

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛІНКО МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 631.363.2:636.085.55 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

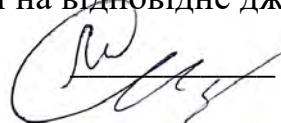
**Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експандера
комбікормів**

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

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

 Микола ЛІНКО

Науковий керівник:

Алієв Ельчин Бахтияр огли, доктор
технічних наук, старший дослідник

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Лінко М. О. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експандера комбікормів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія») – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2024.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесу приготування повнораціонних комбікормів з їх одночасним знезараженням шляхом удосконалення конструкції експандера і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

Об'єкт дослідження – технологічний процес приготування повнораціонних експандованих комбікормів та технічній засіб для його реалізації.

Предмет досліджень – закономірності протікання процесу експандування повнораціонних комбікормів.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження передбачають вивчення закономірностей взаємодії робочих органів експандера комбікормів з технологічним матеріалом із використанням методів системного аналізу, теоретичної механіки, механіки суцільного середовища, інтегральних і диференціальних обчислень, чисельного моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. Проведення експериментальних досліджень передбачало використання стандартних та розроблених методик, застосовуючи створені фізичні моделі та експериментальні зразки робочих органів, приладів і обладнання. Експериментальні дослідження проводились як в лабораторних, так і виробничих умовах, і включали в себе методику планування багатофакторних експериментів. Аналіз експериментальних даних проводився з використанням статистичних методів обробки даних та прикладного програмного забезпечення Wolfram Cloud.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено фізико-математичну модель процесу формування експандатів із комбікорму, яка зв'яже технологічні параметри процесу експандування (вологість і температура) із фізико-механічними властивостями

суміші комбікормів (середній діаметр частинок суміші, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона, робота когезії на одиницю площі).

Отримано аналітичні і експериментальні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку продуктивності експандера, його споживаної потужності, питомої енергоємності процесу експандування і щільності отриманих експандатів від радіусів звуження циліндра і увігнутого конуса формуючої насадки, відстані між ними, частоти обертання гвинта і вологості комбікорму.

Отримали подальший розвиток фізико-математичний апарат руху твердих компонентів корму, як дискретних елементів на основі пружно-демпферної контактної моделі Герца-Міндліна, у гвинтовому каналі експандера, який покладено в основу методики чисельного моделювання процесу експандування кормів в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблену прес-матрицю із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами у складі експандера кормів OEE 30.2 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) було впроваджено у виробництво ТОВ НВО «Глобинський свинокомплекс». Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації удосконаленого експандера кормів використані й впроваджені на виробництві ТОВ ВО «Восход» для виготовлення відповідного дослідного зразка. Розроблені фізико-математичні моделі і методики чисельного моделювання впроваджені в освітні компоненти ОПП «Агроінженерія» для студентів першого (бакалаврського) і другого (магістерського) освітніх рівнів вищої освіти ДДАЕУ.

Обґрунтована конструктивно-технологічна схема експандера комбікормів із удосконаленою формуючою насадкою, яка відрізняється тим що складається зі звуженої області циліндра, увігнутого конуса і корончатої гайки. При переміщенні нагрітої пластифікованої маси до звуженої області формуючої насадки відбувається підвищення тиску, а після її проходження різке його зменшення. Це досягається через збільшення об'єму робочої області за рахунок форми увігнутого конуса. В результаті чого пластифікована маса розширюється і виходить через корончасту гайку з формуючої насадки, утворюючи при цьому експандати.

Для оцінки правильності обраних моделей і фізико-математичного апарата, проведено чисельне моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в циліндричній ємності під дією поршня в STAR-CCM+. Дослідження процесу стискання компонентів кормової суміші були проведені для різних їх фізико-механічних властивостей, а саме середній діаметр частинок суміші, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона, робота когезії на одиницю площі на трьох рівнях їх фіксації. В результаті чисельного моделювання для кожної комбінації фізико-механічних властивостей отримано закономірності пружного гістерезису компонентів корму. В результаті обробки даних моделювання отримані рівняння регресії зміни площі петлі пружного гістерезису і коефіцієнта механічних втрат, висоти отриманого експандату від середнього діаметра частинок суміші, модуля пружності Юнга, коефіцієнта Пуассона і роботи когезії на одиницю.

В результаті чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів для трьох варіантів форми конуса (I – звичайний, II – заокруглений, III – увігнутий) встановлено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в області формуючої насадки за силою тиску і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою. Аналіз отриманих даних дає змогу стверджувати, що формуюча насадка із звичайним конусом забезпечує найбільші сили стиску поршня і конуса – 1415 ± 41 Н і 231 ± 35 Н відповідно. Для заокругленого конуса сили стиску поршня і конуса складають 1162 ± 63 Н і 177 ± 20 Н відповідно. Для увігнутого конуса сили стиску поршня і конуса складають 740 ± 109 Н і 84 ± 21 Н відповідно. Для кожного із варіантів конусу визначено зміну об'ємної маси, загальну силу стиску від абсолютної деформації компонентів корму. Встановлено, що всі три варіанти забезпечують практично однакову щільність суміші на виході $223\text{--}251$ кг/м³. Так як найменша сила стиску спостерігається для увігнутого конуса, то приймаємо його за основний конструктивний елемент, параметри якого обґрунтуємо далі. В результаті чисельного моделювання визначено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формуючої насадки і конусом за силою тиску і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою в залежності від радіуса звуження циліндра формуючої насадки, радіуса увігнутого конуса і відстані між конусом і циліндром. Встановлені рівняння регресії щільності пластифікованої маси компонентів корму на виході з

формуючої насадки і максимального тиску, який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку вздовж їх руху від зазначених факторів досліджень. В результаті вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації критеріїв досліджень, а саме зменшення тиску і підвищення щільності, на основі знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції встановлені раціональні конструктивні параметри формуючої насадки.

Вирішуючи компромісну задачу, яка полягає у мінімізації коефіцієнта механічних втрат і максимізації щільності отриманих експандатів, отримуємо наступні раціональні технологічні параметри, при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним. Для порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень складено програму на мові програмування Wolfram, яка дозволяє зв'язати технологічні параметри процесу експандування із фізико-механічними властивостями суміші комбікормів.

В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера, його споживаної потужності, питомої енергоємності процесу експандування і щільності отриманих експандатів від вологості комбікорму, зазору між конусом та гайкою, частоти обертання гвинта.

Результати техніко-економічної оцінки удосконаленого експандера свідчать, що при річному навантаженні 1880 т економія питомих операційних витрат складе 24,8 грн/т або 46568,1 грн на весь об'єм робіт, що дозволяє повернути інвестиції в переобладнання експандера за період 1,4 роки.

Ключові слова: корм, зерно, жом, шрот, насіння, сипкий, функціональні продукти, виробництво, приготування, переробка, експандер, прес, екструдер, шнек, гвинт, формуючі насадки, параметри, фракції, частота обертання, моделювання, симуляція, фізико-математична модель, експеримент, експериментальний комплекс, пресування, розподіл, напруження, адгезія, анізотропія, сила, зусилля, тиск, стискання, деформація, властивості, вологість, щільність, енергоємність, рівняння регресії, волого-теплова обробка, гранули, брикети, порошок.

ANNOTATION

Linko M. O. Justification of the structural and technological parameters of the compound feed expander. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 133 «Industrial Engineering» (13 «Mechanical Engineering») – Dnipro State Agrarian and Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro – 2024.

The goal of the work is to enhance the efficiency of the process of preparing complete feed pellets by simultaneously disinfecting them through the improvement of the expander's design and justification of its structural and technological parameters.

The object of research is the technological process of preparing full-rational expanded compound feed and the technical means for its implementation.

The subject of research is the regularity of the process of expansion of complete ration compound feed.

Research methods. Theoretical studies involve the examination of the interaction patterns between the working elements of the feed expander with the technological material using methods of systemic analysis, theoretical mechanics, mechanics of continuous media, integral and differential calculations, numerical modeling in the Simcenter Star-CCM+ software package. Experimental research involved the use of standard and developed techniques, employing created physical models and experimental samples of working elements, instruments, and equipment. Experimental studies were conducted in both laboratory and production conditions and included the methodology of planning multifactor experiments. The analysis of experimental data was carried out using statistical data processing methods and the Wolfram Cloud applied software.

Scientific novelty of the obtained results. A physical-mathematical model of the process of forming expandates from feed has been developed, connecting the technological parameters of the expanding process (moisture and temperature) with the physico-mechanical properties of the feed mixture (average particle diameter of the mixture, Young's modulus, Poisson's ratio, cohesion work per unit area). Analytical and experimental dependencies in the form of second-order regression equations for the

productivity of the expander, its power consumption, specific energy consumption of the expanding process, and the density of the obtained expandates have been obtained. These dependencies are related to the radii of the narrowing cylinder and the concave cone of the forming attachment, the distance between them, the screw rotation frequency, and the moisture content of the feed.

Further development of the physical-mathematical apparatus of the movement of solid feed components, treated as discrete elements based on the spring-damper contact model of Hertz-Mindlin, in the screw channel of the expander has been achieved. This forms the basis for the numerical modeling methodology of the feed expanding process using the Simcenter STAR-CCM+ software package.

Practical significance of the obtained results. The developed press matrix with justified rational design and technological parameters within the composition of the OEE 30.2 feed expander (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) has been implemented in the production of LLC NVO "Hlobynskyi Svy nokomplex". The results of the scientific and technical work, in the form of design and technical documentation for the improved feed expander, have been implemented and utilized in the production of LLC VO "Voskhod" to manufacture a corresponding experimental sample. The developed physical-mathematical models and numerical modeling methodologies have been introduced into the educational components of the Educational and Scientific Institute "Agroengineering" for students of the first (bachelor's) and second (master's) levels of higher education at DDAEU.

Justification of the design and technological scheme of the feed expander with an improved forming attachment, which differs in that it consists of a narrowed cylinder area, a concave cone, and a crown nut, has been provided. When the heated plasticized mass moves towards the narrowed area of the forming attachment, there is an increase in pressure, followed by a sharp decrease after passing through it. This is achieved by increasing the working area's volume through the shape of the concave cone. As a result, the plasticized mass expands and exits through the crown nut of the forming attachment, forming expandates.

To assess the correctness of the chosen models and the physical-mathematical apparatus, numerical modeling of the compression process of feed components in a

cylindrical vessel under the action of a piston was conducted in STAR-CCM+. The study of the compression process of feed components was conducted for various physico-mechanical properties, including the average particle diameter of the mixture, Young's modulus, Poisson's ratio, and cohesion work per unit area at three fixation levels. Numerical modeling resulted in hysteresis laws for the elastic components of the feed, and regression equations were obtained for the loop area change of the hysteresis and the coefficient of mechanical losses, as well as the height of the obtained expandate concerning the average particle diameter of the mixture, Young's modulus, Poisson's ratio, and cohesion work per unit area.

Through numerical modeling of the forming attachment of the feed expander for three cone shape variants (I – regular, II – rounded, III – concave), the dynamics and distribution of feed components in the forming attachment area were established based on pressure force and the force of contact interaction between feed components. The analysis of the obtained data indicates that the forming attachment with a regular cone provides the highest compression forces of the piston and cone – 1415 ± 41 N and 231 ± 35 N, respectively. For the rounded cone, the compression forces of the piston and cone are 1162 ± 63 N and 177 ± 20 N, respectively. For the concave cone, the compression forces of the piston and cone are 740 ± 109 N and 84 ± 21 N, respectively. For each cone variant, the change in the volumetric mass and the overall compression force concerning the absolute deformation of feed components were determined. It was found that all three variants provide practically the same density of the mixture at the output, ranging from 223 to 251 kg/m³. Since the least compression force is observed for the concave cone, it is considered the main structural element, the parameters of which are further justified.

Through numerical modelling, the dynamics and distribution of feed components in the cavity between the cylinder of the forming attachment and the cone, based on the pressure force and the force of contact interaction between feed components, depending on the radius of the cylinder's narrowing, the radius of the concave cone, and the distance between the cone and the cylinder, were determined. Regression equations for the density of the plasticized mass of feed components at the exit from the forming attachment and the maximum pressure required to extrude the plasticized mass through the forming

attachment along their movement from the specified research factors were established. By solving the multicriteria optimization task, namely reducing pressure and increasing density, based on finding the optimum of the multiplicative target function, rational design parameters of the forming attachment were determined.

Solving the compromise task, which involves minimizing the coefficient of mechanical losses and maximizing the density of the obtained expandates, we obtain the following rational technological parameters at which the feed expanding process is most efficient. To compare the results of numerical modelling and laboratory experiments, a program was developed in the Wolfram programming language, which allows linking the technological parameters of the expanding process with the physico-mechanical properties of the feed mixture.

As a result of experimental studies on a small-scale feed expander, dependencies were established for the change in expander productivity, its power consumption, specific energy consumption of the expanding process, and the density of the obtained expandates concerning the moisture content of the feed, the gap between the cone and the nut, and the screw rotation frequency.

The results of the techno-economic evaluation of the improved expander indicate that with an annual load of 1880 tons, the savings in specific operating costs will amount to 24.8 UAH/ton or 46,568.1 UAH for the entire volume of work. This enables the return on investment in the expander retrofitting within a period of 1.4 years.

Keywords: feed, grain, pulp, meal, seeds, loose, functional products, production, preparation, processing, expander, press, extruder, auger, screw, forming nozzles, parameters, fractions, rotation frequency, modeling, simulation, physical-mathematical model, experiment, experimental complex, pressing, distribution, stress, adhesion, anisotropy, force, effort, pressure, compression, deformation, properties, moisture, density, energy intensity, regression equation, wet-heat treatment, granules, briquettes, powder.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Aliiev E., Dudin V., Kobets O., **Linko M.** (2023). Development of feed expander. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 16 (65), 2: 115–130. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.2.8 *(Здобувачу належить чисельного моделювання і обґрунтування параметрів формуючої насадки).*

2. Aliiev E., Dudin V., **Linko M.** (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. Machinery & Energetics, 13 (3): 9–16. DOI: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16. *(Здобувачу належить розробка фізико-математичного апарата).*

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

3. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1 (116): 51–57. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-6. *(Здобувачу належить проведення аналізу і формування висновків).*

4. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.**, Алієва О. Ю. (2022). Симуляція процесу експандованого приготування кормів. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 5 (36), II: 176–185. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів).*

5. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Лінко М. О.** (2023). Результати лабораторних досліджень процесу формування експандатів. Вібрації в техніці та технологіях. 2 (109): 20-29. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-3. *(Здобувачу належить проведення лабораторних досліджень і обробка даних).*

6. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2023). Обґрунтування конструктивних параметрів формуючої насадки експандера кормів. Механіка та автоматика агропромислового виробництва, 2 (116): 143–152. DOI: 10.37204/2786-7765-2023-2-15. *(Здобувачу належить проведення чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів).*

7. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Лінко М. О.** (2023). Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 53: 121–130. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.121-130 *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і обробка даних).*

Розділи монографії:

8. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., Малегін Р. Д., Лупко К. О., **Лінко М. О.**, Гезь Я. В., Безугла Л. С. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0 *(Здобувачу належать розділ «3.4 Експандер для приготування харчових продуктів і кормів»).*

Патент України на корисну модель:

9. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Лінко М. О.** (2023). Експандер для приготування кормів. Заявка на корисну модель № u202304732. Заявл. 06.10.2023 *(Здобувачу належить ідея форми насадки експандера у вигляді увігнутого конуса).*

Статті у інших наукових виданнях:

10. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. Корми і факти, 9 (145): 8–10. *(Здобувачу належить проведення аналізу і формування висновків).*

Тези і матеріали конференцій:

11. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2022). Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. Матеріали Міжнародної науково-практичної

конференції молодих вчених «Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу» (20 травня 2022 року). Херсон: ІЗЗ НААН, 160–161. *(Здобувачу належить розробка моделі процесу експандованого приготування кормів).*

12. Алієв Е., **Лінко М.** (2022). Експандоване приготування кормів. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (14–16 травня 2022 р.). Кропивницький: ЦНТУ, 38–40. *(Здобувачу належить аналіз процесу експандованого приготування кормів).*

13. **Лінко М. О.** (2023). Чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (21 березня 2023 р.). Запоріжжя: ІОК НААН, 127–128.

14. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2023). Експандування насіння сої на кормові цілі. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (15 березня 2022 р.). ІОК НААН, 64–65. *(Здобувачу належить формуванн переваг використання експандерів на лінії переробки кормових гранул із насіння сої).*

15. **Лінко М. О.** (2023). Порівняння теоретичних і лабораторних досліджень пресування комбікорму. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 10–12.

16. Алієв Е.Б., **Лінко М. О.** (2023). Результати чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів. Міжнародної науково-практичної конференції «Використання сучасних технологій та техніки в аграрному виробництві» (20–21 квітня 2023 р.): зб. наукових праць. ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, 17–22. *(Здобувачу належить розробка моделі процесу експандованого приготування кормів).*

17. Алієв Е.Б., **Лінко М. О.** (2023). Порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень процесу пресування комбікорму. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та

кормовиробництві» (2–20 жовтня 2023 р.). ІМА АПВ, НУБіП. <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> (Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів).

18. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2023). Експериментальні дослідження експандера кормів. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2023 року). НУБіП: 229–232. (Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і обробка даних).

Депоновані звіти:

19. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгіх Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., Лупко К., **Лінко М.**, Малєгін Р. Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322 (Здобувачу належать розділ 3.4 і висновки).

ЗМІСТ

ВСТУП.....		16
1	СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ....	21
	1.1 Рівень виробництва комбікормів в Україні та світі	21
	1.3 Вимоги до екструдатів та експандатів.....	26
	1.4 Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів екструдування та експандування кормів	29
	1.5 Огляд досліджень процесу експандування	43
	1.6 Висновки з розділу	45
	1.7 Мета і задачі досліджень.....	47
2	ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПАНДЕРА КОМБІКОРМІВ.....	48
	2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми експандера комбікормів	48
	2.2 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання експандера кормів.....	50
	2.3 Розробка моделі фізико-механічних властивостей компонентів комбікорму	58
	2.4 Чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів	69
	2.5 Чисельне моделювання гвинта малогабаритного експандера кормів....	82
	2.6 Висновки з розділу	88
3	ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	91
	3.1 Мета і програма експериментальних досліджень	91
	3.2 Методика лабораторних досліджень пресування комбікорму	92
	3.3 Методика експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів.....	98
	3.4 Методика визначення якісних характеристик експандатів	103
	3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних	104

4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕКСПАНДУВАННЯ КОРМІВ	106
4.1	Результати лабораторних досліджень пресування комбікорму.....	106
4.2	Порівняння теоретичних і лабораторних досліджень пресування комбікорму	115
4.3	Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів.....	118
4.4	Результати експериментальних досліджень якісних характеристик експандатів	123
4.5	Висновки з розділу	127
5	РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	129
5.1	Випробування експандера комбікормів	129
5.2	Впровадження результатів досліджень	131
5.3	Техніко-економічна ефективність застосування розробленого експандера	132
5.4	Висновки з розділу	134
	ВИСНОВКИ	136
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	140
	ДОДАТКИ.....	159

ВСТУП

Актуальність теми. Відповідно до стратегії розвитку тваринництва України одним з головних завдань є забезпечення тварин якісними безпечними і збалансованими кормами у необхідній кількості та за конкурентною ціною [1].

Світові тенденції підтверджують, що запорукою ефективного тваринництва є запровадження годівлі збалансованими комбікормами [2, 3]. Поряд із цим основним джерелом захворювань свиней і птиці є наявні хвороботворні мікроорганізми в кормах [4, 5]. Таким чином, однією з основних перспективних областей досліджень у галузях птахівництва та свинарства є підготовка кормів перед згодовуванням для підвищення їхньої якості та біобезпеки.

В процесі виробництва комбікормів необхідно проводити їх стерилізацію і знезараження. Це дасть змогу підвищити рівень безпечності здоров'я свиней та птиці і зменшити їх масовий падіжа на підприємствах. Згідно поставлених вимог зазначений процес приготування комбікормів можливий з використанням високотемпературної короткочасної обробки (HTST), до якої відносять обробку парою (кондиціонування), гранулювання, екструдкування та експандування [6]. Основним недоліком зазначених процесів є великі енерговитрати.

Тому в рамках досліджень передбачено удосконалення конструкції експандера комбікормів і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів, що дозволить забезпечити технологічний процес приготування комбікормів у вигляді експандатів із меншими енерговитратами.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) згідно з планом науково-дослідних робіт: «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки» (№ ДР 0120U100322, 2020–2022 рр.) та «Розроблення та удосконалення механотронних систем виробничих процесів у тваринництві» (№ ДР 0121U109891, 2021–2023 рр.).

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних комбікормів з їх одночасним знезараженням шляхом удосконалення конструкції експандера і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

Для досягнення поставленої мети було висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою підвищення ефективності, а саме зменшення енерговитрат, процесу експандування повнораціонних біобезпечних комбікормів можна досягти за рахунок використання удосконаленої формуючої насадки із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами.

Задачі дослідження:

– на основі патентно-інформаційного аналізу обґрунтувати шляхи підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних біобезпечних експандованих комбікормів;

– удосконалити конструкцію експандера комбікормів і обґрунтувати його конструктивно-технологічну схему;

– на основі чисельного моделювання і лабораторних досліджень розробити фізико-математичну модель процесу формування експандатів із комбікорму;

– провести теоретичну раціоналізацію конструктивних параметрів і режимів роботи експандера на основі чисельного моделювання;

– розробити методику і провести багатофакторний експеримент із визначенням впливу режимних параметрів удосконаленого експандера на показники якості, продуктивності та енерговитрат;

– впровадити результати досліджень у виробництво і визначити економічну ефективність удосконаленого експандера комбікормів.

Об'єкт дослідження: технологічний процес приготування повнораціонних експандованих комбікормів та технічній засіб для його реалізації.

Предмет дослідження: закономірності протікання процесу експандування повнораціонних комбікормів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження передбачають вивчення закономірностей взаємодії робочих органів експандера комбікормів з технологічним

матеріалом із використанням методів системного аналізу, теоретичної механіки, механіки суцільного середовища, інтегральних і диференціальних обчислень, чисельного моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. Проведення експериментальних досліджень передбачало використання стандартних та розроблених методик, застосовуючи створені фізичні моделі та експериментальні зразки робочих органів, приладів і обладнання. Експериментальні дослідження проводились як в лабораторних, так і виробничих умовах, і включали в себе методику планування багатофакторних експериментів. Аналіз експериментальних даних проводився з використанням статистичних методів обробки даних та прикладного програмного забезпечення Wolfram Cloud.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше:

– розроблено фізико-математичну модель процесу формування експандатів із комбікорму, яка зв'язує технологічні параметри процесу експандування (вологість і температура) із фізико-механічними властивостями суміші комбікормів (середній діаметр частинок суміші, модуль пружності Юнга, коефіцієнт Пуассона, робота когезії на одиницю площі);

– отримано аналітичні і експериментальні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку продуктивності експандера, його споживаної потужності, питомої енергоємності процесу експандування і щільності отриманих експандатів від радіусів звуження циліндра і увігнутого конуса формуючої насадки, відстані між ними, частоти обертання гвинта і вологості комбікорму.

Отримали подальший розвиток:

– фізико-математичний апарат руху твердих компонентів корму, як дискретних елементів на основі пружно-демпферної контактної моделі Герца-Міндліна, у гвинтовому каналі експандера, який покладено в основу методики чисельного моделювання процесу експандування кормів в програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблену прес-матрицю із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами у складі експандера кормів OEE 30.2 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) було

впроваджено у виробництво ТОВ НВО «Глобинський свинокомплекс». Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації удосконаленого експандера кормів використані й впроваджені на виробництві ТОВ ВО «Восход» для виготовлення відповідного дослідного зразка. Розроблені фізико-математичні моделі і методики чисельного моделювання впроваджені в освітні компоненти ОПП «Агроінженерія» для студентів першого (бакалаврського) і другого (магістерського) освітніх рівнів вищої освіти ДДАЕУ.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконані спільно з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [1, 104, 105, 106, 107, 108] – аналіз техніко-технологічного оснащення процесів екструдуювання та експандування кормів; [144] – конструктивно-технологічна схема експандера комбікормів; [1, 108, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151] – теоретичне обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експандера комбікормів; [108, 167, 168, 169, 170, 171] – проведення лабораторних і експериментальних досліджень процесу експандування кормів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу» (Україна, м. Херсон, ІЗЗ НААН, 20 травня 2022 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (Україна, м. Кропивницький, ЦНТУ, 20 травня 2022 р.); Міжнародній науковій інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (Україна, м. Запоріжжя, ІОК НААН, 21 березня 2023 р.); Міжнародній науковій інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (Україна, м. Запоріжжя, ІОК НААН, 15 березня 2022 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем

агропромислового комплексу» (Україна, м. Дніпро, ДДАЕУ, 1 грудня 2023 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Використання сучасних технологій та техніки в аграрному виробництві» (Україна, м. Ніжин, ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», 20–21 квітня 2023 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (Україна, смт. Глеваха, ІМА АПВ, НУБіП, 2–20 жовтня 2023 р.); XXIV Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Україна, м. Київ, НУБіП, 17–19 жовтня 2023 року).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 19 наукових працях, у тому числі: 1 розділ у колективній монографії; 2 статті у виданнях, що проіндексовані у базі даних Scopus; 5 статей у наукових фахових виданнях України (категорії Б); подана 1 заявка на корисну модель; 9 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій, інших наукових виданнях і 1 депонований звіт.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 210 сторінок, у тому числі 9 додатків на 52 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 158 сторінок, містить 73 рисунки, 27 таблиць. Список використаних джерел нараховує 177 найменування на 19 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Рівень виробництва комбікормів в Україні та світі

Комбікорми – це сипкі суміші, які складаються з зернових, високобілкових, мінеральних та біологічно-активних компонентів. Комбікорми готують за спеціально розробленою рецептурою для різних фізіологічних, вікових та статевих груп тварин і птиці. На сьогодні, в залежності від складу та призначення, комбікорми ділять на: повнораціонні комбікорми (ПК), комбікорми-концентрати (КК), білково-вітамінно-мінеральні добавки (БВМД), премікси [7].

Повнораціонні комбікорми повністю забезпечують фізіологічну потребу тварин або птиці у поживних, мінеральних і біологічно активних речовинах. ПК не потребують додаткової підготовки перед згодовуванням. Найбільшого використання ПК знайшли в годівлі свиней та птиці.

Комбікорми-концентрати використовують для згодовування тваринам у складі кормосуміші на додаток до інших компонентів (стеблових, соковитих кормів, тощо). КК компенсують нестачу в кормосуміші протеїну, жиру, амінокислот, вітамінів та мінеральних речовин. Найбільшого використання КК знайшли в годівлі великої рогатої худоби, овець та коней [8].

Білково-вітамінно-мінеральні добавки – це суміш подрібнених високобілкових кормових інгредієнтів і мікрододатків, які мають високий вміст протеїну (до 30%), вітамінів, мікроелементів та інших біологічно активних компонентів. Їх використовують для виробництва комбікормів на комбікормових агрегатах та установках зі спрощеним технологічним циклом.

Премікс – це суміш біологічно активних компонентів з наповнювачем, яку використовують для збагачення комбікормів та БВМД.

Щодо об'ємів виробництва комбікормів в Україні та світі, то згідно даних Alltech за 2023 рік [9], де представлені дані глобального дослідження виробництва кормів, незважаючи на значні макроекономічні проблеми, які торкнулися всього ланцюжка поставок, світове виробництво комбікормів залишалося стабільним у

2023 році на рівні 1,26 мільярди метричних тон (ММТ), що менше на половину відсотка (0,42 %) порівняно з оцінками 2022 року. Щорічне опитування, яке проводиться вже 12-й рік, включає дані зі 142 країн та більш ніж 28000 комбикормових заводів.

Європа прийняла на себе основний тягар наслідків, включаючи значні проблеми із хворобами, сувору погоду та наслідки вторгнення в Україну. Глобальна пандемія COVID-19 мала серйозний вплив на агропродовольчий сектор, посиливши проблеми в ланцюжках поставок та прискоривши впровадження нових технологій та методів забезпечення екологічної стійкості.

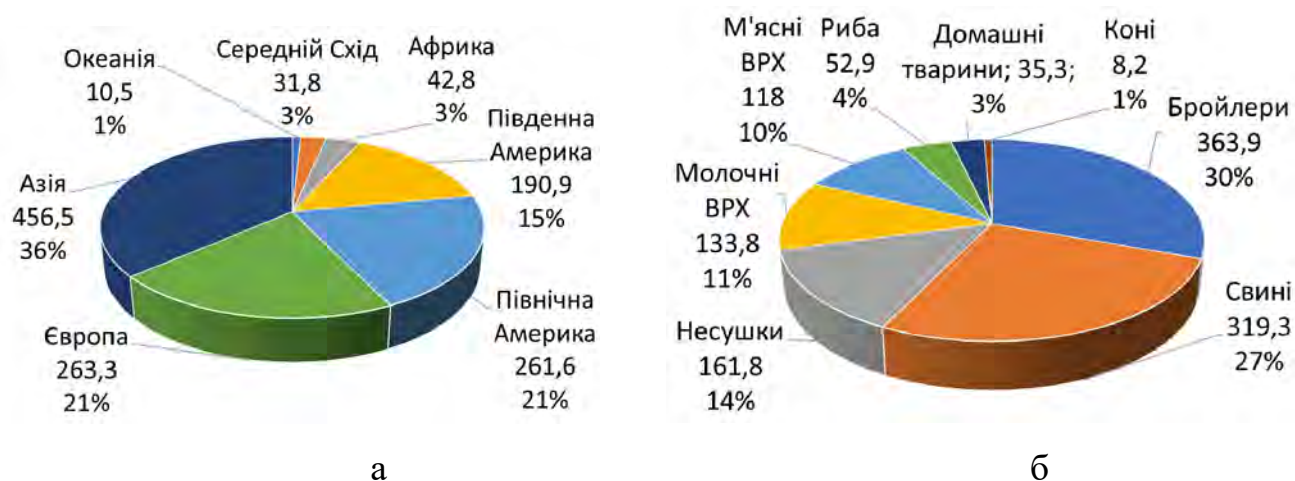


Рисунок 1.1 – Виробництво комбикормів у світі за регіонами (а) та розподіл (б) за видами тварин та птиці, млн. т

Як свідчить рис. 1.1, а, 78 % світового виробництва кормів зосереджено в трьох регіонах – Азія, Європа та Північна Америка, при цьому в Азії найбільший виробник Китай (260,7 млн. т) а в Північній Америці – США (240,4 млн. т). Щодо Європи, то тут спостерігається найбільше падіння виробництва комбикормів серед приведених регіонів - майже 5 % (12,8 млн. т). За даними [9], до цього призвела африканська чума свиней (АЧС), яка вплинула на країни Східної Європи та Ірландію, де обсяг корму зменшився на 2,16%. Німеччина повідомила про зменшення обсягу корму на 8% через заборону експорту в Азію. Те саме відбулося і

в птахівництві, але через пандемію пташиного грипу, високої ціни сировини та енергії. В Україні за даними Державної служби статистики на початок 2022 року загальне виробництво комбікормів складало 6,5 млн. т.

За напрямками виробничої діяльності тваринницьких підприємств, найбільшу вагу в споживанні мають птахи, 44 % за обома напрямками виробництва – м'ясо бройлерів та харчові яйця та галузь свинарства – 27 %. Це обумовлено тим, що в сучасному птахівництві та свинарстві переважає годівля повнораціонними комбікормами [10, 11, 12, 13].

Як стверджують автори в [14, 15] корми є найбільшою статтею витрат у виробництві продукції птахівництва та свинарства і складають 60–70 % від загальної собівартості. Вартість інгредієнтів займає значну частину витрат на корм, але обробка корму також суттєво збільшує його вартість [16, 17]. Проте обробка корму відкриває можливість покращити продуктивність поголів'я.

Таким чином, однією з основних перспективних областей досліджень у галузях птахівництва та свинарства є підготовка кормів перед згодовуванням для підвищення їхньої якості та біобезпеки.

1.2 Показники якості комбікормів та способи їх підвищення

На сьогодні в Україні діє цілий ряд нормативних документів, які регламентують показники якості комбікормів [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29] та методи їх вимірювання та контролю [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40].

В першій групі ДСТУ наведені основні вимоги до складу комбікормів, вимоги якості зернової сировини та характеристик окремих процесів з їх приготування: подрібнення, змішування, гранулювання.

У другій групі стандартів наводяться методики визначення окремих якісних характеристик сировини та комбікормів: токсичності; загальної кислотності; вмісту натрію та хлориду натрію; вмісту вітамінів А, В, В2 та каратиноїдів; вмісту азоту і сирого протеїну; кислотного числа жиру; вмісту миш'яку та ртуті.

Щодо закордонного досвіду, то у роботі [41] автор класифікує показники, які характеризують якість комбікормів та поділяє їх на фізичні, хімічні та мікробіологічні. До перших автор відносить макроскопічні та органолептичні, а саме вихідні параметри сировини (табл. 1.1) такі як якість зерна (пошкоджене, розбите, пошкоджене теплом, проросле і т. д.), наявність домішок і живих комах, колір, запах і текстура. До фізичних в роботі також відносять однорідність подрібнення зерна та однорідність змішування компонентів (не менше 95 %), що також зазначається в роботах [42, 43, 44].

Таблиця 1.1 – Показники якості сировини для комбікорму на прикладі кукурудзи [41]

Параметр якості	1-й гатунок	2-й гатунок	3-й гатунок
Вологість, %	14,50	14,50	14,50
Насипна щільність, кг/гЛ	75,00	72,00	69,00
Зерна, пошкоджені комахами, %	3,00	3,00	3,00
Пошкоджені зерна, %	3,00	5,00	8,00
Биті зерна, %	2,00	3,00	5,00
Домішки, %	1,00	1,5	2,00
Насіння бур'янів, шт./100 г	2,00	2,00	2,00

Хімічні параметри діляться на харчові та якісні. Перші характеризуються відповідністю таких показників, як: волога, сирий білок, сира клітковина, нейтральна детергентна клітковина, кисла детергентна клітковина, ефірний екстракт та зола. Другі використовуються для характеристикації та оцінки інгредієнтів та кормових компонентів. З урахуванням сировини, яку зазвичай використовують для приготування комбікормів, найважливішими аналізами є визначення активності уреазы та розчинності білків для біпродуктів сої, а також визначення показників перекису та кислотності для олії та жирів. Ці показники можуть безпосередньо впливати на доступність та переварюваність білків, як у відношенні до споживання кормів, так і щодо продуктивності тварин. До аналогічних висновків приходять і автори в роботах [45, 46].

Остання група параметрів – мікробіологічні показники, такі як рівень забруднення мікроорганізмами, що можуть бути шкідливими для здоров'я тварин,

найважливіші з яких загальна кількість коліформних бактерій *E. coli* та *Salmonella*, а також мікотоксини (табл. 1.2), які виробляються грибами, що містяться в сировині рослинного походження. В роботах [47, 48] ці параметри класифікуються як показники біобезпеки кормів.

Таблиця 1.2 – Допустимі значення мікотоксинів для свиней [41]

Мікотоксини	Ліміт
Зеараленон	100 частин на мільярд
Фумонізін	2 частин на мільйон
T2 токсин	100 частин на мільярд
Афлатоксин	20 частин на мільярд
Дезоксиніваленол	1 частина на мільйон
Охратоксин	50 частин на мільярд

Таким чином можна стверджувати, що якість комбікормів формується протягом всього циклу приготування – від збирання та зберігання зернових культур до транспортування їх до годівниць. При цьому фізичні показники переважно забезпечуються механічним впливом на сировину та готовий продукт, хімічні та мікробіологічні показники можна покращувати шляхом застосування високотемпературної короткочасної обробки (high temperature and short time (HTST)). До HTST відносять: обробка парою (кондиціонування), гранулювання, екструджування та експандування [49].

Підвищення приведених показників якості комбікормів дозволяє досягти максимальної продуктивності тварин та убезпечити їх від захворювань. Проте існує ще один показник якості, який пов'язаний з логістикою готових комбікормів від виробника до споживача.

Одна з проблем, яка виникає при транспортуванні розсипних кормів, це втрата однорідності через сегрегацію компонентів. Це питання, ще з початку 80-х років минулого сторіччя в Європі почали вирішувати гранулюванням або екструджуванням – однорідність суміші фіксується в стисненій агломерації – гранулі (екструдаті). Але перед виробниками постало інше питання – міцність гранул, їх стійкість до

співударянь під час транспортування. Тому з'явився ще один показник якості – індекс стійкості гранул (pellet durability index (PDI) [50, 51, 52, 53].

В намаганні покращити PDI в кінці 1980-х років в Європі була розроблена технологія експандування. Виробники кормів у Данії, Німеччині та Великобританії були першими, хто почав використовувати цю технологію. На початку 1990-х років нові регуляторні вимоги уряду вимагали, щоб скандинавські виробники кормів у Данії відповідали конкретним вимогам термічної обробки з метою знищення *Salmonella* в кормах для тварин [54]. Для цього можна було використовувати екструдкування, однак високі капітальні та експлуатаційні витрати, а також відносно низька продуктивність процесу робила використання екструдерів економічно недоцільним. Навпаки, експандування отримало значну увагу в Північній Європі, оскільки його можна було використовувати для економічно обґрунтованого виробництва кормів, які відповідають жорстким фізичним та мікробіологічним стандартам, встановленими споживачами та урядовими регуляторами.

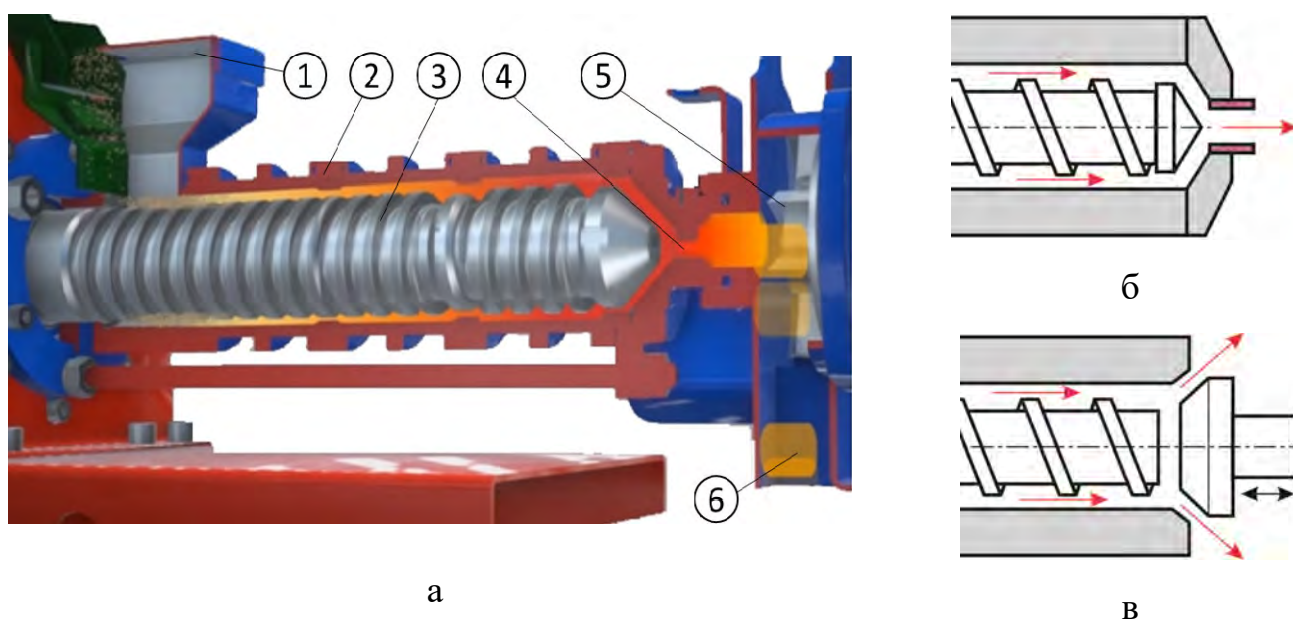
Враховуючи, що технології екструдкування та експандування дуже близькі, розглянемо їх детальніше та приведемо вимоги до характеристик отриманого продукту.

1.3 Вимоги до екструдатів та експандатів

Екструдкування та експандування набуває все більшої популярності у світовій агрохарчовій промисловості, особливо в харчовій і кормовій галузях. Зазначені технології використовують для виробництва так званих інженерних харчових продуктів і спеціальних кормів [55]. Узагальнюючи дослідження [56, 57, 58], ми з'ясували, що екструдкування та експандування рослинної сировини зводиться до формування подрібненого матеріалу в баротермічних умовах. За допомогою енергії зсуву, яку надає обертовий гвинт, і додаткового нагрівання, харчовий матеріал нагрівається до температури плавлення або пластикації [59]. У такому зміненому реологічному стані харчовий матеріал транспортується під високим тиском через матрицю або серію матриць, і продукт розширюється до своєї остаточної форми. Це

виявляє відмінні фізичні та хімічні властивості екструдатів відмінні від властивостей сировини, що використовується [60, 61].

Загалом, екструдуння – це короткочасна теплова обробка продукту при температурі до 170 °С і тиску до 50 атм., у результаті якої відбуваються структурно складні механічні та фізичні зміни. Процес екструдуння полягає у продавлюванні пластифікованого матеріалу крізь отвори незмінного перерізу (фільтери). Розглянемо принцип дії екструдера кормів (рис. 1.2) [62].



1 – завантажувальна камера; 2 – робоча камера; 3 – гвинт; 4 – матриця;
5 – ніж; 6 – екструдат

Рисунок 1.2 – Схема роботи екструдера (а), прес-матриця екструдера (б) та експандера (в)

Попередньо зволожена або оброблена парою сировина (зерно, комбікорм) дозовано подається до робочої камери екструдера, де, під дією шнеку, ущільнюється. По мірі проходження робочої камери за рахунок тиску та тертя сировина нагрівається і набуває пластичного стану (фаза розплаву). Максимальний тиск в робочому корпусі досягається перед входом сировини в фільтеру, на виході з якої він різко зменшується, через що оброблюваний матеріал спінюється,

збільшуючись в об'ємі в 3–4 рази. Екструдат виходить з фільтри безперервним потоком, тому, для його подрібнення, в місці виходу встановлено обертовий ніж з регульованою частотою обертання, змінюючи яку – змінюють довжину окремих частинок продукту. Тривалість перебування сировини в робочій камері екструдера до 20 с.

Процес експандування за своєю суттю практично ідентичний процесу екструдування, відмінності в менш жорстких умовах обробки сировини – температура до 130 °С, тиск до 30 атм. Експандер відрізняється від екструдера конструкцією прес-матриці – в експандері процес пресування обробленої сировини відбувається через щільову матрицю кільцевого типу (рис. 1.2, в).

Щодо показників, які характеризують отриманий в процесі екструдування (експандування) продукт, то на сьогодні вони структуровані лише в закордонних джерелах.

Об'ємна щільність та індекс розширення екструдату (expansion ratio (ER)). Внаслідок екструдування готовий продукт розширюється і набуває пористої структури, що є позитивним ефектом [63]. Оцінити цей ефект допомагають такі параметри екструдату, як об'ємна щільність та індекс розширення. Об'ємна щільність екструдата обернено пропорційна індексу його розширення.

Індекс секційного розширення (sectional expansion index (SEI)). Визначається як відношення діаметра екструдат до діаметра отвору матриці [64, 65], це співвідношення двох діаметрів виражається як відношення або частка. Це також міра радіального розширення та ступінь роздування екструдатів.

Масова швидкість потоку екструдатів (mass flow rate of extrudates (MFR)). Швидкість, з якою надходить маса екструдату з отвору матриці за певний період часу називається масовою швидкістю потоку екструдатів [66], вимірюють в грамах на секунду і характеризує продуктивність процесу.

Індекси водопоглинання та водної розчинності екструдату. Індекс водопоглинання (Water Absorption Index – WAI) та індекс водної розчинності (Water Solubility Index – WSI) характеризують здатність компонентів екструдованого продукту взаємодіяти з водою.

За кордоном вони використовуються як показники його якості [67]. Індекс водопоглинання характеризує здатність компонентів екструдату, зокрема крохмалю та харчових волокон, зв'язуватися з водою. Індекс водної розчинності виступає індикатором кількості розчинних компонентів екструдата (полісахаридів), що виділяються з нього при додаванні надлишку води [68, 69].

Структура екструдату. Структура екструдату є одним із важливих показників якості екструдованих продуктів. Структуру екструдата характеризують твердість поверхні, хрусткість і щільність [63].

Вміст патогенних мікроорганізмів. Вміст бактерій та інших мікроорганізмів у готових рослинних екструдатах є найважливішим показником їхньої якості. Екструзія як процес теплової обробки знижує їх вміст. Найменший вміст бактерій та мікроміцетів спостерігається за високої температури обробки та низької вологості сировини [70].

Вміст мікотоксинів. Для забезпечення біологічної безпеки екструдованих харчових продуктів значення має руйнування у процесі обробки мікотоксинів – отруйних речовин, що виділяються цвілевими грибами, такими як фумонізін, афлатоксин, дезоксиніваленон та зеараленон [71].

Таким чином можна стверджувати, що параметри якості комбікормів взагалі та екструдатів (експандатів) близькі з точки зору біобезпеки, проте є і свої особливі параметри – структура, індекси водопоглинання та водної розчинності, об'ємна щільність та індекс розширення. Що стосується технологій екструдкування та експандування то, як зазначено вище, вони дуже близькі, як і технічні засоби для їх реалізації. Тому для вибору напрямку подальших досліджень необхідно провести аналіз конструкцій обладнання для обох технологій.

1.4 Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів екструдкування та експандування кормів

Як було сказано вище, технологічний процес експандування набув широкого застосування у 80-х роках минулого століття, при запровадженні більш жорстких

вимог до санітарної якості комбікормів в ЄС, США та інших країнах. Забезпечити належну санітарну якість можна застосовуючи процес екструдювання, проте він призначений в першу чергу для підвищення поживності кормової сировини, характеризується невисокою продуктивністю та високою енергоємністю.

Перший експандер кормів було запатентовано фірмою Anderson International Corp., США, у 1965 році. Як видно зі схеми (рис. 1.9), з того часу ідея, закладена в конструкцію не зазнала суттєвих змін – гвинт зонований, тобто має різні конструкційні ділянки відповідного призначення, до робочої камери подається пара, матрицю виконано у формі зрізаного конуса.

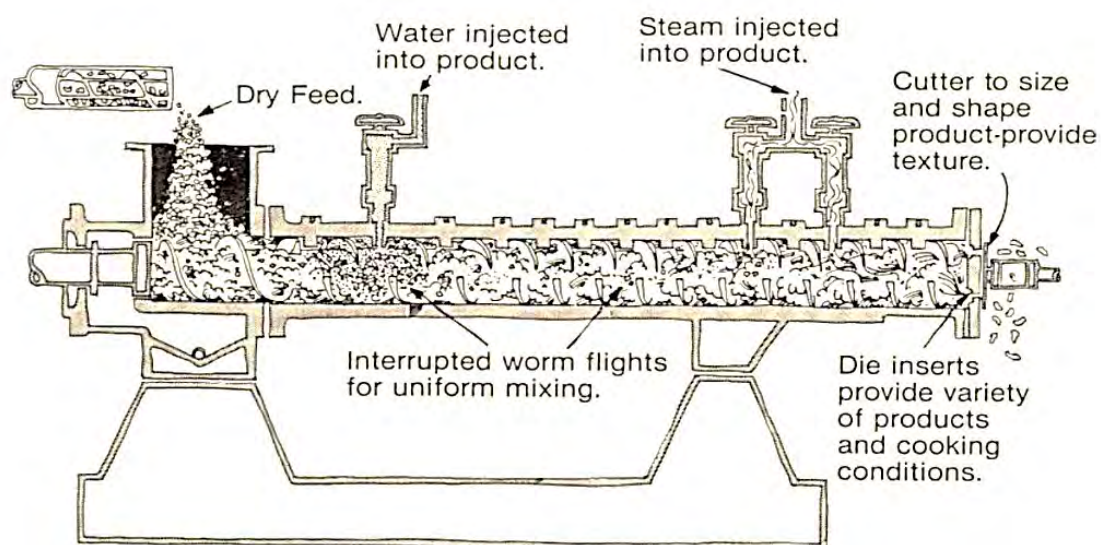


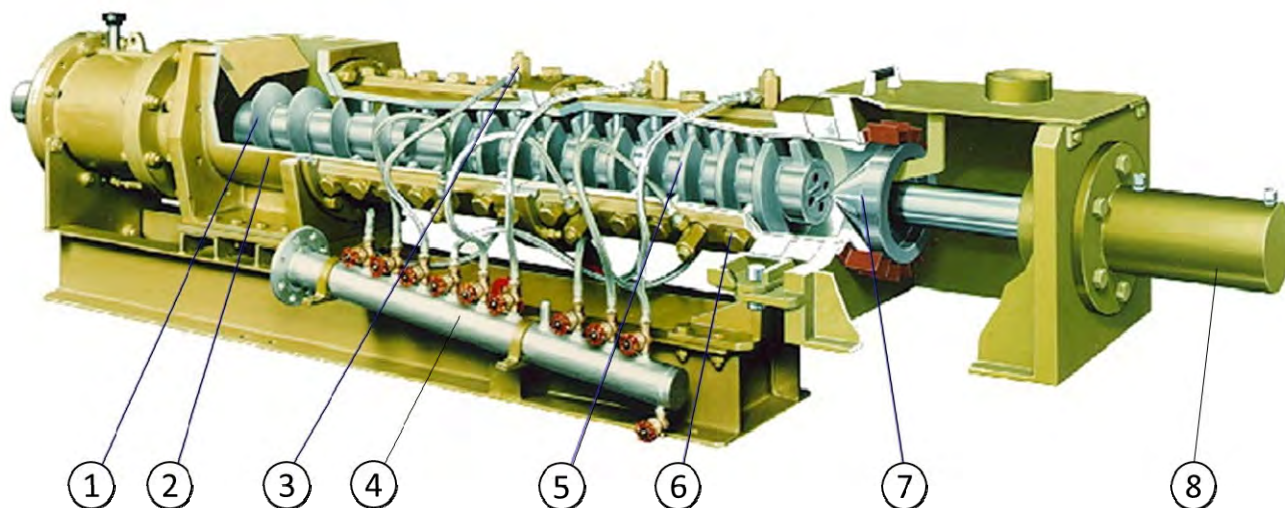
Рисунок 1.9 – Експандер кормів Anderson International Corp. США, 1965 р.

Сфера застосування експандерів з кожним роком збільшується. Спочатку їх використовували для попередньої обробки перед гранулюванням корму, а зараз експандери використовуються в автономних процесах: для підвищення поживної цінності повножирних соєвих бобів та інших бобових, для стерилізації компонентів корму, а в деяких випадках для виробництва простих комбікормів [72, 73].

Варто зазначити, що існує багато подібностей між процесами, що відбуваються в експандері та в екструдері, оскільки їх сутність полягає в баротермічній обробці [74, 75, 76]. Істотна відмінність екструдювання від

експандування полягає в тому, що останній є менш енергоємним і що на виході з установки матриця замінюється на запірний конус, керований – за допомогою гідроциліндру переміщується по відношенню до вихідного отвору робочої камери (рис. 1.10). Це дає змогу оперативно регулювати величину робочого перерізу виходу експандату (а, отже, і тиск в робочій камері) без зупинки експандера. Ще одна відмінність експандера від екструдера – обов'язкова наявність системи подачі перегрітої пари до робочої камери, тривалість обробки сировини – до 5 с [77, 78].

На відміну від одногвинтових харчових екструдерів, експандери мають просту конструкцію та легше керування режимними параметрами. Певне значення має економічний фактор від їх застосування. Наприклад, якщо використовується експандер, виробничі витрати становлять 30 % виробничих витрат двогвинтового екструдера для харчових продуктів і близько 50 % виробничих витрат одногвинтового екструдера. Звичайно, експандери можуть використовуватися лише для обмежених цілей, тому не завжди застосовні.



1 – завантажувальна зона; 2 – робоча камера; 3 – форсунка подачі пари; 4 – паророзподільник; 5 – зона гомогенізації та стиску; 6 – змішувальний штифт; 7 – запірний конус; 8 – гідроциліндр керування конусом

Рисунок 1.9 – Експандер з кільцевим зазором Amandus Kahl

Як і в екструдерах, основними конструкційними елементами експандерів є гвинт, робоча камера та матриця. Розглянемо особливості конструкції цих елементів.

Гвинт експандера – набірний, тобто елементи гвинта набираються на шліцьовий вал, в залежності від призначення відповідної ділянки.

Якщо говорити про загальну конфігурацію гвинта, то, на прикладі експандера серії OE Amandus Kahl, підвищення тиску всередині робочої камери забезпечується не лише зменшенням кроку гвинта, а і за рахунок збільшення діаметру валу гвинта в зоні перед матрицею (рис. 1.11).



а

б

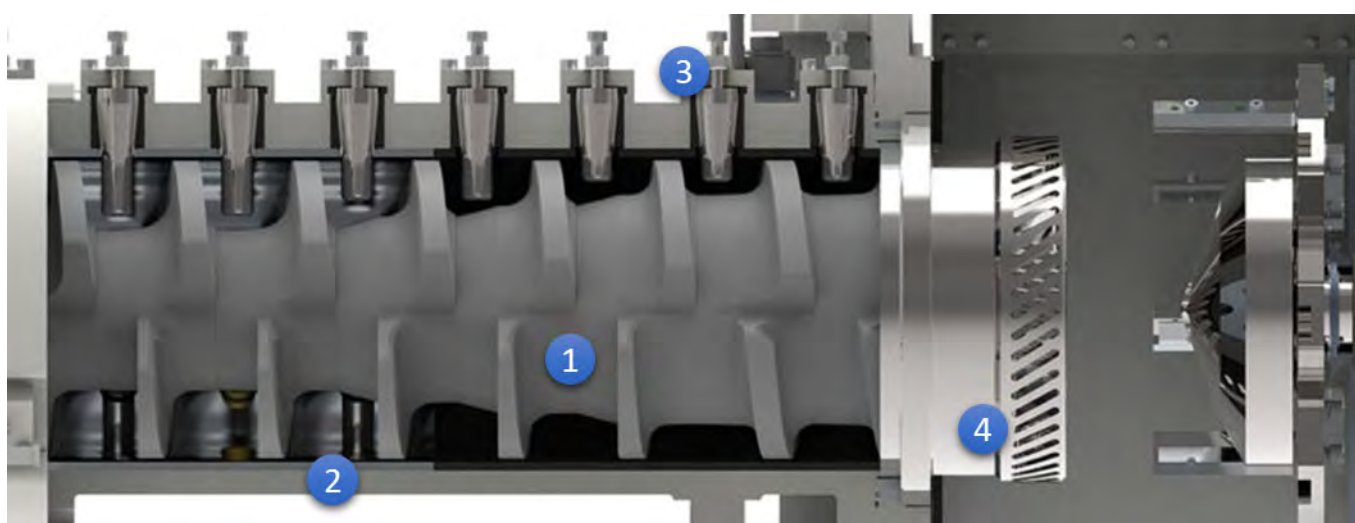
в

а – транспортування; б – стиснення; в – змішування

Рисунок 1.10 – Елементи гвинта експандера серії OE Amandus Kahl

Як стверджує автор в [79], важливим фактором в приготуванні експандованих продуктів є якість перемішування та рівень пластикації матеріалу. Ефект змішування може бути заснований на частинках розподілу або ефекті зсуву, що діє на частинки продукту та досягається завдяки встановленню в робочій камері

змішувальних штифтів (рис. 1.11). При цьому регулювання інтенсивності ефекту зсуву та перемішування здійснюється за рахунок зміни кількості або конфігурації вказаних штифтів [80]. Аналогічні рішення закладені, наприклад, в конструкції експандерів серії Solvex фірми Anderson Feed Technology (США) та FEX34, виробництва Andritz Feed and Biofuel (Данія) [81, 82]. Таким чином спостерігаємо певні відмінності конструкцій робочих камер експандерів та екструдерів – у перших до інтенсифікації процесу застосовують повздовжні проточки внутрішньої поверхні робочої камери, у других – змішувальних штифтів.



1 – гвинт; 2 – робоча камера; 3 – змішувальні штифти; 4 – матриця

Рисунок 1.11 – Експандер серії OE Amandus Kahl

Ще одна відмінність експандера від екструдера – обов’язкова подача перегрітої пари в робочу камеру (рис. 1.9, 1.12). Це умова, яка дозволяє швидко підняти температуру оброблюваної сировини до необхідного значення – 120–130 °С. Справа в тому, що перебування продукту в робочій камері екструдера короткочасне (біля 5 с), тому його нагрів за рахунок тертя та тиску обмежений [83].

Щодо зміни тиску та температури в експандері, то їх проілюстрував (рис. 1.12) автор в [84]. Типовий діапазон температур в експандерах – 120–130 °С при максимальному тиску 4–6 МПа. Подача пари в цьому випадку дає змогу регулювати

зростання температури в залежності від виду продукту та його вихідної температури.



