., Pohorilyi, T. Identification of unknown parameters of the dynamic model of mass transfer. *Mathematical Modelling and Analysis*. 2023. Vol. 28(3), 459–468.
116. Chorny, V., Krūma, Z., Mysiura, T., Popova, N., & Zavialov, V. Comparative extraction of components from ukrainian and baltic ambers. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*. 77(5–6), P. 244–249.
117. Chorny, V., Mysiura, T., Popova, N., & Zavialov, V. Vibroextraction from pre-treated amber by electro-impulse discharges. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. P. 229–240.
118. Palamarchuk, I., Zavialov, V., Fu, Y., Palamarchuk, V., Popova, N. (2025). Mathematical Modeling by the Factorial Area Method in Evaluating the Quality Characteristics of the Studied Samples. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2025. P. 147–156.
119. Сукманов В.О., Українець А.І., Зав'ялов В.Л., Маринін А.І., Соловей Л.В. Субкритична екстракція біологічно активних речовин із виноградних вичавок. К.: НУХТ, 2019. 415 с.
120. Rogovskii, I.L., Palamarchuk, I.P., Voinash, S.A., Troyanovskaya, A.F., & Butenko, V.A., (2020). Engineering of constructive parameters of vibroaspiration separator of oil-containing grain seeds. *Journal of Physics: Conference Series*, 1679(4), article number 042034.
121. Palamarchuk, I., Kiurchev, S., Kiurcheva, L., & Verkholtantseva, V. (2019). Analysis of main process characteristics of infrared drying in the moving layer of grain produce. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*, 317-322.
122. Zhu, Z., Li, Y., Sun, D.W., & Wang, H.W. (2019). Developments of mathematical models for simulating vacuum cooling processes for food products – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(5), 715-727.
123. ДСТУ ISO 2173:2017. Продукти з фруктів та овочів. Визначення розчинних сухих речовин. Рефрактометричний метод (ISO 2173:2003, IDT).

[Чинний від 01.01.2019]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 12 с. *(Інформація та документація)*.

124. ДСТУ ISO 2171:2015. Зернові культури, бобові та продукти їх перероблення. Визначення зольності шляхом спалювання (ISO 2171:2007, IDT). [Чинний від 01.01.2016]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 14 с. *(Інформація та документація)*.

125. ДСТУ EN 12014-5:2007. Продукти харчові. Визначення вмісту нітратів та/або нітритів. Частина 5. Визначення вмісту нітратів у продуктах з фруктів та овочів методом іонної хроматографії (EN 12014-5:2005, IDT). [Чинний від 01.01.2009]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 18 с. *(Інформація та документація)*.

126. ДСТУ ISO 5725-1:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 1. Загальні принципи та визначення (ISO 5725-1:1994, IDT). [Чинний від 01.07.2006]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 24 с. *(Інформація та документація)*.

127. ДСТУ ISO 5725-2:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Частина 2. Основний метод визначення повторюваності та відтворюваності стандартного методу вимірювання (ISO 5725-2:1994, IDT). [Чинний від 01.07.2006]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 38 с. *(Інформація та документація)*.

128. ДСТУ 3570–97. Метрологія. Метрологічне забезпечення. Основні положення. [Чинний від 01.07.1998]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 1998. 16 с. *(Інформація та документація)*.

129. Паламарчук І. П., Загорко Н. П., Яременко Я. В., Сватова Н.С. Математичні моделі якості м'ясопродуктів з рослинними домішками // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 3. С. 177-187.

130. Palamarchuk Igor P., Adamchuk Leonora, Palamarchuk Vladyslav I., T., Hutsol Taras, O., Bezalychna, Olena. Assessment of the Ecological Safety of Honey with the Help of «Factor Area» Models. *Sustainability (Switzerland)*, 2024.

131. Palamarchuk I., Mushtruk M., Piddubny V., Tkachenko H. Modeling of the qualitative state of oilseeds from soybean seeds by multifactorial analysis of factor areas. *Scifood*. Vol.19. 2025.

132. Palamarchuk I., Mushtruk M., Piddubny V., Tkachenko H. Modeling of the qualitative state of oilseeds from soybean seeds by multifactorial analysis of factor areas. *Scifood*. Vol.19. 2025.

133. Mushtruk M., Palamarchuk I., Palamarchuk V., Petrychenko I., Pylypchuk O. Mathematical modelling of quality assessment of cooked sausages with the addition of vegetable additives. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Science* [this link is disabled](#). 2023. Vol. 17. P. 242–255.

134. ДСТУ 7804:2015. Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначення титрованої кислотності. [Чинний від 01.01.2017]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2017. 12 с. (*Інформація та документація*).

135. ДСТУ 6498:2006. Сировина і продукти харчові. Методи визначення масової частки редукуючих цукрів. [Чинний від 01.07.2007]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 10 с. (*Інформація та документація*).

136. ДСТУ ISO 8466-2:2002. Продукти з фруктів та овочів. Визначення вмісту пектинових речовин. Частина 2. Кальцій-пектатний метод (ISO 8466-2:2001, IDT). [Чинний від 01.07.2003]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 13 с. (*Інформація та документація*).

137. ДСТУ 4687:2006. Продукти харчові. Методи визначення масової частки загальних цукрів. [Чинний від 01.07.2007]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 11 с. (*Інформація та документація*).