Рисунок 1.12 – Експандер серії Solvex фірми Anderson Feed Technology

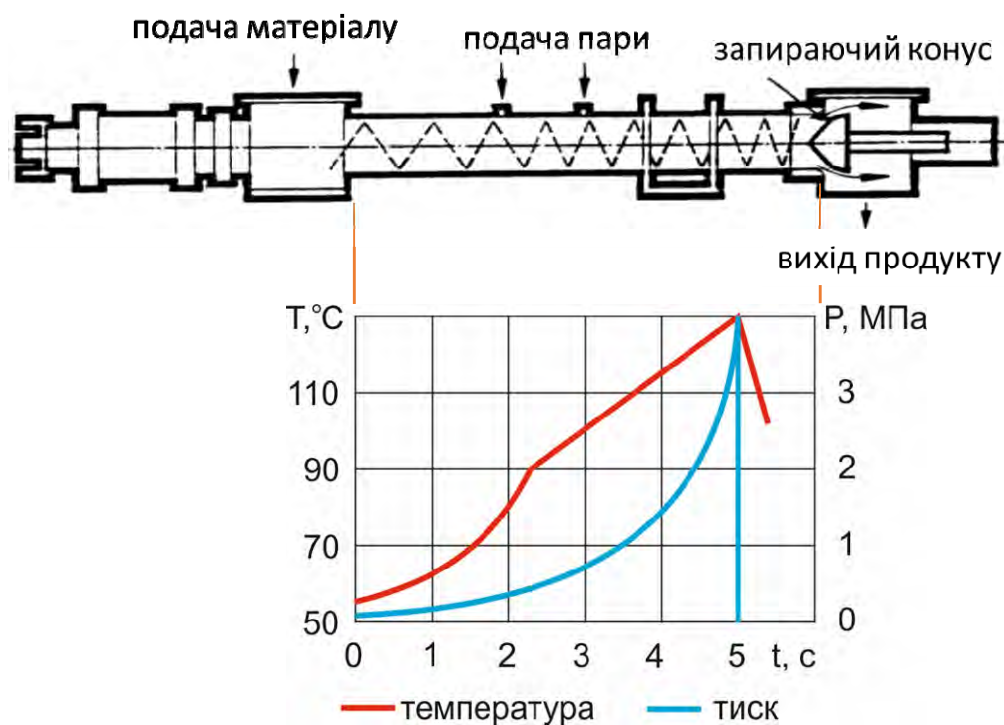


Рисунок 1.13 – Зміна тиску та температури по ходу просування матеріалу в експандері [84]

Основним конструкційним елементом, який відрізняє експандер від екструдера є матриця. Якщо в переважаючій більшості екструдерів це, по суті, пластина з одним або багатьма отворами постійного діаметру, то в експандерах формування продукту відбувається в зазорі між виходом з робочої камери та запираючим робочим органом. У більшості випадків – це конус, повний або зрізаний. Таким чином, експандат виходить через робочий зазор у вигляді пустотілого циліндра («труби»), з товщиною стінки, обумовленою робочим зазором, який встановлюють положенням запираючого конусу відносно виходу з робочої камери. У більшості експандерів це положення встановлюють за допомогою гідроциліндру, при цьому зміна зазору можлива в процесі роботи експандера. В свою чергу, для розрізання отриманої «труби» з експандату використовують, наприклад, спеціальні дільники, які розрізають продукт на полоси (рис. 1.14), або сам конус виконують з пазами по зовнішній стінці (рис. 1.15).

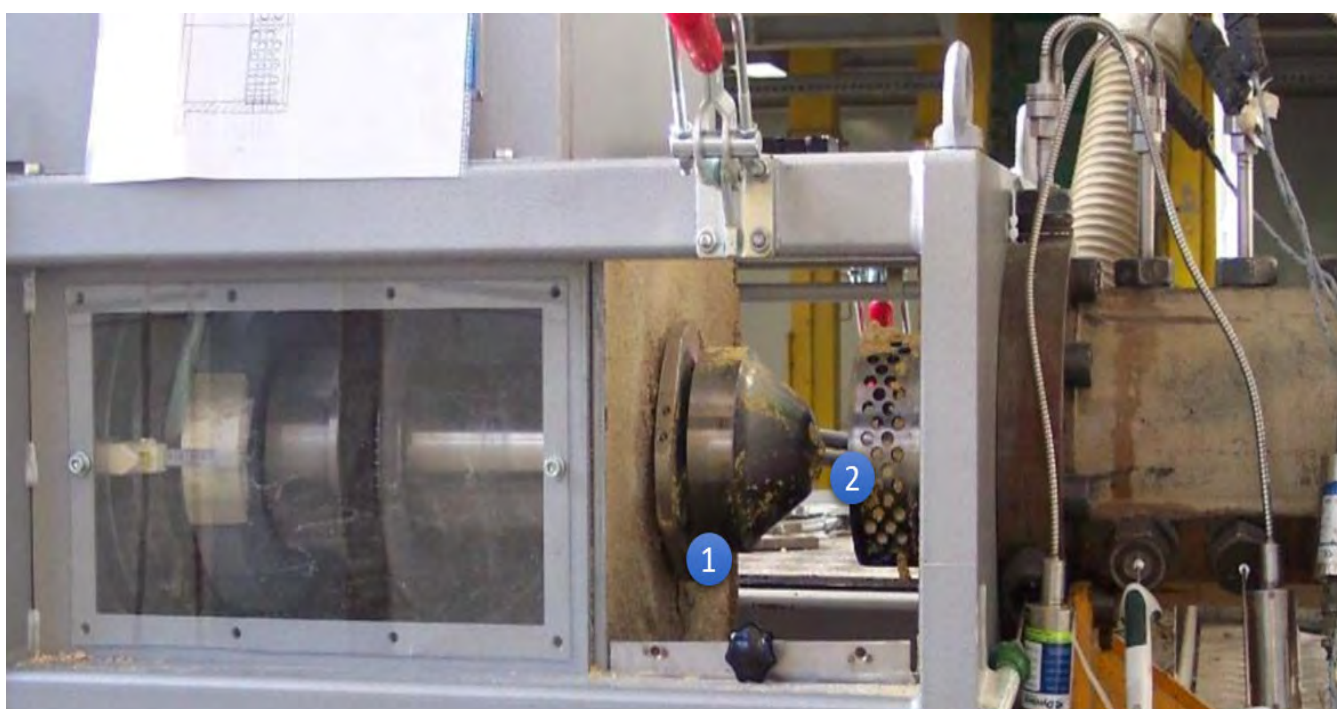


Рисунок 1.14 – Запираючий конус експандера серії OE фірми Amandus Kahl

Розвитком запирання робочої камери експандера за допомогою конуса є рішення фірми Amandus Kahl, яка встановлює на експандери подовжувач робочої камери у вигляді корони (рис. 1.16). Це, разом з сателітним обрізним ножом, дозволяє формувати експандат з круглим (рис. 1.17, а) або прямокутним перерізом (рис. 1.17, б) з регульованою довжиною частинок продукту.



Рисунок 1.15 – Запираючий конус експандера серії Solvex фірми Anderson Feed Technology



1 – запираючий конус; 2 – подовжувач

Рисунок 1.16 – Експандер Amandus Kahl, обладнаний подовжувачем робочої камери у вигляді корони



а



б

1 – запираючий конус; 2 – подовжувач; 3 – сателітний обрізний ніж

Рисунок 1.17 – Подовжувач у вигляді корони експандера Amandus Kahl з круглими (а) та прямокутними (б) отворами

Таке рішення дозволяє отримувати продукт (рис. 1.18), який не потребує подальшої обробки та є готовим до реалізації, як, наприклад, гранули.



а



б

Рисунок 1.18 – Експандат, отриманий на базовому експандері Amandus Kahl (а) та на обладнаному подовжувачем у вигляді корони (б) [85]

Загалом технологічний процес експандування кормів ілюструє рис. 1.19. Кормова сировина вологістю 10–12 %, з температурою навколишнього середовища з бункера, оснащеного шнековим дозатором, подається до потокового змішувача (кандиціонера). Туди ж дозовано подається пара, вода та інші рідкі інгредієнти (м'яса, олія, тощо). По мірі проходження потокового змішувача вихідна сировина набуває вологості 14–17 %, нагрівається (кондиціонується) до температури 80–85 °С та подається до екструдера. В робочій камері екструдера сировина зазнає впливу гвинта та перегрітої пари, яку подають через спеціальні форсунки. Через цей вплив температура сировини підвищується до 120–140 °С, при незмінній вологості та тиску до 6 МПа.

Під час виходу сировини крізь кільцевий зазор між робочою камерою та запираючим конусом тиск різко зменшується до атмосферного, що призводить до швидкого випаровування вологи та спінювання продукту. Саме в цей момент сировина перетворюється на експандат з вологістю 11–15 % при температурі 80–95 °С.

Далі, в залежності від подальшого використання отриманого продукту, можливі варіанти наступних операцій. Якщо отриманий експандат буде використаний як кінцевий продукт, призначений для реалізації у вигляді корму, його охолоджують до температури 20–25 °С, при цьому відбувається зменшення вологості до 10–12 %.

Якщо отриманий продукт підлягає подальшому використанню в якості компоненту кормосуміші, його подрібнюють валковою дробаркою та спрямовують до охолоджувача.

Третій варіант – подрібнення валковою дробаркою з подальшим гранулюванням та охолодженням. За такою схемою отримують кормові гранули, які мають вищі характеристики для транспортування – вищий PDI та вищу щільність, у порівнянні з негранульованим експандатом.

Недоліком вищезгаданого рішення є подвійні витрати пари та більші витрати енергії порівняно із застосуванням простого гранулювання. Технічні характеристики деяких експандерів наведено в табл. 1.3.

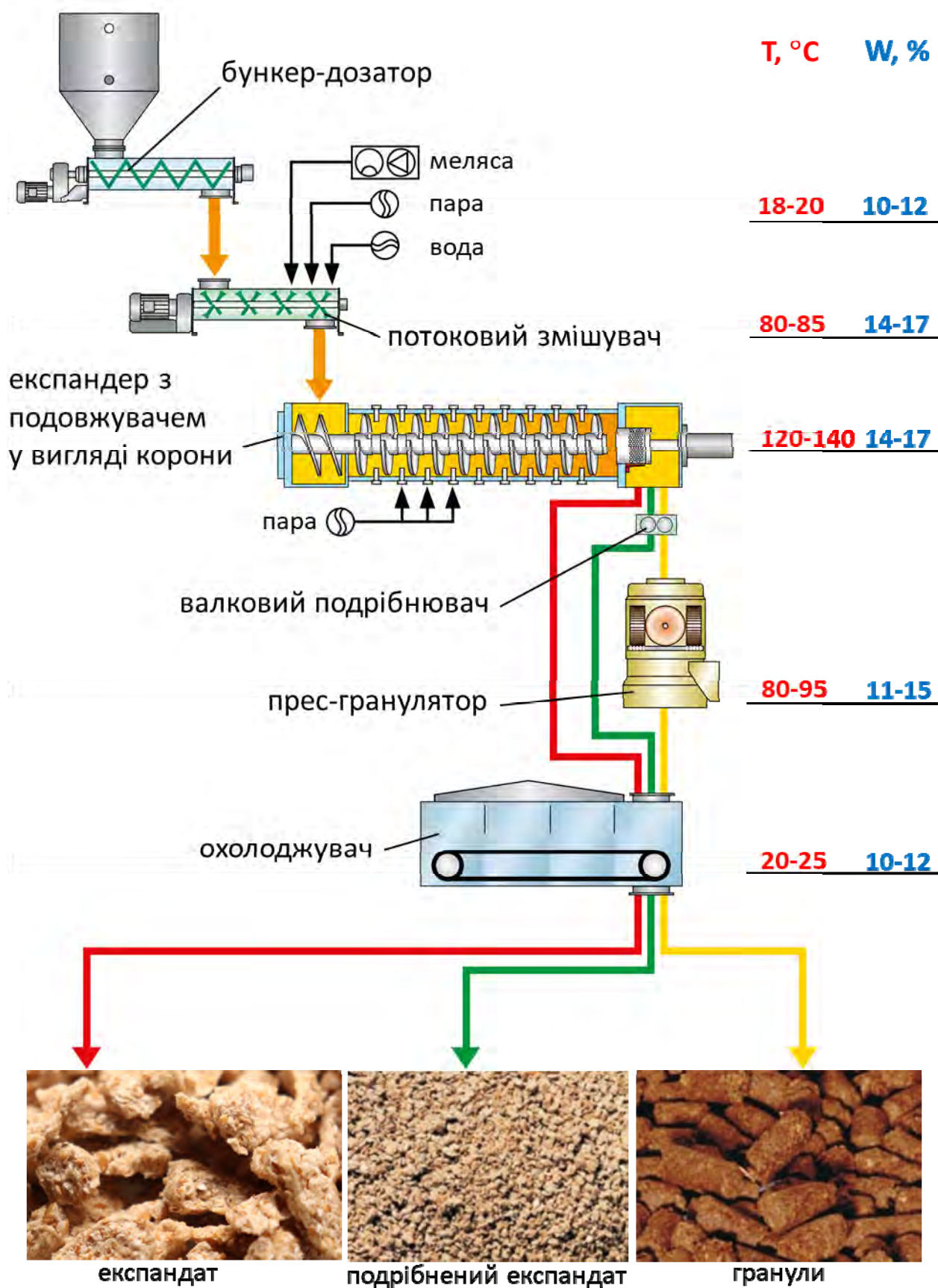


Рисунок 1.19 – Схема технологічного процесу виробництва кормів з використанням експандера Amandus Kahl

Якщо прокоментувати представлену на рис. 1.19 технологічну схему, то застосування експандера в процесі виробництва кормових гранул дозволяє отримати наступні переваги:

- покращення засвоюваності корму (краща конверсія корму);
- ефективне використання сировини низької якості або навіть відходів;
- знезараження бактеріологічно заражених матеріалів;
- вищий контроль подачі рідких добавок;
- зниження енергоспоживання преса-гранулятора;
- підвищення продуктивності преса-гранулятора;
- можливість використання волокнистих матеріалів;
- зниження викидів пилу та втрат під час гранулювання.

Звичайно, в такій технологічній схемі можна застосувати і екструдер, але, як свідчать дані таблиці 1.4, екструдери мають в 3–4 рази вищу енергоємність [86], вищі інвестиційні та операційні витрати. Тому, з точки зору економічної ефективності, використання експандера в даному випадку більш доцільне.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики деяких експандерів

№	Виробник	Модель	Діаметр гвинта, мм	Продуктивність, т	Потужність, кВт
1	Amandus Kahl	OE15	151	0,5-0,8	45,0-75,0
2		OE23	230	1,0-2,5	110,0-160,0
3		OE30	275	10,0-18,0	160,0-250,0
4		OE38	360	18,0-28,0	250,0-315,0
5	Andritz Feed and Biofuel A/S	FEX34	340	10,0-40,0	250,0-355,0
6	Anderson Feed Technology	Solvex 4-5"	114	0,01-0,2	18,0
7	Almex b.v.	AL150	150	1,0-6,0	45,0-75,0
8		AL200	200	5,0-10,0	75,0-132,0
9		AL300	300	10,0-30,0	132,0-315,0
10		AL350	350	30,0-45,0	315,0-400,0
11		AL400	400	45,0-80,0	400,0-500,0

Таблиця 1.4 – Порівняння екструдерів та експандерів при виробництві кормів [58]

Фактор	Одногвинтовий екструдер	Двогвинтовий екструдер	Експандер
Питома енергоємність процесу, кВт·год/т	30 – 70	40 – 80	12 – 30
Тиск, МПа	до 8	до 10	до 6
Температура процесу, °С	до 160	до 180	до 140
Вологість вхідного матеріалу, %	18 – 28	18 – 60	12 – 30
Ступінь желатинізації крохмалю, %	80 – 100	90 – 100	40 – 80
Розчинність білка, %	нижче ніж 10	нижче ніж 10	10 – 12
Агломераційна здатність	так	так	немає
Ефект змішування	середній	високий	низький
Залежність від складу матеріалу	середня	незалежний	висока
Наявність додаткового нагрівання	так	так	так/ні
Наявність додаткового охолодження	так/ні	так	ні
Самоочищення	ні/погано	добре	ні
Інвестиції	середні	високі	низькі
Операційні витрати	середні	високі	низькі

Останні розробки в напрямку оптимізації процесу експандування – автоматизовані комп'ютерно-інтегровані системи керування процесом (рис. 1.20).

Як стверджують розробники [87], ESEP дозволяє забезпечити повністю автоматичну роботу згідно до попередньо вибраних параметрів процесу, дає змогу керувати роботою: дозуючого шнека, змішувача, експандера, подрібнювача та преса-гранулятора. При цьому параметри процесу, які регулює система: синхронізація продуктивності експандера та преса-гранулятора, регулювання продуктивності лінії, регулювання питомої енергоємності процесу експандування (зміна частоти обертання гвинта та положення запираючого конуса), подача пари, води та інших рідких компонентів у змішувач.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що на сьогодні більшість експандерів має усталену конструкцію:

– гвинт експандера набірний, має чітко виражені конструкційні секції по довжині, які призначені для переміщення (транспортування), стискання, змішування, при цьому перед матрицею, для підвищення тиску, діаметр валу гвинта збільшується;

– робоча камера експандера – пустотілий циліндр, постійного внутрішнього діаметру, обладнаний форсунками для подачі пари та з'ємними перемішуючими штифтами;

– матриця експандера – кільцевий зазор, утворений торцем робочої камери та запираючим конусом, при цьому останній може бути суцільним або зрізаним, гладким або з пазами. Подальший розвиток матриці експандера – обладнання робочої камери різного типу подовжувачами, при цьому запираючий конус змін не зазнає.

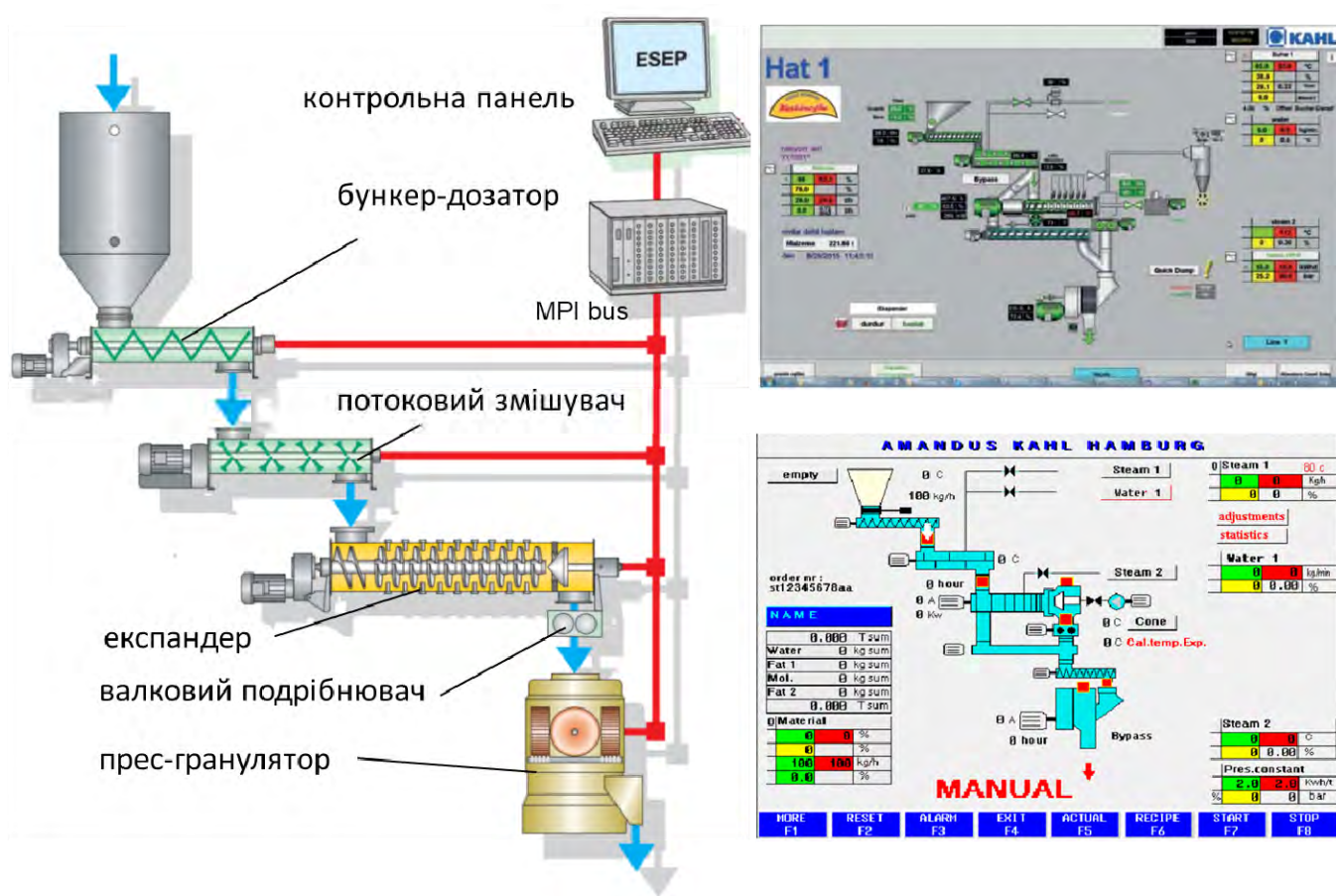


Рисунок 1.20 – Схема автоматизованої системи керування
Electrical Control System of the ExPander (ESEP) Amandus Kahl

Встановлено, що сучасні шляхи оптимізації питомої енергоємності експандерів базуються не на подальшій оптимізації конструкційних параметрів, а на комп'ютерно-інтегрованих автоматизованих системах керування процесом роботи

обладнання з управлінням технологічними параметрами – частотою обертання гвинта та положенням запираючого конуса відносно торця робочої камери.

1.5 Огляд досліджень процесу експандування

У літературі можна знайти результати досліджень щодо впливу екструдуювання та експандування на фізико-хімічні властивості переробленої рослинної сировини. Багато експериментів з годівлі проведено для того, щоб перевірити, наскільки використання експандованого корму було економічно виправданим і ефективним з точки зору поживності. Більшість досліджень показало позитивні ефекти, включаючи економічні аспекти: покращення гігієнічності та засвоюваності кормів [88, 89]. Наприклад, у табл. 1.5 наведено результати годівлі птиці гранулами корму, пресованими приблизно при 80 °С, та експандатом, обробленим при 115 °С.

Таблиця 1.5 – Результати випробувань експандованих кормів на птиці
(3 групи по 50 бройлерів)

Вік, дні	Експандати (115 °С)		Пелети (80 °С)	
	Вага (г)	Коефіцієнт конверсії корму	Вага (г)	Коефіцієнт конверсії корму
20	596 ±19	1,40 ±0,02	587 ±18	1,36 ±0,02
37	1620 ±26	1,81 ±0,02	1586 ±25	1,73 ±0,02
42	1902 ±32	1,93 ±0,02	1866 ±30	1,81 ±0,02

Можна отримати якісні соєві боби, оброблені тільки експандером. У дослідженнях [90] перевірили продуктивність курчат-бройлерів, раціон яких складався із соєвої олії та соєвого шроту, порівняно з продуктивністю бройлерів, в раціоні яких було 20 % експандованих бобів. Кінцевий продукт мав рівень розчинності білка КОН 91,2 %, уреазну активність 0,06 і вміст інгібітора трипсину 3,6 мг/г, тоді як значення для 48 % соєвого шроту, використаного як контрольний зразок, становили 85,5 %, 0,19 одиниці й 2,5 мг/г відповідно. Кури, яких годували квасолею, важили 2621 г і мали індекс конверсії 1,988 на 2617 г, тоді як індекс конверсії контрольної групи курей становив 1,938 ($P > 0,05$).

Згідно з дослідженням [91] встановлено зменшення патогенних організмів у кормах після баротермічної обробки експандерами. Так загальна кількість мікроорганізмів для необробленого корму становила 12 млн КУО/мл, а для оброблених експандатів – 30 тис. КУО/мл.

Багато видів рослинної сировини, зокрема зернові культури, мають високий вміст крохмалю (амілоза та амілопектин). В процесі баротермічної обробки крохмаль сприяє гарному розширенню продукту [92]. Під час експандування крохмаль значно змінює свою структуру. У ньому відбуваються три процеси: желатинізація, деполімеризація та декстринізація. Желатинізація важлива, тому що тварини погано засвоюють нежелатинізований крохмаль [93]. Дія високої температури руйнує структуру молекул крохмалю та міжмолекулярні водневі зв'язки [63]. В результаті цього крохмаль отримує можливість посилено поглинати вологу [94]. Через різке падіння тиску при виході продукту з матриці відбувається випаровуванні цієї вологи, що сприяє формуванню необхідної структури продукту [95, 96].

Індекс розширення екструдата (експандата) залежить від вологості, температури та частоти обертання гвинта [63]. Авторами було встановлено, що при екструзії зерен кукурудзи максимальне лінійне розширення екструдату спостерігалось при низькій вологості 15,5 % та високій частоті обертання шнека 100 хв⁻¹, а також при високій частоті обертання шнека та високій температурі. Також було виявлено відповідність між високою вологістю та низькою температурою та малим розширенням горохового екструдату [97]. Це пояснюється тим, що висока вологість знижує в'язкість сировини, що негативно впливає на тертя матеріалу і желатинізацію крохмалю. Цей ефект посилюється при малій частоті обертання гвинта та низькій температурі, що супроводжується низьким тиском у корпусі екструдера. Наслідком цього є малий перепад тиску на виході з фільтри екструдера та слабке розширення екструдату [63].

Вологість сировини та температура процесу мають основний вплив на величину WAI для рослинних екструдатів та експандатів [63]. Дослідники спостерігали тенденцію збільшення WAI та зменшення WSI при підвищенні

вологості з 12 до 18 % при екструзії рису [98]. Надлишок води в сировині збільшує водопоглинання в процесі екструзії та знижує в'язкість крохмалю, що посилює його желатинізацію та забезпечує однорідне змішування та розподіл тепла в екструдованому продукті [98]. Температура процесу значно впливає на величину водних індексів. З підвищенням температури збільшується і WAI, тоді як збільшення частоти обертання шнека підвищує їх меншою мірою [98]. Але після досягнення температурою певного критичного значення WAI знижується через декстринізацію крохмалю і деполімеризацію амілози.

Експериментальні дослідження [99] виявили зворотний зв'язок між твердістю та індексом розширення екструдату. Твердість екструдату залежить від вологості сировини, температури та частоти обертання шнека [100, 101]. При високій температурі і частоті обертання шнека отримують м'які екструдати, тому що зменшення в'язкості сировини під дією високої температури сприяє його розширенню та формуванню газових бульбашок та зниженню щільності [102].

Дослідження можливостей використання експандерів під час приготування комбікормів наведено в [103]. Автором запропоновано використання експандера в лінії приготування гранульованих комбікормів. Експериментально встановлено, що для зменшення питомої енергоємності процесу, розсипний комбікорм, який подається до експандера, повинен мати вологість 17 %. При цьому температура експандування 100–110 °С, тривалість 60–120 с, температура експандату – 105 °С.

З приведенного огляду можна зробити висновок, що більшість досліджень процесу експандування кормів спрямовані на визначення характеристик отриманого продукту в залежності від технологічних параметрів роботи експандера (частота обертання гвинта, температура та тривалість експандування) та властивостей вихідної сировини – склад, вологість, гранулометричні характеристики.

1.6 Висновки з розділу

1. Світове виробництво комбікормів у 2023 році склало 1,26 мільярди тон, що менше на 0,42 % порівняно з 2022 роком. Поряд з іншими чинниками зменшення

виробництва комбікормів у Європі на 12,8 млн. т. призвела африканська чума свиней (АЧС), яка вплинула на країни Східної Європи та Ірландію. Те саме відбулося і в птахівництві, але через пандемію пташиного грипу. Таким чином, однією з основних перспективних областей досліджень у галузях птахівництва та свинарства є підготовка кормів перед згодовуванням для підвищення їхньої якості та біобезпеки.

2. Якість комбікормів формується протягом всього циклу приготування – від збирання та зберігання зернових культур до транспортування їх до годівниць. При цьому фізичні показники переважно забезпечуються механічним впливом на сировину та готовий продукт, хімічні та мікробіологічні показники можна покращувати шляхом застосування високотемпературної короткочасної обробки (HTST). До HTST відносять: обробка паром (кондиціонування), гранулювання, екструдкування та експандування. Параметри якості комбікормів взагалі та екструдатів (експандатів) близькі з точки зору біобезпеки, проте є і свої особливі параметри – структура, індекси водопоглинання та водної розчинності, об'ємна щільність та індекс розширення.

3. На процес експандування впливають конструкційні параметри експандера: конфігурація гвинта, робочої камери та матриці; технологічні параметри: частота обертання гвинта, температура робочої камери та швидкість подачі; характеристики матеріалу: вміст крохмалю, вологість та розмір часток.

4. Встановлено, що сучасні шляхи оптимізації питомої енергоємності експандерів базуються не на подальшій оптимізації конструкційних параметрів, а на комп'ютерно-інтегрованих автоматизованих системах керування процесом роботи обладнання з управлінням технологічними параметрами – частотою обертання гвинта та положенням запираючого конуса відносно торця робочої камери. При цьому більшість досліджень процесу експандування кормів спрямовані на визначення характеристик отриманого продукту в залежності від технологічних параметрів роботи експандера (частота обертання гвинта, температура та тривалість експандування) та властивостей вихідної сировини – склад, вологість, гранулометричні характеристики.

1.7 Мета і задачі досліджень

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних комбікормів з їх одночасним знезараженням шляхом удосконалення конструкції експандера і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів.

Задачі дослідження:

– на основі патентно-інформаційного аналізу обґрунтувати шляхи підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних біобезпечних експандованих комбікормів;

– удосконалити конструкцію експандера комбікормів і обґрунтувати його конструктивно-технологічну схему;

– на основі чисельного моделювання і лабораторних досліджень розробити фізико-математичну модель процесу формування експандатів із комбікорму;

– провести теоретичну раціоналізацію конструктивних параметрів і режимів роботи експандера на основі чисельного моделювання;

– розробити методику і провести багатофакторний експеримент із визначенням впливу режимних параметрів удосконаленого експандера на показники якості, продуктивності та енерговитрат;

– впровадити результати досліджень у виробництво і визначити економічну ефективність удосконаленого експандера комбікормів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [1, 104, 105, 106, 107, 108].

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПАНДЕРА КОМБІКОРМІВ

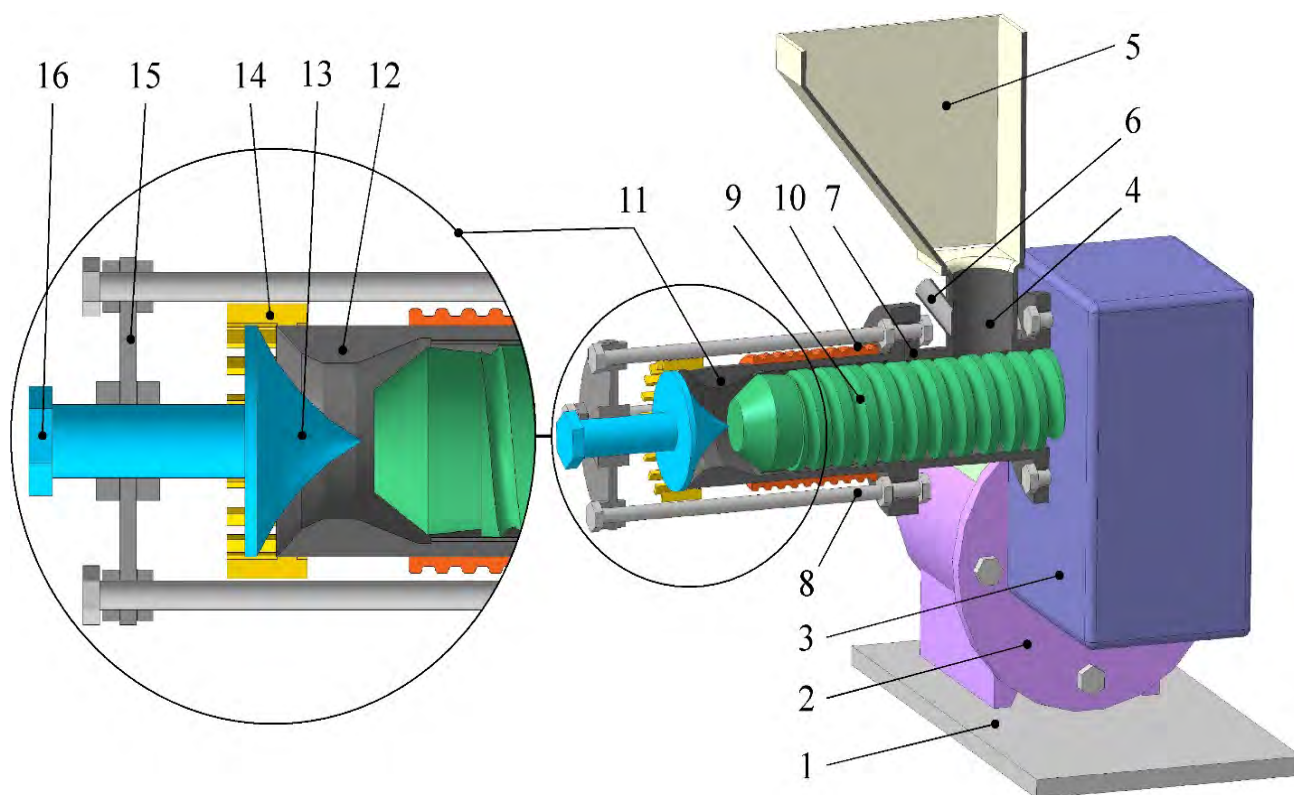
2.1 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми експандера комбікормів

За результатами патентно-інформаційного аналізу (розділ 1) прийнято рішення провести удосконалення формуючої насадки експандера комбікормів.

Конструктивно-технологічна схема експандера кормів із удосконаленою формуючою насадкою приведена на рис. 2.1. Експандер складається з основи 1, на якій встановлено асинхронний електродвигун 2 і редуктор 3. Ведучий вал редуктора 3 приєднано до валу асинхронного електродвигуна 2. До редуктора 3 приєднано живильник 4, на верхній частині якого зафіксовано бункер 5. Збоку у верхній частині живильника 4 приєднано патрубок для подачі пару 6. Живильник 4 переходить у циліндр 7 і з'єднується з ним за допомогою направляючих 8 і гайок. В циліндрі 7 вільно розміщується гвинт 9, який приєднано до веденого валу редуктора 3. Зовні циліндра 7 встановлено нагріваючий елемент 10. Циліндр 7 переходить у формуючу насадку 11. Формуюча насадка 11 складається з звуженої області 12 циліндра 11, увігнутого конуса 13, корончатої гайки 14, направляючої пластини 15. Корончата гайка 14 накручується на зовнішню різьбу циліндра 11. Направляюча пластина 15 закріплена на направляючих 8 і зафіксована гайками. В отвір середини направляючої пластини 15 вкручений увігнутий конус 13, який входить до звуженої області 12 циліндра 11. На іншому кінці увігнутого конуса 13 жорстко встановлена гайка 16.

Експандер працює наступним чином. Змішані компоненти корму засипаються у бункер 5 і потрапляють до живильника 4. Під дією тиску через патрубок для подачі пару 6 в живильник 4 подається пар при температурі 120–180 °С, де відбувається відповідна обробка компонентів корму і насичення їх вологою. Далі за допомогою гвинта 9, який обертається під дією редуктора 3 і асинхронного електродвигуна 2, компоненти корму переміщуються вздовж циліндра 7. В зоні, де встановлено нагріваючий елемент 10,

компоненти корму піддаються баротермічній обробці (нагріваються до температури 80–140 °С під тиском до 6 МПа) і перетворюються в пластифіковану масу.



1 – основа, 2 – асинхронний електродвигун, 3 – редуктор, 4 – живильник, 5 – бункер, 6 – патрубок для подачі пару, 7 – циліндр, 8 – направляюча, 9 – гвинт, 10 – нагріваючий елемент, 11 – формуюча насадка, 12 – звужена область, 13 – увігнутий конус, 14 – корончата гайка, 15 – направляюча пластина, 16 – гайка

Рисунок 1.1 – Конструктивно-технологічна схема експандера комбікормів

Нагріта і стиснена пластифікована маса потрапляє до формуючої насадки 11. При переміщенні пластифікованої маси до звуженої області 12 формуючої насадки 11 відбувається підвищення тиску, а після її проходження різке його зменшення. Це досягається через збільшення об'єму робочої області за рахунок форми увігнутого конуса 13. В результаті чого пластифікована маса розширюється і виходить через корончату гайку 14 з формуючої насадки 11. За допомогою корончатої гайки 14 розширена пластифікована маса розділяється на конгломерати, формуючи при цьому готову продукцію – експандати.

При обертанні гайки 16 увігнутий конус 13 виконує зворотно-поступальний рух, що дозволяє встановити необхідний зазор між ним і звуженою областю 12 формуючої насадки 11. Тим самим забезпечивши необхідний розмір і щільність експандата.

2.2 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання експандера кормів

Геометрія гвинта експандера має великий вплив на пропускну здатність лінії приготування експандованих кормів, а також на їх якість, отже, є вирішальною для техніко-економічної ефективності [109]. Щоб заощадити питомі енерговитрати, існують різні методи аналітичного розрахунку, які враховують механізми руху і руйнування твердих речовин, тому не потрібно проводити тривалі експерименти методом проб і помилок. Існує багато припущень і спрощень, які необхідно зробити, щоб отримати аналітичне рішення; наприклад, припущення, що компоненти кормів утворюють твердий шар, який тече з рівномірною швидкістю [91]. Моделювання з використанням методу дискретних елементів (DEM) набуває все більшого поширення для опису твердих тіл, що рухаються в грануляторах, екструдерах або експандерах, оскільки тут можливі відносні переміщення між частинками за визначенням [110, 111, 112]. Так, імітаційна модель DEM використовується для віртуального проектування експериментів і дає змогу отримати велику базу даних для оцінювання ефективності технологічного процесу.

Для кращого розуміння та обговорення представленої проблеми наведено деякий аналіз теоретичних передумов руху твердих речовин в одношнекових грануляторах, екструдерах та експандерах.

Багато підходів до опису руху твердих речовин в одногвинтовому грануляторі, екструдері або експандері, які стали відомі дотепер, зводяться до концепції моделі Дарнелла і Мола [113]. У цій моделі зроблено припущення, що гранули поведуться як подібний до твердого тіла блок, який протікає через гвинтовий канал як твердий шар у потоці блоків. На цей твердий шар діють різні сили тиску та тертя, які дозволяють розрахувати напрямки руху на основі балансу сил і моментів. З того

часу моделювання, особливо сил, було детально обговорено та адаптовано в багатьох наукових дослідженнях.

Описана вище аналітична модель для опису руху твердих тіл на основі фізико-математичних міркувань не використовувалась на початку 2000-х років, оскільки з'явилося чисельне моделювання на основі методу дискретних елементів (DEM). Це стало можливим насамперед завдяки підвищенню продуктивності персонального комп'ютера. DEM, розроблений Кандааллом і Страком [114], був спочатку розроблений для моделювання молекулярної динаміки і з того часу широко застосовується в технологічних процесах, машинобудуванні та геотехніці.

Основною перевагою моделювання DEM є те, що необхідно робити менше попередніх припущень щодо поведінки частинок сипкого матеріалу. Основою DEM є зображення частинок у вигляді сфер або частинок, що складаються з кількох сфер. Для обчислення взаємодії цих частинок з іншими частинками або геометрією вони не з'єднуються, а використовується віртуальне перекриття. Залежно від цього перекриття та граничних умов контактні моделі розраховують контактні сили в нормальному та тангенціальному напрямках. Потім ці сили використовуються для вирішення рівнянь збереження імпульсу та обчислення нових величин руху. Коли ці величини руху інтегруються на етапі моделювання, виникають нові положення частинок, і, таким чином, виникають нові віртуальні перекриття, цикл обчислень починається знову [115, 116].

Завдяки хорошій придатності DEM для опису руху твердих речовин у грануляторах, екструдерах або експандерах, цей метод використовується для оцінювання існуючих підходів аналітичного розрахунку. Основним слабким місцем аналітичних моделей є те, що вони ніколи не відхиляються від припущення про блоковий потік. Більше того, з цієї причини розрахунок конструктивно-технологічних параметрів гвинта складної конструкції може бути неточним.

Аналіз руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера базується на динаміці переміщення систем твердих частинок методом дискретних елементів (DEM). Тверді кормові компоненти, як дискретні елементи, подаються у гвинтовий канал через бункер. Потік у бункері зазвичай здійснюється самопливом,

хоча за певних обставинах необхідно створювати додаткове зусилля. В цих дослідженнях це питання не розглядатиметься. Після того як компоненти корму потрапляють у гвинтовий канал експандера, вони починають переміщуватися вздовж горизонтальної лінії по спіралі. Через зменшення геометричних розмірів гвинтового каналу компоненти корму ущільнюються, утворюючи твердий шар або конгломерат, який потім транспортується до формуючої насадки [117, 118, 119, 120].

Для розгляду фізико-математичного апарату руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера складено відповідну розрахункову схему (рис. 2.2). На рис. 2.2 наведені такі геометричні параметри експандера: діаметр циліндра D_b , діаметр валу гвинта D_s , глибина каналу гвинта h , крок гвинта t , зазор між гвинтом і циліндром δ , ширина каналу гвинта b , кут спіралі гвинта ϕ і ширина навивки гвинта e . Як зазначалось вище, по довжині гвинта експандера його геометричні параметри змінюються. Згідно з дослідженнями [121, 122, 123, 124, 125] «для забезпечення квадратичного (або, як окремий випадок, лінійного) характеру зміни параметрів гвинта, а саме площі перерізу каналу гвинта, площі та об'єму каналу за довжиною гвинта, достатньо забезпечити лінійну зміну двох геометричних параметрів гвинта, а саме – ширини каналу гвинта (кроку гвинта) та його глибини», тобто

$$t = t_0 + k_t dl, \quad (2.1)$$

$$h = h_0 + k_h dl, \quad (2.2)$$

де t_0 – початковий крок гвинта, м;

h_0 – початкова глибина каналу гвинта, м;

k_t – коефіцієнт зміни кроку гвинта за його довжиною;

k_h – коефіцієнт зміни глибини каналу гвинта за його довжиною;

dl – мінімальний крок за довжиною каналу гвинта, м.

Розглянемо всі сили, що діють на конгломерат компонентів корму під час його транспортування й ущільнення (рис. 2.2). Ці сили розглядаються в макрорівні (без урахування DEM) за припущенням, що конгломерат компонентів корму є суцільним і однорідним. Так на конгломерат компонентів корму діють такі сили:

– сили нормальної реакції між конгломератом компонентів корму й боковими

стінками гвинта F_{N1} , F_{N2} ;

– сили тертя між конгломератом компонентів корму й боковими стінками гвинта експандера F_{f1} , F_{f2} ;

– сила тертя між конгломератом компонентів корму і гвинтом F_{D1} ;

– сила тертя між конгломератом компонентів корму і циліндром F_{D2} ;

– нормальна сила від тиску F_{P1} , F_{P2} .

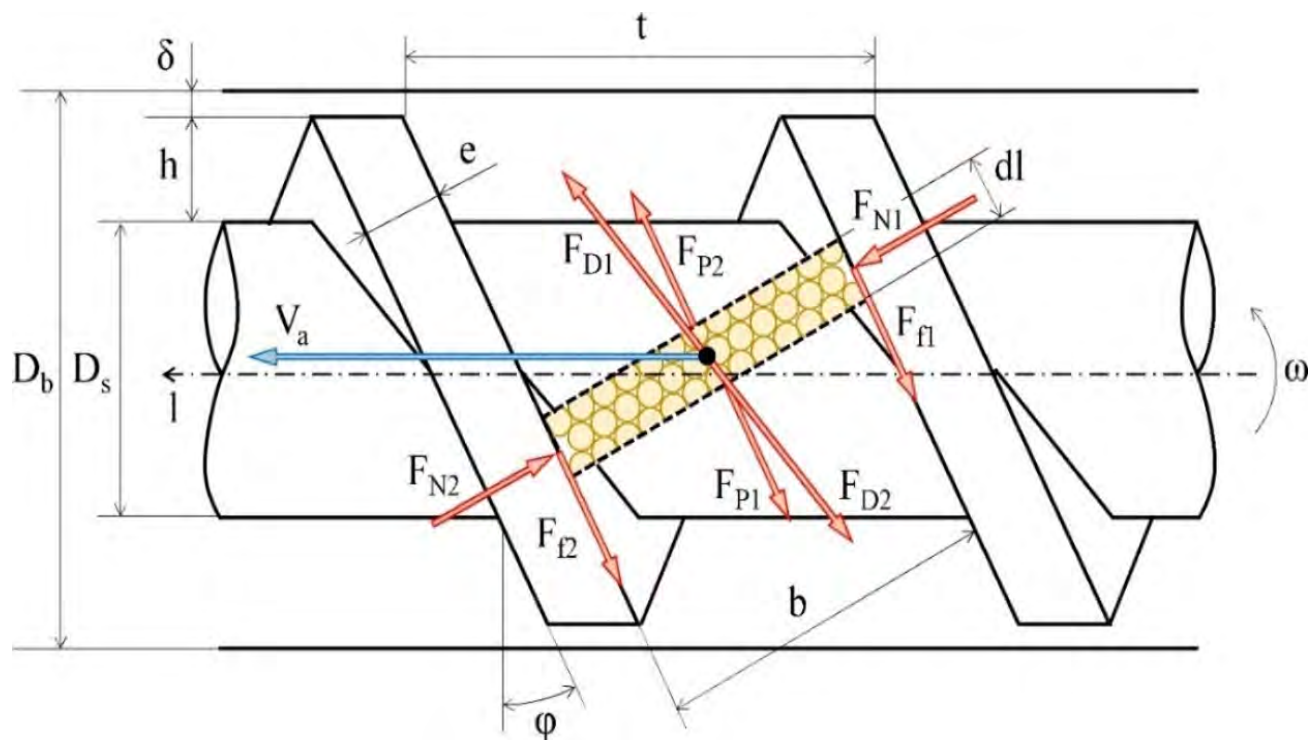


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема руху твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера

У зазначених дослідженнях вирішено диференціальне рівняння рівноваги елемента конгломерату компонентів корму й отримано залежність зміни тиску по довжині їх переміщення вздовж каналу експандера. Отримана В. В. Братішком [121, 122, 123] залежність тиску, що створюється на елемент конгломерату компонентів корму не враховує його структури. Розглянувши конгломерат компонентів корму як щільну упаковку сферичних частинок DEM (рис. 2.3), стверджуємо, що сила тиску повинна компенсуватися сумарною силою контактної взаємодії насінин між собою і

СТІНКОЮ.

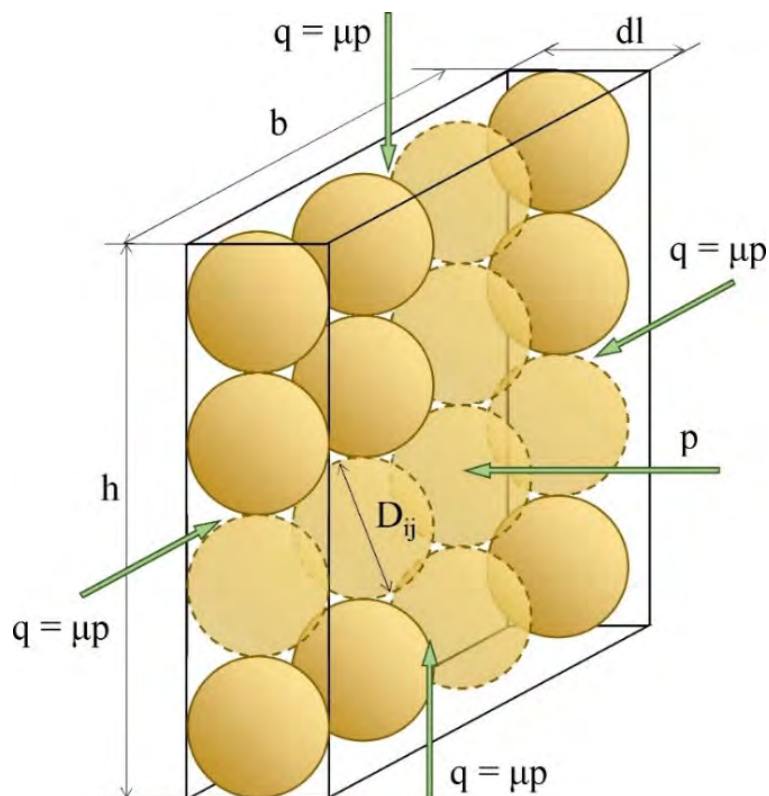


Рисунок 2.3 – Щільна упаковка сферичних частинок твердих компонентів корму у гвинтовому каналі експандера

Сила тиску F_p розраховується з геометричних параметрів шнека та кількості частинок N у силовому полі в елементарному об'ємі елемента конгломерату компонентів корму:

$$F_p = \frac{q\pi(D_b^2 - D_s^2)}{4N}. \quad (2.3)$$

Кількість частинок N в елементарному об'ємі елемента конгломерату компонентів можна розрахувати так:

$$N = N_b N_h = \left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor \left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor, \quad (2.4)$$

де N_b – кількість частинок вздовж ширини каналу;

N_h – кількість частинок вздовж глибини каналу;

D_{ij} – діаметр частинки ij ;

$\langle \rangle$ – функція середнього значення;

$\lfloor \rfloor$ – функція визначення найбільшого цілого, що менше або дорівнює числу

під дужками.

Для визначення сили контактної взаємодії компонентів корму між собою складемо відповідну розрахункову схему (рис. 2.4).

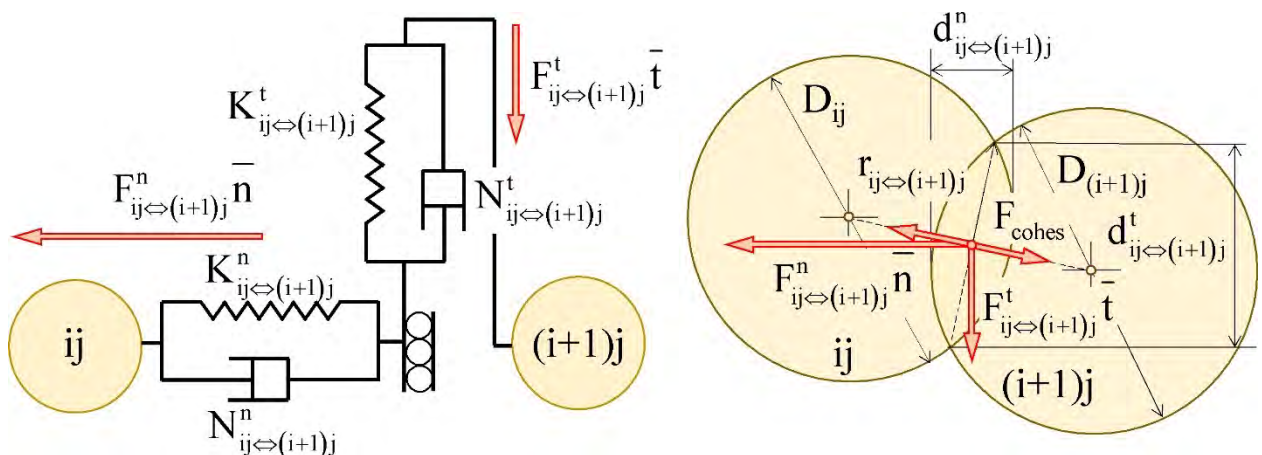


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема сил контактної взаємодії компонентів корму між собою

Згідно з пружно-демпферною контактною моделлю Герца-Міндліна [126, 127] сумарна сила контактної взаємодії компонентів корму між собою визначається так:

$$\bar{F}_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^c = F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n \bar{n} + F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t \bar{t}, \quad (2.5)$$

де $\bar{F}_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^c$ – сила взаємодії між частинками ij та $(i+1)j$, Н;

$F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n$ – нормальний складник сили між частинками ij та $(i+1)j$, Н;

$F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t$ – тангенціальний складник сили між частинками ij та $(i+1)j$, Н;

\bar{n} , \bar{t} – одиничні вектори нормального й тангенціального напрямів відповідно.

Нормальний складник сили визначається таким рівнянням:

$$F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n = -K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n - N_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n V_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n, \quad (2.6)$$

де $K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n$ – нормальний коефіцієнт жорсткості пружної складової, кг/с²:

$$K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n = \frac{4}{3} E_{ij\leftrightarrow(i+1)j} \sqrt{d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n R_{ij\leftrightarrow(i+1)j}}; \quad (2.7)$$

$N_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n$ – нормальний коефіцієнт згасання демпферного складника, кг/с:

$$N_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n = \sqrt{(5K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n M_{ij\leftrightarrow(i+1)j})} N_{n \text{ damp}}. \quad (2.8)$$

Згідно з дослідженням [126] тангенціальний складник сили визначається, як

$$F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t = -K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t - N_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t V_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t, \quad (2.9)$$

якщо $\left| K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t \right| < \left| K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n \right| C_{fs}$, де C_{fs} – статистичний коефіцієнт тертя між частинками компонентів корму. В іншому випадку тангенціальний складник сили визначається таким рівнянням:

$$F_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t = \frac{\left| K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^n \right| C_{fs} d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t}{\left| d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t \right|}, \quad (2.10)$$

де $K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t$ – тангенціальний коефіцієнт жорсткості пружного складника, кг/с²:

$$K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t = 8G_{ij\leftrightarrow(i+1)j} \sqrt{d_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t R_{ij\leftrightarrow(i+1)j}}; \quad (2.11)$$

$N_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t$ – тангенціальний коефіцієнт згасання демпферного складника, кг/с:

$$N_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t = \sqrt{(5K_{ij\leftrightarrow(i+1)j}^t M_{ij\leftrightarrow(i+1)j})} N_{t \text{ damp}}; \quad (2.12)$$

$N_{n \text{ damp}}$, $N_{t \text{ damp}}$ – нормальний і тангенціальний коефіцієнти загасання відповідно

$$N_{n \text{ damp}} = -\ln(C_{n \text{ rest}}) / \sqrt{\pi^2 + \ln(C_{n \text{ rest}})^2}; \quad (2.13)$$

$$N_{t \text{ damp}} = -\ln(C_{t \text{ rest}}) / \sqrt{\pi^2 + \ln(C_{t \text{ rest}})^2}; \quad (2.14)$$

$R_{ij\leftrightarrow(i+1)j}$ – еквівалентний радіус двох частинок ij та $(i+1)j$, м:

$$R_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{2/D_{ij} + 2/D_{(i+1)j}}; \quad (2.15)$$

$M_{ij \leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентна маса двох частинок ij та $(i+1)j$, кг:

$$M_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{1/M_{ij} + 1/M_{(i+1)j}}; \quad (2.16)$$

$E_{ij \leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентний модуль Юнга двох частинок ij та $(i+1)j$, Па:

$$E_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{(1 - v_{ij}^2)/E_{ij} + (1 - v_{(i+1)j}^2)/E_{(i+1)j}}; \quad (2.17)$$

$G_{ij \leftrightarrow (i+1)j}$ – еквівалентний модуль зсуву двох частинок ij та $(i+1)j$, Па:

$$G_{ij \leftrightarrow (i+1)j} = \frac{1}{2(2 - v_{ij})/(1 + v_{ij})/E_{ij} + 2(2 - v_{(i+1)j})/(1 + v_{(i+1)j})/E_{(i+1)j}}; \quad (2.18)$$

$M_{ij}, M_{(i+1)j}$ – маси частинок ij та $(i+1)j$, кг;

$d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t$ – віртуальне перекриття частинок ij та $(i+1)j$ в нормальному і тангенціальному напрямках, м;

$D_{ij}, D_{(i+1)j}$ – ефективні діаметри частинок ij та $(i+1)j$, м;

$E_{ij}, E_{(i+1)j}$ – модулі Юнга частинок ij та $(i+1)j$, Па;

$v_{ij}, v_{(i+1)j}$ – коефіцієнти Пуассона частинок ij та $(i+1)j$;

$V_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t, V_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n$ – тангенціальний й нормальний компоненти швидкості переміщення частинок в точці контакту, м/с;

При взаємодії частинки компонентів корму зі стінкою залежності (2.15)–(2.16) при умові $D_{wall} = \infty, M_{wall} = \infty$ перетворюються у наступну форму

$$\begin{aligned} R_{ij \leftrightarrow wall} &= D_{ij}/2, \\ M_{ij \leftrightarrow wall} &= M_{ij}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Через високий тиск між частинками виникає зчеплення, природа якого у явищі когезії. Моделювання когезії полегшує моделювання сил міжмолекулярного притягання (сил Ван-дер-Ваальса) між поверхнями частинок. Як зазначено в дослідженнях [128] для деяких класів симуляцій, таких як сухі порошки, ці сили

значно впливають на результат, і їх не можна ігнорувати. В подальшому будемо використовувати модель Джонсона-Кендалла-Робертса (JKR) [126, 128, 129]. Сила зчеплення між двома сферичними частинками виражається як (рис. 2.4):

$$F_{\text{cohes}} = \frac{3}{2} \pi r_{ij \leftrightarrow (i+1)j} \left(d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t \right) W_p, \quad (2.20)$$

де $r_{ij \leftrightarrow (i+1)j} \left(d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t \right)$ – мінімальний радіус контактних поверхонь, який залежить від віртуального перекриття частинок ij та $(i+1)j$, м;
 W_p – робота когезії на одиницю площі, Н/м.

2.3 Розробка моделі фізико-механічних властивостей компонентів комбікорму

Далі, для оцінки правильності обраних моделей і фізико-математичного апарата, проведемо чисельне моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в ємності під дією поршня в CAE-системі STAR-CCM+¹ (рис. 2.5). Форма ємності обрана кільцеподібна, так як під час переміщення матеріалу в області гвинтового експандера він формується у вигляді кільця. Геометричні розміри області наведені на рис. 2.5.

Для моделювання прийняті наступні моделі континуума: безсіткова модель дискретних елементів (DEM), Лагранжева багатофазність, граничні сили DEM, нестационарний неявний вирішувач, модель інтерполяції рішення, сила тяжіння. Компоненти кормової суміші представлені у вигляді суцільних сферичних частинок DEM з постійною щільністю. Взаємодія частинок між собою і стінкою підпорядковувалися моделям Герца-Міндліна із опором кочення і лінійного зчеплення [130].

Згідно попередніх лабораторних досліджень і літературних джерел [131, 132,

¹ У дослідженнях використовувалося програмне забезпечення «Simcenter STAR-CCM+ Academic Pack», власником ліцензії якої є Дніпровський державний аграрно-економічний університет.

133, 134, 135] фізико-механічні властивості компонентів кормової суміші прийняті наступні: коефіцієнт тертя спокою – 0,62, щільність – 710 кг/м³, дотичний коефіцієнт відновлення – 0,6, нормальний коефіцієнт відновлення – 0,6.

Крок за часом – 0,01 с. Число ітерацій за один крок часу – 5. Час експозиції – 4 с. Швидкість переміщення поршня – 0,01 м/с.

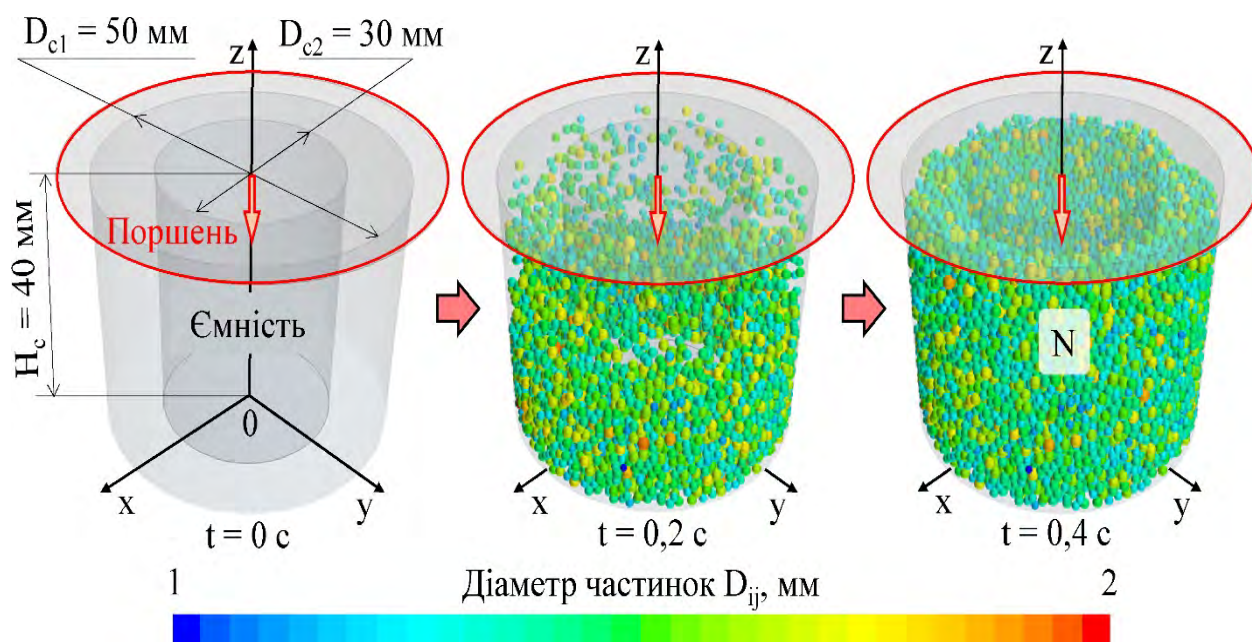


Рисунок 2.5 – Розрахункова схема чисельного моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в циліндричній ємності під дією поршня

Дослідження процесу стискання компонентів кормової суміші були проведені для різних їх фізико-механічних властивостей, а саме середній діаметр частинок суміші D_{μ} , модуль пружності Юнга E_p , коефіцієнт Пуассона μ_p , робота когезії на одиницю площі W_p . Рівні і межі варіювання приведені в табл. 2.1. Частинки у суміші за розміром (ефективним діаметром) розподіляються за нормальним законом. У відповідності до табл. 2.1:

– $D_{\mu} = 0,5$ мм: діапазон – 0,0–1,0 мм, середнє значення – 0,5 мм, середньоквадратичне відхилення – 0,08 мм, загальна кількість частинок, які заповнили всю ємність – 315214, гістограма розподілу наведена на рис. 2.6, а;

– $D_{\mu} = 1,5$ мм: діапазон – 1,0–2,0 мм, середнє значення – 1,5 мм,

середньоквадратичне відхилення – 0,08 мм, загальна кількість частинок, які заповнили всю ємність – 11734, гістограма розподілу наведена на рис. 2.6, б;

– $D_{\mu} = 2,5$ мм: діапазон – 2,0–3,0 мм, середнє значення – 2,5 мм, середньоквадратичне відхилення – 0,08 мм, загальна кількість частинок, які заповнили всю ємність – 2831, гістограма розподілу наведена на рис. 2.6, в.

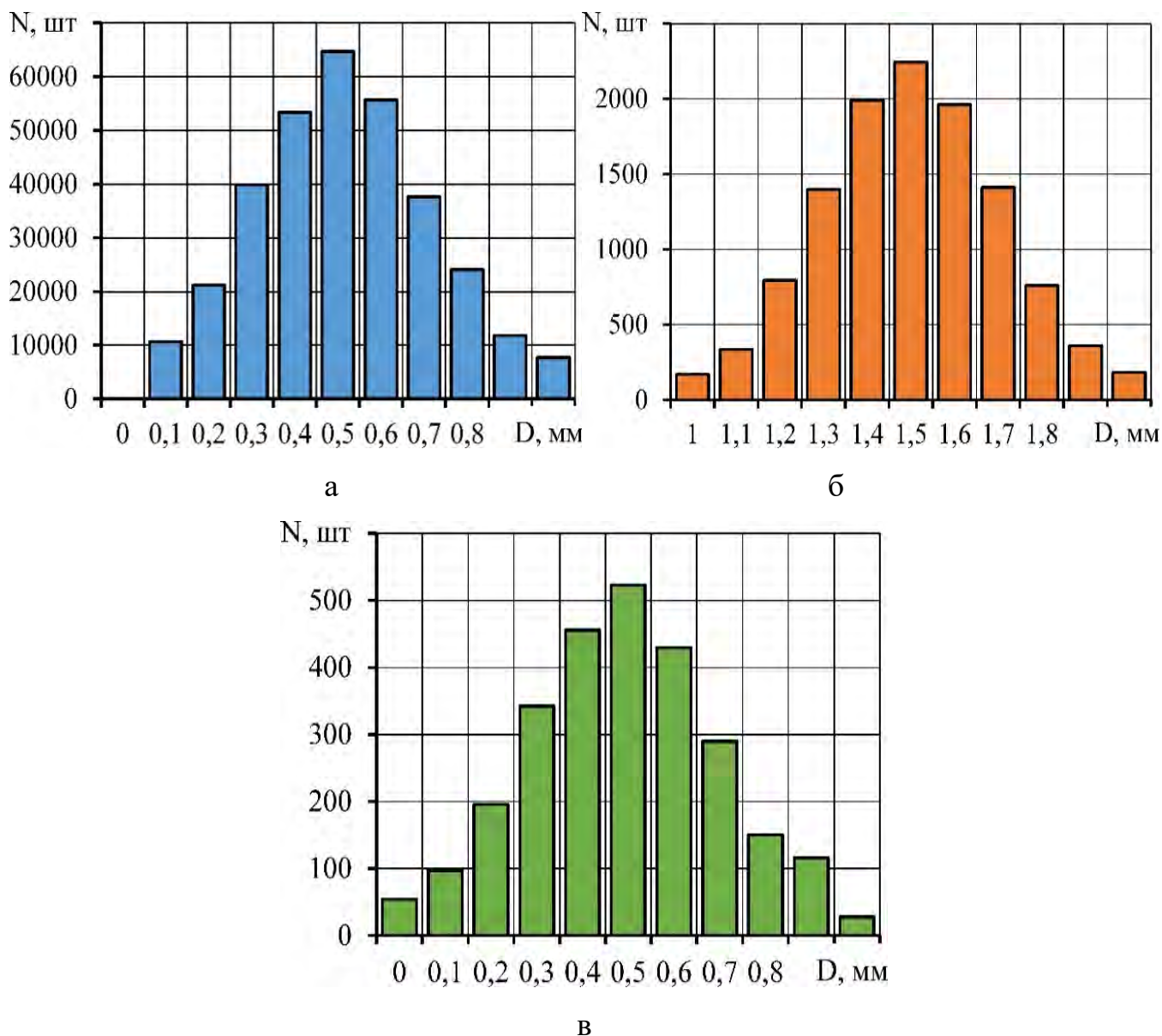


Рисунок 2.6 – Гістограма розподілу частинок у суміші за ефективним діаметром

Моделювання проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю моделювань – $3^4 = 81$ (додаток А).

Таблиця 2.1 – Рівні і межі варіювання факторами чисельного моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в ємності під дією поршня

Фактор	Ефективний діаметр частинок		Модуль пружності Юнга		Коефіцієнт Пуассона		Робота когезії на одиницю площі	
	х ₁	D _μ , мм	х ₂	E _p , МПа	х ₃	μ _p	х ₄	W _p , Н/м
Низький	-1	0,5	-1	10	-1	0,2	-1	0
Середній	0	1,5	0	20	0	0,3	0	0,25
Високий	+1	2,5	+1	30	+1	0,4	+1	0,50
Інтервал	1	1	1	10	1	0,1	1	0,25

В результаті чисельного моделювання отримано візуалізацію стискання компонентів кормової суміші в ємності під дією поршня, яка приведена на рис. 2.7.

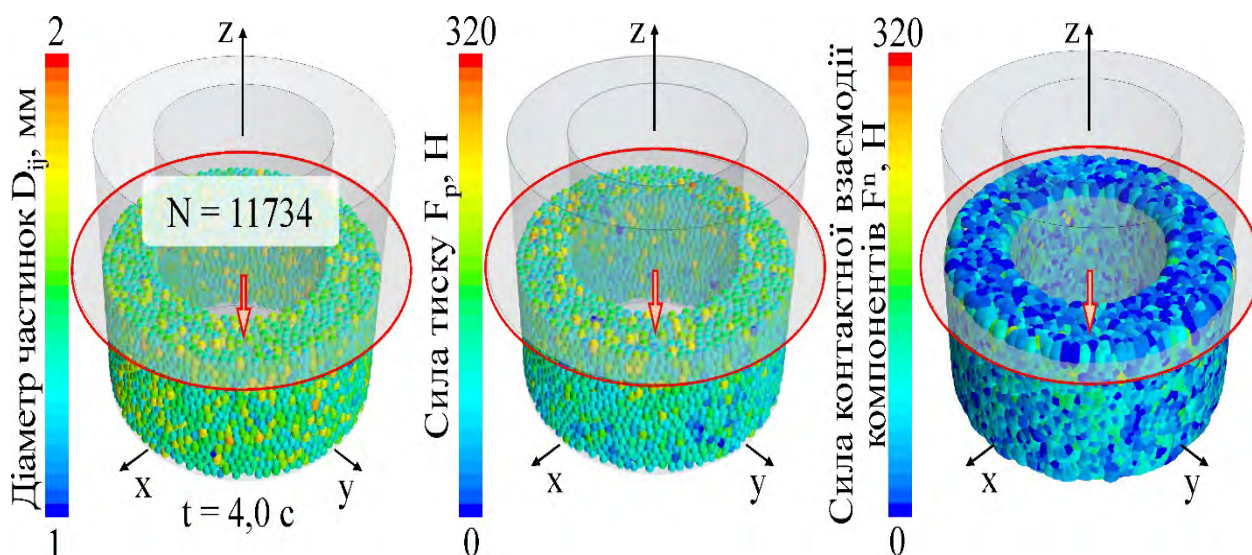


Рисунок 2.7 – Візуалізація стискання компонентів кормової суміші в ємності під дією поршня при $D_{\mu} = 1,5$ мм, $E_p = 10$ МПа, $\mu_p = 0,2$, $W_p = 0$ Н/м

На рис. 2.7 представлено розподіл компонентів кормової суміші в циліндричній ємності (при $D_{\mu} = 1,5$ мм, $E_p = 10$ МПа, $\mu_p = 0,2$, $W_p = 0$ Н/м) за їх діаметром D_{ij} , силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$. При цьому динаміка зміни максимальних значень зазначених сил (при $D_{\mu} = 1,5$ мм, $E_p = 10$ МПа, $\mu_p = 0,2$, $W_p = 0$ Н/м) в залежності від часу і абсолютної деформації

компонентів корму приведені на рис. 2.8.

Для перевірки адекватності вибраних фізико-механічних властивостей для кожного чисельного дослідження визначено загальну силу стиску F_{Σ} , що діє на поршень в залежності від абсолютної деформації компонентів корму Δz (рис. 2.9):

$$F_{\Sigma}(\Delta z) = \int_{S=\pi D_c^2/4} F_p(\Delta z) dS. \quad (2.21)$$

Рівняння (2.21) перетворено у загальний тиск P_{Σ} , що діє на поршень в залежності від відносної деформації компонентів корму ε_z :

$$P_{\Sigma}(\varepsilon_z) = \frac{4F_{\Sigma}(\varepsilon_z H_p)}{\pi D_c^2}. \quad (2.22)$$

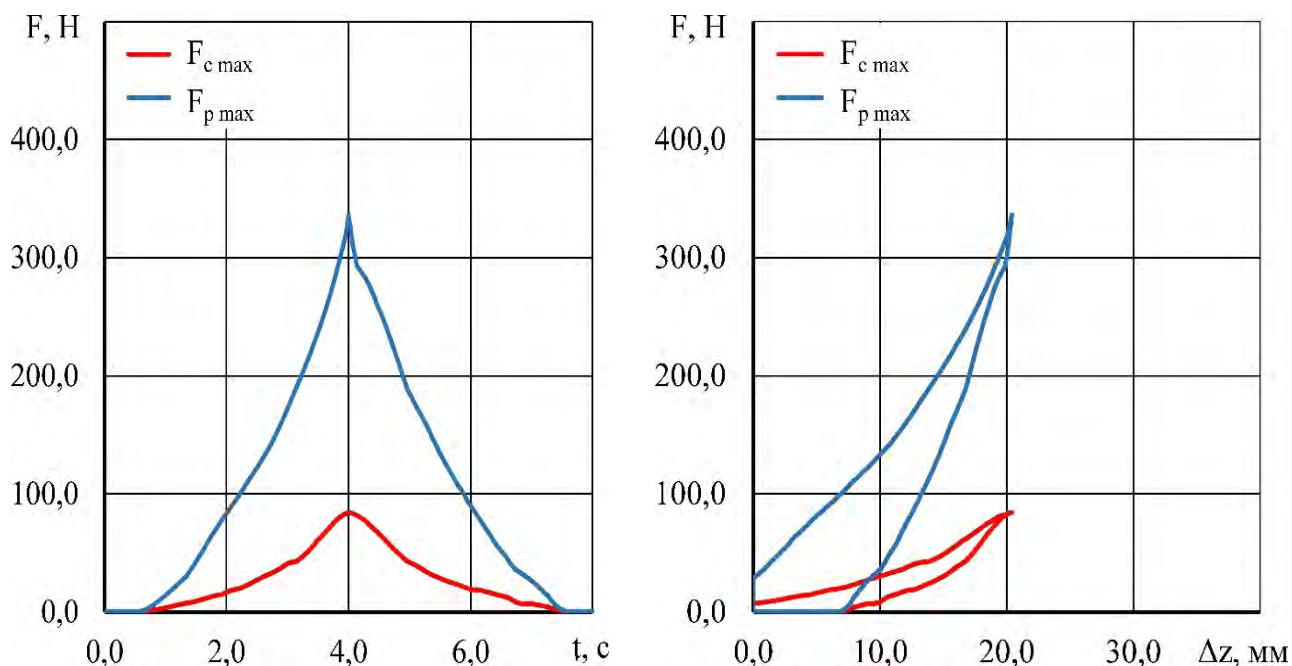


Рисунок 2.8 – Динаміка зміни максимальних значень зазначених сили тиску F_p і сили контактної взаємодії компонентів корму між собою (при $D_{\mu} = 1,5$ мм, $E_p = 10$ МПа, $\mu_p = 0,2$, $W_p = 0$ Н/м) в залежності від часу t і абсолютної деформації компонентів корму Δz

Рис. 2.9 представляє собою графік пружного гістерезису компонентів корму в залежності від його фізико-механічних властивостей.

Площа $S_{\Delta p}$, укладена всередині петлі пружного гістерезису, дорівнює питомій

енергії (роботі), що перетворюється при здійсненні кожного етапу деформації в енергію теплову [136, 137]. Відставання деформацій від напруження і петля пружного гістерезису, що породжується ним, пов'язані з так званим внутрішнім тертям матеріалу. Також існує кілька пов'язаних між собою характеристик механічних втрат при динамічних режимах навантаження.

Коефіцієнтом механічних втрат Ψ називається відношення площі петлі гістерезису $S_{\Delta P}$ до площі, укладеної між кривою напруження і віссю абсцис, де відкладені деформації S_{P1} [136, 138, 139]. Тому в якості критерію оцінки пружних властивостей компонентів корму було прийнято рішення знайти зв'язності площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ і коефіцієнта механічних втрат Ψ від середнього діаметра частинок суміші D_{μ} , модуля пружності Юнга E_p , коефіцієнта Пуассона μ_p і роботи когезії на одиницю площі W_p . Результати розрахунку критеріїв приведені в табл. А.1.

Провівши обробку даних табл. А.1 в Wolfram Cloud отримано рівняння регресії площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ від факторів у загальному закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} S_{\Delta P} = & 0,944283 - 0,0801014 x_1 + 0,000936949 x_1^2 - 0,0994231 x_2 + \\ & + 0,000558862 x_1 x_2 + 0,000943563 x_2^2 + 0,627355 x_3 + \\ & + 0,000320767 x_1 x_3 - 0,128667 x_2 x_3 - 0,00152998 x_3^2 - 0,369332 x_4 - \\ & - 0,00130291 x_1 x_4 - 0,062443 x_2 x_4 - 0,290943 x_3 x_4 + 0,0612099 x_4^2. \end{aligned} \quad (2.23)$$

В результаті статистичної обробки в Wolfram Cloud, використовуючи параметр «ParameterTable» для функції «NonlinearModelFit» (табл. 2.2, табл. А.2), були відхилені незначущі коефіцієнти за критерієм Стьюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$) і проведено розкодування рівняння регресії (2.23):

$$\begin{aligned} S_{\Delta P} = & - 1,91791 - 0,0801014 D_{\mu} + 0,0349022 E_p + 11,7563 \mu_p - \\ & - 0,128667 E_p \mu_p + 2,02385 W_p - 0,0249772 E_p W_p - \\ & - 11,6377 \mu_p W_p + 0,979359 W_p^2. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Графічна інтерпретація рівняння (2.24) приведена на рис. 2.10.

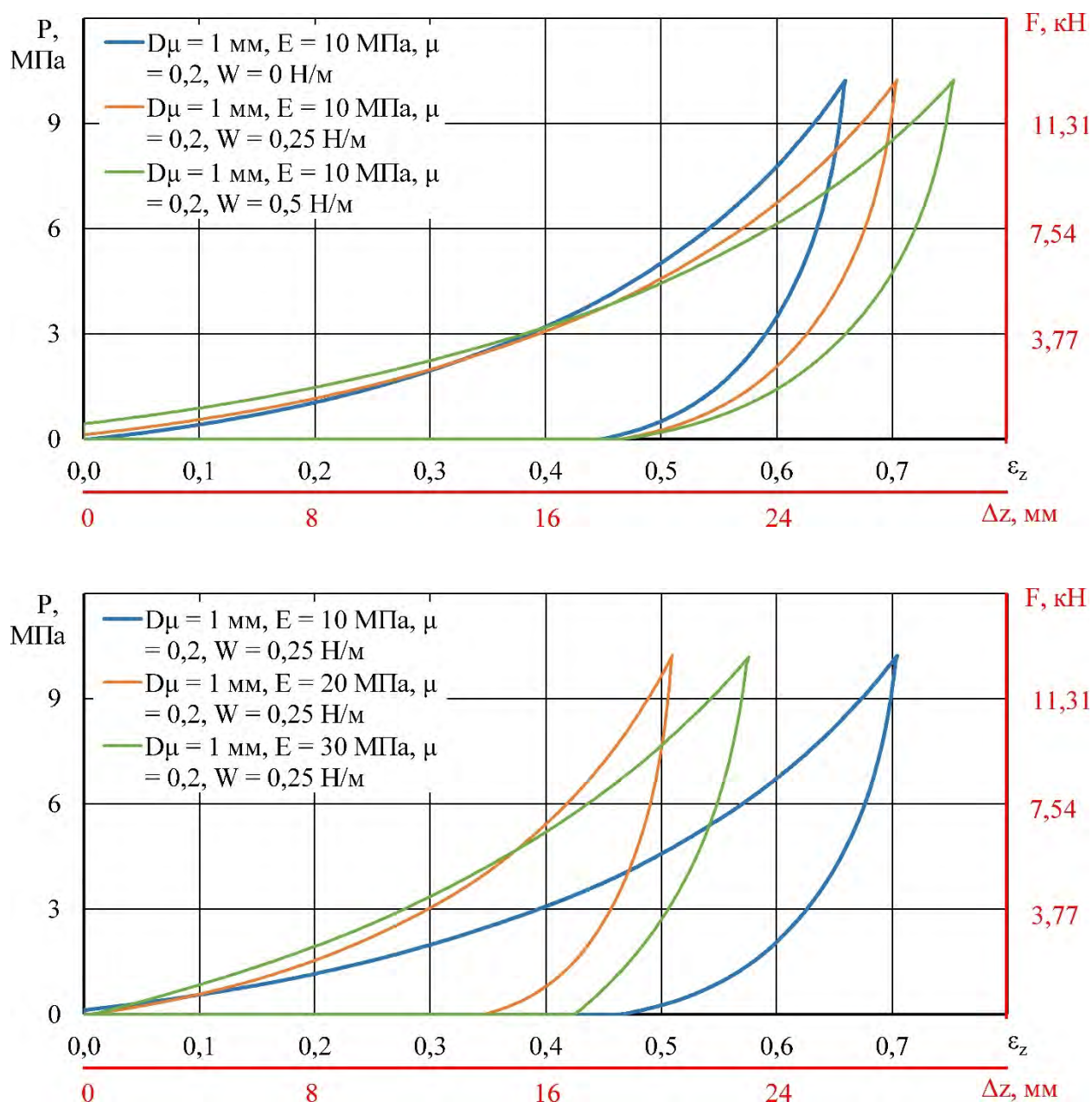


Рисунок 2.9 – Залежність сили стиску поршня F_Σ (тиску P_Σ) від абсолютної (відносної) деформації компонентів корму Δz (ε_z) при різних їх фізико-механічних властивостях

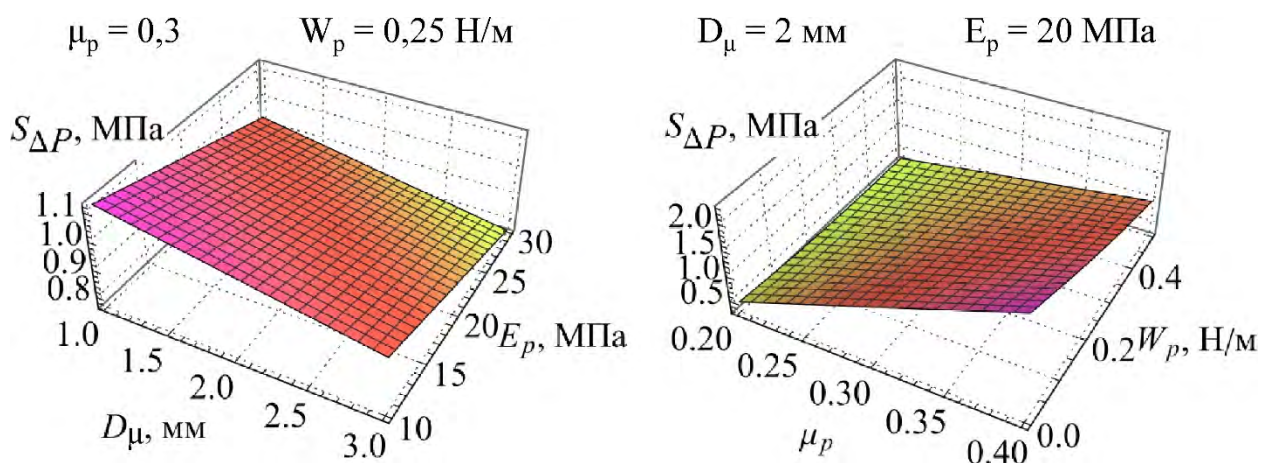
Провівши обробку даних табл. А.1 в Wolfram Cloud отримано рівняння регресії коефіцієнта механічних втрат Ψ від факторів у загальному закодованому вигляді:

$$\Psi = 1,4345 + 0,150654 x_1 - 0,00124723 x_1^2 - 0,0355646 x_2 + 0,00124644 x_1 x_2 + 0,0293183 x_2^2 - 0,0679006 x_3 - \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned}
& - 0,00338794 x_1 x_3 + 0,00249525 x_2 x_3 - 0,00409623 x_3^2 + \\
& + 0,379305 x_4 + 0,0270564 x_1 x_4 - 0,035577 x_2 x_4 + \\
& + 0,0390648 x_3 x_4 - 0,00227287 x_4^2.
\end{aligned}$$

Таблиця 2.2 – Статистична обробка рівняння (2.23)

Коефіцієнт	Значення	Помилка стандартна	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
b ₀₀	0,944283	0,00156121	604,839	2,78405·10 ⁻¹²⁵
b ₁₀	-0,0801014	0,000637362	-125,676	2,66593·10 ⁻⁸⁰
b ₂₀	-0,0994231	0,000637362	-155,991	1,78881·10 ⁻⁸⁶
b ₃₀	0,627355	0,000637362	984,298	3,07715·10 ⁻¹³⁹
b ₄₀	-0,369332	0,000637362	-579,469	4,70654·10 ⁻¹²⁴
b ₁₂	0,000558862	0,000780606	0,715934	0,476558
b ₁₃	0,000320767	0,000780606	0,410921	0,682462
b ₁₄	-0,00130291	0,000780606	-1,6691	0,0998349
b ₂₃	-0,128667	0,000780606	-164,83	4,75138·10 ⁻⁸⁸
b ₂₄	-0,062443	0,000780606	-79,9929	1,94611·10 ⁻⁶⁷
b ₃₄	-0,290943	0,000780606	-372,714	2,07966·10 ⁻¹¹¹
b ₁₁	0,000936949	0,00110394	0,848728	0,3991
b ₂₂	0,000943563	0,00110394	0,85472	0,395798
b ₃₃	-0,00152998	0,00110394	-1,38592	0,170435
b ₄₄	0,0612099	0,00110394	55,4466	4,36315·10 ⁻⁵⁷

Рисунок 2.10 – Залежність площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ від факторів досліджень

В результаті статистичної обробки в Wolfram Cloud, використовуючи параметр «ParameterTable» для функції «NonlinearModelFit» (табл. 2.3, табл. А.3),

були відхиленні незначущі коефіцієнти за критерієм Стьюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$) і проведено розкодування рівняння регресії (2.25):

$$\begin{aligned} \Psi = & 1,24615 + 0,123597 D_{\mu} - 0,0117261 E_p + 0,000293183 E_p^2 - \\ & - 1,06965 \mu_p + 1,11661 W_p + 0,108226 D_{\mu} W_p - \\ & - 0,0142308 E_p W_p + 1,56259 \mu_p W_p. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Графічна інтерпретація рівняння (2.26) приведена на рис. 2.11.

Провівши обробку даних табл. А.1 в Wolfram Cloud отримано рівняння регресії висоти експандату від факторів у загальному закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} h_a = & 13,9223 + 0,344829 x_1 - 0,0543211 x_1^2 - 3,05788 x_2 + \\ & + 0,00416667 x_1 x_2 + 1,51721 x_2^2 - 0,238215 x_3 - 0,0217593 x_1 x_3 + \\ & + 0,142814 x_2 x_3 - 0,0154321 x_3^2 + 0,368441 x_4 + 0,037963 x_1 x_4 - \\ & - 0,0180556 x_2 x_4 - 0,00787037 x_3 x_4 + 0,0682485 x_4^2. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Таблиця 2.3 – Статистична обробка рівняння (2.25)

Коефіцієнт	Значення	Помилка стандартна	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
b ₀₀	1,4345	0,00615575	233,034	5,86956·10 ⁻⁹⁸
b ₁₀	0,150654	0,00251307	59,948	2,78845·10 ⁻⁵⁹
b ₂₀	- 0,0355646	0,00251307	- 14,1519	1,14643·10 ⁻²¹
b ₃₀	- 0,0679006	0,00251307	- 27,019	2,10442·10 ⁻³⁷
b ₄₀	0,379305	0,00251307	150,933	1,56646·10 ⁻⁸⁵
b ₁₂	0,00124644	0,00307787	0,404967	0,686811
b ₁₃	- 0,00338794	0,00307787	- 1,10074	0,275008
b ₁₄	0,0270564	0,00307787	8,79062	1,02474·10 ⁻¹²
b ₂₃	0,00249525	0,00307787	0,810706	0,420448
b ₂₄	-0,035577	0,00307787	- 11,559	1,63515·10 ⁻¹⁷
b ₃₄	0,0390648	0,00307787	12,6921	2,2537·10 ⁻¹⁹
b ₁₁	- 0,00124723	0,00435277	- 0,286537	0,775364
b ₂₂	0,0293183	0,00435277	6,73556	4,77054·10 ⁻⁹
b ₃₃	- 0,00409623	0,00435277	- 0,941063	0,350104
b ₄₄	- 0,00227287	0,00435277	- 0,522166	0,603303

В результаті статистичної обробки в Wolfram Cloud, використовуючи параметр «ParameterTable» для функції «NonlinearModelFit» (табл. 2.4, табл. А.4), були відхилені незначущі коефіцієнти за критерієм Стьюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$) і проведено розкодування рівняння регресії (2.27):

$$h_a = 26,6886 + 0,344829 D_\mu - 0,955516 E_p + 0,0151721 E_p^2 - 5,23844 \mu_p + 0,142814 E_p \mu_p + 0,927778 W_p + 1,09198 W_p^2. \quad (2.28)$$

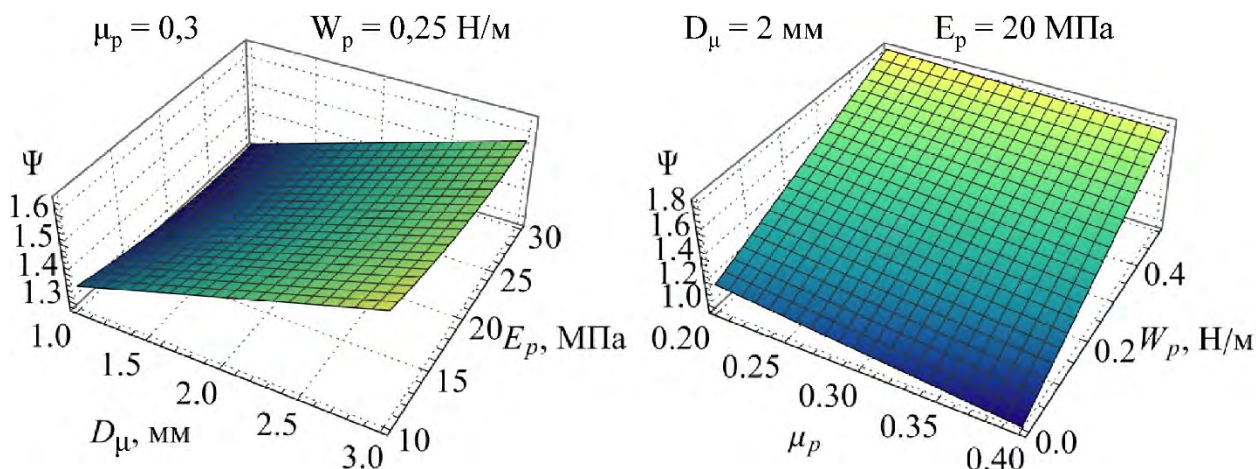


Рисунок 2.11 – Залежність коефіцієнта механічних втрат Ψ від факторів досліджень

Графічна інтерпретація рівняння (2.28) приведена на рис. 2.12.

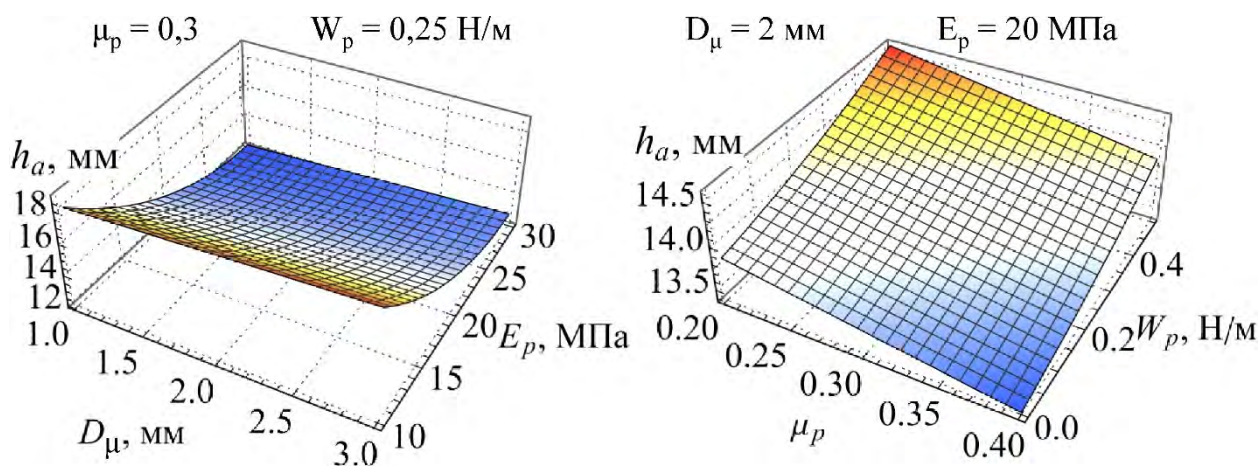


Рисунок 2.12 – Залежність висоти експандату h_a від факторів досліджень

Порівнюючи отримані залежності (2.24), (2.26) і (2.28) із результатами лабораторних досліджень (див. розділ 4.1) встановлено, що при наступних фізико-механічних властивостях компонентів корму $D_\mu = 0,5$ мм, $E_p = 22,3$ МПа, $\mu_p = 0,31$, $W_p = 0,49$ Н/м технологічні параметри експандування є найбільш оптимальними (див. розділ 4.2), чисельне моделювання процесу його стискання є найбільш адекватним.

Таблиця 2.4 – Статистична обробка рівняння (2.27)

Коефіцієнт	Значення	Помилка стандартна	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
b ₀₀	13,9223	0,0437335	318,345	6,83908·10 ⁻¹⁰⁷
b ₁₀	0,344829	0,0178541	19,3137	7,3751·10 ⁻²⁹
b ₂₀	- 3,05788	0,0178541	- 171,27	3,80857·10 ⁻⁸⁹
b ₃₀	- 0,238215	0,0178541	- 13,3423	2,07374·10 ⁻²⁰
b ₄₀	0,368441	0,0178541	20,6362	1,71876·10 ⁻³⁰
b ₁₂	0,00416667	0,0218667	0,190548	0,849465
b ₁₃	- 0,0217593	0,0218667	- 0,995084	0,32333
b ₁₄	0,037963	0,0218667	1,7361	0,0872117
b ₂₃	0,142814	0,0218667	6,53112	1,09501·10 ⁻⁸
b ₂₄	- 0,0180556	0,0218667	- 0,825708	0,411944
b ₃₄	- 0,00787037	0,0218667	- 0,359924	0,720053
b ₁₁	- 0,0543211	0,0309243	- 1,75658	0,083627
b ₂₂	1,51721	0,0309243	49,0621	1,1594·10 ⁻⁵³
b ₃₃	- 0,0154321	0,0309243	- 0,499029	0,619418
b ₄₄	0,0682485	0,0309243	2,20696	0,0308003

Тому згідно з рис. 2.3, враховуючи вирази (2.3)–(2.20) і прийняті фізико-механічні властивості компонентів корму, складемо систему рівнянь рівноваги:

$$\begin{aligned}
 \mu_p \frac{\pi(D_b^2 - D_s^2)}{4 \left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right]} &= \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{1j \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{i=2}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n + \\
 &+ \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{j \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i1 \leftrightarrow \text{wall}}^t + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} \sum_{j=2}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t + \\
 &+ \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \leftrightarrow \text{wall}}^t + \frac{3}{2} \pi r_{ij \leftrightarrow (i+1)j} \left(d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t \right) W_p, \\
 \mu_p \frac{\pi(D_b^2 - D_s^2)}{4 \left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right]} &= \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{i1 \leftrightarrow \text{wall}}^n + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} \sum_{j=2}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n +
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_i^n \left[\frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right]_{i \leftrightarrow \text{wall}} + \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{1j \leftrightarrow \text{wall}}^t + \sum_{i=2}^{\left\lfloor \frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor - 1} \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t + \\
& + \sum_{j=1}^{\left\lfloor \frac{h}{\langle D_{ij} \rangle} \right\rfloor} F_{j \leftrightarrow \text{wall}}^t \left[\frac{b}{\langle D_{ij} \rangle} \right] + \frac{3}{2} \pi r_{ij \leftrightarrow (i+1)j} \left(d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^n, d_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^t \right) W_p.
\end{aligned}$$

Складену систему рівнянь (2.29) разом із залежностями (2.6)–(2.19) та залежністю В. В. Братішка розподілу тиску у гвинтовому каналі аналітичним способом дуже складно вирішити через наявність великої кількості змінних у часі. Тому поклавши цю систему як фізико-математичний апарат у САЕ-системі STAR-CCM+, перейдемо до розгляду методики чисельного моделювання [140].

2.4 Чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів

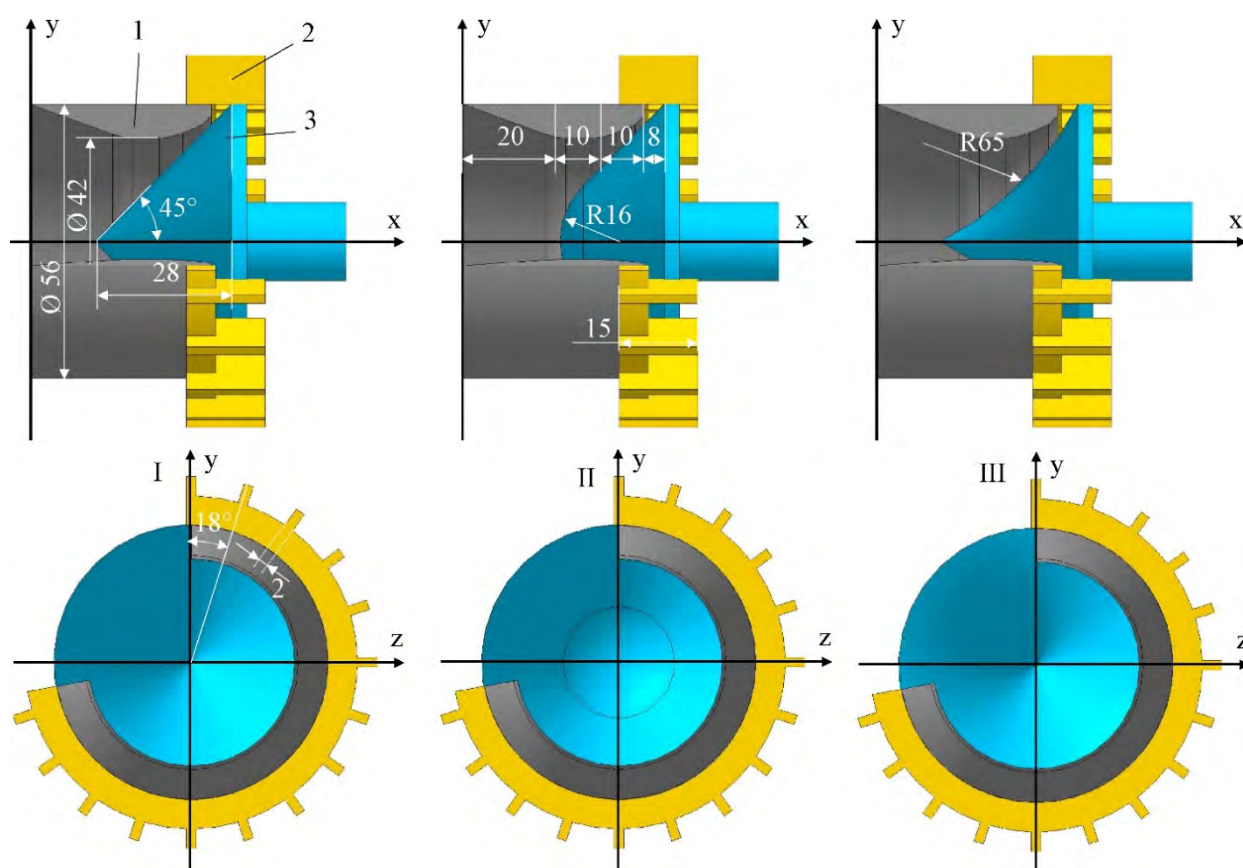
Так як процес чисельного моделювання у САЕ-системі STAR-CCM+ експандера кормів в цілому дуже тривалий (один дослід може зайняти 10 діб реального часу) і потребує високих характеристик комп'ютера, то було прийнято рішення провести моделювання в два етапи. Перший етап передбачає чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів.

Формуюча насадка експандера кормів складається з циліндру 1, гайки корончатої 2 і конуса 3 (рис. 2.13). Згідно аналізу літературних джерел [109, 110] форма конуса може бути виконана у трьох варіантах (рис. 2.13): I – звичайний конус, II – заокруглений конус, III – увігнутий конус. Для оцінки якості формування експандатів у формуючих насадках трьох варіантів приймаємо конструктивні параметри, які приведені на рис. 2.13. Гайка корончата складається з 20 жолобків, по яким переміщуються сформовані експандати. Циліндр формуючої насадки має невелике звуження в середині, яке необхідне для підвищення тиску.

Зміна об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом вздовж руху компонентів кормової суміші (вісь Ox) приведена на рис. 2.14. Як видно з

цього рисунку, характер зміни об'єму різниться для різних типів конусів. Приведена залежність буде використана для подальшого розрахунку зміни щільності компонентів кормової суміші вздовж їх руху.

Схема чисельного моделювання формуючої насадки представлена на рис. 2.15. Початкова загальна кількість частинок компонентів кормів складала 12000 шт., які розміщалися в порожнині циліндра. Далі поршень починає рухатися зі швидкістю 0,01 м/с в бік конуса, стискаючи при цьому компоненти кормів і переміщаючи їх до отворів між конусом і жолобками гайки корончатої.



1 – циліндр, 2 – гайка корончата, 3 – конус, I – звичайний конус, II – заокруглений конус, III – увігнутий конус

Рисунок 2.13 – Варіанти формуючої насадки експандера кормів

Для моделювання прийняті наступні моделі континуума: безсіткова модель дискретних елементів (DEM), Лагранжева багатофазність, граничні сили DEM,

нестационарний неявний вирішувач, модель інтерполяції рішення, сила тяжіння. Компоненти кормової суміші представлені у вигляді суцільних сферичних частинок DEM з постійною щільністю. Взаємодія частинок між собою і стінкою підпорядковувалися моделям Герца-Міндліна із опором кочення і лінійного зчеплення. Всі фізико-механічні властивості компонентів кормів обрані відповідно до розділу 2.2.

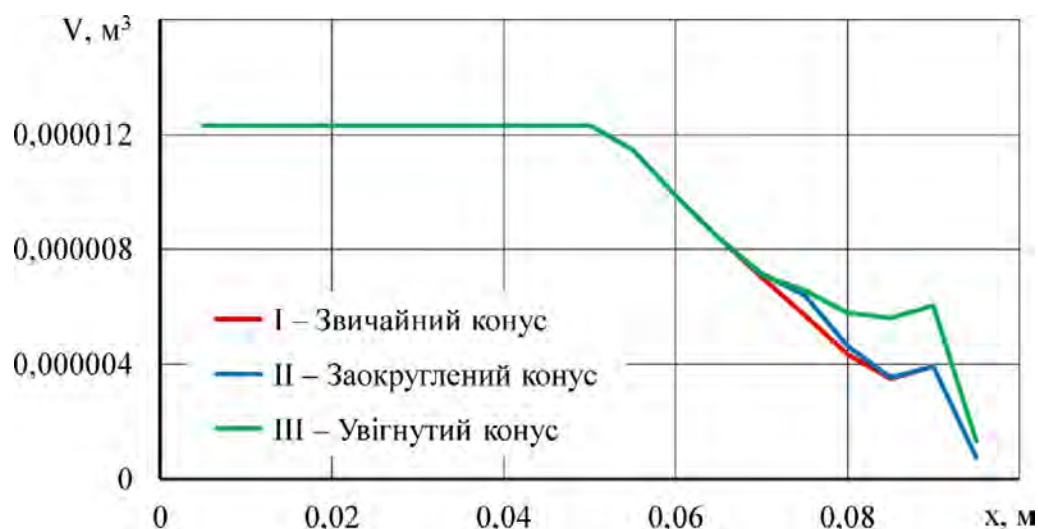


Рисунок 2.14 – Зміна об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом вздовж руху компонентів кормової суміші (вісь Oх)

На рис. 2.16 представлено розподіл компонентів кормової суміші в області формуючої насадки для 3 варіантів конусу за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$.

З рис. 2.16 видно, що при вершині заокругленого конусу скупчуються частинки компонентів, що діють одна на одну і на конус з найбільшою силою тиску – $5,2 \pm 0,1$ Н (сила контактної взаємодії при цьому – $0,65 \pm 0,02$ Н). Для увігнутого конуса спостерігається значне зменшення сили тиску і сили контактної взаємодії вздовж руху компонентів корму. В свою чергу при русі компонентів корму на звичайний конус присутнє поступове зменшення сили тиску і сили контактної взаємодії.

Для кожного із варіантів конусу визначено загальну силу стиску F_Σ (рис. 2.17),

що діє на поршень і на конус в залежності від абсолютної деформації компонентів корму Δx згідно формули (2.21).

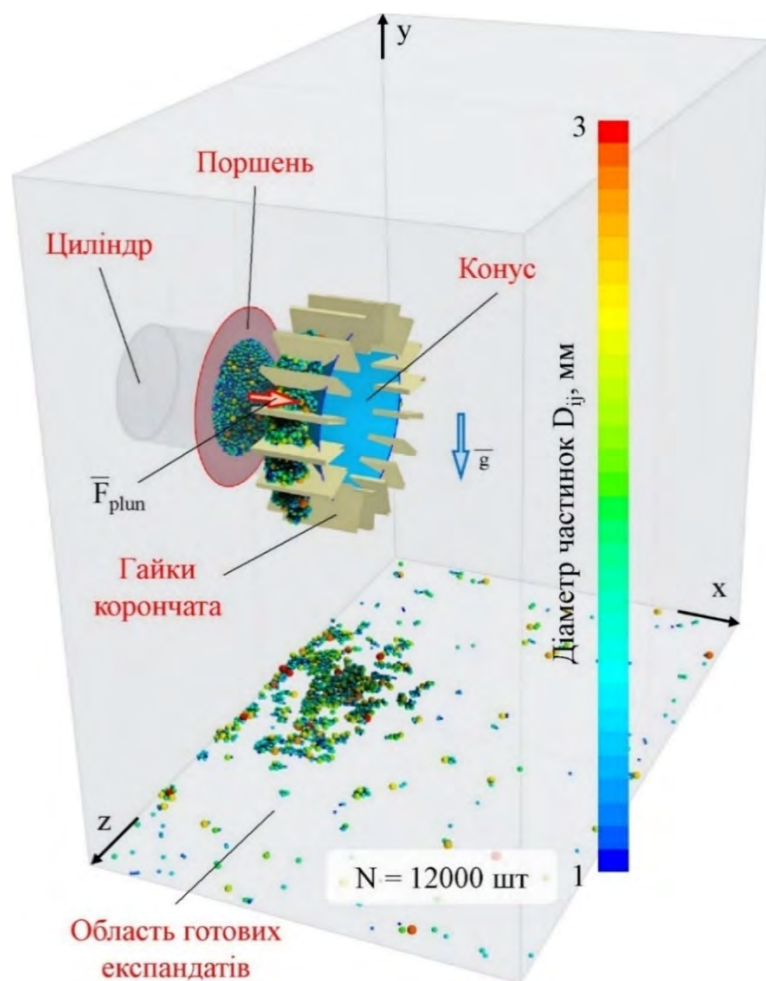


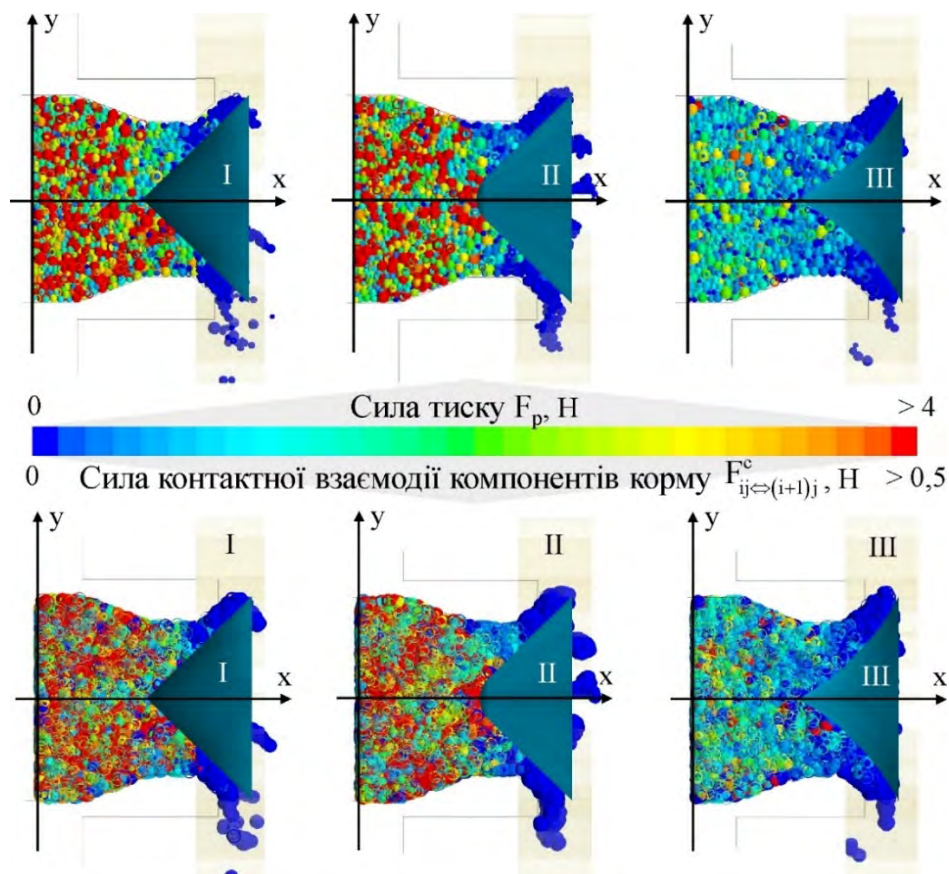
Рисунок 2.15 – Схема чисельного моделювання формуючої насадки експандера

Аналіз рис. 2.17 дає змогу стверджувати, що формуюча насадка із звичайним конусом забезпечує найбільші сили стиску поршня і конуса – 1415 ± 41 Н і 231 ± 35 Н відповідно. Для заокругленого конуса сили стиску поршня і конуса складають 1162 ± 63 Н і 177 ± 20 Н відповідно. Для увігнутого конуса сили стиску поршня і конуса складають 740 ± 109 Н і 84 ± 21 Н відповідно.

Для кожного із варіантів конусу визначено зміну об'ємної маси, загальну силу стиску від абсолютної деформації компонентів корму Δx (рис. 2.18).

З рис. 2.18 видно, що всі три варіанти забезпечують практично однакову щільність суміші на виході $223\text{--}251$ кг/м³. Однак враховуючи рис. 2.15 вона

досягається при різній силі стиску поршня. Так як найменша сила стиску спостерігається для увігнутого конуса, то приймаємо його за основний конструктивний елемент, параметри якого обґрунтуємо далі.



I – звичайний конус, II – заокруглений конус, III – увігнутий конус

Рисунок 2.16 – Розподіл компонентів кормової суміші в області формуючої насадки для 3 варіантів конусу за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$

В якості факторів досліджень приймаємо наступні конструктивні параметри формуючої насадки з увігнутим конусом (рис. 2.19): радіус звуження циліндра формуючої насадки R_r , радіус увігнутого конуса R_c , відстань між конусом і циліндром δ_c . Рівні і межі варіювання приведені в табл. 2.5. Для моделювання використано повнофакторний дослід із загальною кількістю моделювань – $3^3 = 27$ (додаток Б).

Геометрично розраховані залежності зміни об'єму порожнини між циліндром

формуючої насадки і конусом вздовж руху компонентів кормової суміші (вісь Ox) для деяких варіантів чисельного дослідження (відповідно до додатку Б) наведені на рис. 2.20.

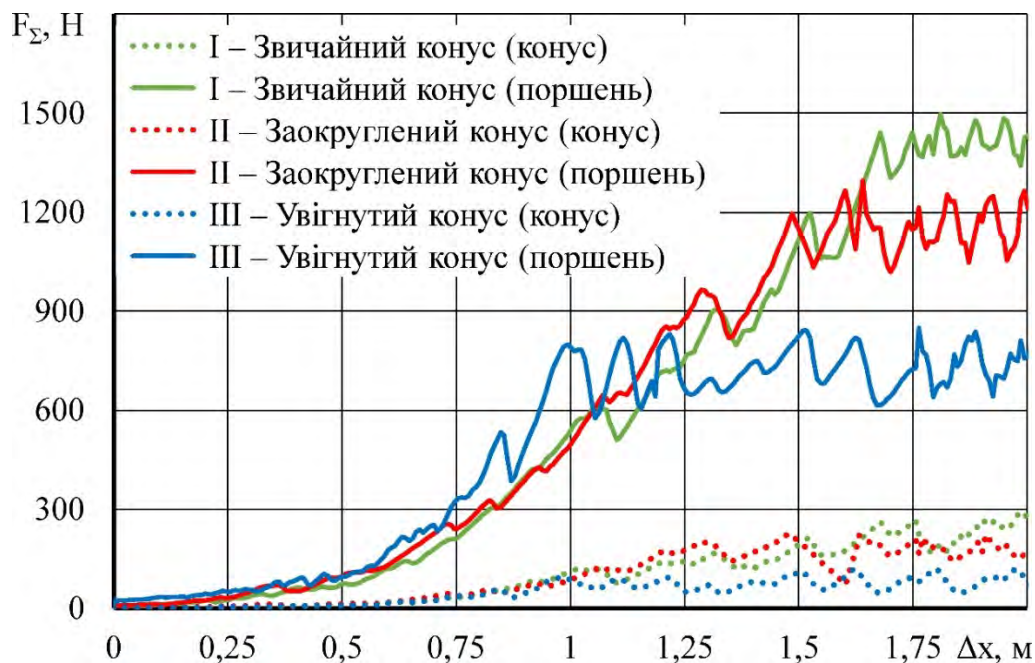


Рисунок 2.17 – Залежність загальної сили стиску поршня і конуса F_{Σ} від абсолютної деформації компонентів корму Δx для 3 варіантів виконання конусу

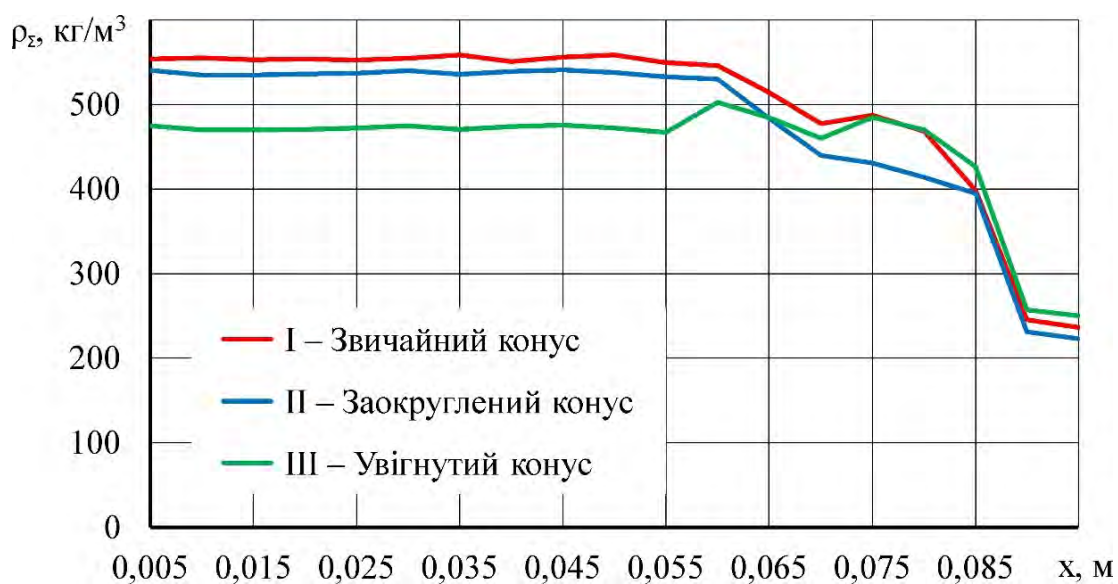


Рисунок 2.18 – Залежність об'ємної маси загальної сили стиску ρ_{Σ} від абсолютної деформації компонентів корму Δx для 3 варіантів виконання конусу

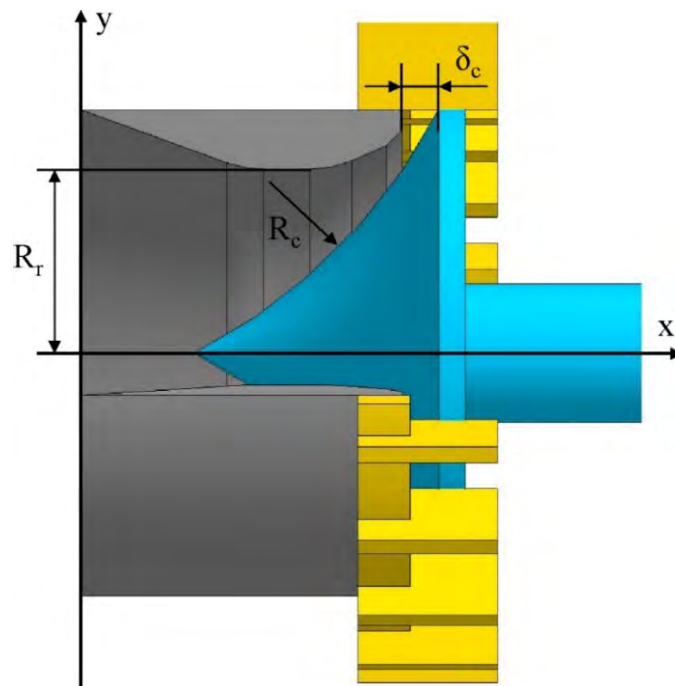


Рисунок 2.19 – Схема факторів чисельного моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в формуючій насадці з увігнутим конусом

Таблиця 2.5 – Рівні і межі варіювання факторами чисельного моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в формуючій насадці з увігнутим конусом

Фактор	Радіус звуження циліндра формуючої насадки		Радіус увігнутого конуса		Відстань між конусом і циліндром	
	x5	R _r , мм	x6	R _c , мм	x7	δ _c , мм
Низький	-1	10	-1	40	-1	3
Середній	0	15	0	70	0	6
Високий	+1	20	+1	100	+1	9
Інтервал	1	5	1	30	1	3

В якості енергетичного критерію досліджень обрано загальний тиск поршня P_{Σ} , який необхідно прикласти для продавлювання компонентів корму через формуючу насадку.