138. ДСТУ 4957:2008. Продукти харчові. Методи визначення масової частки пектинових речовин. [Чинний від 01.01.2009]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 14 с. (*Інформація та документація*).

139. ДСТУ 8550:2015. Сировина рослинна. Методи визначення вмісту харчових волокон. [Чинний від 01.07.2016]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. 18 с. (*Інформація та документація*).
140. ДСТУ 6098:2009. Продукти харчові. Методи визначення активної кислотності (pH). [Чинний від 01.01.2011]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 9 с. (*Інформація та документація*).
141. Zayas, J. F. *Functionality of Proteins in Food*. – Berlin : Spr., 1997. – 373 p.
142. Damodaran, S., Parkin, K. L., Fennema, O. R. *Fennema's Food Chemistry*. – 5th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 1144 p.
143. McClements, D. J. *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 714 p.
144. Gómez-Guillén, M. C., Giménez, B., López-Caballero, M. E., Montero, M. P. Functional and bioactive properties of collagen and gelatin from alternative sources. *Food Hydrocolloids*. 2011. Vol. 25(8). P. 1813–1827.
145. Pietrasik, Z., Janz, J. A. M. Utilization of pea flour, starch-rich and fiber-rich fractions in low fat bologna. *Food Research International*. 2010. Vol. 43(2). P. 602–608.
146. Pearce, K. N., Kinsella, J. E. Emulsifying properties of proteins: evaluation of a turbidimetric technique. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1978. Vol. 26(3). P. 716–723.
147. Narsimhan, G., Wang, Z. Guidelines for processing emulsion-based foods. – *Food Engineering Reviews*. 2008. Vol. 1. P. 16–33.
148. McClements, D. J., Decker, E. A. Lipid oxidation in oil-in-water emulsions: impact of molecular environment on chemical reactions. *Journal of Food Science*. 2000. Vol. 65(8). P. 1270–1282.
149. Dickinson, E. Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food Hydrocolloids*. 2009. Vol. 23(6). P. 1473–1482.
150. ДСТУ ISO/CIE 11664-4:2019. Колориметрія. Частина 4. Колірні простори CIE 1976 L*a*b* і L*u*v* (ISO/CIE 11664-4:2019, IDT). [Чинний від 01.01.2021]

Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2021. 18 с. *(Інформація та документація)*.

151. ДСТУ ГОСТ 30726-2002. Продукти харчові. Методи виявлення та визначення кількості бактерій виду *Escherichia coli* (ГОСТ 30726-2001, IDT). [Чинний від 01.01.2003]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 13 с. *(Інформація та документація)*.

152. ДСТУ EN 12824:2004. Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин. Горизонтальний метод виявляння *Salmonella* (EN 12824:1997, IDT). [Чинний від 01.07.2005]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 24 с. *(Інформація та документація)*.

153. ДСТУ 8447:2015. Продукти харчові. Метод визначення дріжджів і плісневих грибів. [Чинний від 01.07.2017]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2017. 15с. *(Інформація та документація)*.

154. ДСТУ 4823.1:2007. Продукти м'ясні. Органолептичне оцінювання показників якості. Частина 1. Терміни та визначення понять. [Чинний від 01.01.2009]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 17 с. *(Інформація та документація)*.

155. ДСТУ 4823.2:2007. Продукти м'ясні. Органолептичне оцінювання показників якості. Частина 2. Загальні вимоги. [Чинний від 01.01.2009]. Вид.офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 14 с. *(Інформація та документація)*.

156. ДСТУ 5030:2008. Продукти харчові. Методи визначення масової частки загального азоту та розрахування вмісту білка. [Чинний від 01.01.2010] Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2010. 12 с. *(Інформація та документація)*.

157. ISO 10520:1997. Native starch – Determination of starch content – Ewers polarimetric method. Geneva : ISO, 1997. 10 p. *(Інформація та документація)*.

158. ISO 1842:1991. Fruit and vegetable products – Determination of pH. – Geneva : ISO, 1991. 6 p. *(Інформація та документація)*.

159. EN 15758:2010/ДСТУ EN 1135:2007. Соки фруктові та овочеві. Визначення вмісту сухих речовин. [Чинний від 01.01.2009]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 14 с. *(Інформація та документація)*.
160. ДСТУ ISO 750:2001. Продукти з фруктів та овочів. Визначення титрованої кислотності (ISO 750:1998, IDT). [Чинний від 01.07.2002]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2002. 8 с. *(Інформація та документація)*.
161. ДСТУ ISO 3593:2005. Крохмаль. Визначення кислотності (ISO 3593:1981, IDT). [Чинний від 01.07.2006]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 6 с. *(Інформація та документація)*.
162. ДСТУ 4954:2008. Продукти харчові. Методи визначення масової частки сирого протеїну. [Чинний від 01.01.2009]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 11 с. *(Інформація та документація)*.
163. Завадський, Й. С., Осовська, Т. В., Юшкевич, О. О. Економічний аналіз діяльності підприємства: [Навч. посібник]. Київ: КНЕУ, 2018. – 328 с.
164. Грабовецький, Б. Є. Економічний аналіз інноваційних проєктів: [Навч. посібник]. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 162 с.
165. Кузьмін, О. Є., Мельник, О. Г. Управління інноваційною діяльністю підприємств: [Монографія]. – Львів: Львівська політехніка, 2017. – 412 с.
166. ДСТУ ISO 9004:2018. Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху (ISO 9004:2018, IDT). [Чинний від 01.07.2019]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2019. 46 с. *(Інформація та документація)*.
167. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 14001:2015, IDT). [Чинний від 01.01.2016]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2016. – 29 с. *(Інформація та документація)*.

168. European Commission. Guide to Cost–Benefit Analysis of Investment Projects. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2015. – 346 p.

169. McKinsey Global Institute. The economics of productivity in food manufacturing. – New York : McKinsey & Company, 2019. – 124 p.

ДОДАТКИ

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи та
інноваційної діяльності
Національного університету біоресурсів
і природокористування України, доктор
сільськогосподарських наук, професор

« 05 »

2026 р.

Оксана ТОНХА

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор
ТОВ «УКРСТАР ТУР»

« 05 »

2026 р.

Олександр КУДЛАЙ

АКТ

**про впровадження/використання результатів дисертаційної роботи на
здобуття ступеня доктора філософії у виробництво**

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертації **Муштрук Наталії Михайлівни** на тему «Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми та режимних параметрів віброгідравлічного змішувача інгредієнтів виробництва пектиновмісних паст» яку представлено на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 18 «Виробництво та технології», спеціальності 181 «Харчові технології» було впроваджено у ТОВ «УКРСТАР ТУР».

Вид впровадження: результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничий та технологічний процеси у формі виробничо-технологічного впровадження, зокрема шляхом використання під час модернізації та проектування обладнання для приготування пектиновмісних паст, розроблені конструктивно-технологічні рішення та обґрунтовані режимні параметри процесу гідролізу, які застосовані безпосередньо для виробництва харчових пектиновмісних продуктів.

Наукова новизна отриманих результатів: обґрунтовано конструктивно-технологічну схему віброгідравлічного змішувача для багатокомпонентних пектиновмісних систем з урахуванням реологічних властивостей сировини; встановлено раціональні режимні параметри процесу гідролізу рослинної сировини, зокрема частоту та амплітуду коливань, інтенсивність гідравлічного впливу й тривалість процесу, що забезпечують інтенсифікацію масообмінних процесів і підвищення якісних показників кінцевого продукту.

Практичне впровадження/використання результатів: у виробничих умовах підприємства впроваджено конструкцію розробленого віброгідравлічного змішувача та рекомендовані режимні параметри процесу гідролізу, що забезпечують підвищення якісних показників кінцевого продукту, скорочення тривалості технологічного процесу та зниження енерговитрат; застосовано методичні рекомендації щодо проведення процесу гідролізу рослинної

пектиновмісної сировини, зокрема при виробництві пектиновмісних паст з гарбуза, яблук та моркви.

Значущість отриманих результатів: підвищення ефективності процесу змішування інгредієнтів для виробництва пектиновмісних паст і стабілізацію фізико-хімічних та структурно-механічних показників готової продукції, що сприяло зниженню питомих енерговитрат і собівартості виробництва, створило умови для модернізації технологічного обладнання без значних капіталовкладень, підвищення конкурентоспроможності підприємства та розширення асортименту пастоподібної продукції з підвищеною біологічною цінністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами: дисертацію виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою «Наукове обґрунтування та розроблення новітніх агроінженерних рішень моделювання сировини заданого нутрієнтного складу для військовослужбовців» (номер державної реєстрації 00493706, № 0124U001737, 2023 – 2025 рр.).

**Від Національного університету біоресурсів
і природокористування України**

Начальник науково-дослідної частини

 **Володимир ОТЧЕНАШКО**

«05» 01 2026 р.

В.о. декана факультету харчових наук,
нутриціології та управління якістю

 **Лариса БАЛЬ-ПРИЛИПКО**

«05» 01 2026 р.

Здобувач

 **Наталія МУШТРУК**

«05» 01 2026 р.

Від організації

Директор

ТОВ «УКРСТАР ТУР»

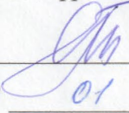
 **Олександр КУДЛАЙ**

«05» 01 2026 р.



ПОГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи
та цифрової трансформації

 **Олена ГЛАЗУНОВА**
" 05 " 01 2026 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з наукової роботи та
інноваційної діяльності

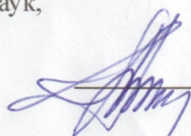
 **Оксана ТОНХА**
" 05 " 2026 р.