За якісний критерій обрано щільність ρ_{Σ} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки.

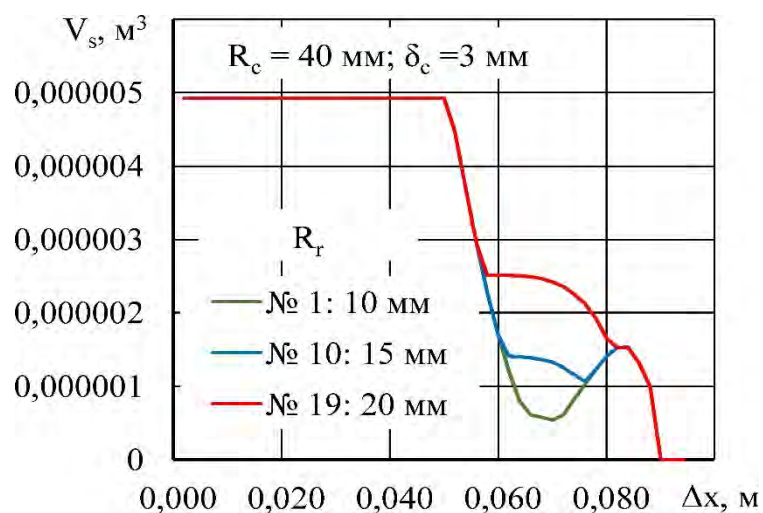
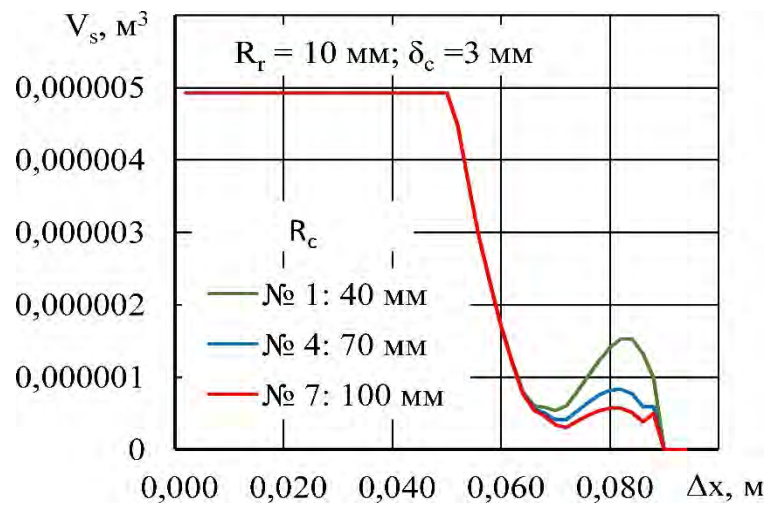
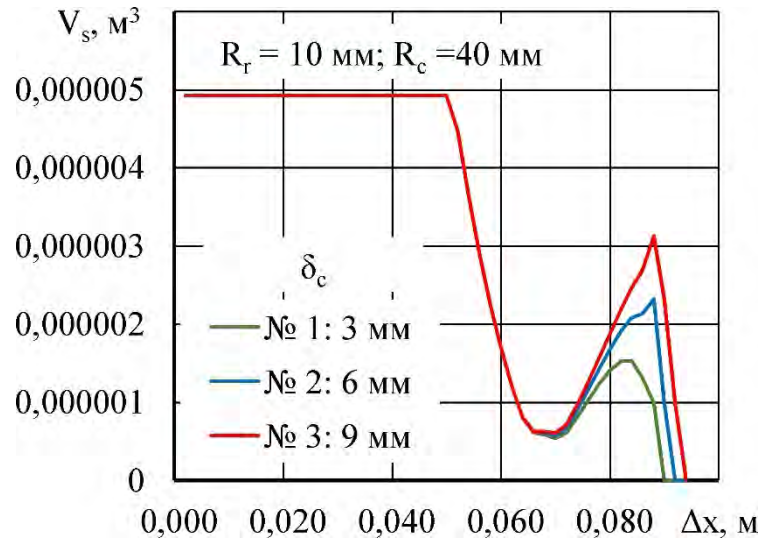


Рисунок 2.20 – Зміна об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом вздовж руху компонентів кормової суміші (вісь Ox)

На рис. 2.21 представлено розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формуючої насадки і конусом (при № 14 – $R_r = 15$ мм, $R_c = 70$ мм, $\delta_c = 6$ мм) за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^c$. При цьому динаміка зміни значень загального тиску поршня P_Σ , об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом V_s , об'єму V_p і щільності ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму вздовж їх руху (вісь Ox) приведені на рис. 2.22–2.23. Залежності інших чисельних дослідів приведені в табл. Б.1.

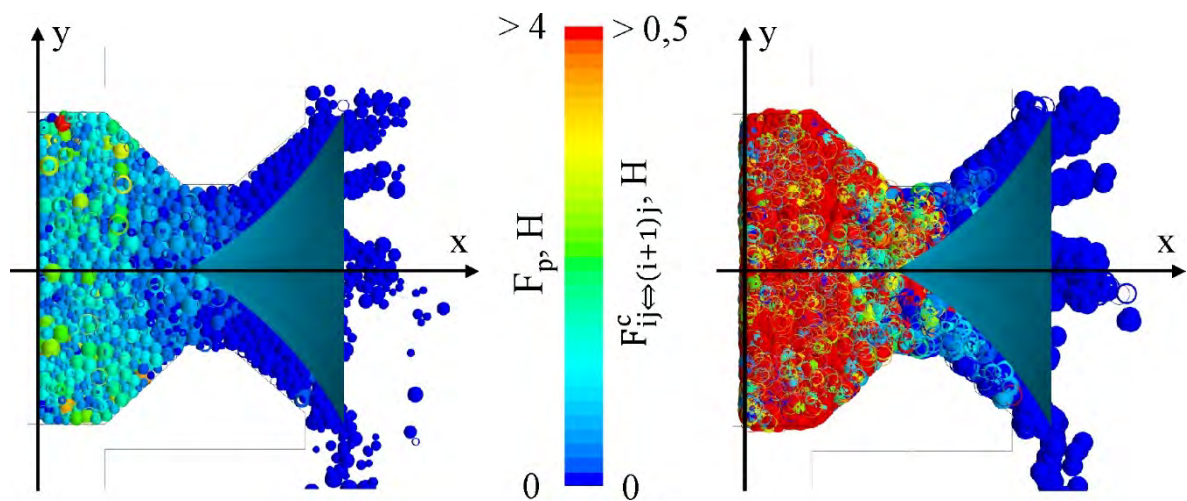


Рисунок 2.21 – Розподіл компонентів кормової суміші в області формуючої насадки за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^c$ (№ 14 – $R_r = 15$ мм, $R_c = 70$ мм, $\delta_c = 6$ мм)

З рис. 2.22 видно, що вздовж руху пластифікованої маси компонентів корму збільшується загальний тиск P_Σ до граничного значення. Далі тиск стабілізується, що свідчить про рівновагу процесу. Тобто даного максимального тиску достатньо для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму. В свою чергу щільність ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму вздовж її руху змінюється нерівномірно (рис. 2.23). Це пов'язано із нерівномірністю об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом V_s . Однак для процесу є важливою саме та щільність пластифікованої маси компонентів корму, яка сформувалася на виході із формуючої насадки.

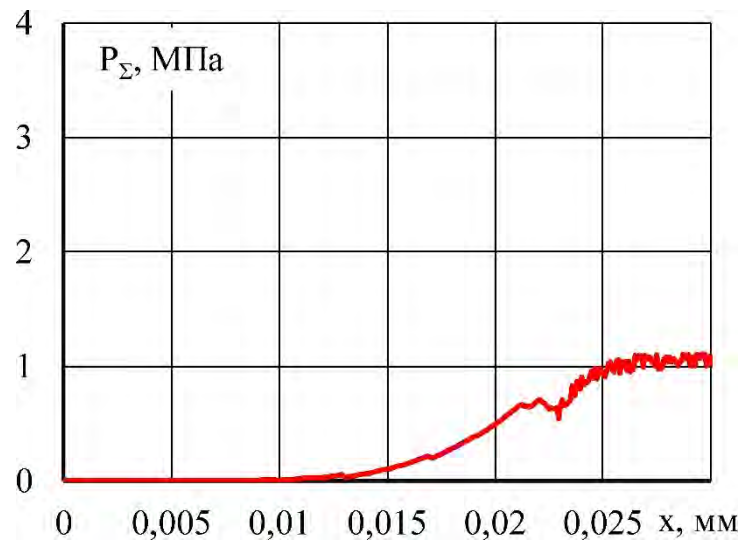


Рисунок 2.22 – Залежність загального тиску поршня P_{Σ} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку вздовж її руху (№ 14 – $R_r = 15$ мм, $R_c = 70$ мм, $\delta_c = 6$ мм)

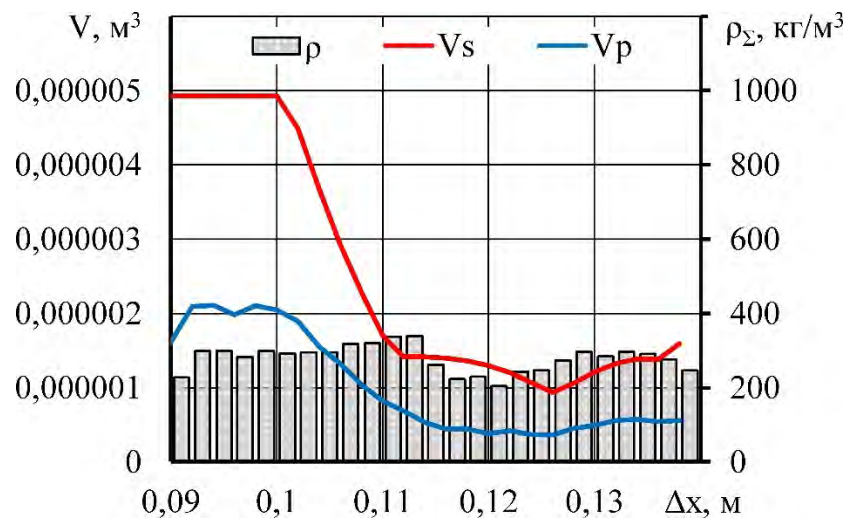


Рисунок 2.23 – Залежність об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом V_s , об'єму V_p і щільності ρ_{Σ} пластифікованої маси компонентів корму вздовж її руху (№ 14 – $R_r = 15$ мм, $R_c = 70$ мм, $\delta_c = 6$ мм)

Провівши обробку даних табл. Б.2 в Wolfram Cloud отримано рівняння регресії максимального загального тиску поршня P_{max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу

насадку від факторів у загальному закодованому вигляді:

$$P_{\max} = 0,867356 - 0,500908 x_5 + 0,0268903 x_5^2 + 0,228626 x_6 - \\ - 0,120244 x_5 x_6 + 0,0580897 x_6^2 - 0,574449 x_7 + 0,211631 x_5 x_7 + \\ + 0,022444 x_6 x_7 + 0,341937 x_7^2. \quad (2.30)$$

В результаті статистичної обробки в Wolfram Cloud, використовуючи параметр «ParameterTable» для функції «NonlinearModelFit» (табл. 2.6, табл. Б.3), були відхилені незначущі коефіцієнти за критерієм Стьюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$) і проведено розкодування рівняння регресії (2.30):

$$P_{\max} = 5,62305 - 0,859031 \delta_c + 0,037993 \delta_c^2 + 0,00762086 R_c - \\ - 0,184834 R_r + 0,0141087 R_c R_r. \quad (2.31)$$

Графічна інтерпретація рівняння (2.31) приведена на рис. 2.24.

Таблиця 2.6 – Статистична обробка рівняння (2.30)

Коефіцієнт	Значення	Помилка стандартна	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
b ₀₀	0,867356	0,183289	4,73218	0,000192603
b ₁₀	-0,500908	0,0848461	-5,90372	0,0000173458
b ₂₀	0,228626	0,0848461	2,69459	0,0153473
b ₃₀	-0,574449	0,0848461	-6,77048	3,26991 · 10 ⁻⁶
b ₁₂	-0,120244	0,103915	-1,15714	0,263218
b ₁₃	0,211631	0,103915	2,03658	0,0575768
b ₂₃	0,022444	0,103915	0,215985	0,83157
b ₁₁	0,0268903	0,146958	0,18298	0,856978
b ₂₂	0,0580897	0,146958	0,395281	0,697551
b ₃₃	0,341937	0,146958	2,32677	0,0325943

Виходячи з умови мінімізації енерговитрат загальний тиск поршня P_{\max} повинен бути мінімальним. З використанням в Wolfram Cloud функції «FindMinimum» (табл. Б.3) отримані відповідні раціональні значення факторів: $R_r = 20$ мм, $R_c = 40$ мм, $\delta_c = 7,59$ мм. При цьому $P_{\max} = 0,041$ МПа.

Провівши обробку даних табл. Б.2 в Wolfram Cloud отримано рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки:

$$\rho_{out} = 283,914 - 21,3359 x_5 - 9,10465 x_5^2 + 18,47 x_6 - 8,52073 x_5 x_6 - \quad (2.32)$$

$$-3,08663 x_6^2 - 38,5849 x_7 + 9,92186 x_5 x_7 + 1,30702 x_6 x_7 + \\ + 7,70336 x_7^2.$$

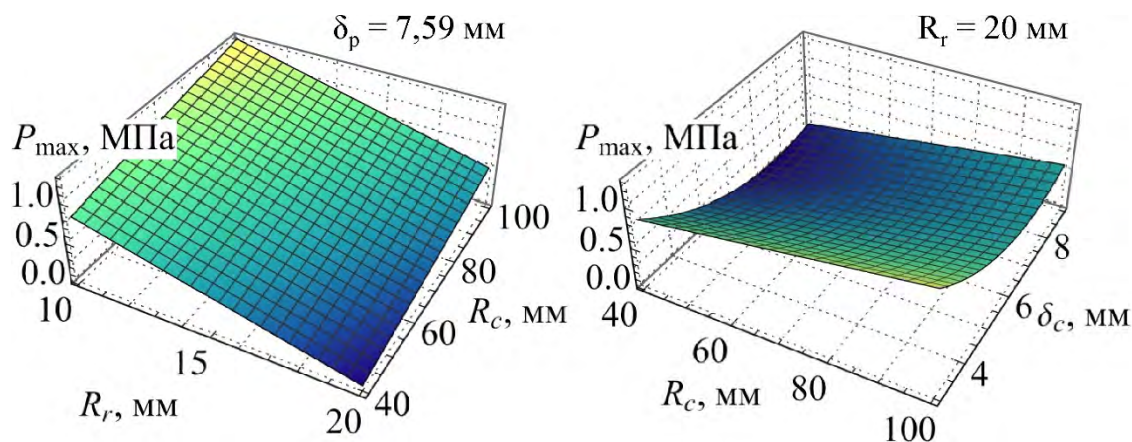


Рисунок 2.24 – Залежність максимального загального тиску поршня P_{\max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку від радіуса звуження циліндра формуючої насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c і відстані між конусом і циліндром δ_c

В результаті статистичної обробки в Wolfram Cloud, використовуючи параметр «ParameterTable» для функції «NonlinearModelFit» (табл. 2.7, табл. Б.4), були відхилені незначущі коефіцієнти за критерієм Стьюдента ($t_{0,05}(27) = 2,05$) і проведено розкодування рівняння регресії (2.32):

$$\rho_{\text{out}} = 381,881 - 22,7835 \delta_c + 1,46774 R_c - 4,25958 R_r + \\ + 0,661457 \delta_c R_r - 0,0568048 R_c R_r. \quad (2.33)$$

Графічна інтерпретація рівняння (2.33) приведена на рис. 2.25.

Виходячи з умови покращення якості отриманих експандатів щільність ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки повинна бути максимальною. З використанням в Wolfram Cloud функції «FindMaximum» (табл. Б.4) отримані відповідні раціональні значення факторів: $R_r = 10$ мм, $R_c = 100$ мм, $\delta_c = 3$ мм. При цьому $\rho_{\text{out}} = 380,7$ кг/м³.

Як видно з рис. 2.24–2.25 оптимальні значення критеріїв відрізняються, тоді потрібно вирішити задачу оптимізації, яка є багатокритеріальною. Під зазначеною

оптимізацією розуміється процес одночасного пошуку оптимальних значень двох або більше конфлікуючих цільових критеріїв у визначеній області:

$$\begin{cases} P_{\max}(R_r, R_c, \delta_c) \rightarrow \min; \\ \rho_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.34)$$

Таблиця 2.7 – Статистична обробка рівняння (2.32)

Коефіцієнт	Значення	Помилка стандартна	t-критерій Стьюдента	P-рівень значущості
b ₀₀	283,914	6,74053	42,1205	1,22861 · 10 ⁻¹⁸
b ₁₀	-21,3359	3,12026	-6,83786	2,88442 · 10 ⁻⁶
b ₂₀	18,47	3,12026	5,91938	0,0000168158
b ₃₀	-38,5849	3,12026	-12,3659	6,34655 · 10 ⁻¹⁰
b ₁₂	-8,52073	3,82152	-2,22967	0,0395426
b ₁₃	9,92186	3,82152	2,59631	0,0188231
b ₂₃	1,30702	3,82152	0,342016	0,73653
b ₁₁	-9,10465	5,40445	-1,68466	0,110323
b ₂₂	-3,08663	5,40445	-0,571128	0,575386
b ₃₃	7,70336	5,40445	1,42537	0,172152

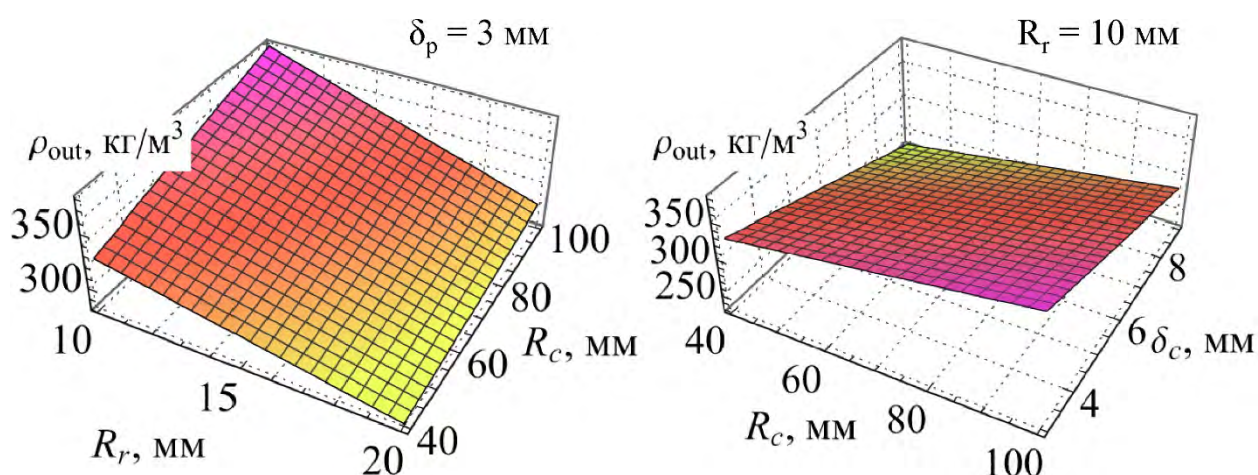


Рисунок 2.25 – Залежність щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки від радіуса звуження циліндра формуючої насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c і відстані між конусом і циліндром δ_c

Тому завдання багатокритеріальної оптимізації полягає у знаходженні такого

вектора факторів, який мінімізував би векторну цільову функцію. Використаємо такий методичний підхід до вирішення задач багатокритеріальної оптимізації [141]:

– згортання вихідної векторної цільової функції критерію оптимізації до скалярного вигляду з попереднім її перетворенням шляхом нормалізації вхідних приватних цільових функцій;

– знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції.

Провівши приведення критерію до єдиного безрозмірного виду та змінюючи їх величини у межах одиничного інтервалу отримуємо:

$$P'_{\max}(R_r, R_c, \delta_c) = \frac{\max[P_{\max}(R_r, R_c, \delta_c)] - P_{\max}(R_r, R_c, \delta_c)}{\max[P_{\max}(R_r, R_c, \delta_c)] - \min[P_{\max}(R_r, R_c, \delta_c)]};$$

$$\rho'_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c) = \frac{\rho_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c) - \min[\rho_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c)]}{\max[\rho_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c)] - \min[\rho_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c)]}.$$
(2.35)

Як нову цільову мультиплікативну функцію W' приймемо:

$$W'(R_r, R_c, \delta_c) = P'_{\max}(R_r, R_c, \delta_c) \cdot \rho'_{\text{out}}(R_r, R_c, \delta_c).$$
(2.36)

Тоді (2.32) зведемо до більш простої задачі:

$$W'(R_r, R_c, \delta_c) \rightarrow \max.$$
(2.37)

Вирішуючи задачу (2.37) в Wolfram Cloud разом з (2.35), (2.36) і (2.31), (2.33), використовуючи «FindMinimum», (табл. Б.5) отримані відповідні раціональні значення факторів: $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 3,7$ мм. При цьому $\rho_{\text{out}} = 331,2$ кг/м³ і $P_{\max} = 1,84$ МПа.

2.5 Чисельне моделювання гвинта малогабаритного експандера кормів

Для подальших досліджень приймаємо визначені геометричні розміри формуючої насадки ($R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 3,7$ мм) і встановлений загальний тиск P_{\max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку. Далі використовуючи фізико-математичну модель визначення тиску у каналі гвинта гранулятора, яка була розроблена В. В. Братішком [121, 122, 123, 142, 143] розраховані відповідні

геометричні розміри гвинта малогабаритного експандера, які наведені на рис. 2.26.

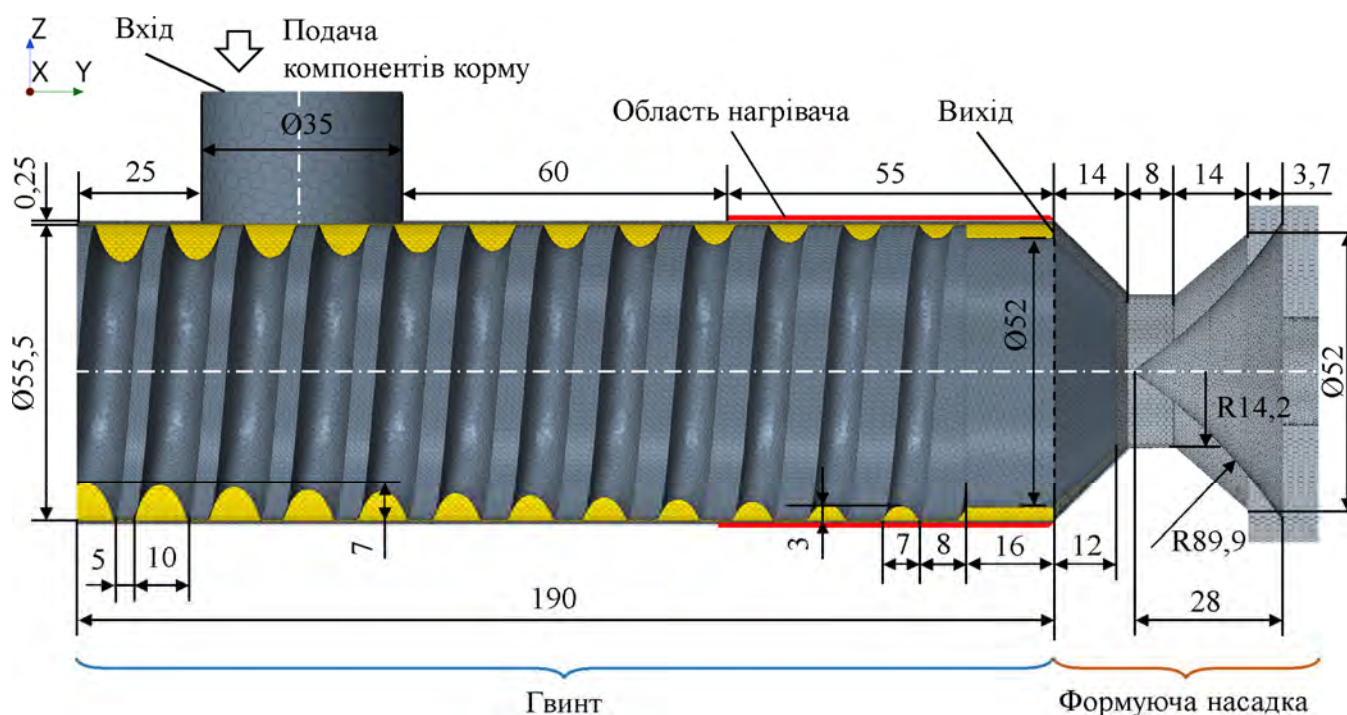


Рисунок 2.26 – Геометричні розміри 3D-моделі малогабаритного експандера в STAR-CCM+

Другим етапом теоретичних досліджень передбачено чисельне моделювання гвинта експандера кормів з метою перевірки розрахованих геометричних параметрів, які наведені на рис. 2.26.

Для проведення моделювання була побудована сітка 3D моделі експандера з використанням генератора поверхневої сітки, багатограних комірок і екструдера комірок. Базовий розмір комірки складав 0,005 м.

Моделювання проводилося із застосуванням градієнтів у тривимірному просторі моделі руху розділеної течії багатофазної ейлерової суміші (ММР) з використанням допустимої двошарової k - ϵ -моделі турбулентності і багатофазного рівняння стану. Симуляція є нестационарною неявною. Теплопровідні процеси підпорядковувалися моделі розділеної багатофазної температури. Моделювання проводилося в полі сили тяжіння. Вектор сили тяжіння є таким: $(0; 0; -9,81)$ м/с².

Фізичними моделями для симуляції процесу руху компонентів корму в

експандері у програмному пакеті STAR-CCM+ є: тривимірний модель, нестационарна неявна модель, модель ідеального газу (повітря), математична модель однокомпонентного газу (повітря), k - ϵ модель турбулентності повітря, модель турбулентної течії повітря, роздільна течія, усереднене по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса, Лагранжева модель багатофазного середовища, методи градієнта і границь, модель багатофазної взаємодії, поле сили тяжіння, модель дискретних елементів (DEM). Теплопровідні процеси підпорядковувалися моделі розділеної багатофазної температури.

Компоненти корму представлено у вигляді Лагранжевої фази відповідно до таких моделей: постійної щільності, сили опору частинок, сили градієнта тиску, феричних частинок, частинок DEM, однокомпонентних твердих частинок. Фізико-механічні властивості корму були прийняті такі самі як в розділі 2.3. Додатково для компонентів корму прийнято: коефіцієнт теплопровідності – 0,285 Вт/(м·К); коефіцієнт питомої теплоємності – 2404,6 Дж/(кг·К).

Взаємодія між насінинами базується на основі моделі Герца-Міндліна. Параметри середовища наступні: середовище – повітря; динамічне турбулентне число Прандтля – 0,9; в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; прискорення вільного падіння – $9,8 \text{ м/с}^2$; опорний тиск – 101 325 Па; початкова температура – 293 К; коефіцієнт питомої теплоємності – 1938,2 Дж/(кг·К); коефіцієнт теплопровідності – 0,025 Вт/(м·К).

Граничні параметри обрані такі (рис. 2.18). Верхня площина горловини (вхід) для подачі представлена моделлю масового потоку кормових компонентів, яка поступає до гвинта самопливом під дією сили тяжіння. Правий кінець гвинта (вихід) представлено вільним потоком суміші, фізичні параметри якого формуються як результат моделювання. Зона нагрівача має постійну температуру 200 °С.

Гвинт обертається навколо власної осі з постійною частотою – 60 об/хв.

Вирішувач у STAR-CCM+ обрано нестационарний неявний із кроком за часом – 0,01 с. Дискретизація за часом першого порядку. Максимальне число ітерацій за одиницю часу – 10, що забезпечує необхідну збіжність результату. Час симуляції – 60 с.

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл тиску (відносно атмосферного) в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 2.27).

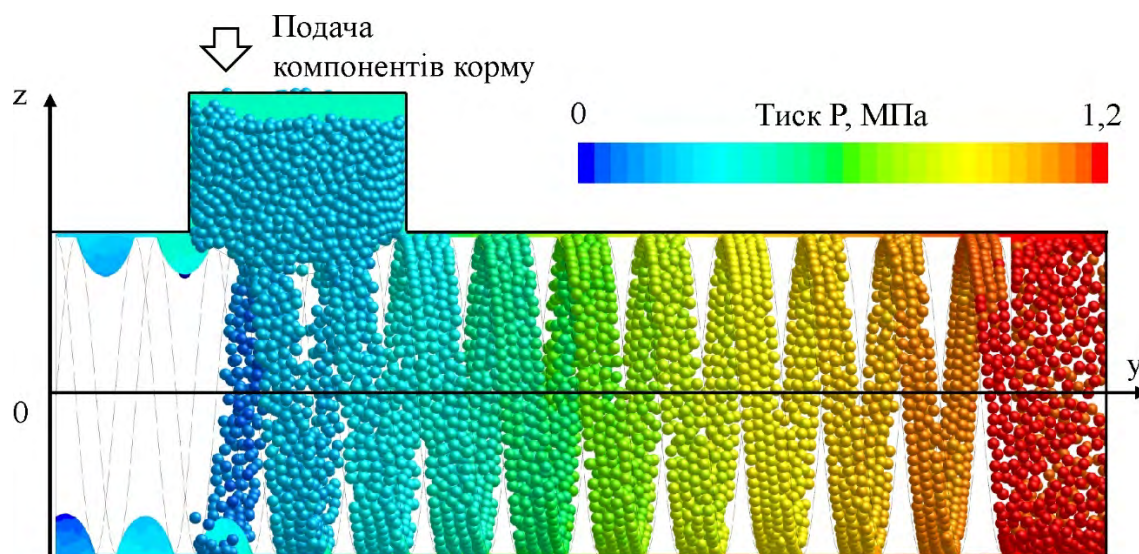


Рисунок 2.27 – Розподіл тиску (відносно атмосферного) у гвинтовому каналі малогабаритного експандера

З рис. 2.27 наочно видно, що тиск збільшується по осі гвинта в напрямку переміщення багатофазної суміші. Збільшення тиску пояснюється зменшенням об'єму порожнини вздовж осі гвинта. На правому кінці гвинта (виході) значення тиску становить $1,14 \pm 0,02$ МПа.

Моделювання проводилося із застосуванням градієнтів у тривимірному просторі моделі руху розділеної течії багатофазної ейлерової суміші (ММР) з використанням допустимої двошарової k-ε-моделі турбулентності й багатофазного рівняння стану. Симуляція є нестационарною неявною. Моделювання проводилося в полі сили тяжіння. Вектор сили тяжіння є таким – $(0; 0; -9,81)$ м/с².

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано векторне поле (рис. 2.28) і лінії потоку багатофазної суміші в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 2.29).

Дані візуалізації наочно показують рух суміші під дією обертання гвинта. Найбільша швидкість становить $0,157 \pm 0,005$ м/с, середня швидкість – $0,083 \pm 0,005$ м/с.

Враховуючи загальну площу виходу ($3,39 \cdot 10^{-4}$ м²), отримуємо теоретичну об'ємну продуктивність $0,083$ м/с $\cdot 3,39 \cdot 10^{-4}$ м² = $28,137 \cdot 10^{-6}$ м³/с = $0,101$ м³/год, або в

перерахунку на теоретичну масову продуктивність (враховуючи щільність згідно з розділу 2.3) $331,2 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,101 \text{ м}^3/\text{год} = 33,5 \text{ кг/год}$. Що для малогабаритного експандера зазначених розмірів є достатнім результатом, враховуючи зроблений аналіз конструкцій в розділі 1 за критеріями ефективності.

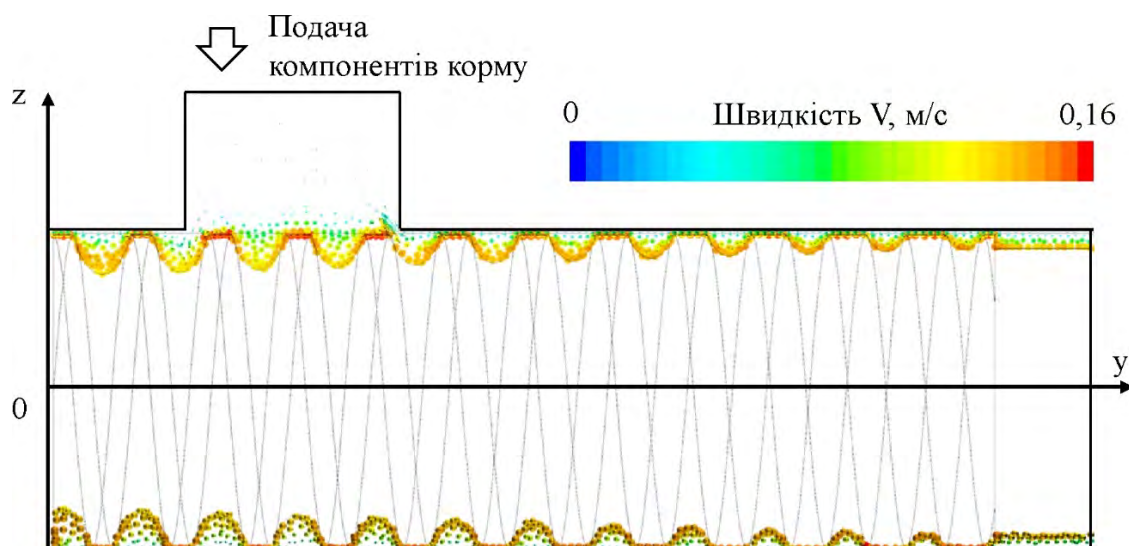


Рисунок 2.28 – Векторне поле суміші у порожнині між гвинтом і циліндром малогабаритного експандера

Рис. 2.29 демонструє лінії потоку багатофазної суміші. Турбулентний потік створюється внаслідок обертання гвинта навколо власної осі. Поступове ущільнення багатофазної суміші спричиняє зменшення швидкості переміщення через збільшення сил опору і в'язкого тертя.

У результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл температури суміші фаз у порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 2.30).

Температурне поле багатофазної суміші виникає внаслідок тертя суміші об стінки циліндра і його стискання. Окрім того, в зоні нагрівача спостерігається значне підвищення температури внаслідок явища теплопровідності. Середня температура багатофазної суміші становить $154 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура в кінці гвинта (на виході) становить $146 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$.

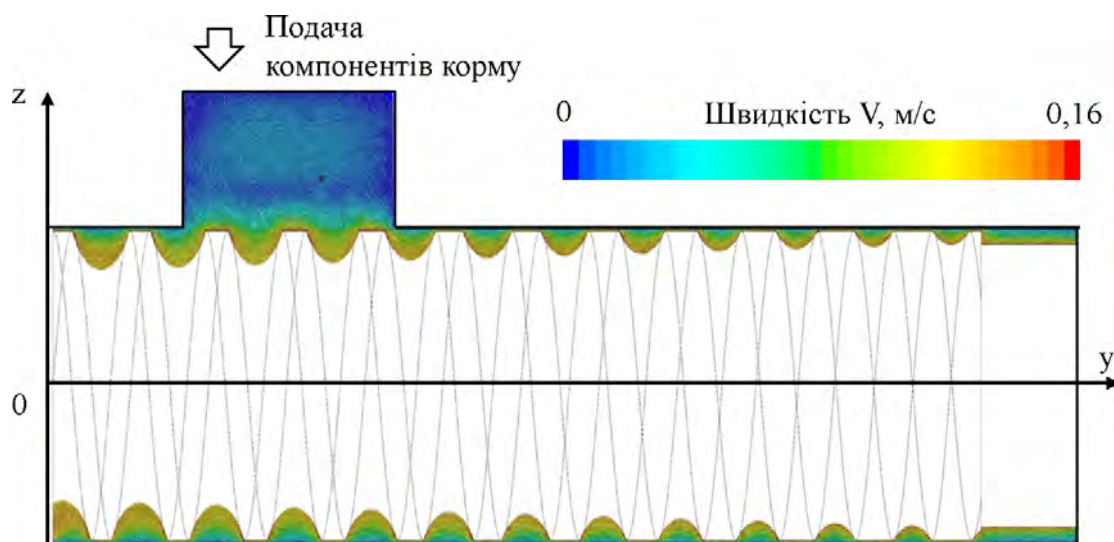


Рисунок 2.29 – Лінії потоку суміші у порожнині між гвинтом і циліндром малогабаритного експандера

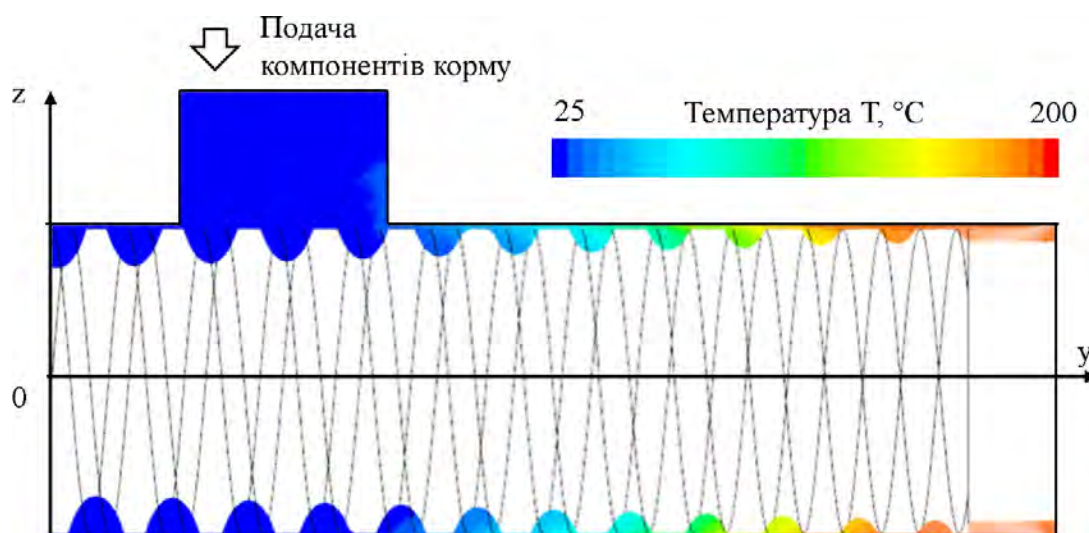


Рисунок 2.30 – Розподіл температури суміші у порожнині між гвинтом і циліндром малогабаритного експандера

Проведена симуляція процесу експандованого приготування кормів у програмному пакеті STAR-CCM+ підтверджує проведені розрахунки і дає передумови для обґрунтування діапазону раціональних параметрів експандера в подальших експериментальних дослідженнях.

2.6 Висновки з розділу

1. Обґрунтована конструктивно-технологічна схема експандера комбікормів із удосконаленою формуючою насадкою, яка відрізняється тим що складається з звуженої області циліндра, увігнутого конуса і корончатої гайки. При переміщенні нагрітої пластифікованої маси до звуженої області формуючої насадки відбувається підвищення тиску, а після її проходження різке його зменшення. Це досягається через збільшення об'єму робочої області за рахунок форми увігнутого конуса. В результаті чого пластифікована маса розширяється і виходить через корончату гайку з формуючої насадки утворюючи при цьому експандати.

2. Набуло подальшого розвитку фізико-математичний апарат руху твердих компонентів корму, як дискретних елементів, у гвинтовому каналі експандера, який покладено в основу методики чисельного моделювання процесу експандування кормів в програмному пакеті STAR-CCM+. В основу апарата увійшли основні положення методу дискретних елементів (DEM), які базувалися на пружно-демпферній контактній моделі Герца-Міндліна взаємодії компонентів корму між собою і границями гвинтового робочого органу.

3. Для оцінки правильності обраних моделей і фізико-математичного апарата, проведено чисельне моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в циліндричній ємності під дією поршня в STAR-CCM+. Дослідження процесу стискання компонентів кормової суміші були проведені для різних їх фізико-механічних властивостей, а саме середній діаметр частинок суміші D_{μ} , модуль пружності Юнга E_p , коефіцієнт Пуассона μ_p , робота когезії на одиницю площі W_p на трьох рівнях їх фіксації.

4. В результаті чисельного моделювання для кожної комбінації фізико-механічних властивостей отримано закономірності пружного гістерезису компонентів корму. В результаті обробки даних моделювання отримані рівняння регресії зміни площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta p}$ і коефіцієнта механічних втрат Ψ , висоти отриманого експандату h_a від середнього діаметра частинок суміші D_{μ} , модуля пружності Юнга E_p , коефіцієнта Пуассона μ_p і роботи когезії на одиницю

площі W_p . Порівнюючи отримані теоретичні залежності із результатами лабораторних досліджень (див. розділ 4.1) встановлено, що при наступних фізико-механічних властивостях компонентів корму $D_\mu = 0,5$ мм, $E_p = 22,3$ МПа, $\mu_p = 0,31$, $W_p = 0,49$ Н/м технологічні параметри експандування є найбільш оптимальними (див. розділ 4.2), чисельне моделювання процесу його стискання є найбільш адекватним.

5. В результаті чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів для трьох варіантів форми конуса (I – звичайний, II – заокруглений, III – увігнутий) встановлено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в області формуючої насадки за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$. Аналіз отриманих даних дає змогу стверджувати, що формуюча насадка із звичайним конусом забезпечує найбільші сили стиску поршня і конуса – 1415 ± 41 Н і 231 ± 35 Н відповідно. Для заокругленого конуса сили стиску поршня і конуса складають 1162 ± 63 Н і 177 ± 20 Н відповідно. Для увігнутого конуса сили стиску поршня і конуса складають 740 ± 109 Н і 84 ± 21 Н відповідно. Для кожного із варіантів конусу визначено зміну об'ємної маси, загальну силу стиску від абсолютної деформації компонентів корму Δx . Встановлено, що всі три варіанти забезпечують практично однакову щільність суміші на виході $223\text{--}251$ кг/м³. Так як найменша сила стиску спостерігається для увігнутого конуса, то приймаємо його за основний конструктивний елемент, параметри якого обґрунтуємо далі.

6. В результаті чисельного моделювання визначено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в порожнину між циліндром формуючої насадки і конусом за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$ в залежності від радіуса звуження циліндра формуючої насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c і відстані між конусом і циліндром δ_c . Встановлені рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки і максимального тиску P_{max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку вздовж її руху від зазначених факторів досліджень. В результаті вирішення завдання

багатокритеріальної оптимізації критеріїв досліджень, а саме зменшення тиску P_{\max} і підвищення щільності ρ_{out} , на основі знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції встановлені раціональні конструктивні параметри формуючої насадки: $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 3,7$ мм. При цьому $\rho_{\text{out}} = 331,2$ кг/м³ і $P_{\max} = 1,84$ МПа.

7. В результаті чисельного моделювання гвинта малогабаритного експандера кормів, параметри якого були розраховані за методикою запропонованою В. В. Братішком, встановлено розподіл тиску, векторне поле і лінії потоку, температури суміші у порожнині між гвинтом і циліндром експандера. Проведена симуляція процесу експандованого приготування кормів у програмному пакеті STAR-CCM+ підтверджує проведені розрахунки і дає передумови для обґрунтування діапазону раціональних параметрів малогабаритного експандера в подальших експериментальних дослідженнях.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [1, 108, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151].

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Мета і програма експериментальних досліджень

Метою експериментального дослідження є перевірка правильності висновків, отриманих з теоретичних досліджень, шляхом обґрунтування експериментально основних параметрів та режимів роботи малогабаритного експандера кормів. З метою досягнення цієї мети були визначені наступні завдання:

- провести лабораторні дослідження процесу формування експандатів і обґрунтувати його раціональні технологічні параметри;
- створити експериментальний зразок малогабаритного експандера кормів;
- дослідити процес експандування комбікормів малогабаритним експандером і обґрунтувати його раціональні конструктивно-режимні параметри.

У відповідності до наведених завдань програмою експериментальних досліджень передбачалося:

1. Пристосування лабораторного обладнання до вимог лабораторних досліджень процесу формування експандатів.
2. Розроблення методики і проведення лабораторних досліджень процесу формування експандатів.
3. Розроблення й створення експериментального обладнання для проведення досліджень малогабаритного експандера кормів.
4. Розроблення методики і проведення експериментальних досліджень процесу експандування комбікормів.
5. Навести методику і провести у відповідності до неї статистичну обробку експериментальних даних.
6. Провести порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень

3.2 Методика лабораторних досліджень пресування комбікорму

Приведені дослідження передбачали пресування компонентів комбікорму з подальшим формуванням з них експандатів в лабораторних умовах при різних технологічних параметрах (розмір частинок компонентів, їх вологість і температура).

На початку досліджень готували зразки комбікорму різного гранулометричного складу. В якості складових комбікорму, у співвідношенні 25 : 25 : 25 %, використовували зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшникову макуху, подрібнені за допомогою молоткового подрібнювача з діаметром отворів решіт 3,5 мм. Далі, за допомогою ситового класифікатора та розсійника лабораторного (рис. 3.1) було проведено розділення отриманих після подрібнення матеріалів на фракції, з діапазоном розміру часток 0–0,99 мм, 1–1,99 мм та 2–2,99 мм.



Рисунок 3.1 – Ситовий класифікатор та розсійник лабораторний

Приготування комбікорму проводили за допомогою лабораторного спірального-гвинтового змішувача сипких матеріалів (рис. 3.2), який дозволяє отримувати суміші однорідністю 94–98 %.

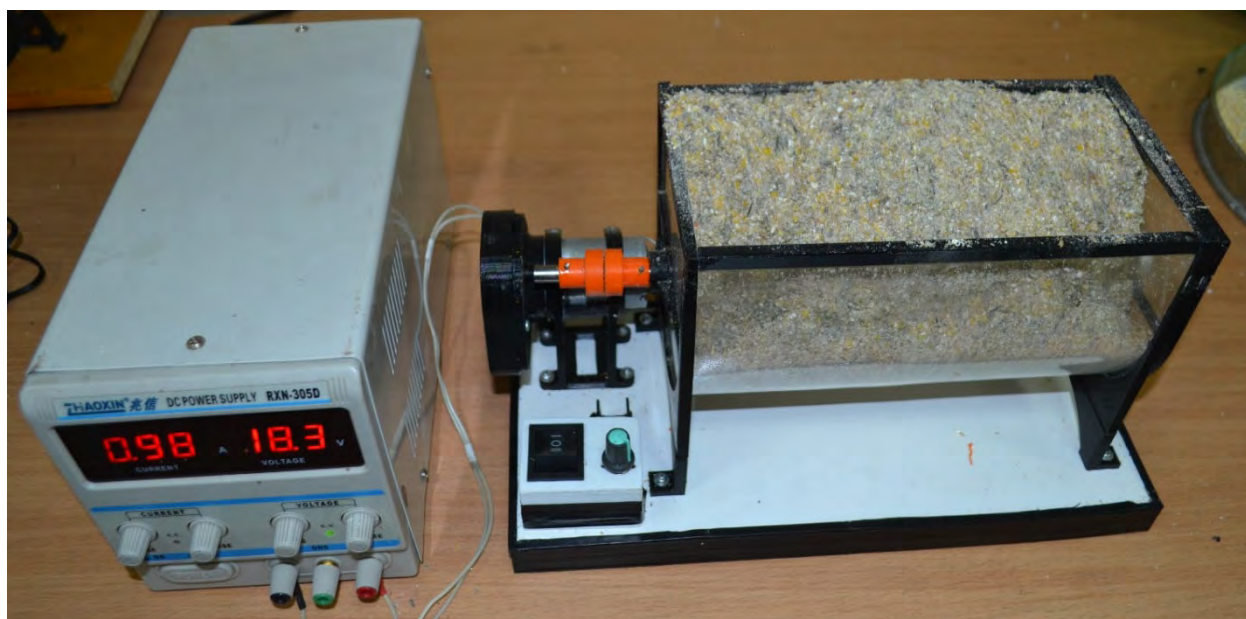


Рисунок 3.2 – Лабораторний спірально-гвинтовий змішувач сипких матеріалів

Отримані зразки вихідної вологості мали наступний вигляд (рис. 3.3).



а

б

в

а – розмір часток 0–0,99 мм; б – 1–1,99 мм; в – 2–2,99 мм.

Рисунок 3.3 – Зразки комбікорму вихідної вологості різного гранулометричного складу

Вихідну вологість отриманих зразків визначали термогравіметричним методом згідно ДСТУ ISO 712:2015 «Зернові та продукти з них. Визначення вмісту

вологи. Контрольний метод (ISO 712:2009, IDT)» [152] з використанням шафи СЕШ-3М (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Сушильна шафа СЕШ-3М

Вихідну вологість ($10 \pm 2 \%$) зразків комбікорму змінювали шляхом додавання відповідної кількості води:

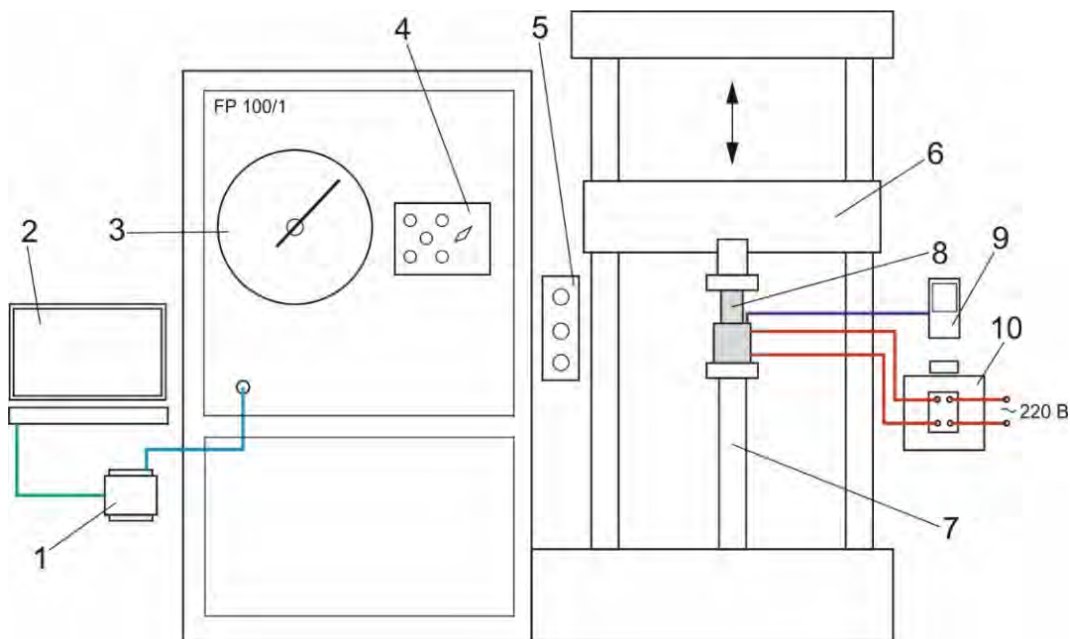
$$m_{\text{в}} = m_{\text{з}} \left(\frac{100 - W_0}{100 - W_{\text{п}}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

де $m_{\text{в}}$, $m_{\text{з}}$ – маса води та зразка комбікорму відповідно, кг;

W_0 , $W_{\text{п}}$ – вихідна вологість та вологість, яку необхідно отримати, %.

Дослідження з визначення впливу гранулометричного складу комбікорму, його вологості та температурного режиму на діаграму деформування – залежність між напруженням і деформацією матеріалу, проводили з використанням випробувальної машини Neckert FP-100/1 та додаткових пристроїв і обладнання (рис. 3.5).

Принцип дії FP-100/1 полягає у вимірі сили при деформації встановленого на нерухомому траверсу зразка, що виникає при переміщенні рухомої траверси із постійною заданою швидкістю.



а



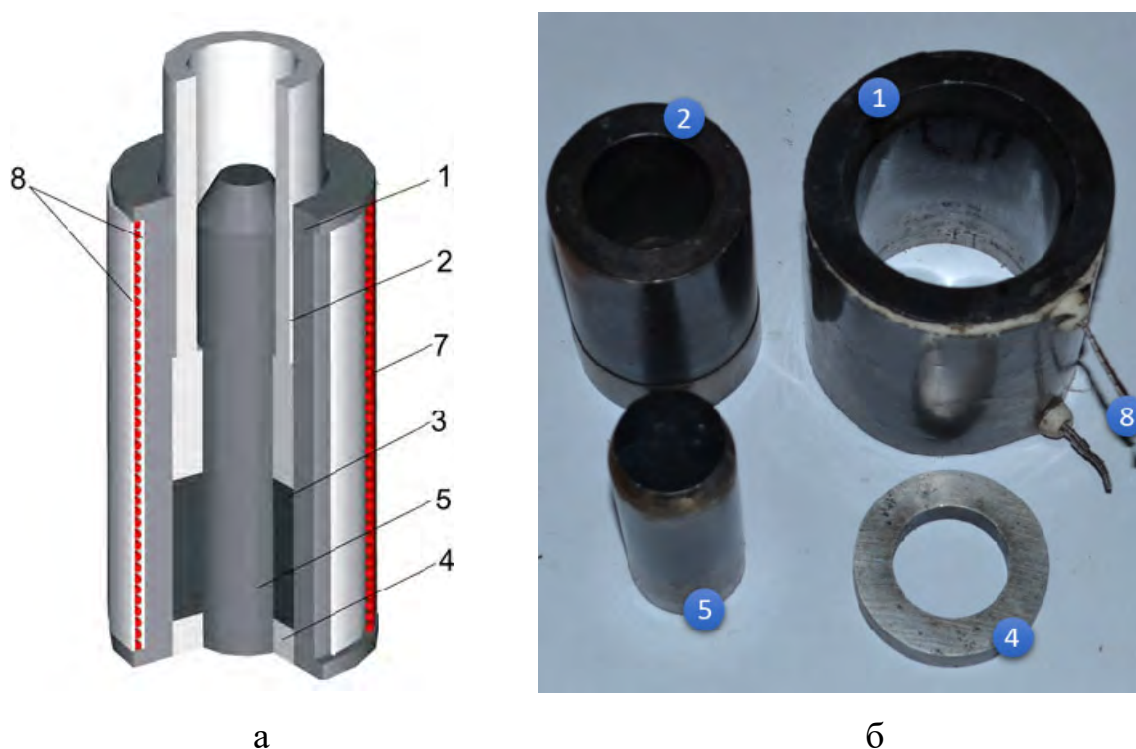
б

1 – аналогово-цифровий перетворювач NI USB-6008; 2 – ПЕОМ;
 3 – силовимірник; 4 – панель налаштувань FP-100/1; 5 – панель керування FP-100/1;
 6 – рухома траверса; 7 – нерухома траверса; 8 – прес-форма з досліджуваним зразком;
 9 – цифровий термометр з термопарою FLUS ET-960; 10 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1М

Рисунок 3.5 – Схема (а) та загальний вигляд (б) випробувальної машини Neckert FP-100/1 з додатковим обладнанням

Залежність деформації від навантаження фіксували за допомогою аналого-цифрового перетворювача NI USB-6008, аналоговий вхід якого було під'єднано до вимірювального блоку FP-100/1. Запис результатів проводили на ПЕОМ з використанням програмного забезпечення NI SignalExpress 2015.

Дослідження проводили з використанням прес-форми, оснащеної обігрівом, який являє собою обмотку з ніхромової проволочки діаметром 1,0 мм по зовнішній поверхні матриці, ізолювану з обох боків шарами азбесту (рис. 3.6). Нагрів прес-форми до потрібної температури та її підтримання здійснювали шляхом подачі на ніхромову обмотку регульованого за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М змінного струму. Розміри формуючих поверхонь прес-форми – внутрішній діаметр матриці 50 мм, діаметр знака – 30 мм.



1 – матриця; 2 – пуансон верхній; 3 – зразок; 4 – пуансон нижній; 5 – знак;
6 – отвір для термопар; 7 – ніхромово обмотка (обігрів); 8 – шари азбесту

Рисунок 3.6 – Прес-форма прямого пресування: схема (а)
та загальний вигляд (б)

Послідовність проведення досліджень наступна.

1. Нагрівання прес-форми до температури у відповідності до номеру досліду, контроль температури за допомогою цифрового термометру з термопарою FLUS ET-960.

2. Підготовка наважки зразка комбікорму у відповідності до номеру досліду. Для цього використовували мірну ємність, об'ємом 50,24 мл, що дозволяло заповнювати робочу камеру прес-форми на висоту 40 мм, зважування зразка проводили за допомогою вагів лабораторних JD-2200-2 (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Підготовка наважки (а), зважування (б) та вимірювання висоти (в) отриманого зразка

3. Завантаження наважки зразка до прес-форми. Для цього з прес-форми видаляли верхній пуансон, засипали зразок до робочої камери, розрівнювали та встановлювали верхній пуансон.

4. Проведення стиску. Для цього встановлювали прес-форму на платформу нижньої траверси, вмикали рух верхньої траверси FP-100/1. По досягненню зусилля 13 кН рух верхньої траверси припиняли та, після витримки 20 с, знімали навантаження та підіймали верхню траверсу. Зазначене зусилля визначено з аналізу літературного огляду відомих екструдерів і експандерів кормів [109].

5. Видалення зразка та фіксування його параметрів. Зразок видаляли з прес-форми, після чого проводили його зважування за допомогою вагів лабораторних JD-

2200-2 та вимірювання висоти, за допомогою штангенциркуля ШЦ-1-150.

В якості факторів досліджень обрано вологість комбікорму W , його температуру T , середній діаметр частинок подрібнених компонентів кормів D_{μ} (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	Нижній рівень (-1)	Нульовий рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Інтервал варіювання, Δ
Вологість комбікорму W , %	10	20	30	10
Температура T , °C	80	110	140	30
Середній діаметр частинок подрібнених компонентів кормів D_{μ} , мм	0,5	1,5	2,5	1,0

Дослідження проводились за повнофакторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $3^3 = 27$. Повторність – триразова.