**АКТ**

**про впровадження/використання результатів
дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії
в освітній процес**

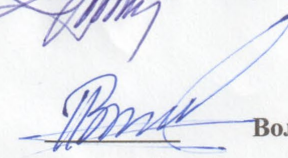
Даним актом стверджується, що результати дисертаційної роботи на тему: **«Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми та режимних параметрів віброгідравлічного змішувача інгредієнтів виробництва пектиновмісних паст»** що представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 **"Харчові технології"** виконаної **Муштрук Наталією Михайлівною** впроваджено у навчальну програму при викладанні дисциплін: "Процеси і апарати харчових виробництв", "Процеси і апарати біотехнічних виробництв", "Машини і обладнання для переробки сільськогосподарської продукції", "Технологічне обладнання галузі", "Інформаційні технології та математичне моделювання систем управління якістю" на кафедрі процесів і обладнання переробки продукції АПК факультету харчових наук, нутриціології та управління якістю у підготовці фахівців ОС "Баклавр" і ОС "Магістр" спеціальності 181 "Харчові технології" ОП "Харчові технології" та ОП "Якість, стандартизація та сертифікація" у Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

В.о. декана факультету харчових наук,
нутриціології та управління якістю
д.т.н., професор



Лариса БАЛЬ-ПРИЛИПКО

Завідувач кафедри процесів і
обладнання переробки продукції АПК
к.т.н., доцент



Володимир ВАСИЛІВ



Розрахункові параметри якості зразка № 1 пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		Fc	Fmax	Rmaxi, ум. од.	Rci, ум. од.	Ri, ум. од.	Si, Smax, Sc, ум. од. ²	k _{вля}	k _{вгн}
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	1,189	1,54 8,16 2,84	0,542	0,189
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	0,551			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	1,705			
4	рН	9,15	18	1,967	1,0	0,633			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,96			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	0,218			
7	Масова частка редуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	0,607			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	0,522			

Розрахункові параметри якості зразка № 2 пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		Fc	Fmax	Rmaxi, ум. од.	Rci, ум. од.	Ri, ум. од.	Si, Smax, Sc, ум. од. ²	k _{вля}	k _{вгн}
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	0,997	1,23 8,16 2,84	0,433	0,151
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	0,877			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	1,399			
4	рН	9,15	18	1,967	1,0	0,59			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,84			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	0,82			
7	Масова частка редуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	0,607			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	0,522			

Таблиця В.3

Розрахункові параметри якості зразка № 3 пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		Fc	Fmax	Rmaxi, ум. од.	Rci, ум. од.	Ri, ум. од.	Si, Smax, Sc, ум. од. ²	K _{вля}	K _{впн}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	0,882	2,4 8,16 2,84	0,845	0,294
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	1,072			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	1,224			
4	pH	9,15	18	1,967	1,0	0,568			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,78			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	1,033			
7	Масова частка редуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	1,089			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	1,13			

Таблиця В.4

Розрахункові параметри якості зразка №4 пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		Fc	Fmax	Rmaxi, ум. од.	Rci, ум. од.	Ri, ум. од.	Si, Smax, Sc, ум. од. ²	K _{вля}	K _{впн}
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	0,797	2,39 8,16 2,84	0,845	0,293
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	1,215			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	1,071			
4	pH	9,15	18	1,967	1,0	0,546			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,72			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	1,22			
7	Масова частка редуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	1,244			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	0,97			

Таблиця В.5

Розрахункові параметри якості зразка № 5 пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		Fc	Fmax	Rmaxi, ум. од.	Rci, ум. од.	Ri, ум. од.	Si, Smax, Sc, ум. од. ²	k _{вiя}	k _{вгн}
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	0,686	2,4 8,16 2,84	0,845	0,294
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	1,403			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	0,885			
4	pH	9,15	18	1,967	1,0	0,525			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,64			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	1,481			
7	Масова частка редуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	1,422			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	0,783			

Таблиця В.6

Розрахункові параметри якості зразка №6 пектинової пасти

№ п/п	Експериментальні характеристики	Нормативні дані				Критерії оцінки якості			
		Fc	Fmax	Rmaxi, ум. од.	Rci, ум. од.	Ri, ум. од.	Si, Smax, Sc, ум. од. ²	k _{вiя}	k _{вгн}
1	Масова частка вологи, %	66	92	1,394	1,0	0,586	2,36 8,16 2,84	0,831	0,289
2	Масова частка сухих речовин, %	39	70	1,795	1,0	1,572			
3	Масова частка пектинових речовин, %	9,15	18	1,967	1,0	0,754			
4	pH	9,15	18	1,967	1,0	0,503			
5	Титрована кислотність, град	5	10	2,0	1,0	0,58			
6	Масова частка цукрів загальних, %	39,5	75	1,9	1,0	1,704			
7	Масова частка редуючих цукрів, %	13,5	25	1,852	1,0	1,6			
8	Масова частка золи, %	1,15	2,0	1,739	1,0	0,522			

Таблиця В.7

Критерії оцінки якості досліджуваних зразків пектинових паст

№ п/п	Зразки пектинових паст	Величина факторного простору			Обрані критерії оцінки якості	
		S_c , ум. од ²	S_{max} , ум. од ²	S_i , ум. од ²	$k_{в\dot{я}}$	$k_{в\dot{гн}}$
1	Зразок №1	2,84	8,16	1,54	0,542	0,189
2	Зразок №2	2,84	8,16	1,23	0,433	0,151
3	Зразок №3	2,84	8,16	2,4	0,845	0,294
4	Зразок №4	2,84	8,16	2,39	0,845	0,293
5	Зразок №5	2,84	8,16	2,4	0,845	0,294
6	Зразок №6	2,84	8,16	2,36	0,831	0,289
7	Конт. зразок	2,84	8,16	0,63	0,222	0,077

ТОВ "УкрХімАналіз"
Ідентифікаційний код 39098305
код ЄДРПОУ – 39098305
оф. 328, пр-т Науки 47, м. Київ,
03028



ТОВ "УкрХімАналіз"

Результати фізико-хімічні випробувань

Гарбуз

Дата випробувань: 10.08 – 10.10.2024 р.

Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019

Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна

Кількість зразків: 3 (три) проба № 124, 125, 126

Показник	Гарбуз мускатний "Вітамінна"	Гарбуз великоплідний "Стофунтова"	Гарбуз твердокорий "Голонасінна"	Метод випробування
Масова частка сухих речовин, %	11,2±0,4	8,5±0,3	9,8±0,3	ДСТУ ISO 2173:2007
Масова частка вологи, %	88,8±0,4	91,5±0,3	90,2±0,3	ДСТУ 4957:2008
Масова частка загальних цукрів, %	6,8±0,2	4,2±0,2	5,1±0,2	ДСТУ ISO 750:2001
в т.ч. редукуючих цукрів, %	4,5±0,2	2,8±0,1	3,4±0,2	ДСТУ 4954:2008
Масова частка пектинових речовин, %	2,1±0,1	1,5±0,1	1,8±0,1	ДСТУ 4956:2008
Масова частка каротиноїдів, мг/100 г	18,5±0,8	8,2±0,5	12,3±0,6	ДСТУ 4305:2004
Титрована кислотність, град	1,8±0,1	1,2±0,1	1,5±0,1	ДСТУ 4955:2008
pH	6,2±0,1	6,5±0,1	6,3±0,1	ДСТУ ISO 1842:2003

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.

Зав. лабораторією: Щербак М.Ю.

Протокол випробувань стосується тільки зразка, підданого випробуванням



ТОВ "УкрХімАналіз"
 Ідентифікаційний код 39098305
 код ЄДРПОУ – 39098305
 оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,
 03028



ТОВ "УкрХімАналіз"
 Результати функціонально-технологічних випробувань

Гарбуз

Дата випробувань: 10.08 – 10.10.2024 р.

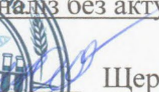
Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019

Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна

Кількість зразків: 3 (три) проби № 134, 135, 136

Показник	Гарбуз мускатний "Вітамінна"	Гарбуз великоплідний "Стофунтова"	Гарбуз твердокорий "Голонасінна"	Метод випродування
Водоутримувальна здатність, %	245±8	198±7	220±7	ДСТУ ISO 16634-1:201
Жирутримувальна здатність, %	158±6	132±5	145±5	ДСТУ ISO 1442
Емульгувальна здатність, %	52±2	43±2	48±2	ISO 707:2008
Стабільність емульсії, %	68±3	55±2	62±2	ISO 11285:2004
Набухання, %	185±7	152±6	168±6	ДСТУ ISO 1871:2015

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.

Зав. лабораторією  Щербак М.Ю.

Протокол випробувань стосується тільки зразка, підданого випробуванням



ТОВ "УкрХімАналіз"
Ідентифікаційний код 39098305
код ЄДРПОУ – 39098305
оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,
03028



ТОВ "УкрХімАналіз"

Результати структурно-механічних випробувань

Гарбуз

Дата випробувань: 10.08 – 10.10.2024 р.

Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019

Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна

Кількість зразків: 3 (три) проби № 94, 95, 96

Показник	Гарбуз мускатний "Вітамінна"	Гарбуз великоплідний "Стофунтова"	Гарбуз твердокорий "Голонасіна"	Метод випробування
Ефективна в'язкість при 20°C ($\gamma=100 \text{ c}^{-1}$), Па·с	2,85±0,10	1,52±0,08	2,15±0,09	ДСТУ ISO 3219:2015
Ефективна в'язкість при 60°C ($\gamma=100 \text{ c}^{-1}$), Па·с	1,68±0,08	0,95±0,05	1,32±0,07	ДСТУ ISO 3219:2015
Міцність тканин, Н/см²	8,5±0,4	5,2±0,3	6,8±0,3	ДСТУ ISO 7500-1:2009
Модуль пружності, кПа	42±2	28±2	35±2	ДСТУ ISO 527-1:2019
Час релаксації напруг, с	125±8	85±6	105±7	ISO 3384:2005
Ступінь тиксотропії, %	32±2	28±2	30±2	ISO 3219 Annex B

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.

Зав. лабораторією: Шербак М.Ю.

Протокол випробувань отримав тільки зразка, підданого випробування



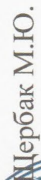
ТОВ "УкрХімАналіз"
Ідентифікаційний код 39098305
код ЄДРПОУ – 39098305
оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,
03028

Результати фізико-хімічні випробувань

ТОВ "УкрХімАналіз"
ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ В УКРАЇНІ

Пектиновмісна паста з гарбуза
Дата випробувань: 10.11 – 20.12.2024 р.
Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019
Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна
Кількість зразків: 7 (сім) проба № 188-195