За кожним дослідом отримана закономірність зміни тиску стискання від деформації (закономірність пружного гістерезису) компонентів комбікорму $\Delta P(\varepsilon_z)$. В якості критеріїв досліджень обрані:

- площа $S_{\Delta P}$, укладена всередині петлі пружного гістерезису $\Delta P(\varepsilon_z)$ [153];
- коефіцієнт механічних втрат (або відносний гістерезис) Ψ , що розраховується, як відношення площі петлі гістерезису $S_{\Delta P}$ до площі, укладеної між кривою напруженості і віссю абсцис, де відкладені деформації S_{P1} [154];
- висота отриманого зразка експандату h_a ;
- об'ємна щільність отриманих експандатів ρ_a .

Методика статистичної обробки даних наведена в розділі 3.4.

3.3 Методика експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

На початку досліджень готували зразки комбікорму відповідного гранулометричного складу з розміром часток 1,2–2,4 мм. В якості складових

комбікорму, у співвідношенні 25 : 25 : 25 : 25 %, використовували зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшникову макуху, подрібнені за допомогою дискового подрібнювача, який дозволяє забезпечити вищу (біля 92 %), ніж молотковий, однорідність подрібнення [155].

Приготування комбікорму проводили за допомогою лабораторного спірального-гвинтового змішувача сипких матеріалів (рис. 3.8), який дозволяє отримувати суміші однорідністю 94–98 % [156].

Вихідну вологість отриманих зразків та її зміну визначали за методиками та за допомогою обладнання, приведених в п. 3.2.

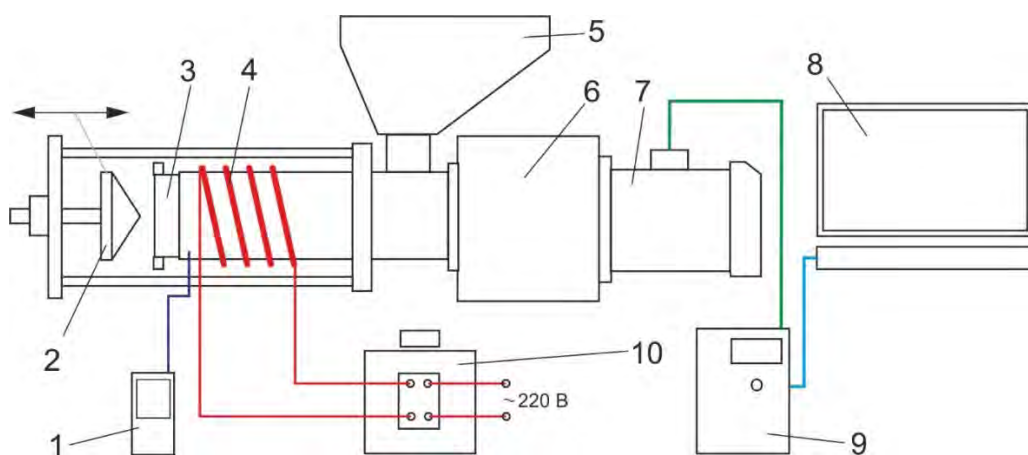
На основі результатів теоретичних та лабораторних досліджень було розроблено та реалізовано експериментальний зразок експандера комбікормів, який став основою дослідної установки, приведеної на рис. 3.9.

Змінними факторами експериментальних досліджень були зазор між запираючим конусом та гайкою δ_c , частота обертання гвинта n і вологість комбікорму W (табл. 3.2). Критерії оптимізації: споживана потужність N , продуктивність Q експериментального експандера і об'ємна щільність отриманих експандатів ρ .

Таблиця 3.2 – Рівні варіювання факторів

Фактор	Нижній рівень (-1)	Нульовий рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Інтервал варіювання, Δ
Вологість комбікорму W , %	20	25	30	5
Зазор між запираючим конусом та гайкою δ_c , мм	1	3	5	2
Частота обертання гвинта n , об/хв	30	45	60	15

Аналізуючи існуючі плани проведення досліджень встановлено, що порівняно з традиційними ортогональними і ротатабельними планами плани Бокса-Бенкіна BB_3 більш економічні за числом дослідів і має хороші статистичні показники, як зазначено в [160].



а



б

- 1 – цифровий термометр з термопарою FLUS ET-960; 2 – запираючий конус; 3 – гайка з роздільником потоку; 4 – повітряний ТЕН нагріву робочої камери; 5 – бункер завантаження; 6 – черв'ячний редуктор NMRV-63 (1:25); 7 – електродвигун AIP/5AI80A4; 8 – ПЕОМ; 9 – частотний перетворювач HYUNDAI N700E; 10 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1М; 11 – тахометр Venetech GM8905

Рисунок 3.8 – Схема (а) та загальний вигляд (б) дослідної установки

Відповідну частоту обертання гвинту встановлювали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E та контролювали за допомогою тахометра Venetech GM8905. Відповідний зазор між запираючим конусом та гайкою встановлювали шляхом обертання гвинта, на якому встановлено конус та контролювали за допомогою глибиноміра штангенциркуля ШЦ-150-0,1 (рис. 3.9).

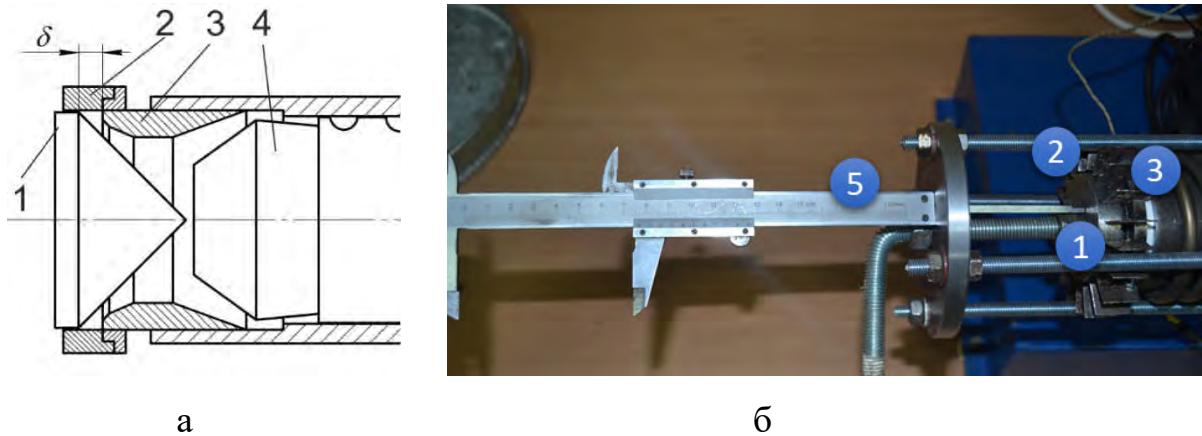


Рисунок 3.9 – Схема встановлення (а) та контролю зазору (б) між конусом і гайкою

Температуру в робочій камері підтримували на рівні 136 ± 2 °С за допомогою повітряного ТЕНу, ступінь нагріву якого регулювали зміною струму живлення лабораторним автотрансформатором ЛАТР-1М.

Потужність приводу знімали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E з наступним поточним записом за допомогою персонального комп'ютера, на якому встановлено програмне забезпечення N700 HIMS (рис. 3.10).

Продуктивність експандера визначали виходячи з отриманої наважки за відповідний термін часу. Наважка складала 1 кг (рис. 3.11).

$$Q = \frac{M}{t}, \quad (3.2)$$

де t – тривалість роботи подрібнювача, год;

M – вага експандату, кг.

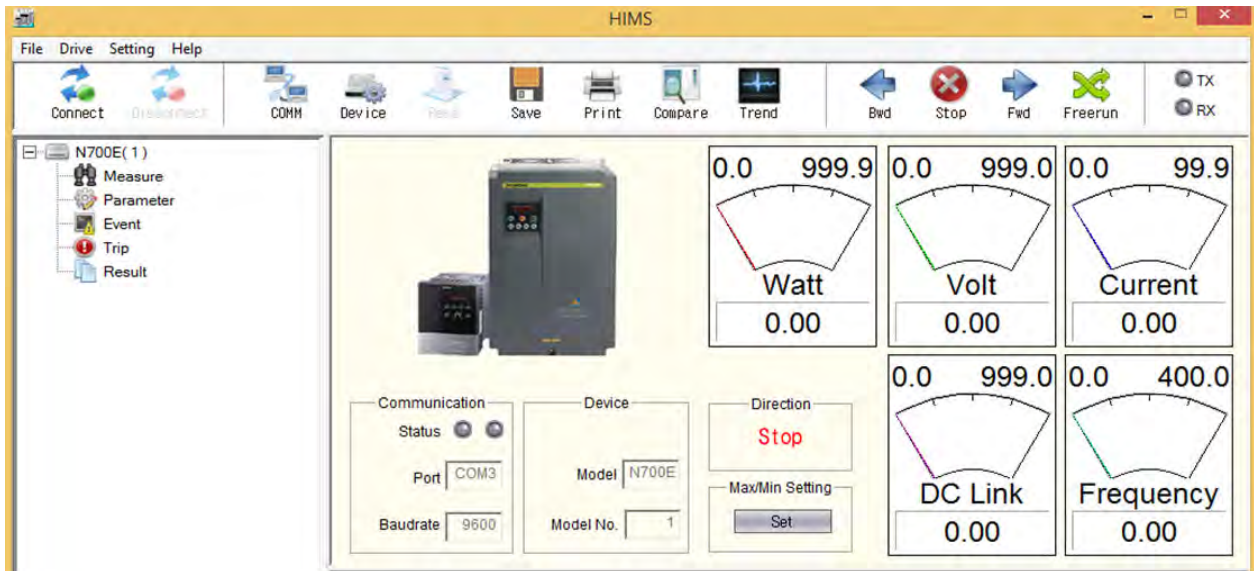


Рисунок 3.10 – Програмне забезпечення N700 HIMS



Рисунок 3.11 – Переробка наважки комбікорму

Затрачуваний час визначали за допомогою секундоміра.

Питому енергоємність процесу визначали як відношення затрачуваної потужності до продуктивності

$$q = \frac{N}{Q}, \quad (3.3)$$

де N – потужність приводу експандера, Вт;
 Q – продуктивність експандера, кг/год.

3.4 Методика визначення якісних характеристик експандатів

Об'ємну щільність експандатів визначали шляхом вимірювання геометричних розмірів окремих зразків (у кількості 10 повторностей) та їх зважуванням [157]. Вимірювання геометричних розмірів проводили за допомогою штангенциркуля ШЦ-1-150, зважування проводили з використанням вагів лабораторних JD-2200-2.

Індекс водопоглинання (water absorption index – WAI) визначали за методом Сінгха та Сміта [158], для вихідної сировини та експандатів. Експандати спочатку подрібнювали, за допомогою млина лабораторного ЛЗМ-1 (рис. 3.12, а), до середнього розміру часток 180–250 мкм. Зразок масою 2,5 г диспергували в 25 мл підігрітої до $39 \pm 1^\circ\text{C}$ дистильованої води, перемішували протягом 10 хв за допомогою магнітної мішалки VEVOR SH-2 (рис. 3.12, б). В процесі змішування температуру суміші підтримували на вказаному рівні, використовуючи підігрів платформи мішалки, контроль температури здійснювали за допомогою цифрового термометра з термопарою FLUS ET-960. Отриману суміш промивали в таровані центрифужні пробірки ємністю 50 мл, довівши її об'єм до 35 мл і центрифугували за допомогою центрифуги CM-3M MICROmed (рис. 3.12, в) при $3000\times g$ протягом 10 хв, декантували надосадову рідину (супернатант) і зважували осад. Значення WAI розраховували згідно з Uribe-Wandurraga et al. [159]:

$$\text{WAI} = \frac{m_o}{m_{c.p.}}, \quad (3.4)$$

де m_o , $m_{c.p.}$ – маса осаду та сухої речовини відповідно, г.

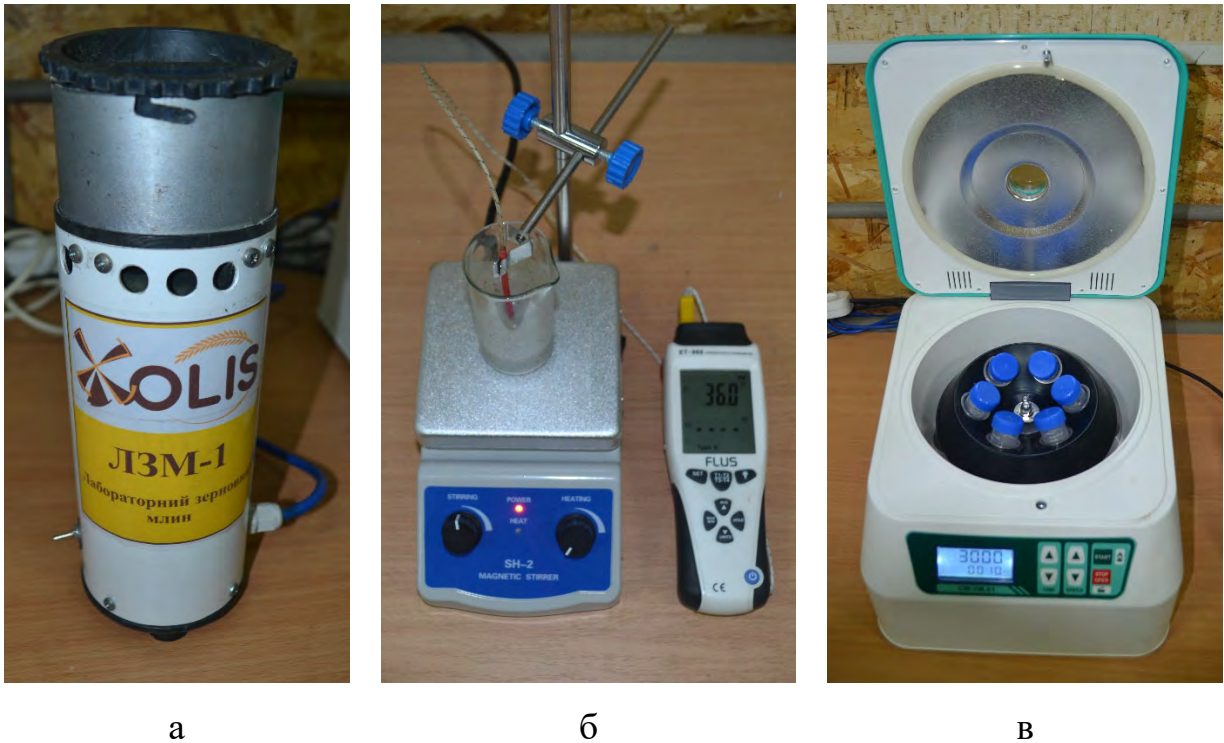


Рисунок 3.12 – Млин лабораторний ЛЗМ-1 (а), магнітна мішалка VEVOR SH-2 з цифровим термометром FLUS ET-960 (б), центрифуга CM-3M MICROMed

3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних

Метою досліджень є визначення математичної моделі досліджуваного процесу експандування кормів. Часто через складність процесу або малий обсяг інформації невідому залежність досліджуваної величини x_i від m незалежних факторів представляють поліномом виду [160, 161, 162, 163, 164, 165]:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq m} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq m} b_{ij} x_{ij} + \sum_{1 \leq i \leq m} b_{ii} x_{ii}^2 + \dots + \varepsilon \quad (3.5)$$

де y – вибіркова оцінка функції відгуку; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – коефіцієнти регресії, отримані за вибірковою оцінкою.

У цьому випадку необхідно розрахувати і оцінити значимість коефіцієнтів рівняння. У приведеної моделі є доданок ε – випадкова величина, яка розподілена з математичним сподіванням рівним нулю і відмінною від нуля дисперсією $s^2(y)$. Вона

відображає вплив випадкових факторів, а також наслідки розрахунку оцінок коефіцієнтів моделі за даними чисельного моделювання [160–164].

Перевірка значущості оцінок коефіцієнтів регресії за t -критерієм Стьюдента зводиться до послідовної перевірки нульових гіпотез. Деякі з коефіцієнтів регресії можуть виявитися нехтувано малими – незначущими. Для цього слід обчислити оцінку середньостатистичну похибку i -го коефіцієнта регресії S_{b_i} . Прийнято вважати, що коефіцієнт регресії значущий при виконанні умови.

Перевірка значущості оцінок коефіцієнтів регресії виконується за виразом [160–164]

$$|b_i| \geq S_{b_i} \cdot t_{\alpha(n-k-1)}. \quad (3.6)$$

У протилежному разі коефіцієнт регресії незначущий і повинен бути вилучений з моделі.

Перевірка інформаційної спроможності моделі ґрунтується на основах дисперсійного аналізу, яке отримано на основі повторення вимірів.

Формулюється нульова гіпотеза $H_0: s_c^2 = s_{на}^2$, де s_c^2 – дисперсія загального розсіювання результатів вимірювань по відношенню до загального середнього значення по всьому експерименту, а $s_{на}^2$ – дисперсія неадекватності.

Якщо для критерію Фішера, визначеного згідно виразу [160–164]

$$F_{ін} = \frac{s_{на}^2}{s_c^2} \quad (3.7)$$

виконується умова $F_{ін} \leq F_T$, то нульова гіпотеза буде не врахована за умови прийнятого рівня значущості при $\alpha = 0,05$. Це свідчить, що модель описує результати експерименту краще, ніж найпростіша модель – пряма лінія, в якій при будь-якому наборі значень x_i вихід є константа, рівна середньому значенню функції даних експерименту. Якщо $F_{ін} > F_T$, то така модель, незважаючи на складний вигляд і витрати на її побудову, не має інформаційної цінності.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕКСПАНДУВАННЯ КОРМІВ

4.1 Результати лабораторних досліджень пресування комбікорму

У відповідності до представленої методики (розділ 3.2) проведені багатофакторні лабораторні дослідження процесу пресування комбікорму. Загальний вигляд отриманих окремих зразків експандатів для кожного досліді (одна з повторностей) наведено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд отриманих окремих зразків експандатів для кожного досліді (одна з повторностей)

Візуалізація закономірностей зміни тиску стискання від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\varepsilon_z)$ для окремих дослідів наведена на рис. 4.2.

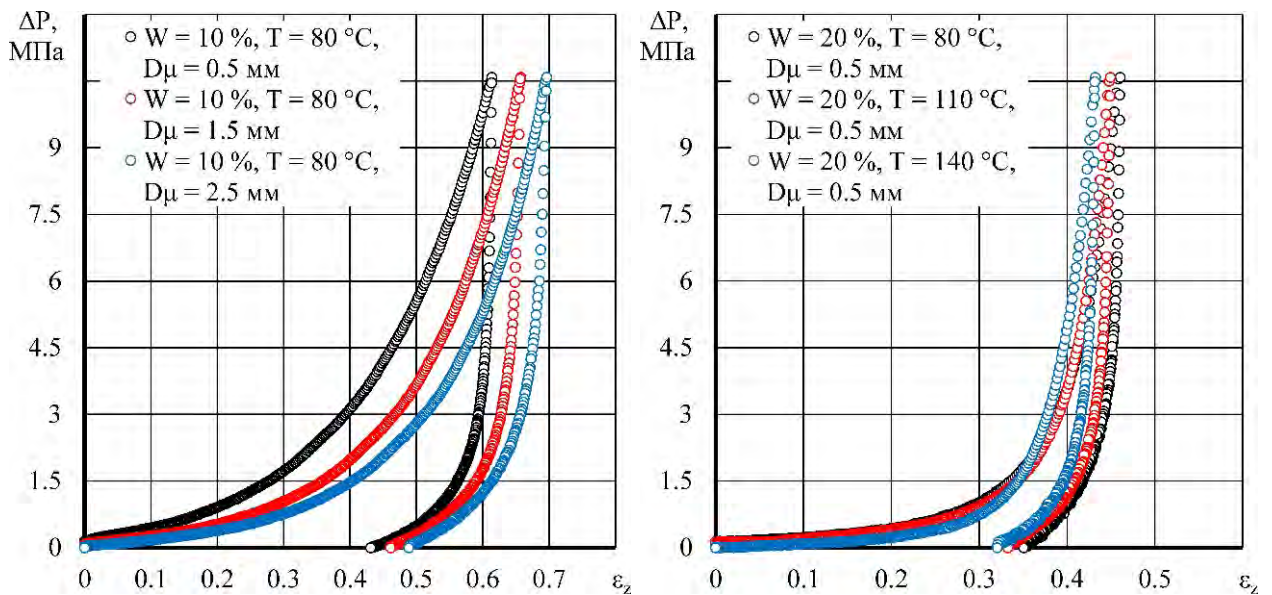


Рисунок 4.2 – Закономірності зміни тиску стискання від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\varepsilon_z)$ для окремих дослідів

Результати розрахунку критеріїв досліджень за кожним дослідом зведено в табл. В.1.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (табл. В.2) визначено рівняння регресії другого порядку для висоти отриманого зразка експандату h_a від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$h_a = 14,5 - 1,12778 x_1 + 2,01667 x_1^2 - 0,561111 x_2 - 0,0833 x_1 x_2 + 0,28333 x_2^2 + 0,9667 x_3 + 0,00833 x_1 x_3 - 0,15833 x_2 x_3 - 0,16667 x_3^2. \quad (4.1)$$

Статистична обробка даних представлена в табл. 4.1.

Після відхилення незначущих коефіцієнтів регресії за коефіцієнтом Стюдента (табл. 4.1) при порівнянні з нормованим значенням $t(0,05;30) = 2,04$ рівняння (4.1) перетворено у наступний вигляд:

$$h_a = 14,5 - 1,12778 x_1 + 2,01667 x_1^2 - 0,561111 x_2 + 0,28333 x_2^2 + 0,9667 x_3 - 0,15833 x_2 x_3 - 0,16667 x_3^2. \quad (4.2)$$

Таблиця 4.1 – Статистична обробка даних рівняння (4.1)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Критерій Стьюдента	Ймовірність значимості
b ₀₀	14,5	0,0791277	183,248	1,84378·10 ⁻²⁹
b ₁₀	- 1,12778	0,036629	- 30,7892	2,36709·10 ⁻¹⁶
b ₂₀	- 0,561111	0,036629	- 15,3188	2,21671·10 ⁻¹¹
b ₃₀	0,966667	0,036629	26,3907	3,09122·10 ⁻¹⁵
b ₁₂	- 0,0833333	0,0448612	- 1,85758	0,0806375
b ₁₃	0,00833333	0,0448612	0,185758	0,854833
b ₂₃	- 0,158333	0,0448612	- 3,5294	0,00257453
b ₁₁	2,01667	0,0634433	31,7869	1,38859·10 ⁻¹⁶
b ₂₂	0,283333	0,0634433	4,46593	0,000339631
b ₃₃	- 0,166667	0,0634433	- 2,62702	0,0176636

Підставляючи у (4.2) розкодовані значення факторів отримано залежність зміни висоти отриманого зразка експандату (рис. 4.3):

$$h_a = 27,9931 + 2,04722 D_\mu - 0,166667 D_\mu^2 - 0,0800463 T - 0,00527778 D_\mu T + 0,000314815 T^2 - 0,919444 W + 0,0201667 W^2. \quad (4.3)$$

Наочно аналізуючи рис. 4.3 видно, що із збільшенням діаметра частинок подрібнених компонентів кормів D_μ висота отриманого експандату h_a збільшується. В свою чергу збільшення температури T корму призводить до зменшення висоти експандату h_a . Для вологості наявний мінімум в точці $W = 22,79$ %. В цілому представлена поверхня відгуку відповідає параболічному циліндру відносно координати W .

Статистичний аналіз (розділ 3.4) залежності (4.3) за критерієм Фішера $F(4.3) = 1,561 < F(0,05;20;54) = 1,768$. Що підтверджує відхилення нульової гіпотези і, як наслідок, адекватність отриманого рівняння.

При мінімальному значенні висоти експандату $h_a = 13,06$ мм: $W = 22,8$ %, $T = 131,3$ °С, $D_\mu = 0,5$ мм.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (табл. В.3) визначено рівняння регресії другого порядку для щільності отриманих експандатів ρ_a від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$\rho_a = 280,404 - 8,28045 x_1 - 16,3438 x_1^2 + 5,9321 x_2 + 2,77189 x_1 x_2 - 9,58021 x_2^2 - 11,4826 x_3 - 5,34306 x_1 x_3 + 3,97184 x_2 x_3 + 0,128632 x_3^2. \quad (4.4)$$

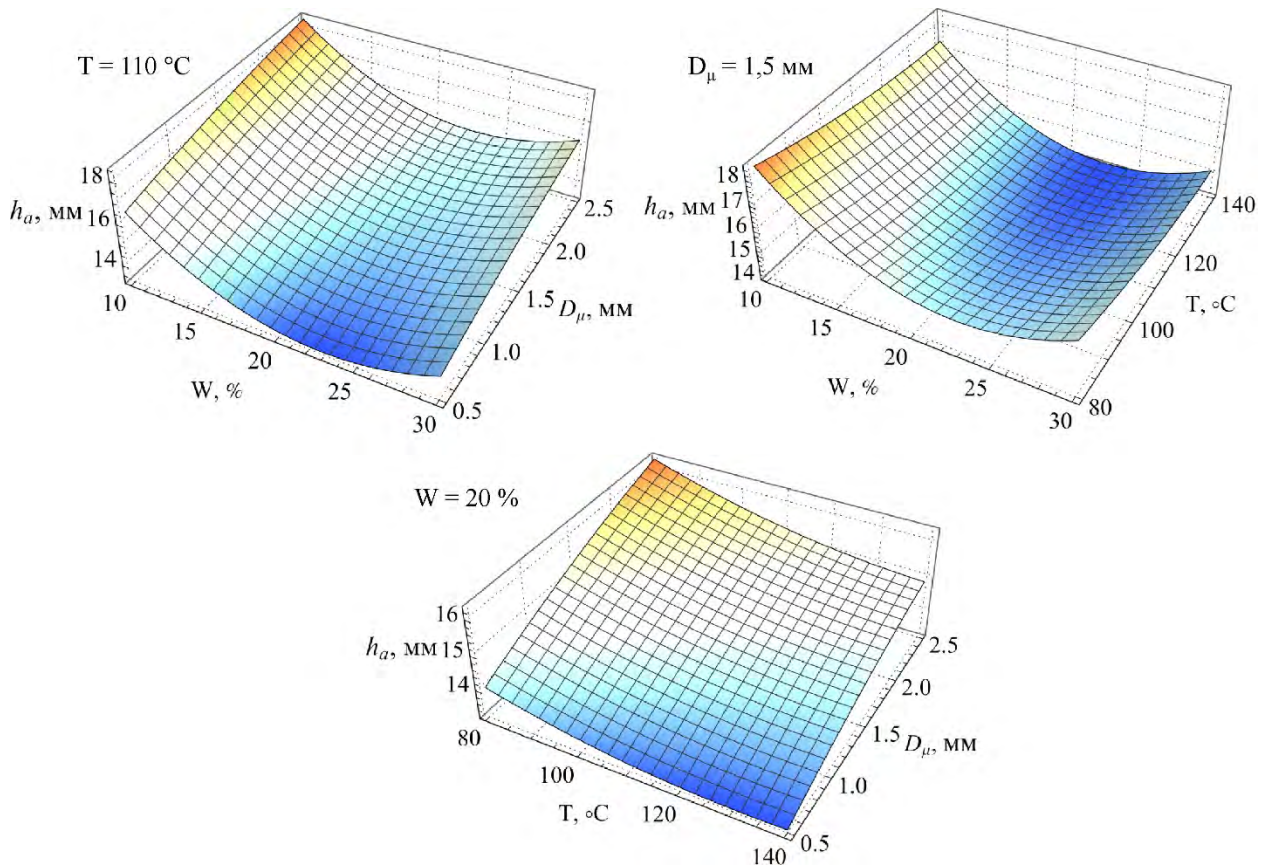


Рисунок 4.3 – Залежність зміни висоти отриманого зразка експандату h_a від факторів досліджень

Статистична обробка даних представлена в табл. 4.2.

Після відхилення незначущих коефіцієнтів регресії за коефіцієнтом Стьюдента (табл. 4.2) при порівнянні з нормованим значенням $t(0,05;30) = 2,04$ рівняння (4.4) перетворено у наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \rho_a = & 280,404 - 8,28045 x_1 - 16,3438 x_1^2 + 5,9321 x_2 - \\ & - 9,58021 x_2^2 - 11,4826 x_3 - 5,34306 x_1 x_3. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Підставляючи у (4.5) розкодовані значення факторів отримано залежність зміни щільності отриманих експандатів (рис. 4.4):

$$\begin{aligned} \rho_a = & 82,2327 - 0,796456 D_\mu + 2,53957 T - 0,0106447 T^2 + 6,51092 W - \\ & - 0,534306 D_\mu W - 0,163438 W^2. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Таблиця 4.2 – Статистична обробка даних рівняння (4.4)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Критерій Стьюдента	Ймовірність значимості
b ₀₀	280,404	4,29112	65,3452	7,35568·10 ⁻²²
b ₁₀	- 8,28045	1,9864	- 4,16857	0,00064387
b ₂₀	5,9321	1,9864	2,98636	0,00829235
b ₃₀	- 11,4826	1,9864	- 5,78059	0,0000221658
b ₁₂	2,77189	2,43284	1,13937	0,270351
b ₁₃	- 5,34306	2,43284	- 2,19623	0,042237
b ₂₃	3,97184	2,43284	1,6326	0,120937
b ₁₁	- 16,3438	3,44055	- 4,75034	0,000185339
b ₂₂	- 9,58021	3,44055	- 2,7845	0,0127131
b ₃₃	0,128632	3,44055	0,0373872	0,970612

З рис. 4.4 видно, що із збільшенням розмірів частинок суміші D_{μ} щільність отриманих експандатів ρ_a зменшується. Це є логічним спостереженням, так як частинки меншого розміру мають більш високу щільність упаковки в ємності. Для вологості ($W = 19,1 \%$) і температури ($T = 119,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) спостерігається оптимум для щільності отриманих експандатів ρ_a . Це свідчить про наявність зайвої вологи, що випаровується при високих температурах. А при високих температурах частинки комбікорму зміцнюються і не дають змоги утворювати конгломерати високої щільності.

Статистичний аналіз (розділ 3.4) залежності (4.6) за критерієм Фішера $F(4.6) = 1,343 < F(0,05;20;54) = 1,768$. Що підтверджує відхилення нульової гіпотези і як наслідок адекватність отриманого рівняння.

При максимальному значенні щільність експандатів $\rho_a = 292,9 \text{ кг/м}^3$: $W = 19,1 \%$, $T = 119,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $D_{\mu} = 0,5 \text{ мм}$.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (табл. В.4) визначено рівняння регресії другого порядку для площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 S_{\Delta P} = & 0,80226 - 0,500841 x_1 + 0,098219 x_1^2 - 0,142712 x_2 + \\
 & + 0,0605085 x_1 x_2 + 0,0135995 x_2^2 - 0,0864498 x_3 + 0,00426012 x_1 x_3 + \\
 & + 0,00665604 x_2 x_3 + 0,0425747 x_3^2.
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

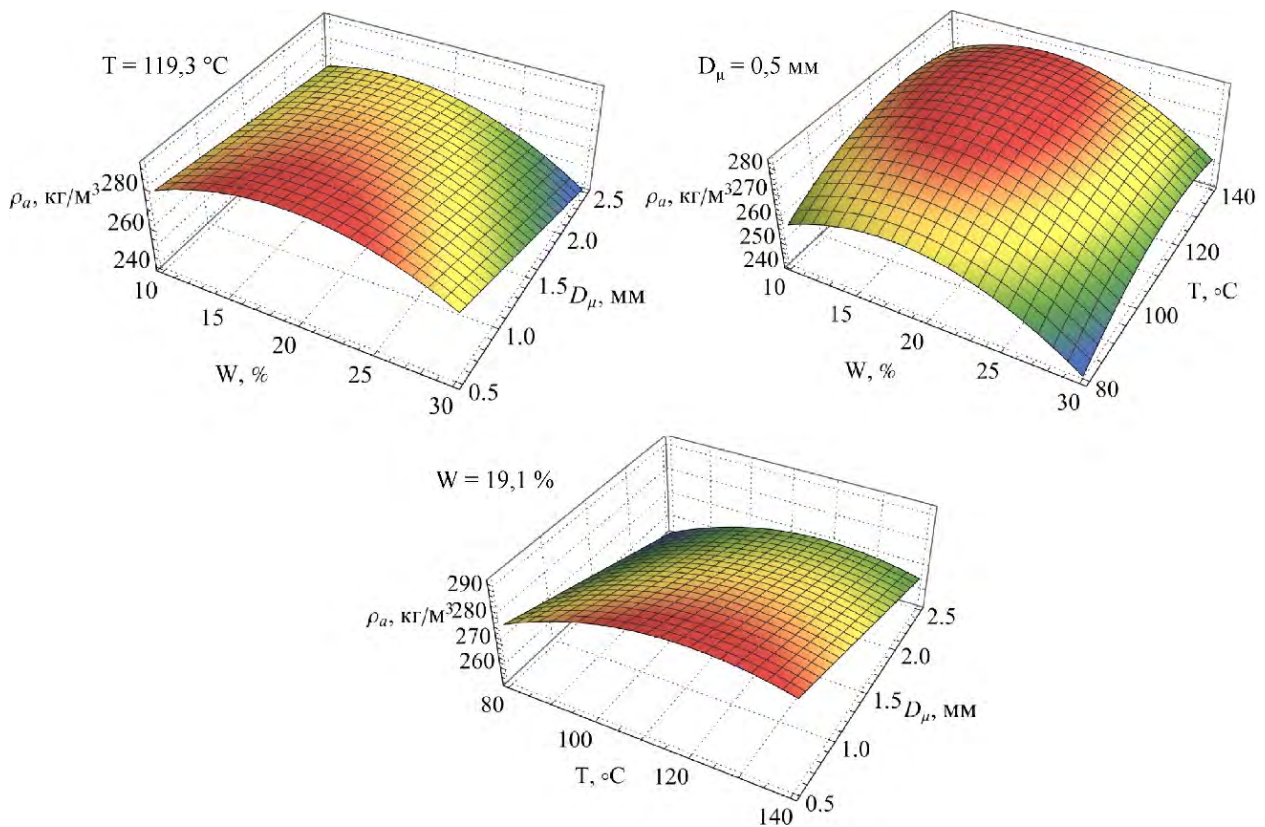


Рисунок 4.4 – Залежність зміни щільності експандатів ρ_a від факторів досліджень

Статистична обробка даних представлена в табл. 4.3.

Після відхилення незначущих коефіцієнтів регресії за коефіцієнтом Стюдента (табл. 4.3) при порівнянні з нормованим значенням $t(0,05;30) = 2,04$ рівняння (4.7) перетворено у наступний вигляд:

$$S_{\Delta P} = 0,80226 - 0,500841 x_1 + 0,098219 x_1^2 - 0,142712 x_2 + 0,0605085 x_1 x_2 - 0,0864498 x_3 + 0,0425747 x_3^2. \quad (4.8)$$

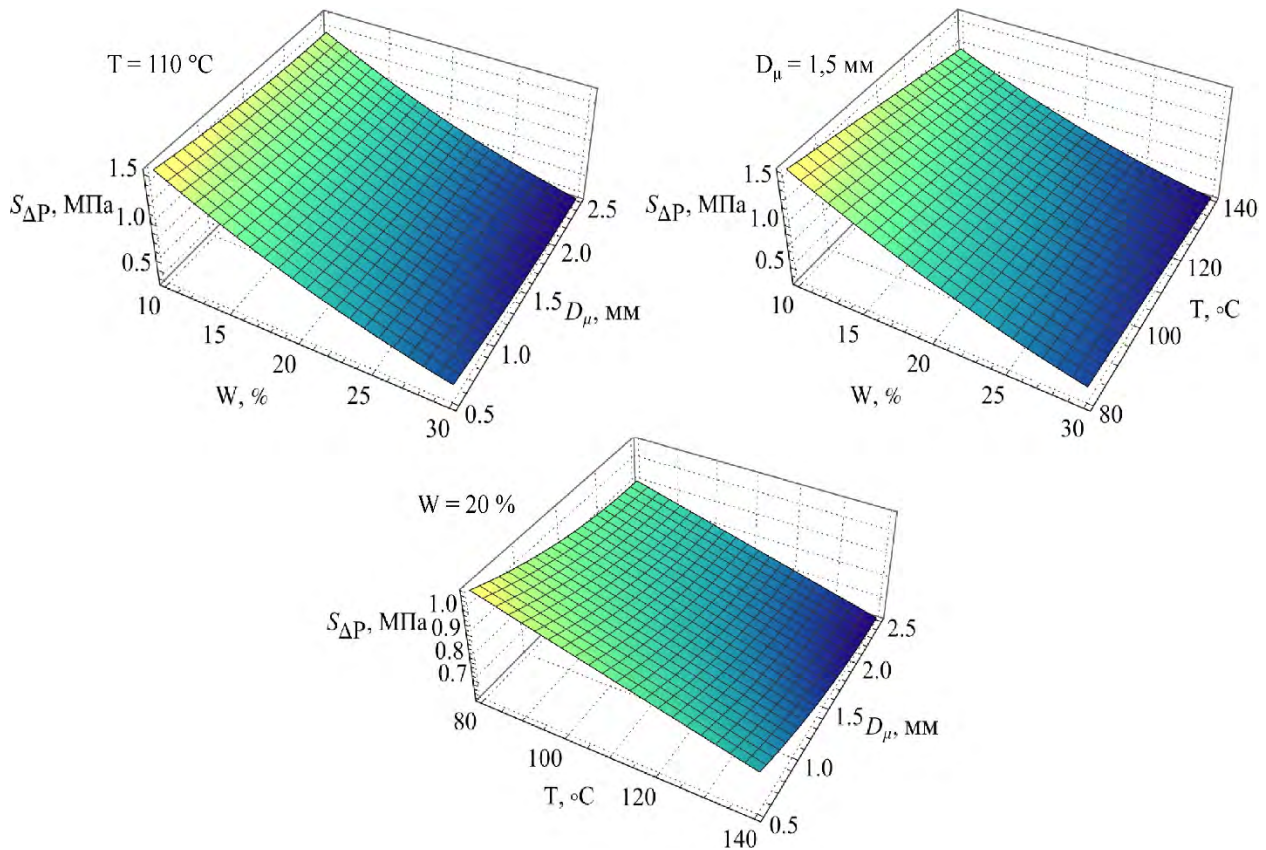
Підставляючи у (4.8) розкодовані значення факторів отримано залежність зміни площі петлі пружного гістерезису (рис. 4.5):

$$S_{\Delta P} = 3,38929 - 0,214174 D_{\mu} + 0,0425747 D_{\mu}^2 - 0,00879098 T - 0,111558 W + 0,000201695 T W + 0,00098219 W^2. \quad (4.9)$$

Наочно аналізуючи рис. 4.5 видно, що із збільшенням всіх факторів досліджень (D_{μ} , T , W) площа петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ зменшується. В цілому представлена поверхня відгуку відповідає практично площинам, навіть для вологості W і температури T .

Таблиця 4.3 – Статистична обробка даних рівняння (4.7)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Критерій Стьюдента	Ймовірність значимості
b_{00}	0,80226	0,0171835	46,6877	$2,16539 \cdot 10^{-19}$
b_{10}	- 0,500841	0,00795443	- 62,9637	$1,37926 \cdot 10^{-21}$
b_{20}	- 0,142712	0,00795443	- 17,9412	$1,75245 \cdot 10^{-12}$
b_{30}	- 0,0864498	0,00795443	- 10,8681	$4,50916 \cdot 10^{-9}$
b_{12}	0,0605085	0,00974215	6,211	$9,48977 \cdot 10^{-6}$
b_{13}	0,00426012	0,00974215	0,437287	0,667408
b_{23}	0,00665604	0,00974215	0,683221	0,503673
b_{11}	0,098219	0,0137775	7,12895	$1,68963 \cdot 10^{-6}$
b_{22}	0,0135995	0,0137775	0,987085	0,337443
b_{33}	0,0425747	0,0137775	3,09017	0,006643

Рисунок 4.5 – Залежність зміни площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ від факторів досліджень

Статистичний аналіз (розділ 3.4) залежності (4.9) за критерієм Фішера $F(4.9) = 1,285 < F(0,05;20;54) = 1,768$. Що підтверджує відхилення нульової гіпотези і як

наслідок адекватність отриманого рівняння.

При мінімальному значенні площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P} = 0,274$ МПа: $W = 30 \%$, $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_\mu = 2,5$ мм.

При максимальному значенні площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P} = 1,734$ МПа: $W = 10 \%$, $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_\mu = 0,5$ мм.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud (табл. В.5) визначено рівняння регресії другого порядку для коефіцієнта механічних втрат Ψ від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \Psi = & 1,53236 + 0,102433 x_1 - 0,136235 x_1^2 + 0,071033 x_2 + \\ & + 0,0155892 x_1 x_2 + 0,00264288 x_2^2 + 0,0848006 x_3 + \\ & + 0,00477652 x_1 x_3 + 0,00133817 x_2 x_3 - 0,00188378 x_3^2. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Статистична обробка даних представлена в табл. 4.2.

Після відхилення незначущих коефіцієнтів регресії за коефіцієнтом Стьюдента (табл. 4.4) при порівнянні з нормованим значенням $t(0,05;30) = 2,04$ рівняння (4.10) перетворено у наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \Psi = & 1,53236 + 0,102433 x_1 - 0,136235 x_1^2 + 0,071033 x_2 + \\ & + 0,0155892 x_1 x_2 + 0,0848006 x_3 + 0,00477652 x_1 x_3. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Таблиця 4.4 – Статистична обробка даних рівняння (4.10)

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Критерій Стьюдента	Ймовірність значимості
b ₀₀	1,53236	0,00412142	371,805	$1,10501 \cdot 10^{-34}$
b ₁₀	0,102433	0,00190785	53,6905	$2,04329 \cdot 10^{-20}$
b ₂₀	0,071033	0,00190785	37,232	$9,79345 \cdot 10^{-18}$
b ₃₀	0,0848006	0,00190785	44,4483	$4,9618 \cdot 10^{-19}$
b ₁₂	0,0155892	0,00233663	6,67165	$3,93483 \cdot 10^{-6}$
b ₁₃	0,00477652	0,00233663	2,04419	0,0567433
b ₂₃	0,00133817	0,00233663	0,572694	0,574349
b ₁₁	-0,136235	0,00330449	-41,2273	$1,76278 \cdot 10^{-18}$
b ₂₂	0,00264288	0,00330449	0,799786	0,434869
b ₃₃	-0,00188378	0,00330449	-0,570066	0,57609

Підставляючи у (4.11) розкодовані значення факторів отримано залежність

зміни щільності отриманих експандатів (рис. 4.6):

$$\Psi = 0,523551 + 0,0752476 D_{\mu} + 0,00132849 T + 0,0583049 W + \\ + 0,000477652 D_{\mu} W + 0,0000519639 T W - 0,00136235 W^2. \quad (4.12)$$

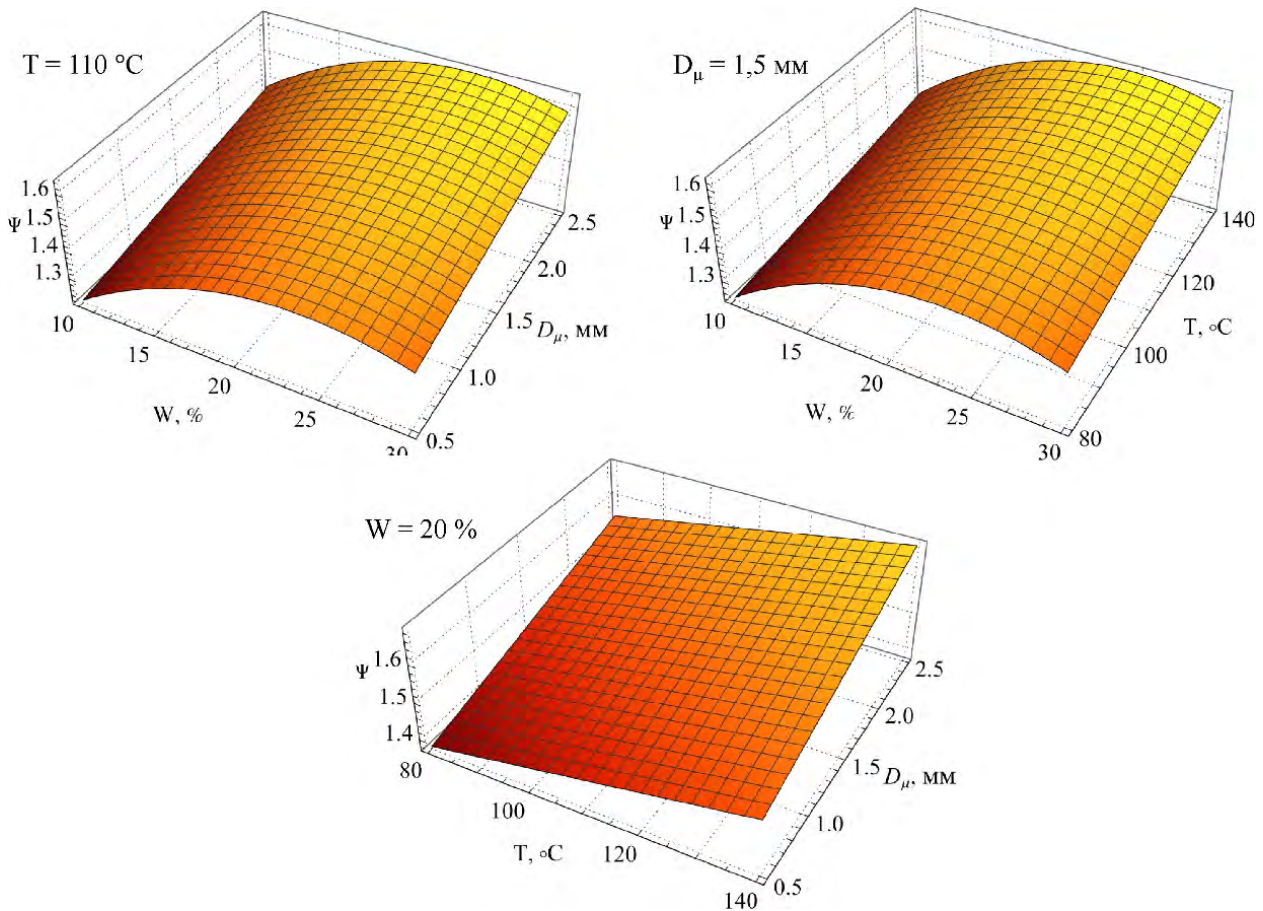


Рисунок 4.6 – Залежність зміни коефіцієнта механічних втрат Ψ від факторів досліджень

З рис. 4.6 видно, що із збільшенням розмірів частинок суміші D_{μ} коефіцієнт механічних втрат Ψ збільшується. Так як коефіцієнт механічних втрат Ψ характеризує ступінь витраченої енергії, то дану закономірність можна пояснити наступним чином. Великі частинки акумулюють енергію пружного тіла, що підсилюється наявністю високої температури. Таке підвищення призводить до збільшення внутрішньої енергії суміші, що намагається максимально протидіяти процесу стискання. В свою чергу для вологості W спостерігається оптимум. Це пояснюється тим, що при високій вологості ($> 24,5\%$) зайва волога виходить з

суміші і випаровується під дією високої температури T . До речі, про це свідчить додаток попарної взаємодії факторів $T \cdot W$ в рівнянні регресії (4.12). Також в рівнянні (4.12) є додаток попарної взаємодії факторів $D_\mu \cdot W$, що свідчить про взаємозв'язок вологості із розміром частинок суміші.

Статистичний аналіз (розділ 3.4) залежності (4.12) за критерієм Фішера $F(4.12) = 1,392 < F(0,05;19;54) = 1,783$. Що підтверджує відхилення нульової гіпотези і як наслідок адекватність отриманого рівняння.

При мінімальному значенні коефіцієнт механічних втрат $\Psi = 0,158$: $W = 10 \%$, $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_\mu = 0,5 \text{ мм}$.

При максимальному значенні коефіцієнт механічних втрат $\Psi = 1,716$: $W = 24,5 \%$, $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_\mu = 2,5 \text{ мм}$.

Так, як коефіцієнт механічних втрат Ψ характеризує енерговитрати процесу (без процесу нагрівання), а щільність отриманих експандатів ρ_a є якісним критерієм, то зведемо лабораторні дослідження до наступної компромісної задачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi(W, T, D_\mu) \rightarrow \min; \\ \rho_a(W, T, D_\mu) \rightarrow \max; \\ 10 \leq W \leq 30; \\ 80 \leq T \leq 140; \\ 0,5 \leq D_\mu \leq 1,5. \end{array} \right. \quad (4.13)$$

Вирішаючи компромісну задачу (4.13) разом з (4.6) і (4.12) в програмному пакеті Wolfram Cloud (табл. В.6) отримуємо наступні раціональні технологічні параметри, при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним: $D_\mu = 0,5 \text{ мм}$, $T = 137,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $W = 20,7 \%$, $\rho_a = 289,2 \text{ кг/м}^3$.

4.2 Порівняння теоретичних і лабораторних досліджень пресування комбікорму

Окрім визначення раціональних технологічних параметрів процесу пресування комбікорму, необхідно провести співставлення рівнянь регресії,

отриманих в ході теоретичних і лабораторних досліджень.

В ході чисельного моделювання встановлені залежності зміни $S_{\Delta P}^T(D_\mu, E_p, \mu_p, W_p)$ – (2.24), $\Psi^T(D_\mu, E_p, \mu_p, W_p)$ – (2.26), $h_a^T(D_\mu, E_p, \mu_p, W_p)$ – (2.28). В свою чергу результати лабораторних досліджень дали змогу визначити $S_{\Delta P}^E(W, T, D_\mu)$ – (4.9), $\Psi^E(W, T, D_\mu)$ – (4.12), $h_a^E(W, T, D_\mu)$ – (4.3). Прирівнюючи зазначені залежності отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} S_{\Delta P}^E(W, T, D_\mu) = S_{\Delta P}^T(D_\mu, E_p, \mu_p, W_p); \\ \Psi^E(W, T, D_\mu) = \Psi^T(D_\mu, E_p, \mu_p, W_p); \\ h_a^E(W, T, D_\mu) = h_a^T(D_\mu, E_p, \mu_p, W_p); \\ 10 \leq W \leq 30; \\ 80 \leq T \leq 140; \\ 0,5 \leq D_\mu \leq 1,5. \end{cases} \quad (4.14)$$

Приведену систему рівнянь вирішено в Wolfram Cloud (табл. В.7) шляхом складання відповідної програми, алгоритм якої передбачає виконання наступних етапів:

- задання рівнянь регресії у вигляді функції декількох змінних;
- задання технологічних параметрів W, T, D_μ з використанням функції динамічних спайдерів;
- візуалізація функції перетину системи рівнянь (4.14) у вигляді тривимірного графіку (рис. 4.7);
- вирішення системи рівнянь (4.14) з використанням функції чисельного обчислення NSolve;
- побудова графіків залежностей $S_{\Delta P}^E(D_\mu)$ і $S_{\Delta P}^T(D_\mu)$, $\Psi^E(D_\mu)$ і $\Psi^T(D_\mu)$, $h_a^E(D_\mu)$ і $h_a^T(D_\mu)$ для порівняння результатів теоретичних і експериментальних залежностей.

Для прикладу розглянемо деякі зв'язки технологічних параметрів із фізико-механічними властивостями суміші комбікормів:

$$- D_\mu = 1,5 \text{ мм}, W = 20 \%, T = 110 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow E_p = 18,3 \text{ МПа}, \mu_p = 0,28, W_p = 0,35 \text{ Н/м} \\ \rightarrow S_{\Delta P} = 0,802 \text{ МПа}, \Psi = 1,532, h_a = 14,5 \text{ мм};$$

$$- D_\mu = 0,5 \text{ мм}, W = 10 \%, T = 80 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow E_p = 10,8 \text{ МПа}, \mu_p = 0,366, W_p = 0,21 \text{ Н/м} \\ \rightarrow S_{\Delta P} = 1,733 \text{ МПа}, \Psi = 1,15, h_a = 17,2 \text{ мм};$$

– $D_\mu = 2,5 \text{ мм}$, $W = 30 \%$, $T = 140 \text{ °C}$ → $E_p = 16,4 \text{ МПа}$, $\mu_p = 0,20$, $W_p = 0,31 \text{ Н/м}$
 → $S_{\Delta P} = 0,274 \text{ МПа}$, $\Psi = 1,675$, $h_a = 15,8 \text{ мм}$.

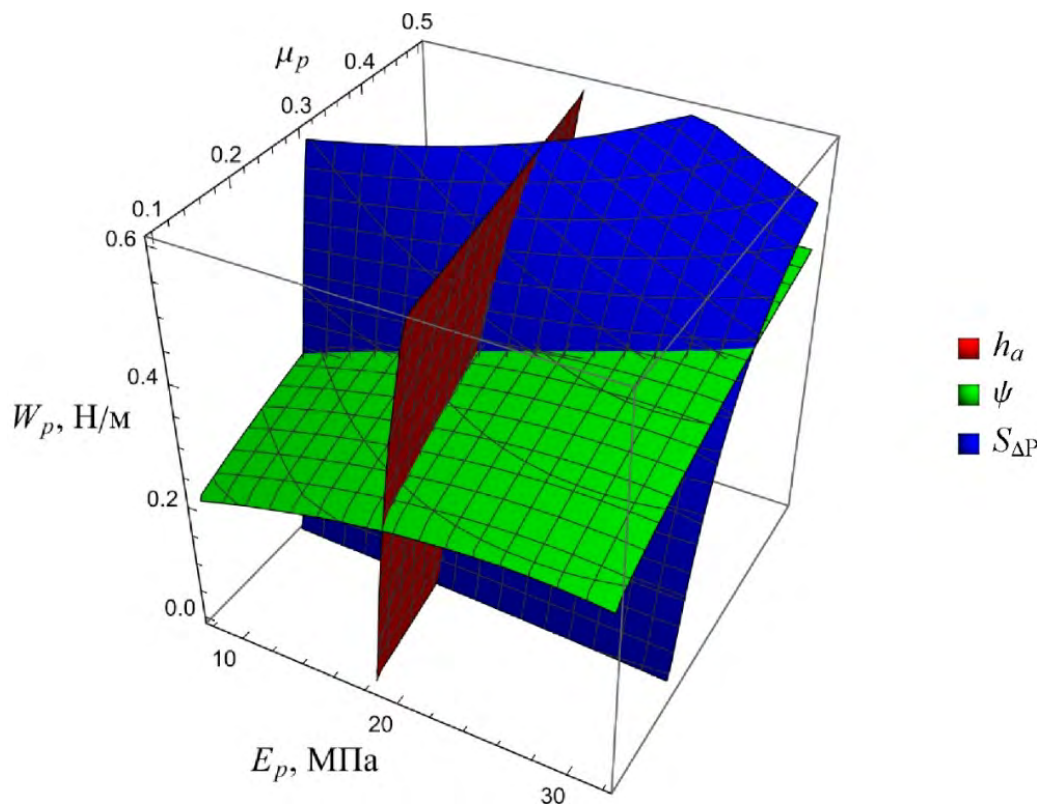


Рисунок 4.7 – Візуалізація функції перетину системи рівнянь (4.14)
 при $D_\mu = 0,5 \text{ мм}$, $W = 20,7 \%$, $T = 137,0 \text{ °C}$

Для раціональних технологічних параметрів маємо: $D_\mu = 0,5 \text{ мм}$, $W = 20,7 \%$, $T = 137,0 \text{ °C}$ → $E_p = 22,3 \text{ МПа}$, $\mu_p = 0,31$, $W_p = 0,49 \text{ Н/м}$ → $S_{\Delta P} = 0,772 \text{ МПа}$, $\Psi = 1,519$, $h_a = 13,2 \text{ мм}$. Розраховані параметри використані в розділі 2 при створенні моделі процесу формування експандатів формуючою насадкою.

Порівняння залежностей $S_{\Delta P}^E(D_\mu)$ і $S_{\Delta P}^T(D_\mu)$, $\Psi^E(D_\mu)$ і $\Psi^T(D_\mu)$, $h_a^E(D_\mu)$ і $h_a^T(D_\mu)$ проведемо при умові раціональних технологічних параметрів (рис. 4.8).

Коефіцієнт кореляції Пірсона між даними моделювання і лабораторними даними знаходиться в межах від 0,94 до 0,99, що свідчить про адекватність проведених досліджень.

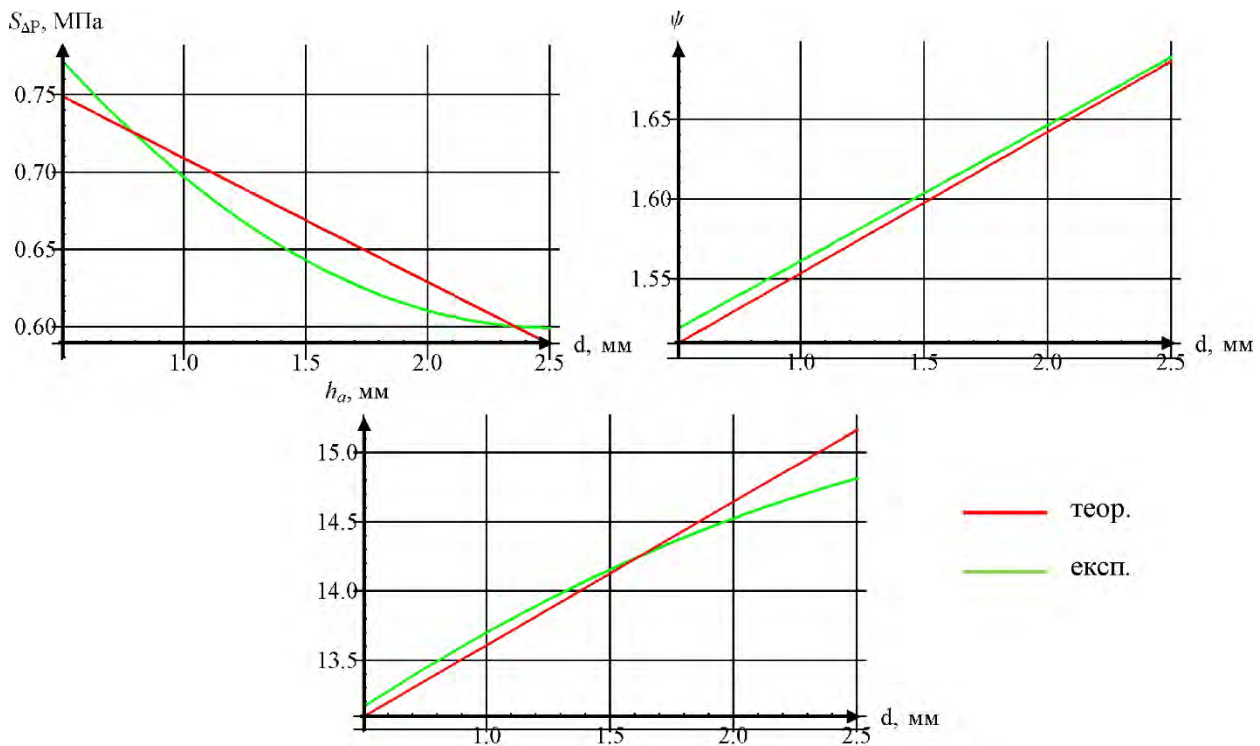


Рисунок 4.8 – Порівняння результатів теоретичних і експериментальних залежностей

4.3 Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

У відповідності до представленої методики (розділ 3.3) проведені багатофакторні експериментальні дослідження процесу роботи малогабаритного експандера кормів. Загальний вигляд зразків отриманого продукту (експандатів) приведені на рис. 4.9.

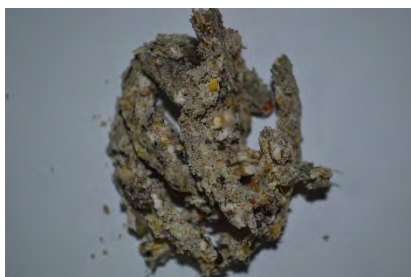
Результати експериментальних досліджень наведені в додатку Г. Згідно з методикою статистичної обробки експериментальних даних (розділ 3.4) складено програму в Excel і визначені рівняння регресії для кожного критерію досліджень. А в програмному пакеті Wolfram Cloud побудовані відповідні тривимірні графіки отриманих закономірностей.

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність продуктивності експандера Q від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$Q = 24,0667 - 1,4532 x_1 - 1,86487 x_1^2 + 2,8222 x_2 - 0,3214 x_1 x_2 - 0,030401 x_2^2 + 6,0167 x_3 - 0,769 x_1 x_3 + 0,76803 x_2 x_3 - 0,8668 x_3^2. \quad (4.15)$$



W = 25 %, $\delta_c = 1$ мм,
n = 30 об/хв



W = 25 %, $\delta_c = 3$ мм,
n = 30 об/хв



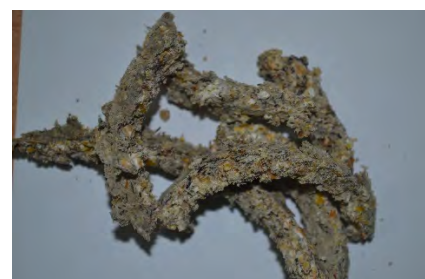
W = 25 %, $\delta_c = 5$ мм,
n = 30 об/хв



W = 25 %, $\delta_c = 1$ мм,
n = 60 об/хв



W = 25 %, $\delta_c = 3$ мм,
n = 60 об/хв



25 %, $\delta_c = 5$ мм,
n = 60 об/хв

Рисунок 4.9 – Зразки отриманого продукту

Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.15) наведені в табл. 4.5. Отримана модель адекватна за критерієм Фішера, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена.

Таблиця 4.5 – Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.15)

Критерій Кохрена	$G_{0,05}(2;15)$	$S_{i^2 \max}$		$\sum S_i^2$		$G_p = S_{i^2 \max} / \sum S_i^2$		$G_p < G_{0,05}$			
	0,3346	1,101		10,17		0,1082		Дисперсії однорідні			
Критерій Стьюдента	$t_{0,05}(30)$	t_{00}	t_{10}	t_{20}	t_{30}	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{11}	t_{22}	t_{33}
	2,04	127,1	1,24	4,66	21,20	0,03	0,17	0,17	0,94	0,00	0,20
Критерій Фішера	$F_{0,05}(12;30)$	$S_{на}^2$		$S_{с}^2$		$F_p = S_{на}^2 / S_{с}^2$		$F_p < F_{0,05}$			
	2,09	27,29		13,66		1,9979		Модель адекватна			

Враховуючи відхилення незначущих коефіцієнтів регресії (табл. 4.5) і провівши розкодування рівняння (4.15) отримуємо остаточно залежність продуктивності експандера Q від факторів досліджень (рис. 4.10):

$$Q = 1,78314 + 0,401115 n + 1,41111 \delta_c. \quad (4.16)$$

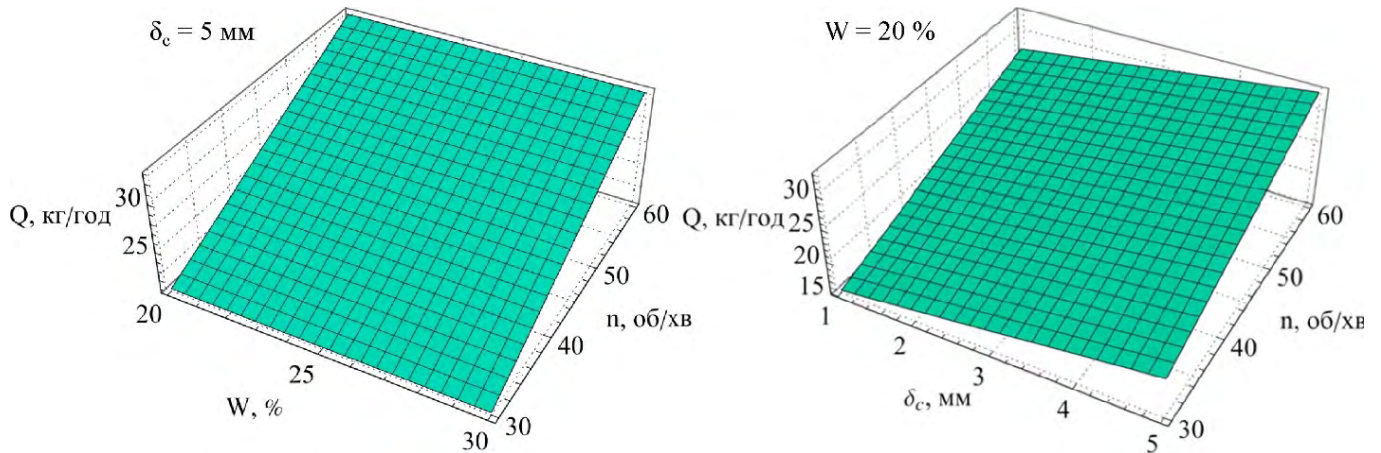


Рисунок 4.10 – Залежність продуктивності експандера Q від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n

З рис. 4.10 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n і зазору між конусом та гайкою δ_c продуктивність експандера Q збільшується. В свою чергу вологість комбікорму W не впливає на продуктивність.

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність споживаної потужності N від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$N = 782,019 - 75,5111 x_1 - 30,8183 x_1^2 + 14,7292 x_2 - 7,42467 x_1 x_2 + 124,3 x_2^2 + 180,343 x_3 - 23,7039 x_1 x_3 - 4,04761 x_2 x_3 - 7,5962 x_3^2. \quad (4.17)$$

Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.17) наведені в табл. 4.6. Отримана модель адекватна за критерієм Фішера, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена.

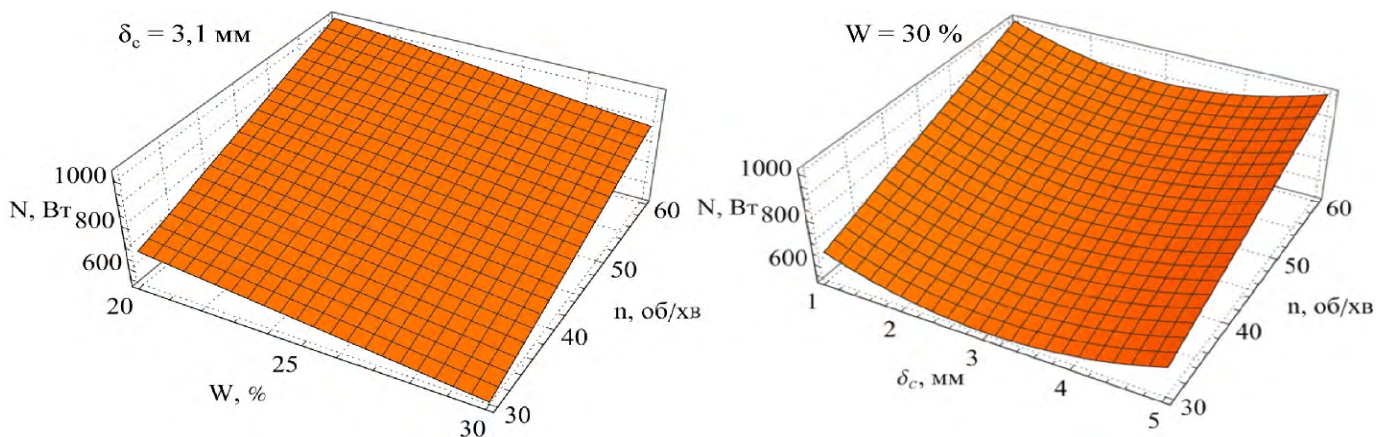
Враховуючи відхилення незначущих коефіцієнтів регресії (табл. 4.6) і провівши розкодування рівняння (4.17) отримуємо остаточно залежність споживаної потужності N від факторів досліджень (рис. 4.11):

$$N = 898,22 + 12,0228 n - 15,1022 W - 186,449 \delta_c + 31,0749 \delta_c^2. \quad (4.18)$$

Таблиця 4.6 – Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.17)

Критерій Кохрена	$G_{0,05}(2;15)$	$S_i^2_{\max}$		$\sum S_i^2$		$G_p = S_{i\max}^2 / \sum S_i^2$		$G_p < G_{0,05}$			
	0,3346	217		1490		0,1456		Дисперсії однорідні			
Критерій Стьюдента	$t_{0,05}(30)$	t_{00}	t_{10}	t_{20}	t_{30}	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{11}	t_{22}	t_{33}
	2,04	89,76	2,23	0,08	12,73	0,01	0,11	0,00	0,17	2,79	0,01
Критерій Фішера	$F_{0,05}(11;30)$	S_{na}^2		S_c^2		$F_p = S_{na}^2 / S_c^2$		$F_p < F_{0,05}$			
	2,13	20129,6		20439,4		0,9848		Модель адекватна			

З рис. 4.11 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n споживана потужність експандера Q збільшується, що є цілком логічним. Зменшення вологості комбікорму W також спричиняє збільшення потужності N . Це пояснюється збільшенням сил внутрішнього і зовнішнього тертя, що виникають між частинками комбікорму і поверхнею робочих органів експандера. Для зазору спостерігається наявність оптимуму $\delta_c = 3,1$ мм, при якому потужність експандера N є мінімальною.

Рисунок 4.11 – Залежність споживаної потужності експандера N від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність зміни питомої енергоємності процесу експандування q від факторів в загальному

закодованому вигляді:

$$q = 32,3874 - 1,11847 x_1 + 1,31155 x_1^2 - 4,29801 x_2 + 0,127836 x_1 x_2 + 6,06315 x_2^2 - 2,04278 x_3 + 0,2867 x_1 x_3 + 2,22 \cdot 10^{-16} x_2 x_3 + 1,6234 x_3^2. \quad (4.19)$$

Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.19) наведені в табл. 4.7. Отримана модель адекватна за критерієм Фішера, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена.

Таблиця 4.7 – Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.19)

Критерій Кохрена	$G_{0,05}(2;15)$	$S_i^2_{\max}$		$\sum S_i^2$		$G_p = S_i^2_{\max} / \sum S_i^2$		$G_p < G_{0,05}$			
	0,3346	217		7,116		0,841		Дисперсії однорідні			
Критерій Стьюдента	$t_{0,05}(30)$	t_{00}	t_{10}	t_{20}	t_{30}	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{11}	t_{22}	t_{33}
	2,04	2552	8,12	119	27,08	0,05	0,27	0,00	5,15	110	7,89
Критерій Фішера	$F_{0,05}(8;30)$	S_{na}^2		S_c^2		$F_p = S_{na}^2 / S_c^2$		$F_p < F_{0,05}$			
	2,27	1,0725		1,2329		0,8698		Модель адекватна			

Враховуючи відхилення незначущих коефіцієнтів регресії (табл. 4.7) і провівши розкодування рівняння (4.19) отримуємо остаточно залежність питомої енергоємності процесу експандування q від факторів досліджень (рис. 4.12):

$$q = 111,597 - 0,785547 n + 0,00721513 n^2 - 2,8468 W + 0,0524621 W^2 - 11,2437 \delta_c + 1,51579 \delta_c^2. \quad (4.20)$$

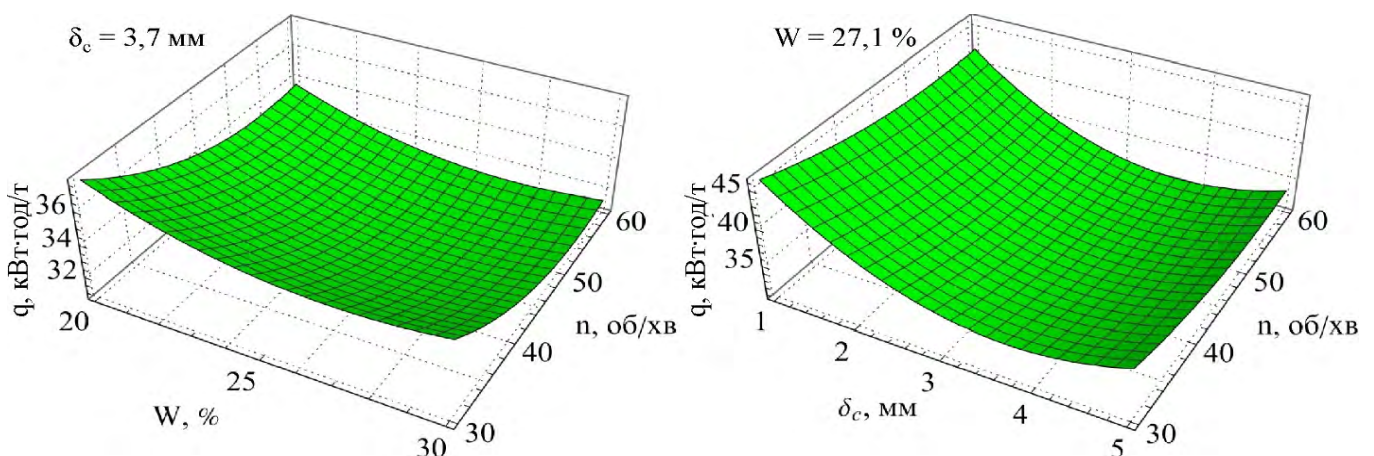


Рисунок 4.12 – Залежність питомої енергоємності процесу експандування q від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n

Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень при якому спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування $q = 30,7$ кВт·год/т встановлено, що $W = 27,1$ %, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв. При цьому продуктивність складала $Q = 28,8$ кг/год, а споживана потужність $N = 879$ Вт.

4.4 Результати експериментальних досліджень якісних характеристик експандатів

Унаслідок обробки експериментальних даних отримано залежність зміни щільності експандатів ρ від факторів в загальному закодованому вигляді:

$$\rho = 353,44 - 5,29002 x_1 - 6,98002 x_1^2 - 14,5158 x_2 + 2,25 x_1 x_2 - 2,5 x_2^2 - 12,375 x_3 - 0,75 x_1 x_3 - 8,88178 \cdot 10^{-16} x_2 x_3 - x_3^2. \quad (4.21)$$

Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.21) наведені в табл. 4.8. Отримана модель адекватна за критерієм Фішера, а дисперсія однорідна за критерієм Кохрена.

Таблиця 4.8 – Результати статистичної обробки даних і рівняння (4.21)

Критерій Кохрена	$G_{0,05}(2;15)$	$S_i^2_{\max}$		$\sum S_i^2$		$G_p = S_i^2_{\max} / \sum S_i^2$		$G_p < G_{0,05}$			
	0,3346	217		1534		0,1414		Дисперсії однорідні			
Критерій Стьюдента	$t_{0,05}(30)$	t_{00}	t_{10}	t_{20}	t_{30}	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{11}	t_{22}	t_{33}
	2,04	6,574	3,93	29,5	21,49	0,36	0,04	0,00	3,16	0,40	0,06
Критерій Фішера	$F_{0,05}(10;30)$	S_{na}^2		S_c^2		$F_p = S_{na}^2 / S_c^2$		$F_p < F_{0,05}$			
	2,16	120,4		57		2,1118		Модель адекватна			

Враховуючи відхилення незначущих коефіцієнтів регресії (табл. 4.8) і провівши розкодування рівняння (4.21) отримуємо остаточно залежність зміни щільності експандатів ρ від факторів досліджень (рис. 4.13):

$$\rho = 264,289 - 0,825 n + 12,902 W - 0,279201 W^2 - 7,25791 \delta_c^2. \quad (4.22)$$

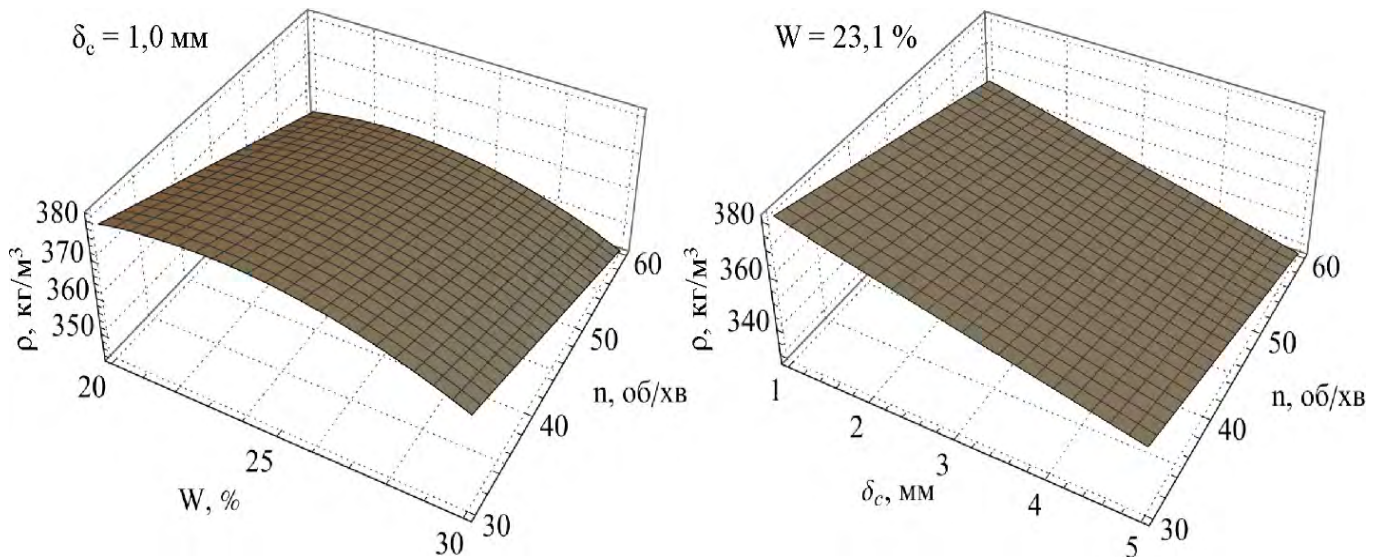
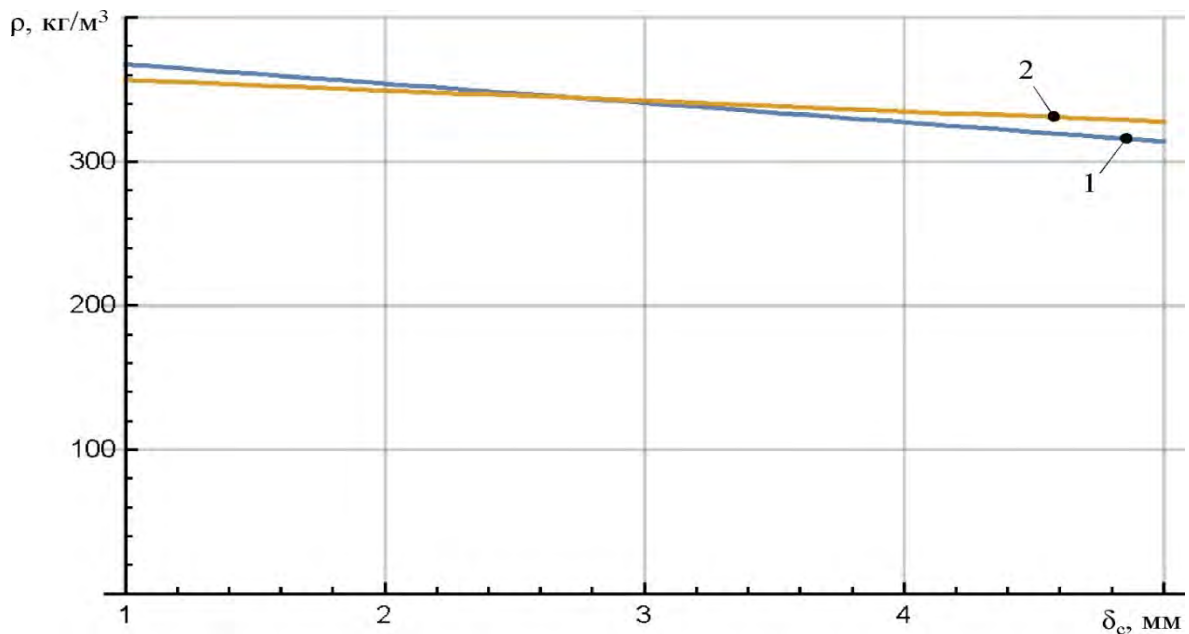


Рисунок 4.13 – Залежність щільності експандатів ρ від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n

З рис. 4.13 наочно видно, що із збільшенням частоти обертання гвинта n щільність експандатів ρ зменшується. Це пояснюється тим, що збільшення частоти обертання зменшує час перебування матеріалу в області шнека, де відбуваються фізико-хімічні процеси утворення експандату. Збільшення зазору між конусом та гайкою δ_c призводить до зменшення щільності, що також є цілком логічним: не утворюється необхідного підпору з боку конуса. Вологість матеріалу має оптимальне значення на рівні $W = 23,1 \%$, що практично наближене до значення, яке отримано при лабораторних дослідженнях (див. розділ 4.1).

Проведемо порівняння результатів експериментальних досліджень із теоретичними моделями. Теоретичні дослідження були направлені на визначення конструктивних параметрів, а експериментальні на визначення режимних і технологічних параметрів. Однак параметр зазор між конусом та гайкою δ_c був фактором досліджень як у теоретичних, так і експериментальних дослідженнях. Тому порівняння будемо проводити саме за цим фактором. Для визначених раціональних параметрів побудовані відповідні графіки залежностей на рис. 4.14. Коефіцієнт кореляції Пірсона становить 0,94.



1 – теоретична залежність (2.33) при $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм;

2 – експериментальна залежність (4.22) при $W = 27,1$ %, $n = 54,4$ об/хв

Рисунок 4.14 – Порівняння теоретичної (1) і експериментальної (2) залежностей щільності експандатів ρ від зазору між конусом та гайкою δ_c

Також встановлено, що при раціональних значеннях $W = 27,1$ %, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв, при яких питома енергоємність процесу експандування q є мінімальною, щільність експандатів складає $\rho = 336$ кг/м³.

Отримані дослідні зразки після центрифугування, за якими визначався індекс водопоглинання (WAI), наведені на рис. 4.15.

Отримані за результатами дослідження дані приведені в табл. 4.9.

Як свідчать дані табл. 4.9, об'ємна щільність експандатів, в порівнянні з вихідною сировиною зменшується на 13–25 %, а індекс водопоглинання зростає на 25–38 %. WAI часто використовується як показник ступеня желатинізації (клейстеризації) крохмалю (див. розділ 3.4), що є індикатором підвищення засвоюваності корму.

«У желатинізованого крохмалю різко підвищується сорбційна здатність. Він набуває здатності поглинати не лише багато води, а й багато травних соків. Процес ферментативного гідролізу крохмалю у травному тракті значно полегшується, що

суттєво підвищує його доступність для організму тварин» [166].

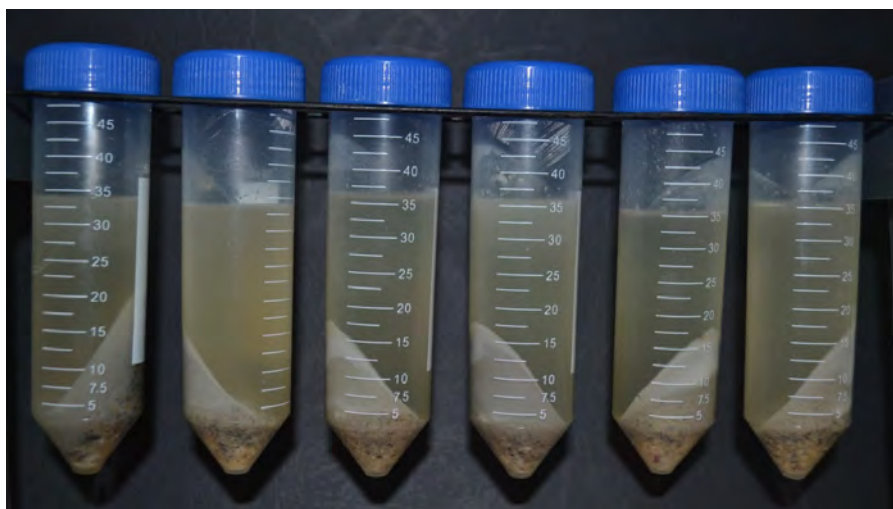


Рисунок 4.14 – Дослідні зразки після центрифугування

Крім того, покращення індексу водопоглинання залежить від ступеня денатурації білка, завдяки чому підвищується енергетична цінність корму.

Таблиця 4.9 – Результати визначення характеристик сировини та експандатів

Зразок	Об'ємна щільність ρ , кг/м ³	Індекс водопоглинання WAI, г/г
Вихідна сировина		
0–0,99 мм	433,9	2,53
1–1,99 мм	427,7	2,38
2–2,99 мм	420,7	2,27
Експандат		
W = 30 %, δ_c = 5 мм, n = 45 об/хв	320.0	3,18
W = 30 %, δ_c = 1 мм, n = 45 об/хв	352.8	3,16
W = 20 %, δ_c = 5 мм, n = 45 об/хв	330.6	3,19
W = 20 %, δ_c = 1 мм, n = 45 об/хв	372.4	3,32
W = 25 %, δ_c = 3 мм, n = 45 об/хв	360.4	3,18
W = 30 %, δ_c = 3 мм, n = 60 об/хв	330.4	3,38
W = 30 %, δ_c = 3 мм, n = 30 об/хв	354.4	3,13
W = 20 %, δ_c = 3 мм, n = 60 об/хв	338.0	3,12
W = 20 %, δ_c = 3 мм, n = 30 об/хв	359.0	3,21
W = 25 %, δ_c = 3 мм, n = 45 об/хв	345.4	3,18
W = 25 %, δ_c = 5 мм, n = 60 об/хв	326.0	3,20
W = 25 %, δ_c = 5 мм, n = 30 об/хв	353.0	3,15
W = 25 %, δ_c = 1 мм, n = 60 об/хв	346.8	3,17
W = 25 %, δ_c = 1 мм, n = 30 об/хв	373.8	3,19
W = 25 %, δ_c = 3 мм, n = 45 об/хв	354.4	3,22

4.5 Висновки з розділу

1. В результаті лабораторних досліджень процесу формування експандатів встановлені залежності зміни тиску стискання від деформації компонентів комбікорму $\Delta P(\varepsilon_z)$. Визначені закономірності зміни площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ (4.9), коефіцієнта механічних втрат Ψ (4.12), висоти отриманого зразка експандату h_a (4.3), щільності отриманих експандатів ρ_a (4.5) від вологості комбікорму W , його температури T та середнього діаметра частинок подрібнених компонентів D_μ .

2. Вирішуючи компромісну задачу, яка полягає у мінімізації коефіцієнта механічних втрат Ψ і максимізації щільності отриманих експандатів ρ_a , отримуємо наступні раціональні технологічні параметри при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним: $D_\mu = 0,5$ мм, $T = 137,0$ °С, $W = 20,7$ %, $\rho_a = 289,2$ кг/м³.

3. Для порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень складено програму на мові програмування Wolfram, яка дозволяє зв'язати технологічні параметри процесу експандування (W , T) із фізико-механічними властивостями суміші комбікормів (E_p , μ_p , W_p). Для раціональних технологічних параметрів ($D_\mu = 0,5$ мм, $W = 20,7$ %, $T = 137,0$ °С) маємо наступні фізико-механічні властивості $E_p = 22,3$ МПа, $\mu_p = 0,31$, $W_p = 0,49$ Н/м. При цьому $S_{\Delta P} = 0,772$ МПа, $\Psi = 1,519$, $h_a = 13,2$ мм. Порівняння залежностей $S_{\Delta P}^E(D_\mu)$ і $S_{\Delta P}^T(D_\mu)$, $\Psi^E(D_\mu)$ і $\Psi^T(D_\mu)$, $h_a^E(D_\mu)$ і $h_a^T(D_\mu)$ проведено при умові раціональних технологічних параметрів і встановлено достатньо високий коефіцієнт кореляції Пірсона (0,94–0,99).

4. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера Q (4.16), його споживаної потужності N (4.17), питомої енергоємності процесу експандування q (4.20) і щільності отриманих експандатів ρ (4.22) від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n .

5. Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень, при якому спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності

процесу експандування $q = 30,7$ кВт·год/т встановлено, що $W = 27,1$ %, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв. При цьому продуктивність складала $Q = 28,8$ кг/год, споживана потужність $N = 879$ Вт, а щільність експандатів $\rho = 336$ кг/м³.

б. Так як параметр зазор між конусом та гайкою δ_c був фактором досліджень як у теоретичних, так і експериментальних дослідженнях, тому порівняння проведено саме за цим фактором. Для визначених раціональних параметрів побудовані відповідні графіки залежностей (рис. 4.14) і розрахований коефіцієнт кореляції Пірсона, який становить 0,94.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [108, 167, 168, 169, 170, 171].

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Випробування експандера комбікормів

Виробничі випробування експандера комбікормів з обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами проводили в умовах комбікормового цеху товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «Глобинський свинокомплекс» (додаток І), м. Глобине, Кременчуцького району Полтавської області, на експандері кормів ОЕЕ 30.2 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Експандер кормів ОЕЕ 30.2 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG)

На вказаний експандер було встановлено розроблену прес-матрицю із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами (відношення радіуса увігнутого конуса до радіуса звуження циліндра формуючої

насадки $R_c/R_r = 6,33$, зазор між конусом та гайкою $\delta_c = 3,7$ мм, частота обертання гвинта $n = 54,4$ об/хв).

Виробничі випробування проводили з використанням комбікорму «Стартер» для поросят на дорошуванні (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Склад комбікорму «Стартер» для проведення виробничих випробувань удосконаленого експандера

Складова	Ячмінь	Пшениця	Кукурудза	Соевий шрот	Соняшникова олія	Вапняк	Сіль	БВМД
Вміст, %	25,0	22,0	20,0	26,0	1,0	1,5	0,5	4,0

На першому етапі виробничих випробувань протягом робочої зміни фіксували показники продуктивності та потужності експандера в базовій комплектації, всього було перероблено 58534 кг комбікорму. Під час виробничих випробувань розробленої прес-матриці у складі експандера OEE 20 NG було перероблено 4653 кг комбікорму, вихідною вологістю 14,3 %. Продуктивність роботи експандера вимірювали шляхом зважування наважки отриманого продукту через рівні проміжки часу, потужність на привід фіксували за показниками автоматизованої системи керування експандером Electrical Control System of the ExPander (ESEP). Питому енергоємність визначали як відношення потужності на привід до продуктивності. Протягом випробувань зупинок через технічні проблеми з розробленою прес-матрицею не було.

Для оцінки якості отриманого експандату використовували два показники – об’ємну щільність та індекс водопоглинання (WAI). Визначення вказаних показників проводили згідно методик, приведених в п. 3.4.

Результати виробничих випробувань приведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати виробничих випробувань розробленої прес-матриці у складі експандера ОЕЕ 20 NG

№ з/п	Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	%
1	Продуктивність, кг/год	980	1015	+ 3,6
2	Потужність на привід, Вт	33200	29600	- 10,8
3	Питома енергоємність, Вт·год/кг	33,9	29,2	- 13,9
4	Об'ємна щільність, кг/м ³	330,25	329,3	- 0,3
5	Індекс водопоглинання (WAI), г/г	3,36	3,41	+ 1,5

Таким чином для удосконаленого експандера фіксуємо збільшення продуктивності на 3,6 % та зменшення потужності на привід на 10,8 % що разом забезпечує зменшення питомої енергоємності на 13,9 %. При цьому показники якості - об'ємна щільність та індекс водопоглинання мають відхилення від базової конструкції у межах 0,3-1,5 %, тобто при збереженні якісних показників на відповідному до вимог рівні отримаємо зменшення енергоємності процесу.

Як було сказано у розділі 1, основне призначення експандування – забезпечення знищення патогенних мікроорганізмів. Дослідження цього показника нами не проводилися, але зважаючи на те, що баротермічний режим в робочій камері експандера удосконаленої конструкції не відрізнявся від базового, можна стверджувати, що рівень біобезпеки експериментального експандату знаходиться на належному рівні.

5.2 Впровадження результатів досліджень

Дослідження викладені в дисертаційній роботі проводились в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) відповідно до плану науково-дослідних робіт «Розроблення та удосконалення мехатронних систем виробничих процесів у тваринництві», № ДР 0121U109891, 2021–2025 р.р. та

«Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки», № ДР 0120U100322, 2020–2022 р.р. (додаток Д).

Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджені та використані на виробництві в приватному акціонерному товаристві «Виробниче об'єднання «Восход», м. Дніпро. Підприємство отримало дослідний зразок і конструкторську документацію на розроблений експандер комбікормів та зацікавлене у виготовленні дослідної партії експандера комбікормів у кількості п'ять одиниць для виробничих випробувань і подальшого серійного виробництва (додаток Е).

Результати досліджень впроваджено у навчальний процес інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ (додаток Ж):

– дисципліна «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 «Агроінженерія». Лабораторна робота «Дослідження процесу експандування комбікормів». Мета роботи – визначення оптимальних конструкційно-технологічних параметрів експандера комбікормів при роботі з різними матеріалами. Матеріальне забезпечення – дослідна установка та методики випробувань згідно дисертаційної роботи.

– дисципліна «Чисельне моделювання процесів сільськогосподарського виробництва» для здобувачів освітнього рівня магістр за спеціальністю 208 «Агроінженерія». Завдання до виконання курсової роботи «Симуляція деформації зернової суміші». Мета – визначити параметри деформації зерна в залежності від його фізико-механічних властивостей.

5.3 Техніко-економічна ефективність застосування розробленого експандера

Техніко-економічну оцінку удосконаленого експандера комбікормів проводили згідно ДСТУ 4397-2005 [172] і ГСТУ 3-37-4-94 [173] та використовуючи методичні рекомендації [174, 175, 176, 177].

Вихідними даними для розрахунків були результати виробничих випробувань, приведені в п. 5.1 та враховуючи потреби в комбікормі «Стартер» для поросят вагою від 10 до 35 кг на репродукторній свинофермі ТОВ «НВП «Глобинський свинокомплекс» з виробничою потужністю 50000 поросят після дорощування на рік. У відповідності до даних підприємства та враховуючи рекомендації [13] добова потреба в комбікормі складає 0,6 кг на початку періоду дорощування та 1,3 кг по закінченню, термін утримання – 47 діб. Так як на репродукторній свинофермі ТОВ «НВП «Глобинський свинокомплекс» використовують потоково-ритмічну технологію виробництва свинини з ритмом виробництва 7 діб, маємо вісім технологічних груп поросят на дорощуванні зі зміщенням за віком, рівним величині ритму виробництва. Таким чином можна прийняти середньодобову потребу в комбікормі на голову рівній середній за період – 0,8 кг. Ці та інші вихідні дані приведено в табл. 5.3

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для розрахунку економічних показників

№ з/п	Показник	Значення
1	Виробнича потужність ферми, гол/рік	50000
2	Термін утримання поросят на дорощуванні, діб	47
3	Одночасне поголів'я поросят на дорощуванні, гол	6438
4	Добова потреба в комбікормі «Стартер», кг/гол	0,8
5	Добова потреба в комбікормі «Стартер» по фермі, кг	5151

Результати розрахунків техніко-економічних показників удосконаленого експандера комбікормів наведено в табл. 5.4.

Результати техніко-економічної оцінки удосконаленого експандера свідчать, що в порівнянні з базовою комплектацією прес-матриці спостерігаємо зменшення операційних витрат, які складають біля 7 %. Це досягається за рахунок зменшення витрат на оплату праці (через збільшення продуктивності) та витрат на електроенергію (через зменшення питомої енергоємності). При цьому, через збільшення балансової вартості, зростають амортизаційні відрахування та витрати на ТО та ремонт.

Таблиця 5.4 – Техніко-економічні показники удосконаленого експандера комбікормів

№ з/п	Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	%
1	Добова потреба в комбікормі по фермі, т	5,151	5,151	0
2	Річна потреба в комбікормі по фермі, т	1880	1880	0
3	Продуктивність експандера, т/год	0,98	1,015	+ 3,6
4	Потужність на привід експандера, кВт	33,2	29,6	- 10,8
5	Кількість операторів, чол.	1	1	0
6	Час роботи обладнання протягом доби, год	5,3	5,1	- 3,4
7	Вартість експандера, грн.	720000,0	786000,0	+ 9,2
8	Витрати праці, люд-год.	1918,5	1852,3	- 3,4
9	Споживання електроенергії, кВт·год.	63693,7	54829,0	- 13,9
10	Витрати на заробітну платню, грн.	230218,2	222279,6	- 3,4
11	Витрати на електроенергію, грн.	343945,9	296076,4	- 13,9
12	Амортизаційні відрахування, грн.	57600,0	62880,0	+ 9,2
13	Відрахування на ремонт і ТО, грн.	43200,0	47160,0	+ 9,2
14	Загальні операційні витрати, грн	674964,1	628396,0	- 6,9
15	Питомі операційні витрати втрати, грн/т	359,0	334,2	- 6,9
16	Інвестиції в переобладнання, грн	-	66000,0	-
17	Річний економічний ефект, грн	-	46568,1	-
18	Питомий річний економічний ефект, грн./т	-	24,8	-
19	Строк окупності інвестицій в переобладнання експандера, років	-	1,4	-

При річному навантаженні 1880 т економія питомих операційних витрат складе 24,8 грн/т або 46568,1 грн на весь об'єм робіт, що дозволяє повернути інвестиції в переобладнання експандера за період 1,4 роки.

5.4 Висновки з розділу

1. Виробничі випробування експандера комбікормів оснащеного розробленою прес-матрицею із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами (відношення радіуса увігнутого конуса до радіуса звуження циліндра формуючої насадки $R_c/R_r = 6,33$, зазор між конусом та гайкою $\delta_c = 3,7$ мм, частота обертання гвинта $n = 54,4$ об/хв) показали збільшення продуктивності на 3,6 % та

зменшення потужності на привід на 10,8 %, що разом забезпечує зменшення питомої енергоємності на 13,9 %. При цьому показники якості – об’ємна щільність та індекс водопоглинання мають відхилення від базової конструкції у межах 0,3–1,5 %, тобто при збереженні якісних показників на відповідному до вимог рівні отримаємо зменшення енергоємності процесу.

2. Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджені та використані на виробництві в приватному акціонерному товаристві «Виробниче об’єднання «Восход», м. Дніпро. Підприємство отримало дослідний зразок і конструкторську документацію на розроблений експандер комбікормів та зацікавлене у виготовленні дослідної партії експандера комбікормів у кількості п’ять одиниць для виробничих випробувань і подальшого серійного виробництва. Крім того, результати досліджень впроваджено у навчальний процес інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ для здобувачів спеціальності 208 «Агроінженерія» першого (бакалаврського) та другого (магістерського) освітніх рівнів.

3. Результати техніко-економічної оцінки удосконаленого експандера свідчать, що в порівнянні з базовою комплектацією прес-матриці спостерігається зменшення операційних витрат, які складають біля 7 %. Це досягається за рахунок зменшення витрат на оплату праці (через збільшення продуктивності) та витрат на електроенергію (через зменшення питомої енергоємності). При цьому, через збільшення балансової вартості, зростають амортизаційні відрахування та витрати на ТО та ремонт. При річному навантаженні 1880 т економія питомих операційних витрат складе 24,8 грн/т або 46568,1 грн на весь об’єм робіт, що дозволяє повернути інвестиції в переобладнання експандера за період 1,4 роки.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності процесу приготування повнораціонних комбікормів з їх одночасним знезараженням шляхом удосконалення конструкції експандера і обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. Обґрунтована конструктивно-технологічна схеми експандера комбікормів із удосконаленою формуючою насадкою, яка відрізняється тим, що складається з звуженої області циліндра, увігнутого конуса і корончатої гайки. При переміщенні нагрітої пластифікованої маси до звуженої області формуючої насадки відбувається підвищення тиску, а після її проходження різке його зменшення. Це досягається через збільшення об'єму робочої області за рахунок форми увігнутого конуса. В результаті чого пластифікована маса розширяється і виходить через корончасту гайку з формуючої насадки утворюючи при цьому експандати.

2. Для оцінки правильності обраних моделей і фізико-математичного апарата, проведено чисельне моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші в циліндричній ємності під дією поршня в STAR-CCM+. Дослідження процесу стискання компонентів кормової суміші були проведені для різних їх фізико-механічних властивостей, а саме середній діаметр частинок суміші D_{μ} , модуль пружності Юнга E_p , коефіцієнт Пуассона μ_p , робота когезії на одиницю площі W_p на трьох рівнях їх фіксації. В результаті чисельного моделювання для кожної комбінації фізико-механічних властивостей отримано закономірності пружного гістерезису компонентів корму. В результаті обробки даних моделювання отримані рівняння регресії зміни площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta p}$ і коефіцієнта механічних втрат Ψ , висоти отриманого експандату h_a від середнього діаметра частинок суміші D_{μ} , модуля пружності Юнга E_p , коефіцієнта Пуассона μ_p і роботи когезії на одиницю площі W_p . Порівнюючи отримані теоретичні залежності із результатами лабораторних досліджень встановлено, що при наступних фізико-механічних властивостях компонентів корму $D_{\mu} = 0,5$ мм, $E_p = 22,3$ МПа, $\mu_p = 0,31$,

$W_p = 0,49$ Н/м технологічні параметри експандування є найбільш оптимальними, чисельне моделювання процесу його стискання є найбільш адекватним.

3. В результаті чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів для трьох варіантів форми конуса (I – звичайний, II – заокруглений, III – увігнутий) встановлено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в області формуючої насадки за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$. Аналіз отриманих даних дає змогу стверджувати, що формуюча насадка із звичайним конусом забезпечує найбільші сили стиску поршня і конуса – 1415 ± 41 Н і 231 ± 35 Н відповідно. Для заокругленого конуса сили стиску поршня і конуса складають 1162 ± 63 Н і 177 ± 20 Н відповідно. Для увігнутого конуса сили стиску поршня і конуса складають 740 ± 109 Н і 84 ± 21 Н відповідно. Для кожного із варіантів конусу визначено зміну об'ємної маси, загальну силу стиску від абсолютної деформації компонентів корму Δx . Встановлено, що всі три варіанти забезпечують практично однакову щільність суміші на виході $223\text{--}251$ кг/м³. Так як найменша сила стиску спостерігається для увігнутого конуса, то приймаємо його за основний конструктивний елемент, параметри якого обґрунтуємо далі. В результаті чисельного моделювання визначено динаміку і розподіл компонентів кормової суміші в порожнині між циліндром формуючої насадки і конусом за силою тиску F_p і силою контактної взаємодії компонентів корму між собою $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$ в залежності від радіуса звуження циліндра формуючої насадки R_r , радіуса увігнутого конуса R_c і відстані між конусом і циліндром δ_c . Встановлені рівняння регресії щільності ρ_{out} пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки і максимального тиску P_{max} , який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку вздовж її руху від зазначених факторів досліджень. В результаті вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації критеріїв досліджень, а саме зменшення тиску P_{max} і підвищення щільності ρ_{out} , на основі знаходження оптимуму мультиплікативної цільової функції встановлені раціональні конструктивні параметри формуючої

насадки: $R_r = 14,2$ мм, $R_c = 89,9$ мм, $\delta_c = 3,7$ мм. При цьому $\rho_{out} = 331,2$ кг/м³ і $P_{max} = 1,84$ МПа.

4. Вирішуючи компромісну задачу, яка полягає у мінімізації коефіцієнта механічних втрат Ψ і максимізації щільності отриманих експандатів ρ_a , отримуємо наступні раціональні технологічні параметри при яких процес експандування кормів є найбільш ефективним: $D_\mu = 0,5$ мм, $T = 137,0$ °С, $W = 20,7$ %, $\rho_a = 289,2$ кг/м³. Для порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень складено програму на мові програмування Wolfram, яка дозволяє зв'язати технологічні параметри процесу експандування (W , T) із фізико-механічними властивостями суміші комбікормів (E_p , μ_p , W_p). Для раціональних технологічних параметрів ($D_\mu = 0,5$ мм, $W = 20,7$ %, $T = 137,0$ °С) маємо наступні фізико-механічні властивості $E_p = 22,3$ МПа, $\mu_p = 0,31$, $W_p = 0,49$ Н/м. При цьому $S_{\Delta P} = 0,772$ МПа, $\Psi = 1,519$, $h_a = 13,2$ мм. Порівняння залежностей $S_{\Delta P}^E(D_\mu)$ і $S_{\Delta P}^T(D_\mu)$, $\Psi^E(D_\mu)$ і $\Psi^T(D_\mu)$, $h_a^E(D_\mu)$ і $h_a^T(D_\mu)$ проведено при умові раціональних технологічних параметрів і встановлено достатньо високий коефіцієнт кореляції Пірсона (0,94–0,99).

5. В результаті експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів встановлені залежності зміни продуктивності експандера Q (4.16), його споживаної потужності N (4.17), питомої енергоємності процесу експандування q (4.20) і щільності отриманих експандатів ρ (4.22) від вологості комбікорму W , зазору між конусом та гайкою δ_c , частоти обертання гвинта n . Знайшовши в програмному пакеті Wolfram Cloud значення факторів досліджень, при якому спостерігається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування $q = 30,7$ кВт·год/т встановлено, що $W = 27,1$ %, $\delta_c = 3,7$ мм, $n = 54,4$ об/хв. При цьому продуктивність складала $Q = 28,8$ кг/год, споживана потужність $N = 879$ Вт, а щільність експандатів $\rho = 336$ кг/м³. Так як параметр зазор між конусом та гайкою δ_c був фактором досліджень як у теоретичних, так і експериментальних дослідженнях, тому порівняння проведено саме за цим фактором. Для визначених раціональних параметрів побудовані відповідні графіки залежностей (рис. 4.14) і розрахований коефіцієнт кореляції Пірсона, який становить 0,94.

6. Результати техніко-економічної оцінки удосконаленого експандера свідчать, що в порівнянні з базовою комплектацією прес-матриці спостерігається зменшення операційних витрат, які складають біля 7 %. Це досягається за рахунок зменшення витрат на оплату праці (через збільшення продуктивності) та витрат на електроенергію (через зменшення питомої енергоємності). При цьому, через збільшення балансової вартості, зростають амортизаційні відрахування та витрати на ТО та ремонт. При річному навантаженні 1880 т економія питомих операційних витрат складе 24,8 грн/т або 46568,1 грн на весь об'єм робіт, що дозволяє повернути інвестиції в переобладнання експандера за період 1,4 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., Малєгін Р. Д., Лупко К. О., Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0.
2. Bedford M. R., Choct M., O'Neill H. V. M. (2016). Nutrition experiments in pigs and poultry: a practical guide. CABI Publishing. 162 p. ISBN: 9781780647005
3. Проваторов Г. В., Ладика В. І., Бондарчук Л. В. (2018). Норми годівлі, раціони і поживність кормів для різних видів сільсько-господарських тварин. Довідник. Суми: «Університетська книга». 488 с. ISBN 978-966-680-370-5.
4. Левченко В. І., Заярнюк В. П., Папченко І. В., Абдуллаєв Ш. М., Богатко Л. М., Костенко Л. О., Соколюк В. М., Шарандак В. В., Шульга П. Г. (2005). Хвороби свиней: [навчальний посібник] / за ред. В.І. Левченка і І.В. Папченка. Біла Церква. 168 с. ISSN 966-7417-63-8.
5. Соляник М. Б., Коваленко В. Ф. (2018). Що таке африканська чума свиней (етіологія захворювання, симптоми, виявлення, сучасні методи боротьби). Сучасні методи боротьби з АЧС, вплив ферментованих кормів: інформ. збірник: (зібрання матеріалів за 2005-2018 рр.). Херсон: Олді-плюс. 70 с.
6. Borojeni F. G., Svihus B., von Reichenbach H. G., Zentek J. (2016). The effects of hydrothermal processing on feed hygiene, nutrient availability, intestinal microbiota and morphology in poultry. A review. Anim. Feed Sci. Technol., 220: 187–215. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2016.07.010
7. Єгоров Б. В. (2011). Технологія виробництва комбикормів [Текст]: підруч. для вищ. навч. закладів. Одеса.: Друкарський дім. 448 с.
8. Алиев Э. Б., Алиева О. Ю., Малегин Р. Д. (2020). Безотходная переработка семян сафлора в корма для органического животноводства. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (14 травня 2020 р.). Запоріжжя. ІОК НААН, 80–81.

9. What does global feed production reveal about the future of agri-food? (2024). Alltech. <https://www.alltech.com/agri-food-outlook>.

10. Ібатуллін І. І., Мельник Ю. Ф., Отченашко В. В., Сичов М. Ю., Кривенок М. Я., Чигрин А. І., Кондратюк В. М., Ільчук І. І., Уманець Д. П., Яценко О. В., Баланчук І. М., Голубєв М. І., Кононенко В. К., Столюк В. Д., Панасенко Ю. О. (2013). Практикум з годівлі сільськогосподарських тварин: навчальний посібник / під ред. академіка НААН України І. І. Ібатулліна. Житомир: Полісся. 442 с.

11. Alagawany M., Elnesr, S. S., Farag, M. R., Tiwari, R., Yattoo, M. I. Karthik K., Michalak, I. and Dhama K. (2021). Nutritional significance of amino acids, vitamins, and minerals as nutraceuticals in poultry production and health – a comprehensive review. *Veterinary Quarterly*, 41(1): 1–29.

12. Chassé É., Guay F., Bach Knudsen K. E., Zijlstra R. T., Létourneau-Montminy M. P. (2021). Toward precisenutrient value of feed in growing pigs: effect of meal size, frequency and dietary fibre on nutrient utilisation. *Animal*, 11 (9): 2598, DOI: 10.3390/ani11092598

13. Повод М., Бондарська О., Лихач В., Жижка С., Нечмілов В., Дудін В. (2021). Технологія виробництва і переробки продукції свинарства: навчальний посібник. Київ: Науково-методичний центр ВФПО. 360 с.

14. Behnke K. C., Beyer R. S. (2002) Effect of feed processing on broiler performance. III International Seminar on Poultry Production and Pathology, Santiago, Chile.

15. Kliebenstein J., Stender D., Mabry J., Huber G. (2008). Costs, Returns, Production and Financial Efficiency of Niche Pork Production in 2007, Iowa Pork Industry Center, November. 8 p. <https://www.leopold.iastate.edu/files/pubs-and-papers/2008-11-costs-returns-production-and-financial-efficiency-niche-pork-production-2007.pdf>

16. Peisker M. (2006) Feed processing – Impacts on nutritive value and hygienic status in broiler feeds. *Proceedings of the Australian Poultry Science Symposium*, 18: 7–16. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20073009426>

17. Aliiev E., Maliehin R., Ivliev V., Aliieva O. (2021). Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed. *Scientific Horizons*, 24 (2): 16–26. DOI: 10.48077/scihor.24(2).2021.16-26.

18. ДСТУ 2421-94. (1994). Комбікорми. Терміни та визначення: Чинний від 01.01.95. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 32 с.

19. ДСТУ 4120-2002. (2003). Комбікорми повнораціонні для сільськогосподарської птиці. Технічні умови: Чинний від 2003-04-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 12 с.

20. ДСТУ 4124-2002. (2003). Комбікорми повнораціонні для свиней. Технічні умови: Чинний від 2004-01-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 13 с.

21. ДСТУ 4482:2005. (2006). Премікси. Технічні умови: Уведено вперше 25 листоп. 2005 р. № 338 з 2006-10-01 (зі скасуванням в Україні ГОСТ 26753.0-85) / НАУ, ОНАХТ. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України. 38 с.

22. ДСТУ 4507:2005. (2007). Комбікорми для контрольної відгодівлі свиней. Технічні умови. Вид. офіц. Зі скасуванням ГОСТ 16955-71; чинний від 2007-04-01. – Київ: Держспоживстандарт України. 11 с.

23. ДСТУ 4508:2005. (2007). Комбікорми-концентрати для свиней. Технічні умови. Вид. офіц. Зі скасуванням ГОСТ 9267-68; чинний від 2008-01-01. Київ: Держспоживстандарт України. 11 с.

24. ДСТУ 8024:2015. (2017). Комбікорми гранульовані. Загальні технічні умови. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 8 с.

25. ДСТУ 8530:2015. (2017). Комбікорми для великої рогатої худоби. Технічні умови. Чинний від 2017-07-01. Київ: УкрНДНЦ. 11 с.

26. ДСТУ 8458:2015. (2017). Комбікорми повнораціонні для беконної відгодівлі свиней. Технічні умови. Чинний від 2017-07-01. Київ: УкрНДНЦ. 14 с.

27. ДСТУ 8214:2015. (2017). Комбікорми для різновікових груп коропа. Технічні умови. Чинний від 2017-04-01. Київ: УкрНДНЦ. 8 с.

28. ДСТУ 8173:2015. (2017). Комбікорми для овець. Технічні умови. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 9 с.

29. ДСТУ 8167:2015. (2018). Комбікорми для свиней. Технічні умови. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 14 с.

30. ДСТУ 3570-97 (ГОСТ 13496.7-97). (1999). Зерно фуражне, продукти його переробки, комбікорми. Методи визначення токсичності: На зміну ГОСТ 13496.7-92; Чинний від 1999-07-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 15 с.

31. ДСТУ 3698-98 (ГОСТ 13496.12-98). (1999). Комбікорми. Комбікормова сировина. Метод визначення загальної кислотності: Чинний від 1999-07-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 12 с.

32. ДСТУ 3782-98 (ГОСТ 13496.1-98). (1999). Комбікорми. Комбікормова сировина. Методи визначення вмісту натрію та хлориду натрію: Чинний від 2000-01-01. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України. 14 с.

33. ДСТУ 4687:2006. (2007). Комбікорми, премікси, вітамінні препарати, продукція птахівництва. Методи визначення вітамінів А, В, В2 та каратиноїдів. Вид. офіц. Чинний від 2007-07-01. Київ: Держспоживстандарт України. 16 с.

34. ДСТУ 7169:2010. (2011). Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення вмісту азоту і сирого протеїну. Чинний від 2011-07-01. Київ: Держспоживстандарт України. 17 с.

35. ДСТУ 8048:2015. (2016). Комбікорми. Комбікормова сировина. Метод визначення кислотного числа жиру. Чинний від 2017-07-01. Київ: УкрНДНЦ. 7 с.

36. ДСТУ 8050:2015. (2017). Корми для тварин, сировина для виготовлення повнораціонних сумішей, виділення тварин. Визначення вмісту миш'яку та ртуті методом атомно-абсорбційної спектрометрії. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 11 с.

37. ДСТУ 8100:2015. (2016). Корми, комбікорми. Аналітичний метод мікроскопічної ідентифікації компонентів тваринного походження. – Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 6 с.

38. ДСТУ 8128:2015. (2018). Корми, комбікорми. Метод визначення кислотодетергентної клітковини. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 6 с.

39. ДСТУ 8129:2015. (2017). Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Метод визначання цистину і метіоніну. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 8 с.

40. ДСТУ 8182:2015. (2017). Корми для тварин. Метод визначання активності інгібіторів трипсину. Чинний від 2017-01-01. Київ: УкрНДНЦ. 9 с.

41. Main quality control points in feed mills. (2024). pig333.com. Professional Pig Community. https://www.pig333.com/articles/quality-control-in-swine-feed-mills_18871/
42. Jones F. T. (2010). Mixing feeds and mixer test procedures for batch mixers. *Feed Additive Compendium*: 105–108. <https://pdfcoffee.com/feed-quality-quality-control-in-feed-manufacturing-pdf-free.html>
43. Behnke K. C. (2005). Mixing and uniformity issues in ruminant diets. Penn State Dairy Cattle Nutrition Workshop. <https://www.txanc.org/Proceedings/1996/Mixing-and-Nutrient-Uniformity-Issues-in-Ruminant-Diets.pdf>
44. Herrman T. (2002). Micro-Ingredient Optimization: Particle Size and Density Relationship on Mixing Uniformity. GRSI-1001, K-State Research and Extension Service. Kansas State University, Manhattan.
45. Van Barneveld R. J., (1999). Chemical and physical characteristics of grains related to variability in energy and amino acid availability in pigs: a review. *Aust. J. Agric. Res.*, 50: 667–687.
46. Zijlstra R. T., de Lange C. F. M., Patience J. F., (1999). Nutritional value of wheat for growing pigs: chemical composition and digestible energy content. *Can. J. Anim. Sci.*, 79: 187–194.
47. OIE list of antimicrobials of veterinary importance. (2007). Appendix 3.9.3. Guidelines for the responsible and prudent use of antimicrobial agents in veterinary medicine. *Terrestrial Animal Health Code, Sixteenth Edition*, 549–556.
48. O’Meara F. M., Gardiner G. E., Clarke D., Cummins W., O’Doherty J. V., Lawlor P. G. (2020). Microbiological assessment of liquid feed for finisher pigs on commercial pig units. *J. Appl. Microbiol.*, 130: 356–369. DOI: 10.1111/jam.14785.
49. Peisker M. (1992). High-temperature-short-time conditioning: physical and chemical changes during expansion. *Feed Int*, 2: 5–8.
50. Standard A. S. A. E. (1994). Wafers, Pellet and Crumbles-Definitions and Methode for Determining Specific Weight, Durability and Moisture Content. *Feed Manufacturing Tech IV*. American Feed Industry Association, Inc, Arlington.