Показник	Зразок 1 (контроль свіжий)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)	Метод випробування
Масова частка вологи, %	89,2±0,6	78,5±0,5	65,8±0,4	58,2±0,4	52,6±0,3	45,3±0,3	38,7±0,3	ДСТУ 4957:2008
Масова частка сухих речовин, %	10,8±0,6	21,5±0,5	34,2±0,4	41,8±0,4	47,4±0,3	54,7±0,3	61,3±0,3	ДСТУ ISO 2173:2007
Масова частка пектинових речовин, %	1,8±0,1	15,6±0,3	12,8±0,3	11,2±0,2	9,8±0,2	8,1±0,2	6,9±0,2	ДСТУ 4956:2008
pH	6,2±0,1	5,8±0,1	5,4±0,1	5,2±0,1	5,0±0,1	4,8±0,1	4,6±0,1	ДСТУ ISO 1842:2003
Титрована кислотність, град	2,1±0,1	4,8±0,2	4,2±0,2	3,9±0,1	3,6±0,1	3,2±0,1	2,9±0,1	ДСТУ 4955:2008
Масова частка цукрів загальних, %	5,2±0,2	8,6±0,3	32,4±0,5	40,8±0,6	48,2±0,7	58,5±0,8	67,3±0,9	ДСТУ ISO 750:2001
Масова частка редуруючих цукрів, %	4,8±0,2	8,2±0,3	12,5±0,3	14,7±0,4	16,8±0,4	19,2±0,5	21,6±0,5	ДСТУ 4954:2008
Масова частка золи, %	0,6±0,05	1,8±0,1	1,5±0,1	1,3±0,1	1,1±0,1	0,9±0,1	0,8±0,1	ДСТУ ISO 2171:2019

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.
Зав. лабораторії:  Шербак М.Ю.
Протокол випробувань № 188-195. Печітка зразка, підданого випробування



ТОВ "УкрХімАналіз"

Ідентифікаційний код 39098305

код ЄДРПОУ – 39098305

оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,

ТОВ "УкрХімАналіз"

ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ В УКРАЇНІ

03028 Результати реологічних випробувань

Пектиновмісна паста з гарбуза
Дата випробувань: 10.11 – 20.12.2024 р.
Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019
Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна
Кількість зразків: 7 (сім) проба № 388-395

Показник	Зразок 1 (контроль)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)	Метод випробування
Ефективна в'язкість, Па·с	0,8±0,1	32,4±1,5	42,6±1,9	51,8±2,3	58,4±2,6	48,7±2,2	41,2±1,8	ДСТУ ISO 3219:2015
Межа текучості, Па	-	12,5±0,6	16,8±0,8	20,4±0,9	23,6±1,1	19,8±0,9	16,5±0,7	
Пластична в'язкість, Па·с	-	27,6±1,3	35,8±1,6	43,5±1,9	49,2±2,2	41,1±1,8	34,8±1,6	
Міцність гелю, г	-	185±9	248±11	296±13	342±15	318±14	276±12	ДСТУ ISO 11036:2003
Пружність, %	-	58,4±1,9	68,7±2,2	74,5±2,4	78,2±2,5	75,8±2,4	71,3±2,3	
Липкість, г	-	245±10	186±8	148±7	125±6	112±5	98±4	

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.

Зав. лабораторією:  Шчербак М.Ю.

Протокол випробувань:  Шчербак М.Ю.

Протокол випробувань:  Шчербак М.Ю.

ТОВ "УкрХімАналіз"

Ідентифікаційний код 39098305

код ЄДРПОУ – 39098305

оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,

УкрХімАналіз

ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ В УКРАЇНІ

ТОВ "УкрХімАналіз"

код ЄДРПОУ – 39098305

оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,

Результати функціонально-технологічних випробувань

Пектиновмісна паста з гарбуза
Дата випробувань: 10.11 – 20.12.2024 р.
Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019
Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна
Кількість зразків: 7 (сім) проба № 488-495

Показник	Зразок 1 (контр. свіжий)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)	Метод випробування
Водотримуюча здатність, %	185±7	268±9	242±8	228±8	215±7	198±7	182±6	ДСТУ ISO 16634-1:201
Жироутримуюча здатність, %	98±4	138±5	128±5	122±5	116±4	108±4	102±4	ДСТУ ISO 1442
Набухання, %	245±10	398±13	362±12	342±11	325±11	302±10	278±9	ГОСТ 10832-2009
Стабільність емульсії, %	68,5±1,8	82,4±2,1	79,6±2,0	77,8±2,0	75,2±1,9	72,6±1,9	70,1±1,8	ДСТУ ISO 3931:2009
Пінотворююча здатність, %	124±5	162±6	156±6	151±6	146±6	140±5	134±5	ДСТУ ISO 8586
Стабільність піни, хв	28±2	45±2	42±2	40±2	38±2	35±2	32±2	
Активність води (a _w)	0,982±0,005	0,945±0,004	0,912±0,003	0,886±0,003	0,862±0,003	0,835±0,002	0,808±0,002	ДСТУ ISO 18787:2017

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.
Зав. лабораторією:  Цербак М.Ю.
Протокол випробування:  488-495

ТОВ "УкрХімАналіз"
Ідентифікаційний код 39098305
код ЄДРПОУ – 39098305
оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,
04202

ТОВ "УкрХімАналіз"
ХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ В УКРАЇНІ

Організація структурно-механічних випробувань

Пектиновмісна паста з гарбуза
Дата випробувань: 10.11 – 20.12.2024 р.
Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019
Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна
Кількість зразків: 7 (сім) проба № 188-195