51. Thomas M., Van der Poel A. F. B. (1996). Physical quality of pelleted animal feed. 1. Criteria for pellet quality. *Animal Feed Science Technology*, 61: 89–112 DOI: 10.1016/0377-8401(96)00949-2
52. Болтянська Н. І., Комар А. С. (2019). Взаємодія пресуючого ролика і матеріалу в прес-грануляторі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 19 (4): 260–269. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-260-269
53. Пацула А. Н. (2015). Аналіз технічного забезпечення технологічного процесу створення кормових пелет з макух насіння олійних культур. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 5 (2): 173–180.
54. Rollins D. (1996). Expanders – performance evaluation. *Proc. Southeastern Poultry and Egg Assn. Feed Mill Management Seminar*, Atlanta, GA.
55. Moscicki L. (2003). Effect of screw configuration on quality and SME value of corn extrudate. *Teka commission of motorization power industry in agriculture*, 3: 182–186.
56. Jusko S., Mitrus M., Moscicki L., Rejak A., Wojtowicz A. (2001). Wpływ geometrii układu plastyfikującego na przebieg procesu ekstruzji surowców roślinnych (in Polish). *Inżynieria Rolnicza*, 2: 124–129.
57. Сапа В. Ю. (2009). Совершенствование конструктивно-режимных параметров экспандера: дис.... канд. техн. наук. Оренбург. 161 с.
58. Moscicki L., Mitrus M., Wojtowicz A. (2007). Technika ekstruzji przetworstwie rolno-spożywczym (in Polish). Warszawa: PWRiL. 222 p.
59. Huimin Li. (2021). The effect of expanded and extruded process on pellets physical properties and in sacco rumen degradability: master's Thesis. 40 p. <https://hdl.handle.net/11250/2831222>.
60. Солових С. І., Косяк С. В. (2010). Екпандування кормосумішів для великої рогатої худоби із введенням зеленої маси. *Аграрний вісник Причорномор'я*, 55: 1–6.
61. Болтянська Н. І. (2020). Доцільність виробництва кормів методом екструдування. Тези XV Міжнародної науково-практичної конференції «Обуховські читання» (м. Київ, 10 березня 2020 р.): НУБіП: 36–38.
62. Дяченко Л. С., Бомко В. С., Сивик Т. Л. (2015). Основи технології комбікормового виробництва: навч. посібник. Біла Церква. 306 с.

63. Leonard W., Zhang P., Ying D. (2020). Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19 (1): 218–246. DOI: 10.1111/1541- 4337.12514.

64. Bhople S., Singh M. (2017). Effect of iron enrichment on the physical properties of rice based extruded snacks, *International Journal of Agriculture Sciences*. 9(24): 4282–4284.

65. Kanojia V., Singh M. (2016). Production of Value Added Snacks from Rice Broken and Okara by Extrusion Cooking Technology, *International Journal of Agriculture Sciences*; 8 (51): 2321–2325.

66. Alam S. A., Järvinen J., Kokkonen H. (2016). Factors affecting structural properties and in vitro starch digestibility of extruded starchy foams containing bran. *Journal of Cereal Science*, 71: 190–197. DOI: 10.1016/J. jcs.2016.08.018.

67. Patil R. T., Berrios J. J., Tang J., Pan J., Swanson B. (2005). Physical Characteristics of Food Extrudates – A Review, An ASAE Annual International Meeting, Paper No. 056166, Tampa Convention Center, Tampa, Florida, 1–17.

68. Yousf N., Nazir F., Salim R. (2017). Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6 (6): 2165–2168.

69. Bajaj S. R., Singhal R. S. (2019). Effect of extrusion processing and hydrocolloids on the stability of added vitamin B12 and physico-functional properties of the fortified puffed extrudates. *LWT – Food Science and Technology*, 101: 32–39. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.11.011.

70. Awolu O. O., Oluwaferanmi P. M., Fafowora O. I. (2015). Optimization of the extrusion process for the production of ready-to-eat snack from rice, cassava and kersting's groundnut composite flours. *LWT – Food Science and Technology*, 64 (1): 18–24. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.05.025.

71. Castells M., Marín S., Sanchis V. (2005). Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: A review / [et al.] // *Food Additives and Contaminants*, 22 (2): 150–157. DOI: 10.1080/02652030500037969.

72. Amandus Kahl GmbH. (2022). Technical materials, laboratory reports (personal communication). Amandus Kahl GmbH: website. URL: www.akahl.com.

73. Hancock J. D. (2001). Extrusion technologies to produce quality pig feed. *Feed Technol*, 5 (3): 18–20.

74. Потапов В. О., Білий Д. В. (2016). Розробка рекуперативного теплообмінного пристрою для екструдера з переробки харчової сировини. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 2 (24): 233–246.

75. Дмитренко В. П. (2018). Експериментальне обладнання для дослідження шнекового робочого органа екструдера. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1 (100): 68–74.

76. Ляшук О. Л., Третяков О. Л., Дмитренко В. П., Колесник О. А. (2015). Технологічність конструкцій механізмів гвинтових робочих органів екструдерів. *Сільськогосподарські машини*, 33: 94–101.

77. Морозова Л. П. (2022). Перспективи використання екструдованих кормів у годівлі сільськогосподарських тварин. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи розвитку науки, освіти і технологій в контексті євроінтеграції»*, 49–50.

78. Кондратюк Д., Петренко В. (2014). Технологічні передумови екструдювання зернових матеріалів. *Матеріали XVIII наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, 29.

79. Van Zuilichem D.J. (1992). *Extrusion Cooking. Craft or Science?* Ph.D. thesis, Wageningen University, Netherlands.

80. Mościcki L., Mitrus M., Wojtowicz A. (2007) *Technika ekstruzji w przetwórstwie rolno-spożywczym* (in Polish), PWRiL, Warszawa. ISBN: 978-83-09-01027-2

81. *The Difference Between Anderson Expanders and Extruders*. (2024). Anderson International Corp. <https://www.andersonintl.com/the-difference-between-anderson-expanders-and-extruders/>

82. Improve feed quality and increase flexibility. Feed expander. (2024). Andritz. <https://www.andritz.com/resource/blob/19090/b5b2565f67dff86dd2e42940c39d4036/fb-feed-expander-en-data.pdf>

83. Lundblad K. K., Issa S., Hancock J. D., Behnke K. C., McKinney L.J., Alavi S., Prestløkken E., Fledderus J., Sørensen M. (2011). Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 169: 208–217.

84. Pipa F., Frank G. (1989). High-pressure conditioning with annular gap expander. A new way of feed processing: *Advances in Feed Technology*, (2), Verlag Moritz Schäfer, Detmold: 22–30.

85. Expander. Pressure conditioning by amandus kahl. (2024). https://www.akahl.com/fileadmin/media/akahl/Propsekte/Expander/Expander_Pressure_Conditioning_by_AMANDUS_KAHL.pdf

86. Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П. (2020). Вплив технологічних параметрів процесу екструзії та технічних параметрів екструдера з пружним гвинтовим елементом на індекс розширення екструдату. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 2 (109): 97–104. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-2-10

87. Electrical Control System of the ExPander. (2024). https://www.akahl.com/fileadmin/media/akahl/bilder/verfahren_maschinen/automatisierte_steuering/elektrische_steuering_expander/PDF/ESEP_englisch.pdf

88. Navarro G. H., Lopez C. C., Garcia E., Forat S. M. (2001). Evaluacion de la soja integral procesada mediante expansion en dietas practicas de pollo de engorde. *American Soybean Association. Soya Noticias*, 265: 14–22.

89. Zuilichem D. J. van, Poel A. F. B. van der, Cruz U., Stolp W., Wolters I. (1996). Thermo mechanical treatments of soya beans. Full-fat Soya: materials 2nd International conference. Hungary: ASA: 99–117.

90. Долуд М., Вальтер Г. (2016). КАHL – експандований структурований корм для поросят, свиней та свиноматок. *Корма и кормление*, 8: 40–44.

91. White J. L., Potente H. (2003). *Screw Extrusion*. Munich: Hanser. ISBN 3446196242.

92. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. (2019). Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (18): 2979–2998. DOI: 10.1080/10408398.2018.1480007.

93. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: A review / S. Singh, // *International Journal of Food Science and Technology*, 42 (8): 916–929. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x.

94. Wang P., Fu Y., Wang L. (2017). Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch. *Starch/Staerke*, 69: 7–8. DOI: 10.1002/star.201600201.

95. Bordoloi R., Ganguly S. (2014). Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, 2 (1): 1–3.

96. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. (2017). Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС. ISBN 978-617-7353-59-0.

97. Rzedzicki Z., Sobota A., Zarzycki P. (2004). Influence of pea hulls on the twin screw extrusion-cooking process of cereal mixtures and the physical properties of the extrudate. *International Agrophysics*, 18 (1): 73–81.

98. Yagci S., Gögüs F. (2009). Development of extruded snack from food by-products: A response surface analysis. *Journal of Food Process Engineering*, 32 (4): 565–586. DOI: 10.1111/j.1745-4530.2007.00232.x

99. Ačkar Đ., Jozinović A., Babić J. (2018). Resolving the problem of poor expansion in corn extrudates enriched with food industry by-products. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47: 517–524. DOI: 10.1016/j.ifset.2018.05.004.

100. Dar A. H., Sharma H. K., Kumar N. (2014). Effect of extrusion temperature on the microstructure, textural and functional attributes of carrot pomacebased extrudates. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38 (1): 212–222. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2012.00767.x.

101. Dehghan-Shoar Z., Hardacre A. K., Brennan C. S. (2010). The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene / Z. DehghanShoar. *Food Chemistry*, 123 (4): 1117–1122. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.05.071.

102. Stojceska V., Ainsworth P., Plunkett A. (2009). The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. *Food Chemistry*. 114 (1): 226–232. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.09.043.

103. Батієвська Н. О. (2020) Удосконалення технології гранулювання при виробництві комбикормів. Дис. ... доктора філософії за спец. 181 Харчові технології, Одеса. 208 с.

104. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1 (116): 51–57. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-6.

105. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. *Корми і факти*, 9 (145): 8–10.

106. Алієв Е., Лінко М. (2022). Експандоване приготування кормів. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (14–16 травня 2022 р.). Кропивницький: ЦНТУ, 38–40.

107. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2023). Експандування насіння сої на кормові цілі. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (15 березня 2022 р.). ІОК НААН, 64–65.

108. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла

Л., Долгіх Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., Лупко К., Лінко М., Малєгін Р. Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322.

109. Guy, R. (2001). Extrusion Cooking. Technologies and Applications. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 206 p. Retrieved from: https://mastermilk.com/uploads/biblio/extrusion_cooking_techniques_applications.pdf

110. Nielsen S. K. (2016). Numerical modeling of the wood pelleting process: master thesis. 121 p.

111. Rodríguez E. O. (2009). Numerical simulations of reactive extrusion in twin screw extruders: thesis for the degree of Doctor of Philosophy in chemical engineering. Waterloo, Ontario, Canada. 254 p.

112. Lewandowski A., Wilczyn´ski K. (2022). Modeling of twin screw extrusion of polymeric materials. *Polymers*, 14, 274. 28 p. DOI: 10.3390/polym14020274.

113. Darnell W. H., Mol E. A. J. (1956). Solids Conveying in Extruders. *SPE Journal*, 12: 20–29.

114. Cundall P. A., Strack O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29: 47–65.

115. Aliev E. B., Bandura V. M., Pryshliak V. M., Yaropud V. M., Trukhanska O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1): 95–104.

116. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М. (2017). Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 180: 67–71.

117. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. (2023). Результати лабораторних досліджень процесу виготовлення паливних брикетів з ріпакової соломи. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2 (121): 23–31. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-3

118. Говоруха В. Б., Луц П. М., Кисельов О. В. (2023). Фізико-математична модель процесу пресування паливних брикетів з рослинних матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*, 3 (110): 67–74. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-8

119. Дідур В., Верещага А. (2019). Методика вимірювання зусилля у шнековому пресі при віджимі олії з рослинної сировини. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 19 (2): 41–47. DOI: 10.31388/2078-0877-19-2-41-47

120. Дідур В. В., Кутковецька Т. О. (2021). Обґрунтування конструктивних параметрів зерної камери шнекового пресу. 12 (1): 103–108. DOI: 10.31548/machenergy2021.01.103

121. Братішко В. В. (2013). Дослідження геометричних параметрів гвинта гранулятора кормів з основою каналу у вигляді частини кола. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 132: 415–420.

122. Братішко В. В. (2012). Дослідження впливу геометричних параметрів робочих органів гранулятора кормів на інтенсивність процесу гранулювання. Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: матеріали І-ї наук.-техн. конф. Глеваха, 7–9.

123. Братішко В. В. (2014). Модель зміни тиску у каналі гвинта гранулятора. Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві: матеріали XXII та IX Всеукраїнської конференції-семінару аспірантів, докторантів та здобувачів у галузі аграрної інженерії. Глеваха: ІМЕСГ, 130–131.

124. Самохвал В. А., Самойчук К. О. (2023). Дослідження ефективності роботи обладнання для інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання, 13, 1: 198–210. DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-16

125. Самойчук К. О., Самохвал В. А., Червоткіна О. О. (2023). Дослідження ефективності роботи системи охолодження при інтенсифікації відтискання технічних олій в гвинтових прес-екструдерах для виготовлення паливних брикетів. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наукове фахове видання, 23, 2: 33–45. DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-33-45

126. Johnson K. L. (1987). Contact Mechanics. 434 p. DOI: 10.1017/SVO9781139171731.

127. Simcenter STAR-CCM+. Help. User guide, tutorials, knowledge base, and tech support. (2022).

128. Lupo M., Sofia D., Barletta D., Poletto M. (2019). Calibration of DEM Simulation of Cohesive Particles. *Chemical Engineering Transactions*, 74: 379–384 DOI: 10.3303/CET1974064.

129. Pachón-Morales J., Do H., Colin J., Puel F., Perre P. (2019). DEM modelling for flow of cohesive lignocellulosic biomass powders: Model calibration using bulk tests. *Advanced Powder Technology*, 30 (4): 732–750. DOI: 10.1016/j.appt.2019.01.003.

130. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9.

131. Mohammad Reza Seifi, Reza Alimardani. (2010). The Moisture Content Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science Archives*, 2 (4): 125-134. DOI:10.5539/jas.v2n4p125

132. Li Y M, Chandio F A, Ma Z, Lakhari I A, Sahito A R, Ahmad F. (2018). Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *Int J Agric & Biol Eng.*, 11 (4): 52–57.

133. Kang Y. S., Spillman C. K., Steele J. L., Chung D. S. (1995). Mechanical Properties of Wheat. *Transactions of the ASAE*, 38(2): 573–578. DOI: 10.13031/2013.27868

134. Astanakulov K. D., Balabanov V. I., Vitliemov P., Ashurov N. A., Khakberdiev O. (2021). Biometric parameters and physical-mechanical properties of wheat and barley grown on dry lands. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 868 012077. DOI 10.1088/1755-1315/868/1/012077

135. Markowski M., Żuk-Gołaszewska K., Kwiatkowski. D (2013). Influence of variety on selected physical and mechanical properties of wheat. *Industrial Crops and Products*, 47: 113–117. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.02.024.

136. Филин А. П. (1975). Прикладная механика твердого деформируемого тела. Том 1. М: Издательство «Наука». 832 с.

137. Гусенков А. П. (1979). Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М: Издательство «Наука». 295 с.

138. Івлєв В. В. (2023). Чисельне моделювання пружного гістерезису сипкого матеріалу. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 7 (38), II: 39–67. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.59-67

139. Луц П., Івлєв В. (2023). Аналітичні дослідження віджимної насадки двогвинтового пресу для зневоднення кормів. Вісник Хмельницького національного університету, 2 (5): 204–209. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-327-5-203-209

140. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2022). Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу» (20 травня 2022 року). Херсон: ІЗЗ НААН, 160–161.

141. Лагєрев И. А., Лагєрев А. В. (2013). Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. Брянск: Издательство БГТУ. 228 с. ISBN 978-5-89838-680-1.

142. Братішко В. В. (2017). Механіко-технологічні основи приготування повнораціонних комбикормів гвинтовими грануляторами. Дисертація на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук зі спеціальності 05.05.11. Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». Глеваха. 397 с.

143. Братішко В. В. (2017). Науково-технічні основи приготування комбикормів гвинтовими грануляторами: монографія. Тернопіль: Видавництво «Крок», 234 с. ISBN 978-617-692-444-9с.

144. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Лінко М. О. (2023). Експандер для приготування кормів. Заявка на корисну модель № u202304732. Заявл. 06.10.2023.

145. Aliiev E., Dudin V., Kobets O., Linko M. (2023). Development of feed expander. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 16 (65), 2: 115–130. DOI: 10.31926/but.fwiife.2023.16.65.2.8.

146. Aliiev E., Dudin V., Linko M. (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. Machinery & Energetics, 13 (3): 9–16. DOI: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16.

147. Алієв Е. Б., Лінко М. О., Алієва О. Ю. (2022). Симуляція процесу експандованого приготування кормів. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 5 (36), II: 176–185. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185.

148. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2023). Обґрунтування конструктивних параметрів формуючої насадки експандера кормів. Механіка та автоматика агропромислового виробництва, 2 (116): 143–152. DOI: 10.37204/2786-7765-2023-2-15.

149. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2022). Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу» (20 травня 2022 року). Херсон: ІЗЗ НААН, 160–161.

150. Лінко М. О. (2023). Чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (21 березня 2023 р.). Запоріжжя: ІОК НААН, 127–128.

151. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2023). Результати чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів. Міжнародної науково-практичної конференції «Використання сучасних технологій та техніки в аграрному виробництві» (20–21 квітня 2023 р.): зб. наукових праць. ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, 17–22.

152. ДСТУ ISO 712:2015 Зернові та продукти з них. Визначення вмісту вологи. Контрольний метод (ISO 712:2009, IDT). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 21 с. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=83685

153. Филин, А. П. (1975). Прикладная механика твердого деформируемого тела. Том 1. М: Издательство «Наука». 832 с.

154. Гусенков А. П. (1979). Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М: Издательство «Наука». 1979. 295 с.

155. Дудін В. Ю., Губа Є. В. (2016). Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна. Матеріали за 12-а міжнародна научна практична конференція, «Настоящи изследвания и развитие – 2016». Том 8. Лекарство. Биологии. Химия и

химически технологии. Екология. География и геология. Селско стопанство (15–22-ти януари 2016). София. «Бял ГРАД-БГ» ООД: 85–87.

156. Дудін В. Ю., Корнієнко А. А. (2016). Експериментальні дослідження процесу змішування сипких кормів. *Materialy XII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2016» Volume 8. Matematyka. Fizyka. Budownictwo i architektura. Rolnictwo. Techniczne nauki (7–15 stycznia 2016 roku). Przemysł. Nauka i studia: 30–32.*

157. Igual M., Chiş M. S., Socaci S.A., Vodnar D.C., Ranga F., Martínez-Monzó J., García-Segovia P (2021). Effect of Medicago sativa Addition on Physicochemical, Nutritional and Functional Characteristics of Corn Extrudates. *Foods*, 10, 928, doi: 10.3390/foods10050928

158. Singh N., Smith A. C. (1997). A comparison of wheat starch, whole wheat meal, and oat flour in the extrusion cooking process. *J. Food Eng.*, 34: 15–32. doi: 10.1016/S0260-8774(97)00069-1.

159. Uribe-Wandurraga Z.N., Igual M., García-Segovia P., Martínez-Monzó J. (2020). Influence of microalgae addition in formulation on colour, texture, and extrusion parameters of corn snacks. *Food Sci. Technol. Int.*, 26: 685–695. doi: 10.1177/1082013220924178.

160. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджиєв Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник. За заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС. 1181 с.

161. Shumway, R. H., Stoffer, D. S. (2011). *Time series analyses and its applications: With R examples*. 3-rd ed. New York: Springer. 596 p.

162. Everitt, B., Hothorn, T. (2009). *A handbook of statistical analyses using R*. 2-nd ed. Chapman and HALL/CRC. 376 p.

163. Вашків, П. Г., Пастер, П. І., Сторожук, В. П., Ткач, Є. І. (2001) *Теорія статистики: Навчальний посібник*. К.:Либідь. 320 с.

164. Ушкаренко, Е. О., Нікішенко, В. Л., Голобородько, С. П., Коковіхін, С. В. (2008). Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві: Навчальний посібник. Херсон: Айлант. 272 с.

165. Ратніков Є. М., Мілько Д. О. (2020). Методика експериментальних досліджень процесу екструдювання кормових компонентів з метою збільшення їх засвоюваності. I Міжнародна науково-практична конференція «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі», 223–225.

166. Natabirwa H., Nakimbugwe D., Lung'aho M., Muyonga J. H. (2018). Optimization of Robal extrusion conditions and bean extrudate properties using response surface methodology and multi-response desirability function. LWT, 96: 411–418. doi: 10.1016/j.lwt.2018.05.040.

167. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Лінко М. О. (2023). Результати лабораторних досліджень процесу формування експандатів. Вібрації в техніці та технологіях. 2 (109): 20-29. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-3.

168. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Лінко М. О. (2023). Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 53: 121–130. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.121-130.

169. Лінко М. О. (2023). Порівняння теоретичних і лабораторних досліджень пресування комбікорму. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 10–12.

170. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2023). Порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень процесу пресування комбікорму. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (2–20 жовтня 2023 р.). ІМА АПВ, НУБіП. <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

171. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2023). Експериментальні дослідження експандера кормів. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2023 року). НУБіП: 229–232.

172. ДСТУ 4397 (2005). *Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування*. Держспоживстандарт України.
173. ГСТУ 3-37-4-94 (1995). *Трактори та машини сільськогосподарські. Методи економічної оцінки*. Мінагрополітики України.
174. Остапенко, М. Н. (2017). Развитие методики экономической оценки сельскохозяйственных машин. *Экономика и организация инженерно-технических систем в АПК*. 2, 49–53.
175. Сорокин, Н. Т., Табашников, А. Т. (2015). Методика оценки экономической эффективности сельскохозяйственной техники. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2, 41–44.
176. Данильченко, М. Г., Гладич, Б. Б., Гевко, Р. Б., Ткаченко, І. Г. (2001). *Експертноаналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки*. Тернопіль: Економічна думка.
177. Завгородній О.І., Левкін Д.А., Котко Я.М., Левкін А.В. (2021). Економіко-математичне моделювання прогнозування ймовірних ризиків технологічних процесів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 32(71), 4. 66–70. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.4/10

ДОДАТКИ

Додаток А

Результати чисельного моделювання процесу стискання компонентів
кормової суміші в циліндричній ємності

Таблиця А.1 – Результати чисельного моделювання

№	x ₁	D _ц , мм	x ₂	E _p , МПа	x ₃	μ _p	x ₄	W _p , Н/м	Ψ	S _{ΔP} , МПа	h _a , мм
1	-1	1	-1	10	-1	0,2	-1	0	1,036	0,451	18,0
2	-1	1	-1	10	-1	0,2	0	0,25	1,436	0,368	18,6
3	-1	1	-1	10	-1	0,2	1	0,5	1,728	0,420	18,7
4	-1	1	-1	10	0	0,3	-1	0	0,937	1,491	17,7
5	-1	1	-1	10	0	0,3	0	0,25	1,364	1,127	18,2
6	-1	1	-1	10	0	0,3	1	0,5	1,730	0,882	18,5
7	-1	1	-1	10	1	0,4	-1	0	0,851	2,534	17,5
8	-1	1	-1	10	1	0,4	0	0,25	1,302	1,873	17,9
9	-1	1	-1	10	1	0,4	1	0,5	1,694	1,349	18,0
10	-1	1	0	20	-1	0,2	-1	0	1,026	0,542	13,4
11	-1	1	0	20	-1	0,2	0	0,25	1,369	0,389	13,9
12	-1	1	0	20	-1	0,2	1	0,5	1,647	0,383	14,0
13	-1	1	0	20	0	0,3	-1	0	0,937	1,449	13,3
14	-1	1	0	20	0	0,3	0	0,25	1,262	1,030	13,4
15	-1	1	0	20	0	0,3	1	0,5	1,661	0,708	14,2
16	-1	1	0	20	1	0,4	-1	0	0,818	2,369	13,1
17	-1	1	0	20	1	0,4	0	0,25	1,185	1,657	13,1
18	-1	1	0	20	1	0,4	1	0,5	1,610	1,056	13,8
19	-1	1	1	30	-1	0,2	-1	0	1,044	0,627	11,8
20	-1	1	1	30	-1	0,2	0	0,25	1,354	0,423	12,2
21	-1	1	1	30	-1	0,2	1	0,5	1,594	0,349	12,4
22	-1	1	1	30	0	0,3	-1	0	0,967	1,420	11,8
23	-1	1	1	30	0	0,3	0	0,25	1,295	0,925	12,1
24	-1	1	1	30	0	0,3	1	0,5	1,601	0,555	12,4
25	-1	1	1	30	1	0,4	-1	0	0,865	2,207	11,7
26	-1	1	1	30	1	0,4	0	0,25	1,180	1,428	11,7
27	-1	1	1	30	1	0,4	1	0,5	1,550	0,764	12,2
28	0	2	-1	10	-1	0,2	-1	0	1,193	0,359	18,6
29	0	2	-1	10	-1	0,2	0	0,25	1,582	0,283	19,0
30	0	2	-1	10	-1	0,2	1	0,5	1,959	0,327	19,5
31	0	2	-1	10	0	0,3	-1	0	1,091	1,417	18,2
32	0	2	-1	10	0	0,3	0	0,25	1,486	1,047	18,4
33	0	2	-1	10	0	0,3	1	0,5	1,894	0,805	18,8
34	0	2	-1	10	1	0,4	-1	0	0,967	2,463	17,7
35	0	2	-1	10	1	0,4	0	0,25	1,446	1,804	18,2
36	0	2	-1	10	1	0,4	1	0,5	1,902	1,258	18,7
37	0	2	0	20	-1	0,2	-1	0	1,146	0,453	13,7
38	0	2	0	20	-1	0,2	0	0,25	1,499	0,319	14,1
39	0	2	0	20	-1	0,2	1	0,5	1,833	0,303	14,5

№	x ₁	D _μ , мм	x ₂	E _p , МПа	x ₃	μ _p	x ₄	W _p , H/м	Ψ	S _{ΔP} , МПа	h _a , мм
40	0	2	0	20	0	0,3	-1	0	1,050	1,372	13,6
41	0	2	0	20	0	0,3	0	0,25	1,407	0,947	13,7
42	0	2	0	20	0	0,3	1	0,5	1,830	0,633	14,5
43	0	2	0	20	1	0,4	-1	0	0,923	2,293	13,3
44	0	2	0	20	1	0,4	0	0,25	1,362	1,569	13,7
45	0	2	0	20	1	0,4	1	0,5	1,766	0,968	14,1
46	0	2	1	30	-1	0,2	-1	0	1,167	0,546	12,1
47	0	2	1	30	-1	0,2	0	0,25	1,483	0,343	12,5
48	0	2	1	30	-1	0,2	1	0,5	1,786	0,272	12,8
49	0	2	1	30	0	0,3	-1	0	1,075	1,339	12,1
50	0	2	1	30	0	0,3	0	0,25	1,442	0,841	12,5
51	0	2	1	30	0	0,3	1	0,5	1,758	0,478	12,7
52	0	2	1	30	1	0,4	-1	0	0,993	2,129	12,1
53	0	2	1	30	1	0,4	0	0,25	1,382	1,334	12,4
54	0	2	1	30	1	0,4	1	0,5	1,722	0,684	12,5
55	1	3	-1	10	-1	0,2	-1	0	1,327	0,284	18,9
56	1	3	-1	10	-1	0,2	0	0,25	1,711	0,204	19,2
57	1	3	-1	10	-1	0,2	1	0,5	2,125	0,246	19,8
58	1	3	-1	10	0	0,3	-1	0	1,205	1,338	18,4
59	1	3	-1	10	0	0,3	0	0,25	1,655	0,962	18,8
60	1	3	-1	10	0	0,3	1	0,5	2,054	0,721	19,1
61	1	3	-1	10	1	0,4	-1	0	1,077	2,379	17,9
62	1	3	-1	10	1	0,4	0	0,25	1,554	1,723	18,2
63	1	3	-1	10	1	0,4	1	0,5	2,042	1,183	18,8
64	1	3	0	20	-1	0,2	-1	0	1,302	0,377	14,2
65	1	3	0	20	-1	0,2	0	0,25	1,616	0,246	14,2
66	1	3	0	20	-1	0,2	1	0,5	2,020	0,223	14,9
67	1	3	0	20	0	0,3	-1	0	1,170	1,295	13,9
68	1	3	0	20	0	0,3	0	0,25	1,593	0,868	14,3
69	1	3	0	20	0	0,3	1	0,5	1,995	0,554	14,7
70	1	3	0	20	1	0,4	-1	0	1,093	2,205	13,9
71	1	3	0	20	1	0,4	0	0,25	1,495	1,494	13,9
72	1	3	0	20	1	0,4	1	0,5	1,977	0,884	14,6
73	1	3	1	30	-1	0,2	-1	0	1,307	0,472	12,4
74	1	3	1	30	-1	0,2	0	0,25	1,648	0,263	12,8
75	1	3	1	30	-1	0,2	1	0,5	1,981	0,179	13,3
76	1	3	1	30	0	0,3	-1	0	1,225	1,260	12,5
77	1	3	1	30	0	0,3	0	0,25	1,551	0,770	12,5
78	1	3	1	30	0	0,3	1	0,5	1,960	0,397	13,2
79	1	3	1	30	1	0,4	-1	0	1,069	2,053	12,0
80	1	3	1	30	1	0,4	0	0,25	1,504	1,265	12,5
81	1	3	1	30	1	0,4	1	0,5	1,923	0,604	13,0

Таблиця А.2 – Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії площі петлі пружного гістерезису

```

M={ {-1,-1,-1,-1,0.4505633333333333}, {-1,-1,-1,0,0.3676467}, {-1,-1,-1,1,0.4200511333333333}, {-1,-1,0,-1,1.49119985714286}, {-1,-1,0,0,1.12739012857143}, {-1,-1,0,1,0.8822348}, {-1,-1,1,-1,2.53374114285714}, {-1,-1,1,0,1.87284784285714}, {-1,-1,1,1,1.348585133333333}, {-1,0,-1,-1,0.542297947619048}, {-1,0,-1,0,0.388879461904762}, {-1,0,-1,1,0.382805852380952}, {-1,0,0,-1,1.44906870952381}, {-1,0,0,0,1.02963808095238}, {-1,0,0,1,0.707552328571429}, {-1,0,1,-1,2.36905375714286}, {-1,0,1,0,1.65718241428571}, {-1,0,1,1,1.05598928095238}, {-1,1,-1,-1,0.627484942857143}, {-1,1,-1,0,0.422612223809524}, {-1,1,-1,1,0.348893904761905}, {-1,1,0,-1,1.42015184761905}, {-1,1,0,0,0.925338414285714}, {-1,1,0,1,0.5548936666666667}, {-1,1,1,-1,2.20722351428571}, {-1,1,1,0,1.42758841428571}, {-1,1,1,1,0.7639886666666667}, {0,-1,-1,-1,0.359084061904762}, {0,-1,-1,0,0.28307219047619}, {0,-1,-1,1,0.327024242857143}, {0,-1,0,-1,1.4167443952381}, {0,-1,0,0,1.047101333333333}, {0,-1,0,1,0.804803147619047}, {0,-1,1,-1,2.46345234761905}, {0,-1,1,0,1.80351142857143}, {0,-1,1,1,1.25805824285714}, {0,0,-1,-1,0.453199628571429}, {0,0,-1,0,0.319424}, {0,0,-1,1,0.3028742}, {0,0,0,-1,1.37247039047619}, {0,0,0,0,0.946849285714286}, {0,0,0,1,0.632858771428571}, {0,0,1,-1,2.29328877142857}, {0,0,1,0,1.56927457142857}, {0,0,1,1,0.967724295238095}, {0,1,-1,-1,0.546481861904762}, {0,1,-1,0,0.343275809523809}, {0,1,-1,1,0.271700347619048}, {0,1,0,-1,1.33902971904762}, {0,1,0,0,0.840763904761905}, {0,1,0,1,0.478295347619048}, {0,1,1,-1,2.12895852857143}, {0,1,1,0,1.33360914285714}, {0,1,1,1,0.683937966666666}, {1,-1,-1,-1,0.283557171428571}, {1,-1,-1,0,0.203735776190476}, {1,-1,-1,1,0.246021161904762}, {1,-1,0,-1,1.33836036190476}, {1,-1,0,0,0.961812538095238}, {1,-1,0,1,0.721061971428571}, {1,-1,1,-1,2.37875879047619}, {1,-1,1,0,1.72310358571429}, {1,-1,1,1,1.18312659047619}, {1,0,-1,-1,0.376958452380952}, {1,0,-1,0,0.246278061904762}, {1,0,-1,1,0.222942547619048}, {1,0,0,-1,1.29503873809524}, {1,0,0,0,0.867989061904762}, {1,0,0,1,0.553641404761905}, {1,0,1,-1,2.20549997619048}, {1,0,1,0,1.494461966666667}, {1,0,1,1,0.883506928571429}, {1,1,-1,-1,0.471907352380952}, {1,1,-1,0,0.263344157142857}, {1,1,-1,1,0.179268695238095}, {1,1,0,-1,1.26005044761905}, {1,1,0,0,0.770237014285714}, {1,1,0,1,0.396697028571429}, {1,1,1,-

```

```

1,2.05295544761905},{1,1,1,0,1.26498701428571},{1,1,1,1,0.604125361904762}
};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *y1+a20 * y2+a30 *y3+a40 *y4+
  a12* y1*y2+a13 *y1*y3+a14 *y1*y4+a23* y2*y3+a24* y2*y4+a34* y3*y4+
  a11* y1^2+a22 *y2^2+a33 *y3^2+a44
*y4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14, a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44
},{y1,y2,y3,y4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[y1_,y2_,y3_,y4_] :=0.9442831481481485` -0.08010140546737182` y1-
0.09942312345679051` y2+0.6273547389770722` y3-0.12866734920634937` y2
y3-0.36933182363315725` y4-0.06244298994708959` y2 y4-
0.2909426984126986` y3 y4+0.06120991604938126` y4^2
"Розкадоване скорочене"
y10=2;
dy1=1;
y20=20;
dy2=10;
y30=0.3;
dy3=0.1;
y40=0.25;
dy4=0.25;
θθ [Dp_,Ep_,Up_,Wp_] := θ [ (Dp - y10) / dy1 , (Ep-y20)/ dy2 , (Up-y30)/
dy3 , (Wp - y40) / dy4 ] ;
Eurand[ θθ [Dp,Ep , Up ,Wp ] ]
"Оптимум"
FindMinimum[{ θθ [Dp,Ep , Up ,Wp ],y10-dy1<=Dp<=y10+dy1,y20-
dy2<=Ep<=y20+dy2,y30-dy3<= Up<=y30+dy3,y40-
dy4<=Wp<=y40+dy4},{Dp,y10-dy1},{Ep,y20-dy2},{ Up,y30-dy3},{Wp,y40-
dy4}]
Opt=FindMaximum[{ θθ [Dp,Ep , Up ,Wp ],y10-dy1<=Dp<=y10+dy1,y20-
dy2<=Ep<=y20+dy2,y30-dy3<= Up<=y30+dy3,y40-
dy4<=Wp<=y40+dy4},{Dp,y10-dy1},{Ep,y20-dy2},{ Up,y30-dy3},{Wp,y40-
dy4}]
Dropt=Dp/.Last[Opt];
Eropt=Ep/.Last[Opt];
Upopt= Up/.Last[Opt];
Wropt=Wp/.Last[Opt];
"Графики"
Plot3D[{ θθ[Dp,Ep ,y30 ,y40]},{Dp,y10-dy1,y10+dy1},{Ep,y20-

```

```

dy2,y20+dy2},ColorFunction->"NeonColors", AyesLabel->{"Dp, мм", "Ep,
МПа", "SΔP, МПа"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{
θθ[y10,y20,Up,Wp]},{Up,y30-dy3,y30+dy3},{Wp,y40-
dy4,y40+dy4},ColorFunction->"NeonColors", AyesLabel->{"μp", "Wp, Н/М", "SΔP,
МПа"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
>20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Таблиця А.3 – Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії коефіцієнта механічних втрат Ψ

```

M={{-1,-1,-1,-1,1.03594133760684},{-1,-1,-1,0,1.43580774145299},{-1,-1,-
1,1,1.72798183760684},{-1,-1,0,-1,0.936927778632479},{-1,-
1,0,0,1.36422556923077},{-1,-1,0,1,1.73007036837607},{-1,-1,1,-
1,0.851076612820513},{-1,-1,1,0,1.30153228589744},{-1,-
1,1,1,1.69369736068376},{-1,0,-1,-1,1.02630694957265},{-1,0,-
1,0,1.36890828931624},{-1,0,-1,1,1.64655236410256},{-1,0,0,-
1,0.937207920512821},{-1,0,0,0,1.26211244188034},{-
1,0,0,1,1.66077764700855},{-1,0,1,-1,0.818365301709402},{-
1,0,1,0,1.18506018418803},{-1,0,1,1,1.61004566495726},{-1,1,-1,-
1,1.04442288974359},{-1,1,-1,0,1.35377625940171},{-1,1,-
1,1,1.59389885982906},{-1,1,0,-1,0.967289672649573},{-
1,1,0,0,1.29535648034188},{-1,1,0,1,1.60145747606838},{-1,1,1,-
1,0.86494278034188},{-1,1,1,0,1.17984268418803},{-
1,1,1,1,1.54969985299145},{0,-1,-1,-1,1.19346711623932},{0,-1,-
1,0,1.58220381709402},{0,-1,-1,1,1.95888923589744},{0,-1,0,-
1,1.09103475384615},{0,-1,0,0,1.48643361068376},{0,-
1,0,1,1.89388374957265},{0,-1,1,-1,0.96672204957265},{0,-
1,1,0,1.44562066923077},{0,-1,1,1,1.90152783589744},{0,0,-1,-
1,1.1464823008547},{0,0,-1,0,1.49872316837607},{0,0,-
1,1,1.83344266837607},{0,0,0,-
1,1.04960549401709},{0,0,0,0,1.40739740641026},{0,0,0,1,1.83006111367521},
{0,0,1,-
1,0.923070567521368},{0,0,1,0,1.36222549059829},{0,0,1,1,1.76625220854701},
{0,1,-1,-1,1.16673499316239},{0,1,-1,0,1.4825654974359},{0,1,-
1,1,1.78625924957265},{0,1,0,-
1,1.07532827179487},{0,1,0,0,1.44175255598291},{0,1,0,1,1.75757854957265},
{0,1,1,-
1,0.992724969230769},{0,1,1,0,1.38230713589744},{0,1,1,1,1.72231665299145},
{1,-1,-1,-1,1.32671939059829},{1,-1,-1,0,1.71099305512821},{1,-1,-
1,1,2.12492483931624},{1,-1,0,-1,1.20454343846154},{1,-
1,0,0,1.6547954982906},{1,-1,0,1,2.05444926752137},{1,-1,1,-
1,1.07698287094017},{1,-1,1,0,1.55355520641026},{1,-

```

```

1,1,1,2.04226429401709},{1,0,-1,-1,1.30170038717949},{1,0,-
1,0,1.61648676538462},{1,0,-1,1,2.02033297264957},{1,0,0,-
1,1.16969537521368},{1,0,0,0,1.59328066153846},{1,0,0,1,1.99498560598291},
{1,0,1,-
1,1.09264762820513},{1,0,1,0,1.49537370299145},{1,0,1,1,1.97733054700855},
{1,1,-1,-1,1.30656846410256},{1,1,-1,0,1.6475940517094},{1,1,-
1,1,1.98092733162393},{1,1,0,-
1,1.22507627264957},{1,1,0,0,1.55071273418803},{1,1,0,1,1.95985346923077},
{1,1,1,-
1,1.06888322649573},{1,1,1,0,1.50442970726496},{1,1,1,1,1.92348046153846}}
;
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *y1+a20 * y2+a30 *y3+a40 *y4+
  a12* y1*y2+a13 *y1*y3+a14 *y1*y4+a23* y2*y3+a24* y2*y4+a34* y3*y4+
  a11*          y1^2+a22          *y2^2+a33          *y3^2+a44
*y4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14,          a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44
},{y1,y2,y3,y4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[y1_,y2_,y3_,y4_] :=1.4345009201804382` +0.15065375212092466` y1-
0.03556464890788295` y2+0.02931834232351936` y2^2-0.06790062742956662`
y3+0.379305049461855` y4+0.027056431861348394` y1 y4-
0.03557702991452995` y2 y4+0.03906481505223142` y3 y4
"Розкадоване скорочене"
y10=2;
dy1=1;
y20=20;
dy2=10;
y30=0.3;
dy3=0.1;
y40=0.25;
dy4=0.25;
θθ [Dp_ , Ep_ ,Up_,Wp _ ] := θ [ (Dp - y10) / dy1 , (Ep-y20)/ dy2 , (Up-y30)/
dy3 , (Wp - y40) / dy4 ] ;
Eurand[ θθ [Dp,Ep , Up ,Wp ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMayimum[{ θθ [Dp,Ep , Up ,Wp ],y10-dy1<=Dp<=y10+dy1,y20-
dy2<=Ep<=y20+dy2,y30-dy3<=
Up<=y30+dy3,y40-
dy4<=Wp<=y40+dy4},{Dp,y10-dy1},{Ep,y20-dy2},{ Up,y30-dy3},{Wp,y40-
dy4}]
Dpopt=Dp/.Last[Opt];

```



```

Eрopt=Eр/.Last[Opt];
Uрopt= Uр/.Last[Opt];
Wрopt=Wр/.Last[Opt];
"Графики"
Plot3D[{
   $\theta\theta$ [Dр,Eр
  ,y30
  ,y40]},{Dр,y10-dy1,y10+dy1},{Eр,y20-
  dy2,y20+dy2},ColorFunction->"BlueGreenYellow",
  AyesLabel->{"Dр, мм","Eр,
  МПа"," $\Psi$ 
  "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
  >20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{
   $\theta\theta$ [y10,y20,Uр,Wр]},{Uр,y30-dy3,y30+dy3},{Wр,y40-
  dy4,y40+dy4},ColorFunction->"BlueGreenYellow",
  AyesLabel->{" $\mu_p$ ","Wр,
  Н/м"," $\Psi$ 
  "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
  >20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Таблиця А.4 – Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії коефіцієнта висоти експандату h_a

```

M={{-1,-1,-1,-1,18.0027681688471},{-1,-1,-1,0,18.6183931688471},{-1,-1,-
1,1,18.6902681688471},{-1,-1,0,-1,17.7048808111173},{-1,-
1,0,0,18.187172477784},{-1,-1,0,1,18.4923808111173},{-1,-1,1,-
1,17.4736601200542},{-1,-1,1,0,17.8892851200542},{-1,-
1,1,1,18.0444934533876},{-1,0,-1,-1,13.3614532094235},{-1,0,-
1,0,13.8770782094235},{-1,0,-1,1,14.0322865427569},{-1,0,0,-
1,13.345842863892},{-1,0,0,0,13.3781345305587},{-
1,0,0,1,14.1500095305587},{-1,0,1,-1,13.0802325183605},{-
1,0,1,0,13.1291908516938},{-1,0,1,1,13.7510658516938},{-1,1,-1,-
1,11.7532371118379},{-1,1,-1,0,12.2021954451712},{-1,1,-
1,1,12.3574037785046},{-1,1,0,-1,11.7872746592613},{-
1,1,0,0,12.1028996592613},{-1,1,0,1,12.441441325928},{-1,1,1,-
1,11.7046455400181},{-1,1,1,0,11.6702705400181},{-
1,1,1,1,12.1588122066847},{0,-1,-1,-1,18.6229062521804},{0,-1,-
1,0,19.005197918847},{0,-1,-1,1,19.4937395855137},{0,-1,0,-
1,18.208352227784},{0,-1,0,0,18.4073105611173},{0,-
1,0,1,18.8125188944506},{0,-1,1,-1,17.7271315367209},{0,-
1,1,0,18.1760898700542},{0,-1,1,1,18.6979648700542},{0,0,-1,-
1,13.7482579594235},{0,0,-1,0,14.0805496260902},{0,0,-
1,1,14.5024246260902},{0,0,0,-
1,13.6159809472253},{0,0,0,0,13.748272613892},{0,0,0,1,14.4868142805587},{
0,0,1,-
1,13.3003706016938},{0,0,1,0,13.7159956016938},{0,0,1,1,14.0878706016938},
{0,1,-1,-1,12.1067085285046},{0,1,-1,0,12.4556668618379},{0,1,-
1,1,12.8442085285046},{0,1,0,-
1,12.0574127425947},{0,1,0,0,12.4897044092613},{0,1,0,1,12.7115794092613},

```

```

{0,1,1,-
1,12.0747836233514},{0,1,1,0,12.4404086233514},{0,1,1,1,12.5456169566847},
{1,-1,-1,-1,18.9263775021804},{1,-1,-1,0,19.1753358355137},{1,-1,-
1,1,19.7638775021804},{1,-1,0,-1,18.411823477784},{1,-
1,0,0,18.8441151444507},{1,-1,0,1,19.0659901444506},{1,-1,1,-
1,17.9472694533876},{1,-1,1,0,18.2295611200542},{1,-
1,1,1,18.7847694533876},{1,0,-1,-1,14.1850625427569},{1,0,-
1,0,14.1506875427569},{1,0,-1,1,14.8892292094235},{1,0,0,-
1,13.8527855305587},{1,0,0,0,14.251743863892},{1,0,0,1,14.7402855305587},{
1,0,1,-
1,13.8871751850271},{1,0,1,0,13.8861335183605},{1,0,1,1,14.6413418516938},
{1,1,-1,-1,12.4435131118379},{1,1,-1,0,12.8424714451712},{1,1,-
1,1,13.3476797785046},{1,1,0,-
1,12.4775506592613},{1,1,0,0,12.4931756592613},{1,1,0,1,13.1983839925947},
{1,1,1,-
1,12.0449215400181},{1,1,1,0,12.5105465400181},{1,1,1,1,13.0157548733514}}
;
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *y1+a20 * y2+a30 *y3+a40 *y4+
a12* y1*y2+a13 *y1*y3+a14 *y1*y4+a23* y2*y3+a24* y2*y4+a34* y3*y4+
a11* y1^2+a22 *y2^2+a33 *y3^2+a44
*y4^2,{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14, a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44
},{y1,y2,y3,y4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[y1_,y2_,y3_,y4_] :=13.92234668796607` +0.34482935802469217` y1-
3.0578771500020685` y2+1.5172101799392859` y2^2-0.23821511367434992`
y3+0.1428143044284358` y2 y3+0.36844135802469224`
y4+0.06824845679013722` y4^2
"Розкодоване скорочене"
y10=2;
dy1=1;
y20=20;
dy2=10;
y30=0.3;
dy3=0.1;
y40=0.25;
dy4=0.25;
θθ [Dp_, Ep_, Up_, Wp_] := θ [ (Dp - y10) / dy1 , (Ep-y20)/ dy2 , (Up-y30)/
dy3 , (Wp - y40) / dy4 ] ;
EuRand[ θθ [Dp,Ep , Up , Wp ] ]
"Оптимум"
FindMinimum[{ θθ [Dp,Ep , Up , Wp ],y10-dy1<=Dp<=y10+dy1,y20-