Показник	Зразок 1 (контроль свіжий)	Зразок 2 (без цукру)	Зразок 3 (350 г цукру)	Зразок 4 (450 г цукру)	Зразок 5 (550 г цукру)	Зразок 6 (700 г цукру)	Зразок 7 (850 г цукру)	Метод випробування
Твердість, Н	0,12±0,02	1,38±0,06	1,72±0,08	2,08±0,09	2,42±0,11	2,18±0,10	1,95±0,09	ДСТУ ISO 11036:2003
Пружність, мм	-	3,2±0,2	3,9±0,2	4,3±0,2	4,7±0,2	4,5±0,2	4,1±0,2	
Когезивність	-	0,58±0,02	0,65±0,02	0,69±0,02	0,73±0,02	0,71±0,02	0,68±0,02	
Адгезивність, Н·с	-	0,48±0,02	0,42±0,02	0,38±0,02	0,34±0,01	0,31±0,01	0,28±0,01	
Липкість, Н	-	0,68±0,03	0,58±0,02	0,51±0,02	0,45±0,02	0,40±0,02	0,36±0,01	ISO 13299
Розмазуваність, Н·мм	-	4,2±0,2	3,6±0,2	3,1±0,1	2,7±0,1	2,4±0,1	2,1±0,1	

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.
Зав. лабораторією: М.Ю. Цербак
Протокол випробувань: 188-195



ТОВ "УкрХімАналіз"
Ідентифікаційний код 39098305
код ЄДРПОУ – 39098305
оф. 328, пр-т Науки 41, м. Київ,
03028



ТОВ "УкрХімАналіз"

Результати мікробіологічних випробувань

Гарбуз

Дата випробувань: 10.08 – 10.10.2024 р.

Нормативний документ: ДСТУ ISO/IEC 17025:2019

Замовник: Муштрук Наталія Михайлівна

Кількість зразків: 4 (чотири) проба № 01 – 04

Назва показника	Контроль	Рецептура 5	Рецептура 6	Рецептура 7	Згідно з ГОСТ 9958
Кількість КМАФАНМ, в 1 г, не більше					
на перший день ($t=0-8^{\circ}$)	$1,6 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^3$
на четвертий день ($t=0-8^{\circ}$)	$1,9 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$	
Бактерії групи кишкових паличок	Не виявлено				Не дозволено
Умовно-патогенні мікроорганізми (<i>E.coli</i> , <i>S.aureus</i> , сульфїтредукуючі клостридії) в 1 г	Не виявлено				Не дозволено
Патогенні мікроорганізми (бактерії роду <i>Salmonella</i>) в 25 г	Не виявлено				Не дозволено
Дріжджі та плісняві гриби	Не виявлено				Не дозволено

Проба представлена на аналіз без акту відбору проб.

Зав. лабораторією: Щербак М.Ю.

Протокол випробувань стосується тільки зразка, підданого випробування



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

1. **Mushtruk N.M.**, Mushtruk, M.M. Analysis of the raw material base for pectin production. *Animal Science and Food Technology*. 2023. Vol. 14(2), P. 57–75. *(Муштрук Н.М. здійснено аналіз сировинної бази для виробництва пектину, узагальнено літературні та експериментальні дані, сформульовано висновки. Муштрук М.М. проведено систематизацію джерел інформації, участь у методологічному обґрунтуванні дослідження та редагуванні матеріалів статті).*

2. **Муштрук Н.М.** Оптимізація процесу виробництва гарбузової пектинової пасти. *Здоров'я людини і нації*. 2024. Т.2. № 3. С. 7–17.

3. **Муштрук Н.М.**, Муштрук, М.М. Штучний інтелект як інструмент для розроблення рецептур пектиновмісних паст. *Здоров'я людини і нації*. 2025. Т. 3. № 2. С. 31–46. *(Муштрук Н.М. сформульовано наукову ідею та концепцію застосування штучного інтелекту для розроблення рецептур пектиновмісних паст, визначено мету і завдання дослідження, виконано аналіз та інтерпретацію отриманих результатів, сформульовано висновки. Муштруком М.М. розроблено та реалізовано алгоритмічні моделі штучного інтелекту, здійснено підготовку та обробку вхідних даних, проведено моделювання рецептур і участь у підготовці рукопису статті).*

4. **Муштрук Н.М.** Порівняльний аналіз властивостей пектиновмісних паст із використанням штучного інтелекту. *Здоров'я людини і нації*. 2025. Т. 3. № 3. С. 63–79.

Статті у науковому виданні,**включені до міжнародних наукометричних баз даних****Scopus та/або Web of Science Core Collection**

5. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., **Mushtruk, N.** Evaluation of technological parameters of convective drying of pumpkin seeds with vibro-ozonation

intensification of the process. *Animal Science and Food Technology*. 2025, Vol. 16(2). P. 39–54. (*Mushtruk M. розроблено програму експериментальних досліджень та виконано підготовку зразків, проведено конвективне сушіння насіння гарбуза. Mushtruk M. здійснено технічне обґрунтування параметрів вібраційного та озонуючого впливу, проведено аналіз енергоефективності процесу. Palamarchuk I. виконано узагальнення та аналіз експериментальних даних, оцінено технологічні параметри сушіння, сформульовано наукові висновки*).

6. Mushtruk M., Chuiuk R., **Mushtruk, N.**, Vasyliv, V., Slobodyanyuk, N., Rudyk Y., Gruntovskyi, M. Raw material base for the production of food and pharmacological glycerin. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16(2), e25057. (*Mushtruk N. сформульовано наукову концепцію дослідження та виконано аналіз сировинної бази, проведено порівняльний аналіз рослинної сировини (багатанних культур). Chuiuk R. проведено аналіз нормативних та регуляторних вимог до якості гліцерину. Mushtruk M. здійснено узагальнення літературних та експериментальних даних, оцінено перспективність різних видів сировини, сформульовано висновки. Vasyliv V. виконав фізико-хімічну оцінку сировини та продуктів переробки, а також здійснив аналіз отриманих результатів. Slobodyanyuk N. брала участь у проведенні фізико-хімічних досліджень сировини та продуктів перероблення, а також у узагальненні та інтерпретації результатів. Rudyk Y. здійснив статистичну обробку експериментальних даних, аналіз отриманих результатів. Gruntovskyi M. брав участь у підготовці рукопису статті, формуванні структури роботи, редагуванні тексту та оформленні матеріалів до публікації*).

Тези наукових доповідей

7. **Муштрук Н.М.**, Муштрук М.М. Удосконалення технології виробництва пектиновмісних паст. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу. Секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах

війни та вирішенні завдань плану відродження України: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 484-485. *(Муштрук Н.М. сформульовано наукову ідею доповіді, обґрунтовано напрями удосконалення технології виробництва пектиновмісних паст, здійснено узагальнення результатів досліджень. Муштруком М.М. виконано техніко-технологічний аналіз процесу та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

8. **Муштрук Н.М.**, Муштрук М.М. Дослідження сировинної бази для виробництва пектину. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу. Секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 486-487. *(Муштрук Н.М. проведено аналіз та оцінку сировинної бази для виробництва пектину, узагальнено літературні та експериментальні дані. Муштруком М.М. виконано систематизацію сировинних ресурсів та участь у формуванні висновків).*

9. **Mushtruk N.M.**, Mushtruk M.M., Rzewski P. The main technological aspects of the production of pectin-containing pastes. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу. Секція 3: Роль тваринництва, ветеринарної медицини та харчових технологій в умовах війни та вирішенні завдань плану відродження України: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 644-646. *(Mushtruk N.M. обґрунтовано основні технологічні аспекти виробництва пектиновмісних паст, здійснено аналіз технологічних параметрів та сформульовано висновки. Mushtruk M.M. виконано технічний аналіз обладнання і процесів. Rzewski P. взято участь у*

порівняльному аналізі технологічних рішень та підготовці матеріалів доповіді).

10. **Муштрук Н.М.**, Муштрук М.М. Аналіз сировини для виробництва пектину. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 205. *(Муштрук Н.М. виконано аналіз якісних та кількісних характеристик сировини для виробництва пектину, обґрунтовано перспективність її використання. Муштруком М.М. здійснено узагальнення даних та участь у підготовці тез доповіді).*

11. **Муштрук Н.М.**, Муштрук М.М. Технологічні особливості виробництва пектинів. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 206. *(Муштрук Н.М. проаналізовано ключові технологічні особливості виробництва пектинів, визначено критичні параметри процесу. Муштруком М.М. виконано технічне обґрунтування технологічних рішень та участь у формуванні висновків).*

12. **Муштрук Н.М.**, Муштрук М.М. Обладнання для виробництва пектину. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 207. *(Муштрук Н.М. здійснено аналіз сучасного обладнання для виробництва пектину та визначено напрями його удосконалення. Муштруком М.М. виконано технічну оцінку конструктивних рішень обладнання та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

13. **Муштрук Н.М.**, Муштрук М.М. Технологічні інновації у технології виробництва пектинів. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем

виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 208. *(Муштрук Н.М. обґрунтовано інноваційні підходи у технології виробництва пектинів, узагальнено сучасні наукові та практичні рішення. Муштруком М.М. здійснено аналіз інноваційних технологічних схем та участь у формуванні висновків).*

14. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Аналіз ринку обладнання для виробництва пектинів. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 18–19 квітня 2024 року: тези доповіді. Київ, 2024. С. 209. *(Муштрук Н.М. проведено аналіз сучасного ринку обладнання для виробництва пектинів, визначено тенденції та перспективи розвитку. Муштруком М.М. виконано техніко-економічну оцінку обладнання та участь у підготовці матеріалів доповіді).*

15. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Аналіз та оцінка сировинних ресурсів для виробництва пектину. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XIII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 10–11 квітня 2025 року: тези доповіді. Київ, 2025. С. 337–338. *(Муштрук Н.М. здійснено комплексний аналіз та оцінку сировинних ресурсів для виробництва пектину, обґрунтовано напрями їх раціонального використання. Муштруком М.М. виконано систематизацію ресурсної бази та участь у формуванні висновків).*

16. **Муштрук Н.М.,** Муштрук М.М. Інноваційні підходи до вдосконалення технології виробництва пектиновмісних паст. Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: XIII Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів, м. Київ, 10–11 квітня 2025 року:

тези доповіді. Київ, 2025. С. 339–340. (*Муштрук Н.М. обґрунтовано інноваційні підходи до вдосконалення технології виробництва пектиновмісних паст, узагальнено результати досліджень та сформульовано висновки. Муштруком М.М. здійснено технічний аналіз запропонованих рішень та участь у підготовці матеріалів доповіді*).