```

```

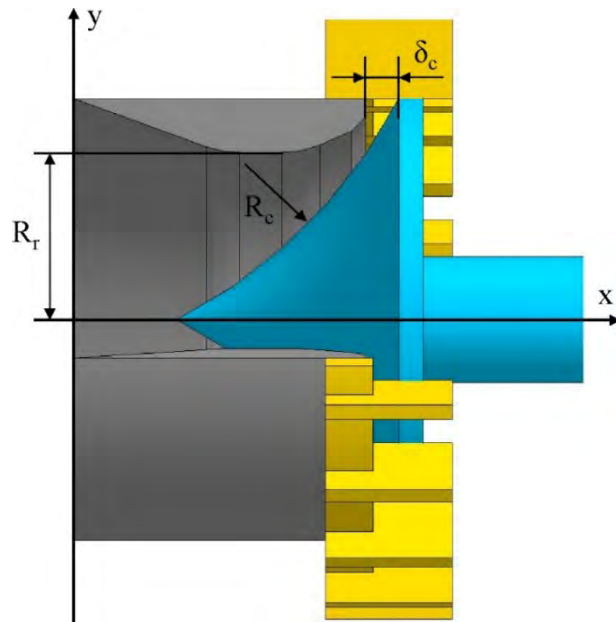
dy2<=Ep<=y20+dy2,y30-dy3<=
dy4<=Wp<=y40+dy4},{Dp,y10-dy1},{Ep,y20-dy2},{
Up<=y30+dy3,y40-
dy4}]
Opt=FindMayimum[{  $\theta$  [Dp,Ep , Up ,Wp ],y10-dy1<=Dp<=y10+dy1,y20-
dy2<=Ep<=y20+dy2,y30-dy3<=
Up<=y30+dy3,y40-
dy4<=Wp<=y40+dy4},{Dp,y10-dy1},{Ep,y20-dy2},{
Up,y30-dy3},{Wp,y40-
dy4}]
Dropt=Dp/.Last[Opt];
Eropt=Ep/.Last[Opt];
Upopt= Up/.Last[Opt];
Wropt=Wp/.Last[Opt];
"Графики"
Plot3D[{  $\theta$ [Dp,Ep ,y30 ,y40]},{Dp,y10-dy1,y10+dy1},{Ep,y20-
dy2,y20+dy2},ColorFunction->"TemperatureMap", AxesLabel->{"Dp, мм","Ep,
МПа","ha, мм"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{  $\theta$ [y10,y20,Up,Wp]},{Up,y30-dy3,y30+dy3},{Wp,y40-
dy4,y40+dy4},ColorFunction->"TemperatureMap", AxesLabel->{" $\mu_p$ ","Wp,
Н/м","ha, мм"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Додаток Б

Результати чисельного моделювання процесу стискання компонентів кормової суміші
в формуючій насадці з увігнутим конусом

Таблиця Б.1 – Розподіли компонентів кормової суміші в області формуючої насадки за силою тиску F_p , силою їх контактної взаємодії $F_{ij \Leftrightarrow (i+1)j}^c$ та залежності загального тиску поршня P_Σ , об'єму порожнини між циліндром формуючої насадки і конусом V_s , об'єму V_p і щільності ρ_Σ пластифікованої маси компонентів корму вздовж їх руху

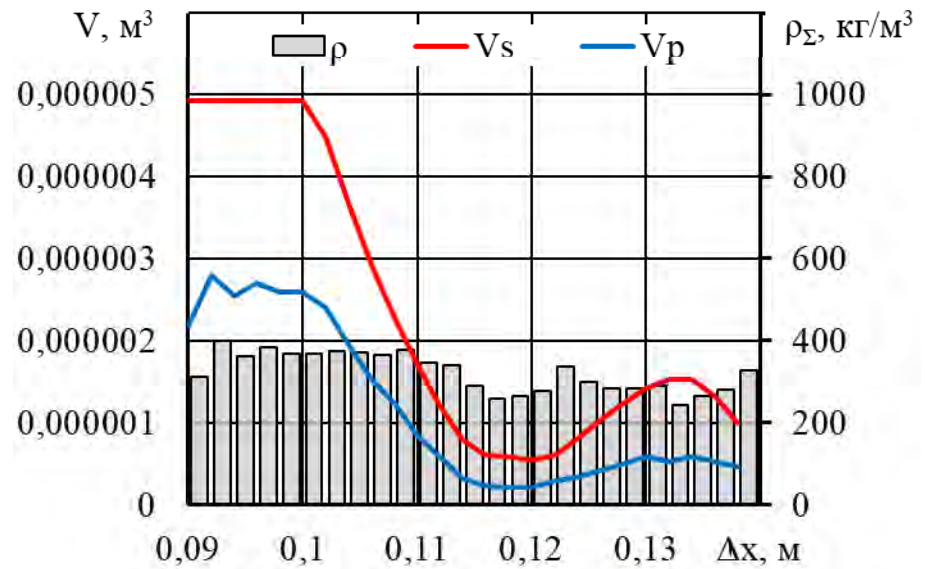
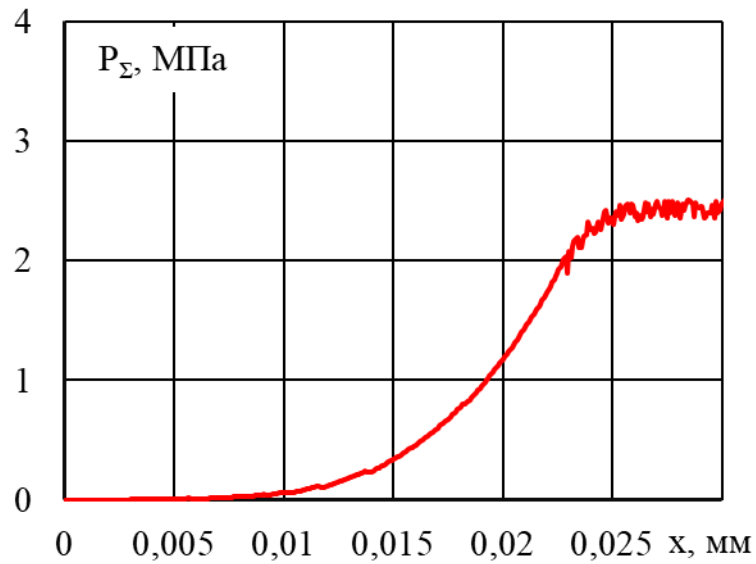
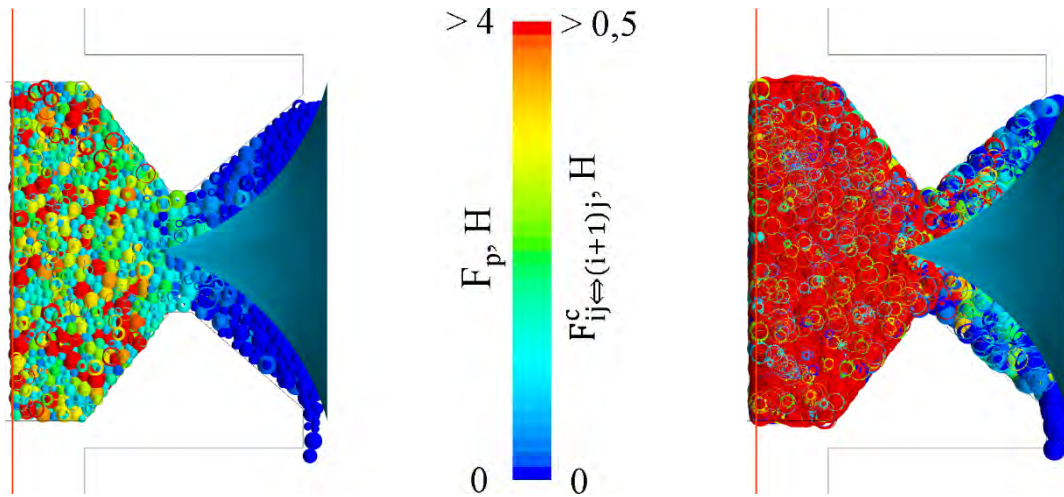


R_r – радіус звуження циліндра
формуючої насадки, мм;

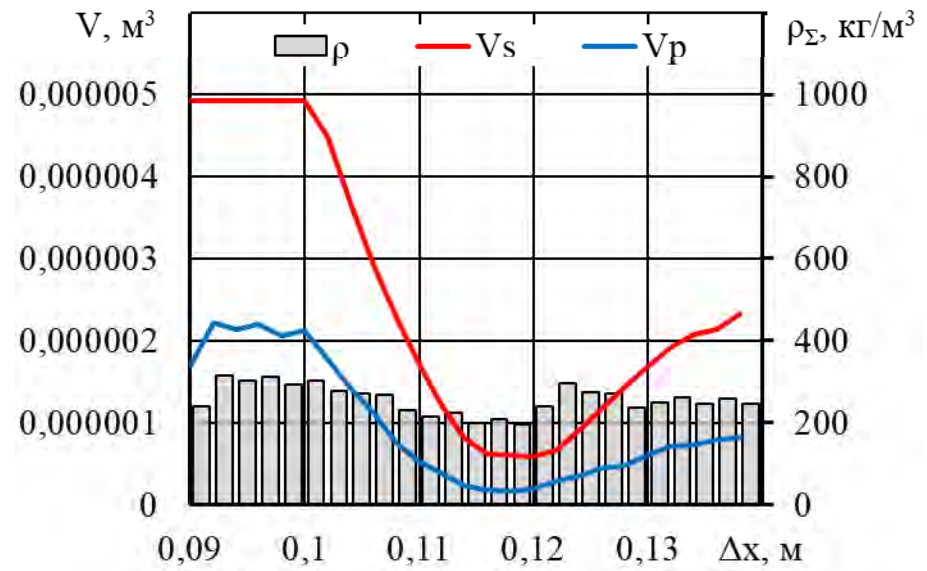
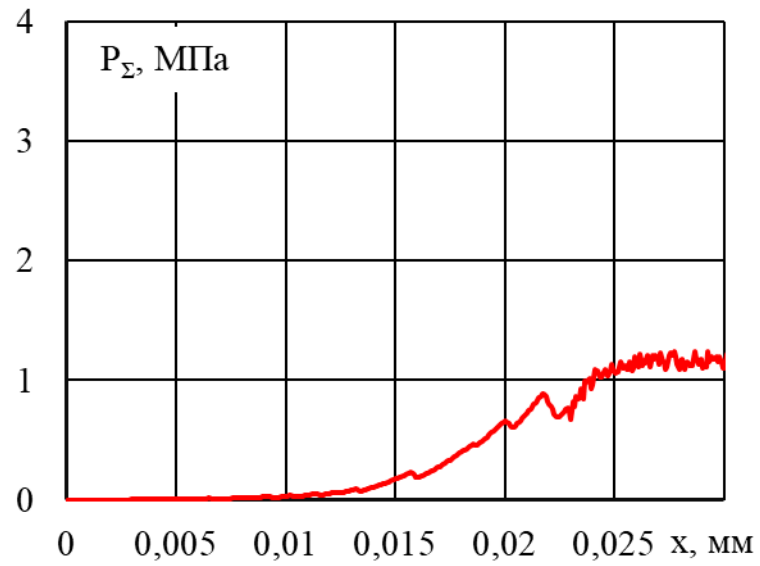
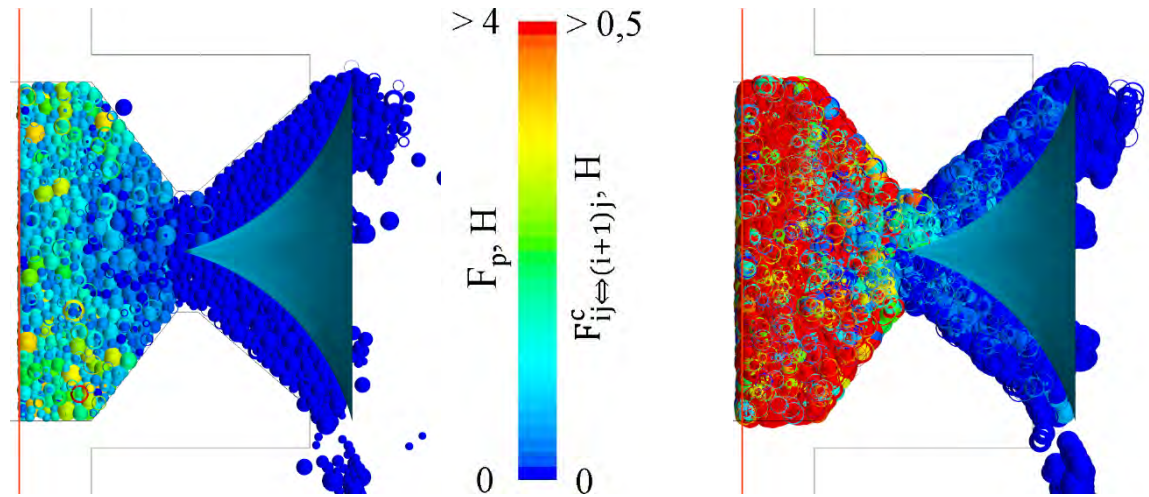
R_c – радіус увігнутого конуса, мм;

δ_c – відстань між конусом і
циліндром, мм

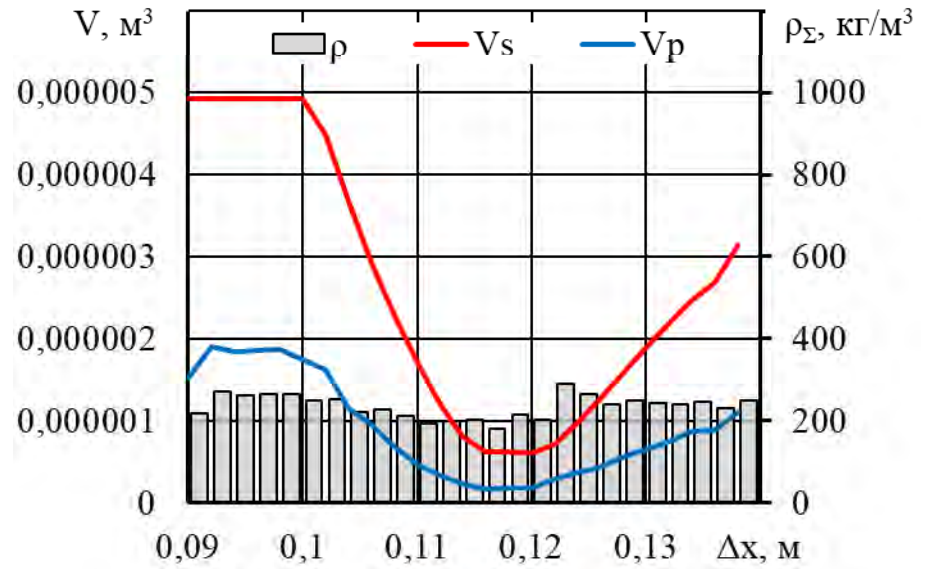
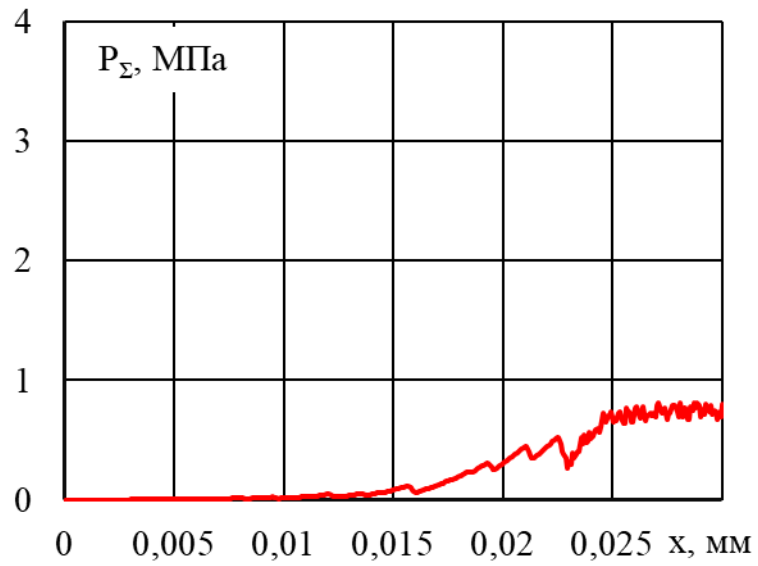
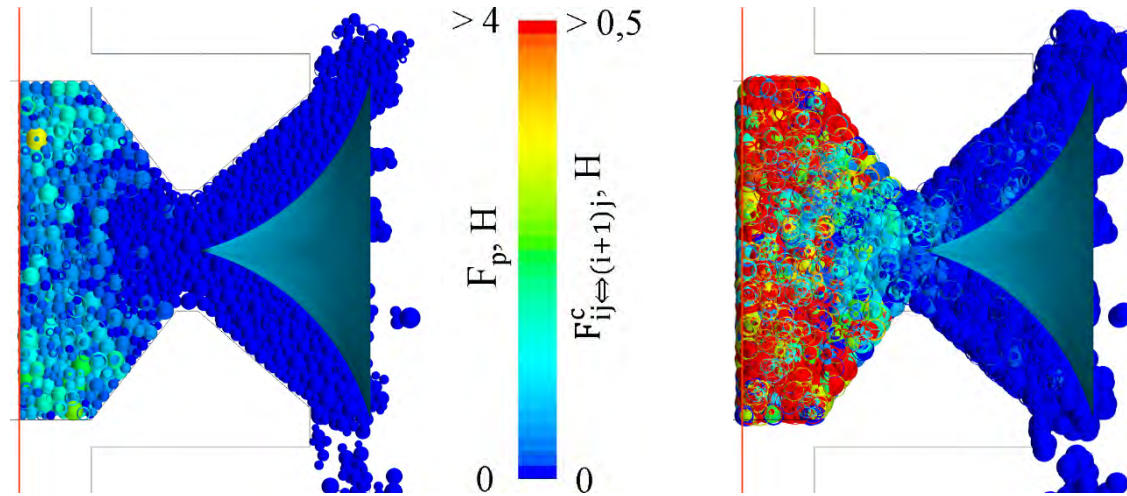
№ 1: $R_r = 10 \text{ mm}$; $R_c = 40 \text{ mm}$; $\delta_c = 3 \text{ mm}$



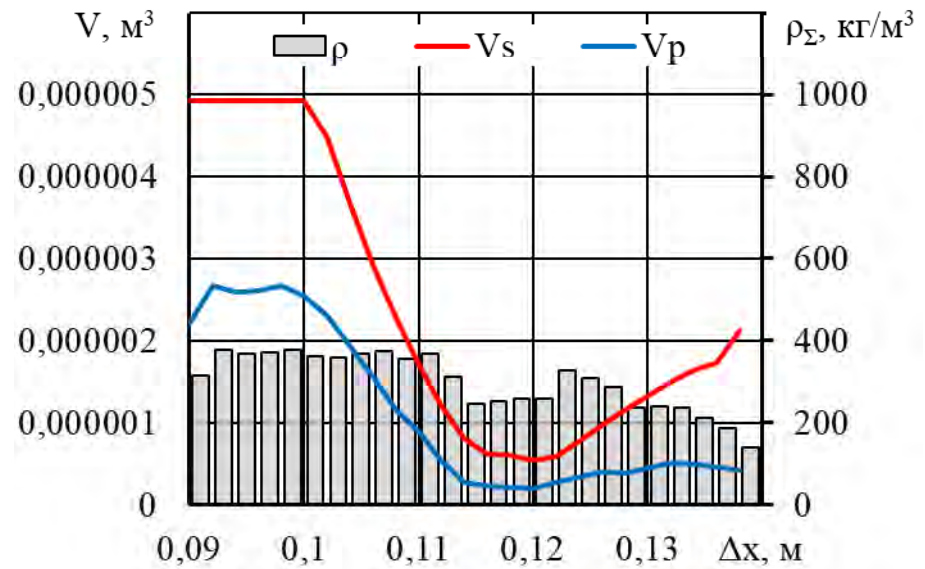
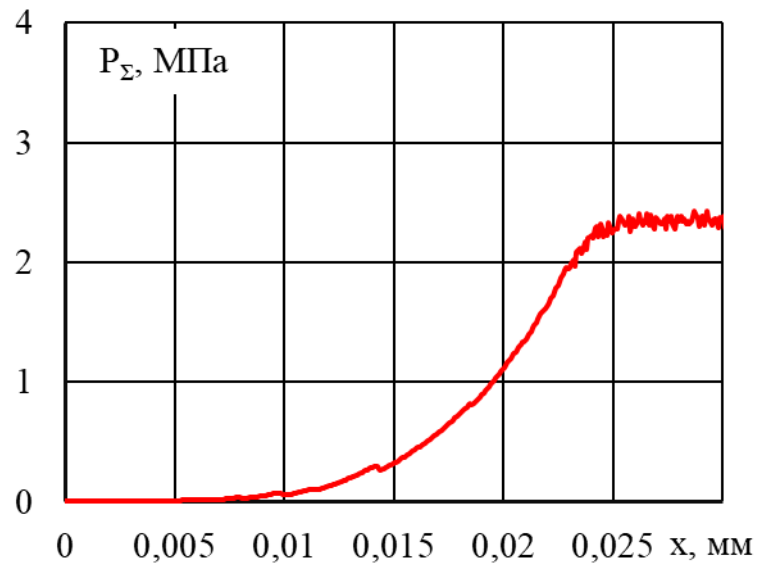
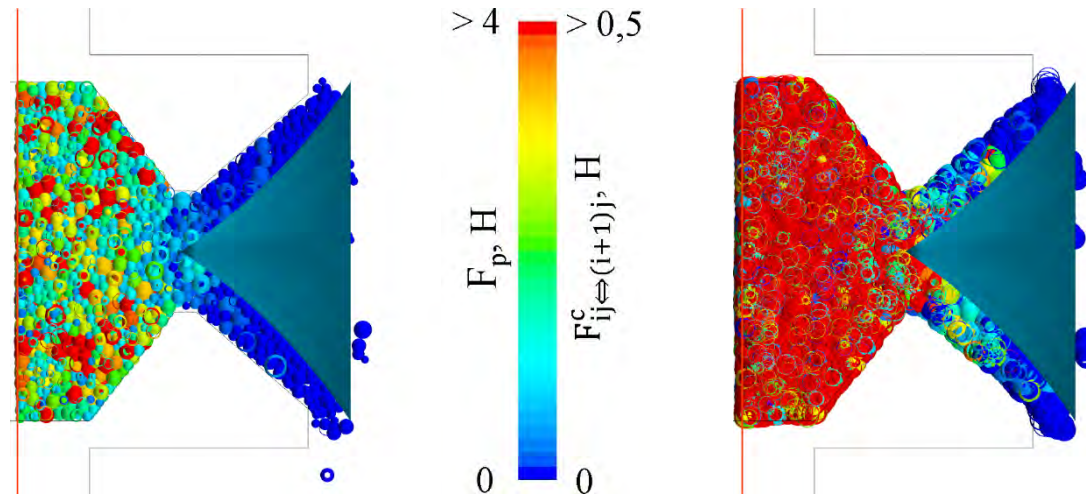
№ 2: $R_r = 10 \text{ mm}$; $R_c = 40 \text{ mm}$; $\delta_c = 6 \text{ mm}$



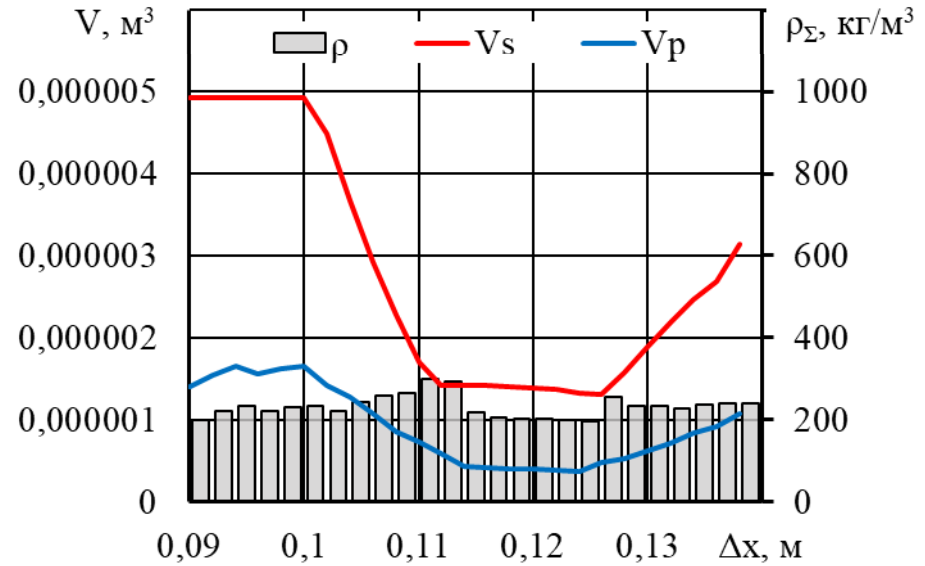
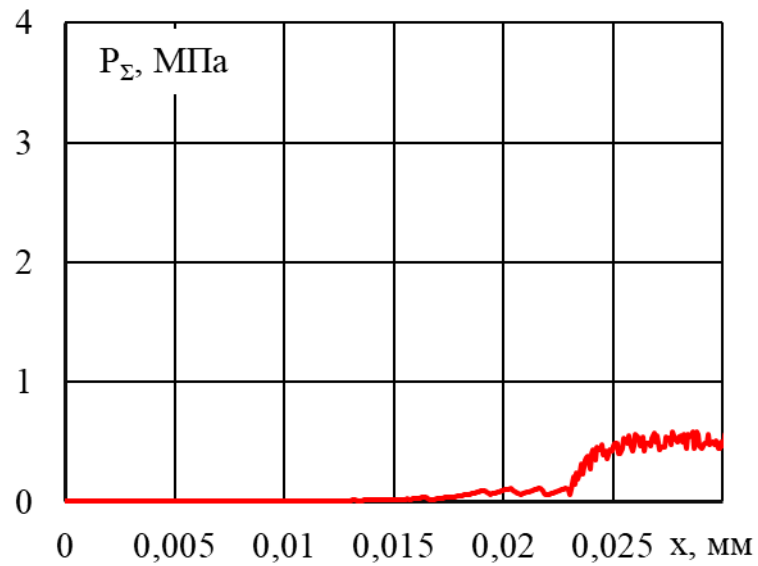
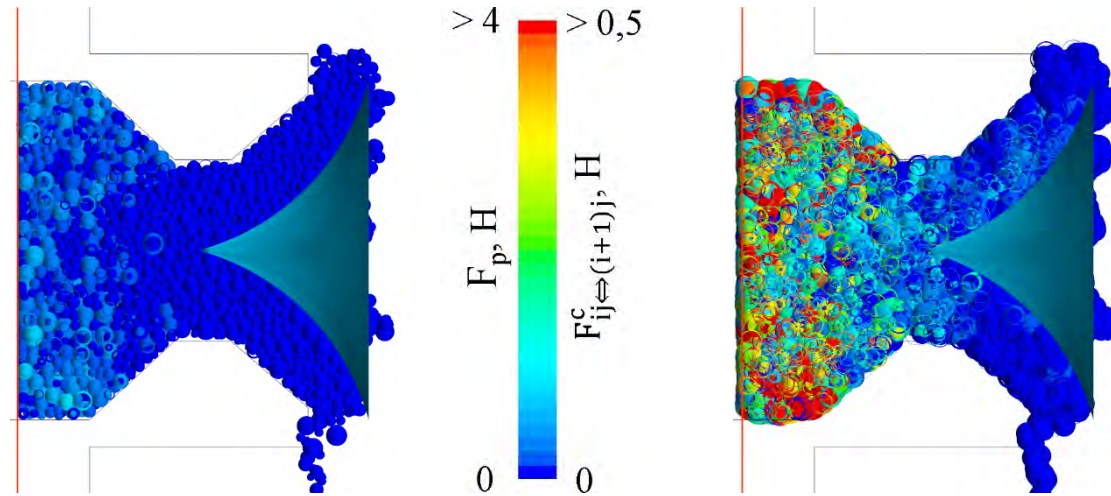
№ 3: $R_r = 10 \text{ mm}$; $R_c = 40 \text{ mm}$; $\delta_c = 9 \text{ mm}$



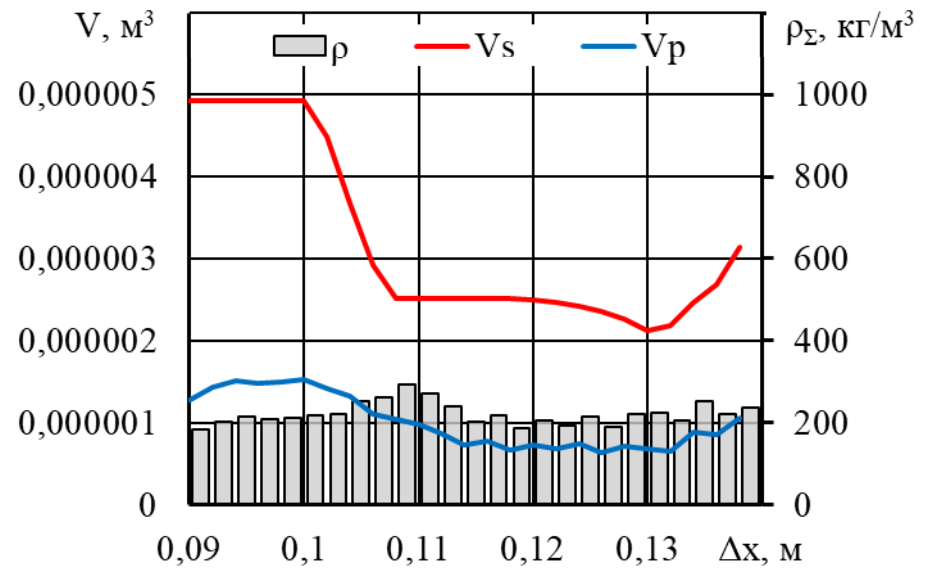
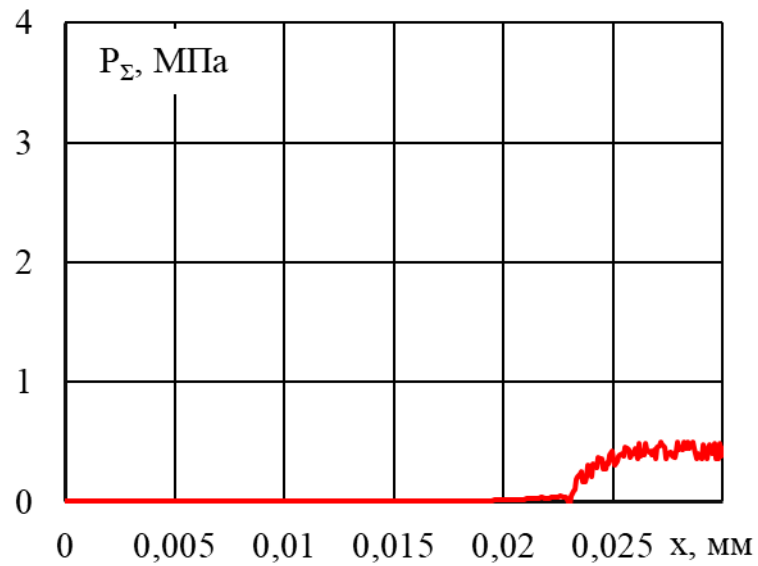
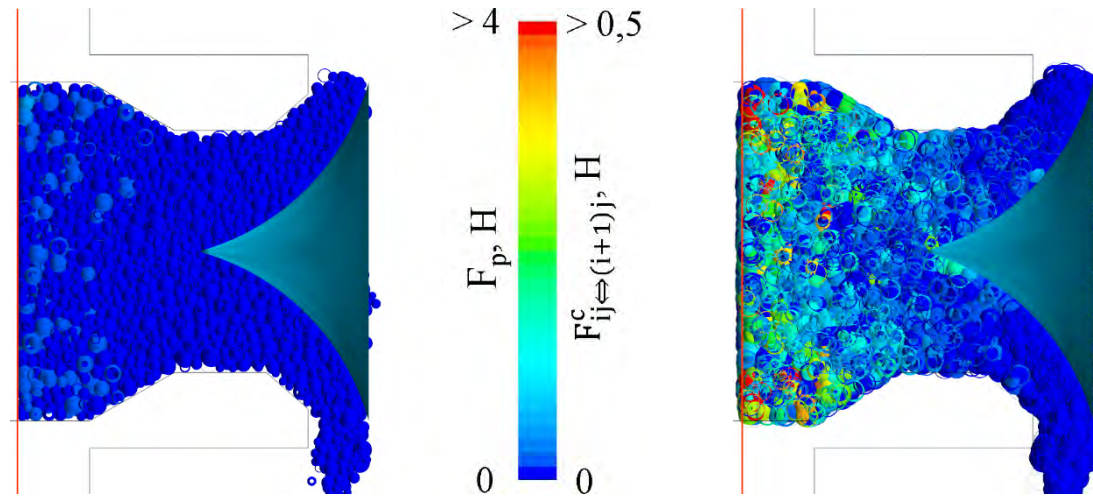
№ 9: $R_r = 10 \text{ mm}$; $R_c = 100 \text{ mm}$; $\delta_c = 9 \text{ mm}$



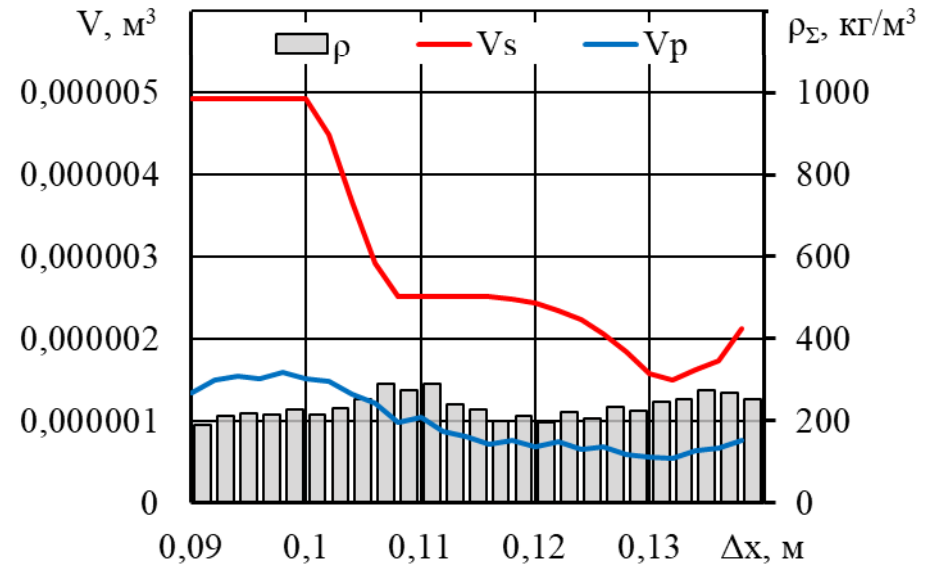
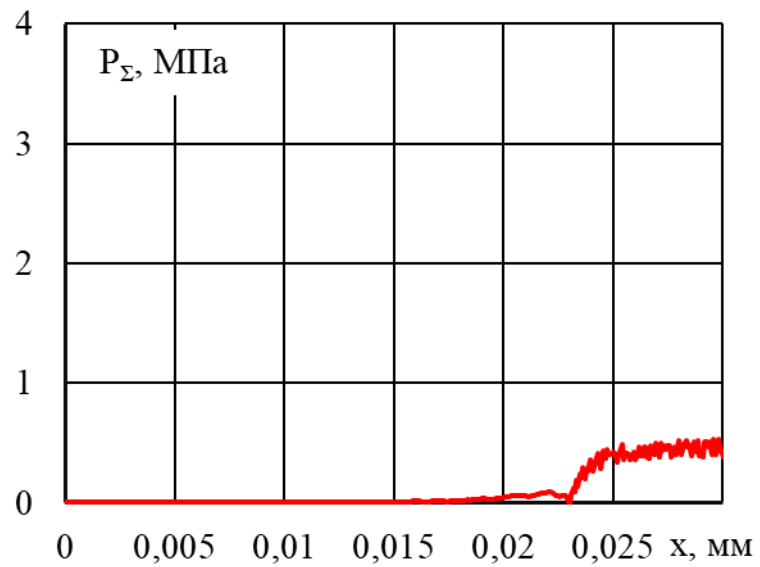
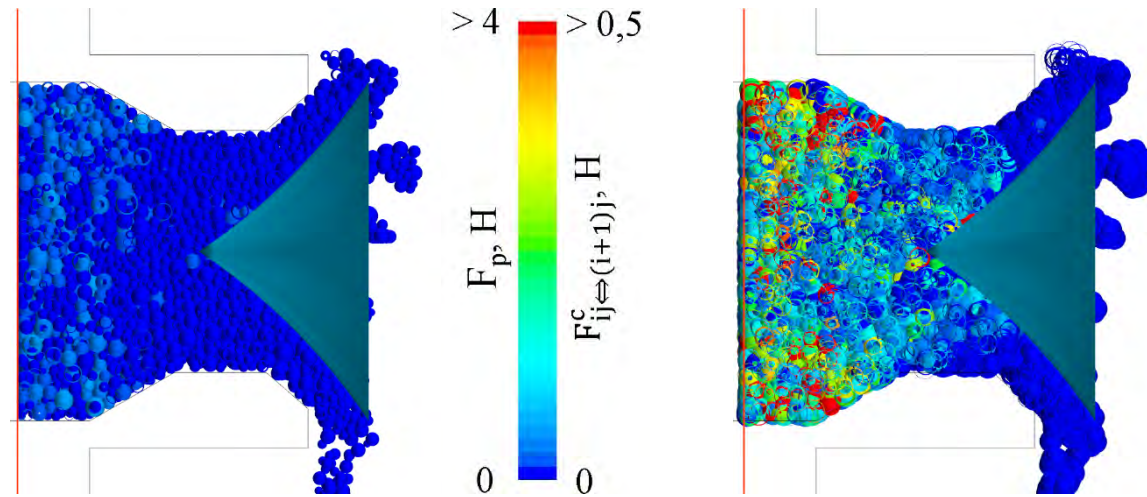
№ 12: $R_r = 15 \text{ mm}$; $R_c = 40 \text{ mm}$; $\delta_c = 9 \text{ mm}$



№ 21: $R_r = 20 \text{ mm}$; $R_c = 40 \text{ mm}$; $\delta_c = 9 \text{ mm}$



№ 27: $R_r = 20$ mm; $R_c = 100$ mm; $\delta_c = 9$ mm



Таблиця Б.2 – Результати чисельного моделювання

№	x4	Rr, мм	x5	Rc, мм	x6	δс, мм	Pmax, МПа	ρout, кг/м ³
1	-1	10	-1	40	-1	3	2,37	323,0
2	-1	10	-1	40	0	6	1,10	257,8
3	-1	10	-1	40	1	9	0,67	235,3
4	-1	10	0	70	-1	3	2,63	367,0
5	-1	10	0	70	0	6	1,28	287,8
6	-1	10	0	70	1	9	0,65	249,3
7	-1	10	1	100	-1	3	2,99	361,7
8	-1	10	1	100	0	6	0,97	310,7
9	-1	10	1	100	1	9	2,29	300,5
10	0	15	-1	40	-1	3	1,57	314,7
11	0	15	-1	40	0	6	0,73	254,2
12	0	15	-1	40	1	9	0,45	232,7
13	0	15	0	70	-1	3	1,91	338,6
14	0	15	0	70	0	6	0,97	278,6
15	0	15	0	70	1	9	0,48	241,5
16	0	15	1	100	-1	3	2,08	351,9
17	0	15	1	100	0	6	1,49	320,1
18	0	15	1	100	1	9	0,53	250,7
19	1	20	-1	40	-1	3	0,81	277,4
20	1	20	-1	40	0	6	0,43	235,3
21	1	20	-1	40	1	9	0,36	222,5
22	1	20	0	70	-1	3	1,04	283,0
23	1	20	0	70	0	6	0,63	264,3
24	1	20	0	70	1	9	0,41	236,7
25	1	20	1	100	-1	3	1,15	281,4
26	1	20	1	100	0	6	0,71	273,3
27	1	20	1	100	1	9	0,39	235,0

Таблиця Б.3 – Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії максимального загального тиску поршня, який необхідно прикласти для продавлювання пластифікованої маси компонентів корму через формуючу насадку

$$M = \{ \{-1, -1, -1, 2.37388488293646\}, \{-1, -1, 0, 1.1011106218425\}, \{-1, -1, 1, 0.669888729087865\}, \{-1, 0, -1, 2.63204435973298\}, \{-1, 0, 0, 1.28315748575151\}, \{-1, 0, 1, 0.649906557611313\}, \{-1, 1, -1, 2.99072542570369\}, \{-1, 1, 0, 0.967464816790456\}, \{-1, 1, 1, 2.28836655158462\}, \{0, -1, -1, 1.57198216518833\}, \{0, -1, 0, 0.725883613475475\}, \{0, -1, 1,$$

```

0.446352224909331}, {0, 0, -1, 1.91199403184382}, {0, 0, 0,
0.970740503546673}, {0, 0, 1, 0.48035028967181}, {0, 1, -1,
2.07581696648759}, {0, 1, 0, 1.49282194559645}, {0, 1, 1,
0.530420365729071}, {1, -1, -1, 0.809865373731656}, {1, -1, 0,
0.428583594968747}, {1, -1, 1, 0.356790110633438}, {1, 0, -1,
1.0442615636686}, {1, 0, 0, 0.632677465009402}, {1, 0, 1,
0.41403380595296}, {1, 1, -1, 1.15298313826944}, {1, 1, 0,
0.713639780743863}, {1, 1, 1, 0.387365636124855}}};
nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 *y1 + a20 * y2 + a30 *y3 +
a12* y1*y2 + a13 *y1*y3 + a23* y2*y3 +
a11* y1^2 + a22 *y2^2 + a33 *y3^2, {a00, a10, a20, a30, a12, a13,
a23, a11, a22, a33 }, {y1, y2, y3}];
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
\[Theta][y1_, y2_, y3_] :=
0.867355554729714` - 0.500908275663246` y1 +
0.22862573945867942` y2 - 0.5744490909031829` y3 +
0.2116310255942404` y1 y3 + 0.3419373624120923` y3^2
y10 = 15;
dy1 = 5;
y20 = 70;
dy2 = 30;
y30 = 6;
dy3 = 3;
\[Theta][\[Theta][rr_, rc_,
dc_] := \[Theta][rr - y10)/dy1, (rc - y20)/dy2, (dc - y30)/dy3];
Eyppand[\[Theta][\[Theta][rr, rc, dc]]
Opt = FindMinimum[{\[Theta][\[Theta][rr, rc, dc],
y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1, y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2,
y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr, y10 - dy1}, {rc,
y20 - dy2}, {dc, y30 - dy3}]
rropt = rr /. Last[Opt];
rcopt = rc /. Last[Opt];
dcopt = dc /. Last[Opt];
Plot3D[{\[Theta][\[Theta][rr, rc, dcopt]}, {rr, y10 - dy1,
y10 + dy1}, {rc, y20 - dy2, y20 + dy2},
ColorFunction -> "BlueGreenYellow", AxesLabel -> {"\!\(\(*
StyleBox[SubscriptBox["R", "r"], \nFontFamily->"Times New \
Roman", \nFontSize->14, \nFontWeight->"Normal", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]]\)\!\(\(*
StyleBox["", "r", \nFontFamily->"Times New Roman", \nFontSize->14, \n\

```

```

FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["mm",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])", "\!(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["R", "c"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["mm",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])", "\!(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["P", "may"],\nFontFamily->"Times New Roman\
",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., \
0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["MIIa",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])"},
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]
Plot3D[{{[Theta][Theta][rropt, rc, dc]}, {rc, y20 - dy2,
y20 + dy2}, {dc, y30 - dy3, y30 + dy3},
ColorFunction -> "BlueGreenYellow", AyesLabel -> {"\!(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["R", "c"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*
StyleBoy["mm",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.])", "\!(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["[Delta]", "c"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.])\!(\(*

```



```

StyleBoy["\","\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" \"\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["мм\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)", "\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["P\", \"may\"],nFontFamily->"Times New Roman\
\",nFontSize->14,nFontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., \
0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["\","\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" \"\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["МПа\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" \"\",nFontFamily->"Times New Roman",nFontSize->14,n\
FontWeight->"Normal",nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)",
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]

```

Таблиця Б.4 – Програмний код в Wolfram Cloud для визначення рівняння регресії щільності пластифікованої маси компонентів корму на виході з формуючої насадки

```

M = {{-1, -1, -1, 322.983702575679}, {-1, -1, 0,
257.777801688708}, {-1, -1, 1, 235.285228591427}, {-1, 0, -1,
367.001326965297}, {-1, 0, 0, 287.769193572108}, {-1, 0, 1,
249.309816971705}, {-1, 1, -1, 361.714696309084}, {-1, 1, 0,
310.711745109664}, {-1, 1, 1, 300.45673439622}, {0, -1, -1,
314.713397021479}, {0, -1, 0, 254.167468610068}, {0, -1, 1,
232.734844068108}, {0, 0, -1, 338.552278286579}, {0, 0, 0,
278.641727041522}, {0, 0, 1, 241.467761708983}, {0, 1, -1,
351.892271025414}, {0, 1, 0, 320.098403621504}, {0, 1, 1,
250.660903449046}, {1, -1, -1, 277.350207186562}, {1, -1, 0,
235.339269234537}, {1, -1, 1, 222.459294621382}, {1, 0, -1,
283.036507604814}, {1, 0, 0, 264.306235795826}, {1, 0, 1,
236.73607329477}, {1, 1, -1, 281.43084904367}, {1, 1, 0,
273.269124390791}, {1, 1, 1, 235.036516767919}};
nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 *y1 + a20 * y2 + a30 *y3 +
a12* y1*y2 + a13 *y1*y3 + a23* y2*y3 +

```

```

a11* y1^2 + a22 *y2^2 + a33 *y3^2, {a00, a10, a20, a30, a12, a13,
a23, a11, a22, a33 }, {y1, y2, y3}];
Normal[nlm]
nlm["ParameterTable"]
\[Theta][y1_, y2_, y3_] :=
283.91429916708785` - 21.335898235534486` y1 +
18.4700016952979` y2 - 8.520726983271304` y1 y2 -
38.58489234161207` y3 + 9.921855561644383` y1 y3
y10 = 15;
dy1 = 5;
y20 = 70;
dy2 = 30;
y30 = 6;
dy3 = 3;
\[Theta][\[Theta][rr_, rc_,
dc_] := \[Theta][{rr - y10)/dy1, (rc - y20)/dy2, (dc - y30)/dy3];
Expand[\[Theta][\[Theta][rr, rc, dc]]
Opt = FindMayimum[{\[Theta][\[Theta][rr, rc, dc],
y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1, y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2,
y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr, y10 - dy1}, {rc,
y20 - dy2}, {dc, y30 - dy3}]
rropt = rr /. Last[Opt];
rcopt = rc /. Last[Opt];
dcopt = dc /. Last[Opt];
"Графики"
Plot3D[{\[Theta][\[Theta][rr, rc, dcopt]}, {rr, y10 - dy1,
y10 + dy1}, {rc, y20 - dy2, y20 + dy2},
ColorFunction -> "NeonColors", AxesLabel -> {"\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy[\"R\", \"r\"],\nFontFamily->\"Times New \
Roman\", \nFontSize->14, \nFontWeight->\"Normal\", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\)\!\(\(*
StyleBoy[\", \"\", \nFontFamily->\"Times New Roman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\)\!\(\(*
StyleBoy[\" \", \nFontFamily->\"Times New Roman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\)\!\(\(*
StyleBoy[\"мм\", \nFontFamily->\"Times New Roman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\)", "\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy[\"R\", \"c\"], \nFontFamily->\"Times New \
Roman\", \nFontSize->14, \nFontWeight->\"Normal\", \n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\)\!\(\(*
StyleBoy[\", \"\", \nFontFamily->\"Times New Roman\", \nFontSize->14, \n\
FontWeight->\"Normal\", \nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\)\!\(\(*

```

```

StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["MM",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)", "\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["\[Rho]", "out"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["kr",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["^",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[SuperscriptBoy[
StyleBoy["m",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]],
RowBoy[{"3", " "}],\nFontFamily->"Times New Roman",\n\
FontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)",
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]
Plot3D[{\[Theta][Theta][rropt, rc, dc]}, {rc, y20 - dy2,
y20 + dy2}, {dc, y30 - dy3, y30 + dy3},
ColorFunction -> "NeonColors", AyesLabel -> {"!\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["R", "c"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["MM",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)", "\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["\[Delta]", "c"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*

```

```

StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["мм",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)", "\!\(\(*
StyleBoy[SubscriptBoy["\["Rho]", "out"],\nFontFamily->"Times New \
Roman",\nFontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\n\
FontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["",",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[" ",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["kr",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy["^",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]\)\!\(\(*
StyleBoy[SuperscriptBoy[
StyleBoy["m",\nFontFamily->"Times New Roman",\nFontSize->14,\n\
FontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., 0.]],
RowBoy[{"3", " "}],\nFontFamily->"Times New Roman",\n\
FontSize->14,\nFontWeight->"Normal",\nFontColor->RGBColor[0., 0., \
0.]\)\)},
LabelStyle -> Directive[FontSize -> 14, FontFamily -> "Times"],
Mesh -> 20, PlotTheme -> "Detailed", PlotLegends -> Automatic]

```

Таблиця Б.5 – Програмний код в Wolfram Cloud для рішення завдання багатокритеріальної оптимізації

```

y10 = 15;
dy1 = 5;
y20 = 70;
dy2 = 30;
y30 = 6;
dy3 = 3;
Ps[rr_, rc_, dc_] :=
5.6230541080027105` - 0.8590305391114245` dc +
0.03799304026801026` dc^2 + 0.007620857981955981` rc -
0.18483406537034536` rr + 0.014108735039616026` dc rr;
pps[rr_, rc_, dc_] :=
381.8811524215208` - 22.78348634218174` dc +
1.467739421503727` rc - 4.259582612904708` rr +

```

```

0.6614570374429589` dc rr - 0.05680484655514203` rc rr;
PsmínF = FindMinimum[{Ps[rr, rc, dc], y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1,
  y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2, y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr,
  y10 - 0 dy1}, {rc, y20 - 0 dy2}, {dc, y30 - 0 dy3}];
PsmáyF = FindMayimum[{Ps[rr, rc, dc], y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1,
  y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2, y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr,
  y10 - 0 dy1}, {rc, y20 - 0 dy2}, {dc, y30 - 0 dy3}];
ppsmínF =
  FindMinimum[{pps[rr, rc, dc], y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1,
  y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2, y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr,
  y10 - 0 dy1}, {rc, y20 - 0 dy2}, {dc, y30 - 0 dy3}];
ppsmáyF =
  FindMayimum[{pps[rr, rc, dc], y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1,
  y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2, y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr,
  y10 - 0 dy1}, {rc, y20 - 0 dy2}, {dc, y30 - 0 dy3}];
Psmín = Ps[rr /. Last[PsmínF], rc /. Last[PsmínF], dc /. Last[PsmínF]];
Psmáy = Ps[rr /. Last[PsmáyF], rc /. Last[PsmáyF], dc /. Last[PsmáyF]];
ppsmín = pps[rr /. Last[ppsmínF], rc /. Last[ppsmínF],
  dc /. Last[ppsmínF]];
ppsmáy = pps[rr /. Last[ppsmáyF], rc /. Last[ppsmáyF],
  dc /. Last[ppsmáyF]];
Opt = FindMayimum[{
  ((pps[rr, rc, dc] - ppsmín)/(ppsmáy - ppsmín))
  ((Psmáy - Ps[rr, rc, dc])/(Psmáy - Psmín)),
  y10 - dy1 <= rr <= y10 + dy1, y20 - dy2 <= rc <= y20 + dy2,
  y30 - dy3 <= dc <= y30 + dy3}, {rr, y10 - 0 dy1}, {rc,
  y20 - 0 dy2}, {dc, y30 - 0 dy3}]
rropt = rr /. Last[Opt];
rcopt = (rc /. Last[Opt]);
dcopt = dc /. Last[Opt];
Ps[rropt, rcopt, dcopt]
pps[rropt, rcopt, dcopt]

```

Додаток В

Результати лабораторних досліджень пресування комбікорму

Таблиця В.1 – Зведені данні результатів лабораторних досліджень пресування комбікорму

№	x ₁	x ₂	x ₃	W, %	T, °C	d, мм	h _a , мм				ρ _a , кг/м ³				Ψ				S _{ΔP}			
							1	2	3	Сер	1	2	3	Сер	1	2	3	Сер	1	2	3	Сер
1	-1	-1	-1	10	80	0,5	17,8	16,3	17,5	17,2	285,8	266,3	285,8	279,3	1,170	1,109	1,187	1,155	1,761	1,708	1,833	1,767
2	-1	-1	0	10	80	1,5	18,3	18,2	18,8	18,4	261,3	250,8	261,3	257,8	1,240	1,227	1,278	1,248	1,586	1,535	1,599	1,573
3	-1	-1	1	10	80	2,5	19,8	18,7	20,0	19,5	251,2	226,7	250,2	242,7	1,322	1,268	1,383	1,324	1,545	1,452	1,603	1,533
4	-1	0	-1	10	110	0,5	17,2	15,6	16,6	16,5	280,7	261,7	278,7	273,7	1,226	1,165	1,255	1,216	1,542	1,490	1,604	1,545
5	-1	0	0	10	110	1,5	18,3	16,8	18,0	17,7	285,1	270,1	288,1	281,1	1,324	1,265	1,298	1,296	1,389	1,368	1,476	1,411
6	-1	0	1	10	110	2,5	18,0	17,8	19,4	18,4	269,6	248,1	274,6	264,1	1,368	1,339	1,404	1,370	1,359	1,266	1,417	1,347
7	-1	1	-1	10	140	0,5	16,2	15,9	16,8	16,3	266,4	251,9	267,4	261,9	1,265	1,241	1,301	1,269	1,350	1,288	1,382	1,340
8	-1	1	0	10	140	1,5	17,8	17,1	17,9	17,6	272,2	252,2	268,2	264,2	1,328	1,294	1,416	1,346	1,262	1,169	1,279	1,237
9	-1	1	1	10	140	2,5	18,0	17,4	18,2	17,9	272,5	261,5	274,5	269,5	1,433	1,403	1,434	1,424	1,189	1,158	1,235	1,194
10	0	-1	-1	20	80	0,5	14,0	13,7	14,3	14,0	277,3	262,8	275,3	271,8	1,355	1,336	1,420	1,370	1,121	1,049	1,131	1,100
11	0	-1	0	20	80	1,5	14,9	14,6	15,8	15,1	269,5	251,0	271,5	264,0	1,443	1,417	1,489	1,450	1,007	0,924	1,045	0,992
12	0	-1	1	20	80	2,5	16,1	15,8	16,7	16,2	257,0	244,5	259,0	253,5	1,538	1,518	1,561	1,539	0,992	0,940	1,025	0,985
13	0	0	-1	20	110	0,5	13,8	12,6	13,5	13,3	300,8	281,3	297,8	293,3	1,449	1,401	1,508	1,453	0,933	0,860	0,973	0,922
14	0	0	0	20	110	1,5	14,8	13,9	14,7	14,5	300,3	282,3	297,3	293,3	1,529	1,489	1,591	1,537	0,824	0,752	0,854	0,810
15	0	0	1	20	110	2,5	15,3	15,0	15,6	15,3	263,7	251,7	263,7	259,7	1,614	1,593	1,649	1,619	0,768	0,717	0,791	0,759
16	0	1	-1	20	140	0,5	14,0	12,9	13,3	13,4	290,7	281,7	287,7	286,7	1,526	1,490	1,546	1,521	0,760	0,739	0,787	0,762
17	0	1	0	20	140	1,5	15,1	13,9	14,5	14,5	276,7	263,2	273,7	271,2	1,612	1,570	1,647	1,610	0,640	0,599	0,674	0,638
18	0	1	1	20	140	2,5	15,2	14,3	15,3	14,9	276,8	263,3	279,8	273,3	1,716	1,674	1,706	1,699	0,578	0,546	0,643	0,589
19	1	-1	-1	30	80	0,5	15,9	14,3	15,5	15,2	263,5	242,0	262,5	256,0	1,347	1,282	1,377	1,335	0,623	0,561	0,695	0,626
20	1	-1	0	30	80	1,5	16,5	15,6	16,4	16,2	249,2	231,2	246,2	242,2	1,411	1,372	1,474	1,419	0,488	0,416	0,518	0,474
21	1	-1	1	30	80	2,5	17,8	17,0	17,4	17,4	224,9	212,4	220,9	219,4	1,497	1,468	1,553	1,506	0,433	0,381	0,446	0,420
22	1	0	-1	30	110	0,5	14,3	13,6	15,0	14,3	271,5	253,5	277,5	267,5	1,420	1,376	1,408	1,401	0,512	0,460	0,595	0,523
23	1	0	0	30	110	1,5	16,0	14,5	15,4	15,3	260,9	242,9	257,9	253,9	1,504	1,447	1,541	1,497	0,390	0,338	0,443	0,390
24	1	0	1	30	110	2,5	16,2	15,7	17,1	16,3	245,6	224,6	248,6	239,6	1,576	1,538	1,611	1,575	0,366	0,283	0,424	0,358
25	1	1	-1	30	140	0,5	13,9	13,6	14,2	13,9	284,7	276,2	285,7	282,2	1,491	1,473	1,503	1,489	0,468	0,437	0,494	0,467
26	1	1	0	30	140	1,5	15,9	14,4	14,7	15,0	246,3	234,3	240,3	240,3	1,590	1,542	1,632	1,588	0,367	0,336	0,393	0,365
27	1	1	1	30	140	2,5	16,0	14,6	16,2	15,6	253,1	226,1	253,1	244,1	1,686	1,620	1,736	1,681	0,317	0,223	0,394	0,311

Таблиця В.2 – Розрахунок рівняння регресії висоти експандатів h_a в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M={{-1,-1,-1,17.2},{-1,-1,0,18.4},{-1,-1,1,19.5},{-1,0,-1,16.5},{-1,0,0,17.7},{-
1,0,1,18.4},{-1,1,-1,16.3},{-1,1,0,17.6},{-1,1,1,17.9},{0,-1,-1,14},{0,-
1,0,15.1},{0,-1,1,16.2},{0,0,-1,13.3},{0,0,0,14.5},{0,0,1,15.3},{0,1,-
1,13.4},{0,1,0,14.5},{0,1,1,14.9},{1,-1,-1,15.2},{1,-1,0,16.2},{1,-1,1,17.4},{1,0,-
1,14.3},{1,0,0,15.3},{1,0,1,16.3},{1,1,-1,13.9},{1,1,0,15},{1,1,1,15.6}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *y1+a20 * y2+a30 *y3+
  a12* y1*y2+a13 *y1*y3+a23* y2*y3+
  a11* y1^2+a22 *y2^2+a33 *y3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13, a23,a11,a22,a33
},{y1,y2,y3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
θ[y1_,y2_,y3_] :=14.500000000000004` -1.12777777777777753`
y1+2.0166666666666666` y1^2-0.56111111111111079` y2+0.283333333333332905`
y2^2+0.96666666666666676` y3-0.15833333333333358` y2 y3-
0.166666666666667054` y3^2
"Розкодоване скорочене"
y10=20;
dy1=10;
y20=110;
dy2=30;
y30=1.5;
dy3=1.0;
θθ [w_,t_,d_] := θ [(w-y10)/ dy1 , (t-y20)/ dy2 , (d - y30 )/ dy3 ] ;
EuRand[ θθ [W , T ,Dp ] ]
EuRand[ θθ [G4 , H4 ,I4 ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ θθ [w , t ,d ],y10-dy1<=w<=y10+dy1,y20-dy2<=
t<=y20+dy2,y30-dy3<=d<=y30+dy3},{w,y10-dy1},{ t,y20-dy2},{d,y30-dy3}]
wopt=w/.Last[Opt];
topt= t/.Last[Opt];
dopt=d/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{ θθ[w , t ,y30]},{w,y10-dy1,y10+dy1},{ t,y20-
dy2,y20+dy2},ColorFunction->"LightTemperatureMap", AxesLabel->{"W, %
","T, °C","ha, мм"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{ θθ[y10,t,d]},{t,y20-dy2,y20+dy2},{d,y30-dy3,y30+dy3},ColorFunction-
>"LightTemperatureMap", AxesLabel->{"T, °C","Dμ, мм","ha, мм"},LabelStyle-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme-

```



```
>"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{
     $\theta[w,y20,d]$ },{w,y10-dy1,y10+dy1},{d,y30-
dy3,y30+dy3},ColorFunction->"LightTemperatureMap", AxesLabel->{"W, %
","D $\mu$ , мм","h $a$ , мм"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
```

Таблиця В.3 – Розрахунок рівняння регресії щільності експандатів ρ_a в програмному пакеті Wolfram Cloud

```
M={{-1,-1,-1,279.330804917825},{-1,-1,0,257.761810007526},{-1,-
1,1,242.71128821514},{-1,0,-1,273.698273347426},{-
1,0,0,281.106294260473},{-1,0,1,264.140982318954},{-1,1,-
1,261.922168615957},{-1,1,0,264.165555401818},{-
1,1,1,269.518671087881},{0,-1,-1,271.842326906068},{0,-
1,0,264.028564533244},{0,-1,1,253.468983442648},{0,0,-
1,293.329740040608},{0,0,0,293.339024422821},{0,0,1,259.667010910551},{0,1
,-
1,286.686749170196},{0,1,0,271.249415941963},{0,1,1,273.313899755965},{1,-
1,-1,256.009102539266},{1,-1,0,242.170947358964},{1,-
1,1,219.409723989474},{1,0,-
1,267.530555564436},{1,0,0,253.945754786333},{1,0,1,239.586773994931},{1,1
,-1,282.242399080232},{1,1,0,240.323964068762},{1,1,1,244.088590607282}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *y1+a20 * y2+a30 *y3+
a12* y1*y2+a13 *y1*y3+a23* y2*y3+
a11* y1^2+a22 *y2^2+a33 *y3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13, a23,a11,a22,a33
},{y1,y2,y3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
 $\theta[y1_,y2_,y3_] := 280.4039117068154` -8.280446454628866` y1-
16.343765004747137` y1^2+5.932103434438958` y2-9.580214091825319` y2^2-
11.482566436621525` y3-5.343055277751201` y1 y3$ 
"Розкодоване скорочене"
y10=20;
dy1=10;
y20=110;
dy2=30;
y30=1.5;
dy3=1.0;
 $\theta[w_,t_,d_] := \theta[(w-y10)/dy1,(t-y20)/dy2,(d-y30)/dy3];$ 
Expand[ $\theta[W,T,Dp]$ ]
Expand[ $\theta[G4,H4,I4]$ ]
"Оптимум"
```

```

Opt=FindMaximum[{  $\theta\theta$  [w , t ,d ],y10-dy1<=w<=y10+dy1,y20-dy2<=
t<=y20+dy2,y30-dy3<=d<=y30+dy3},{w,y10-dy1},{t,y20-dy2},{d,y30-dy3}]
wopt=w/.Last[Opt];
topt= t/.Last[Opt];
dopt=d/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{  $\theta\theta$ [w , t ,y30]},{w,y10-dy1,y10+dy1},{ t,y20-
dy2,y20+dy2},ColorFunction->"DarkRainbow", AxesLabel->{"W, % ","T,
°C", " $\rho_a$ , кг/м3"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{  $\theta\theta$ [y10,t,d]},{t,y20-dy2,y20+dy2},{d,y30-dy3,y30+dy3},ColorFunction-
>"DarkRainbow", AxesLabel->{"T, °C","D $\mu$ , мм"," $\rho_a$ , кг/м3"},LabelStyle-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme-
>"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{  $\theta\theta$ [w,y20,d]},{w,y10-dy1,y10+dy1},{d,y30-
dy3,y30+dy3},ColorFunction->"DarkRainbow", AxesLabel->{"W, % ","D $\mu$ ,
мм", " $\rho_a$ , кг/м3"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Таблиця В.4 – Розрахунок рівняння регресії площі петлі пружного гістерезису $S_{\Delta P}$ в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M={{-1,-1,-1,1.7674685444013},{-1,-1,0,1.57323707718973},{-1,-
1,1,1.53347745468127},{-1,0,-1,1.54518899828435},{-
1,0,0,1.41130905724436},{-1,0,1,1.34737557668387},{-1,1,-
1,1.34017337703224},{-1,1,0,1.23691779412101},{-
1,1,1,1.19377528881109},{0,-1,-1,1.09994234510861},{0,-
1,0,0.992040438249004},{0,-1,1,0.985457804813559},{0,0,-
1,0.921726483393025},{0,0,0,0.810378665488666},{0,0,1,0.75869096168053},{
0,1,-
1,0.762331359289067},{0,1,0,0.637779106949067},{0,1,1,0.58903852299936},{
1,-1,-1,0.62639001708476},{1,-1,0,0.474131768044977},{1,-
1,1,0.419764230187298},{1,0,-
1,0.522617817340943},{1,0,0,0.39011447486105},{1,0,1,0.35770042150577},{1,
1,-
1,0.466633354586274},{1,1,0,0.365342978432466},{1,1,1,0.311095322558861}}
;
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *y1+a20 * y2+a30 *y3+
a12* y1*y2+a13 *y1*y3+a23* y2*y3+
a11* y1^2+a22 *y2^2+a33 *y3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13, a23,a11,a22,a33
},{y1,y2,y3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]

```

```

"Закодоване скорочене"
 $\theta[y1_,y2_,y3_] := 0.8022600012243087^y1 - 0.5008407102137121^y1^2 - 0.14271236527672607^y2 - 0.08644981736660892^y3 + 0.042574731071194874^y3^2$ 
"Розкодоване скорочене"
y10=20;
dy1=10;
y20=110;
dy2=30;
y30=1.5;
dy3=1.0;
 $\theta[w_,t_,d_] := \theta[(w-y10)/dy1, (t-y20)/dy2, (d-y30)/dy3];$ 
EuRand[ $\theta[w,t,Dp]$ ]
EuRand[ $\theta[G4, H4, I4]$ ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ $\theta[w, t, d]$ , y10-dy1<=w<=y10+dy1, y20-dy2<=t<=y20+dy2, y30-dy3<=d<=y30+dy3}, {w, y10-dy1}, {t, y20-dy2}, {d, y30-dy3}]
wopt=w/.Last[Opt];
topt=t/.Last[Opt];
dopt=d/.Last[Opt];
Opt=FindMaximum[{ $\theta[w, t, d]$ , y10-dy1<=w<=y10+dy1, y20-dy2<=t<=y20+dy2, y30-dy3<=d<=y30+dy3}, {w, y10-dy1}, {t, y20-dy2}, {d, y30-dy3}]
wopt=w/.Last[Opt];
topt=t/.Last[Opt];
dopt=d/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{ $\theta[w, t, y30]$ }, {w, y10-dy1, y10+dy1}, {t, y20-dy2, y20+dy2}, ColorFunction->"BlueGreenYellow", AxesLabel->{"W, %", "T, °C", "SΔP, МПа"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{ $\theta[y10, t, d]$ }, {t, y20-dy2, y20+dy2}, {d, y30-dy3, y30+dy3}, ColorFunction->"BlueGreenYellow", AxesLabel->{"T, °C", "Dμ, мм", "SΔP, МПа"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{ $\theta[w, y20, d]$ }, {w, y10-dy1, y10+dy1}, {d, y30-dy3, y30+dy3}, ColorFunction->"BlueGreenYellow", AxesLabel->{"W, %", "Dμ, мм", "SΔP, МПа"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]

```

Таблиця В.5 – Розрахунок рівняння регресії коефіцієнта механічних втрат Ψ в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M = {{-1, -1, -1, 1.15540285375162}, {-1, -1, 0,
1.24822693950659}, {-1, -1, 1, 1.32447333056168}, {-1, 0, -1,
1.21554789518429}, {-1, 0, 0, 1.29555625862133}, {-1, 0, 1,
1.37006322365111}, {-1, 1, -1, 1.26886894074353}, {-1, 1, 0,
1.34595543620784}, {-1, 1, 1, 1.4237191003561}, {0, -1, -1,
1.37027170097169}, {0, -1, 0, 1.44956873321394}, {0, -1, 1,
1.53874615628829}, {0, 0, -1, 1.45292230490142}, {0, 0, 0,
1.53652486443651}, {0, 0, 1, 1.61856550044225}, {0, 1, -1,
1.52079877613553}, {0, 1, 0, 1.6095290630203}, {0, 1, 1,
1.69890257109514}, {1, -1, -1, 1.33533192637953}, {1, -1, 0,
1.41893922867839}, {1, -1, 1, 1.50608926798487}, {1, 0, -1,
1.40117430179263}, {1, 0, 0, 1.49744233371261}, {1, 0, 1,
1.5747647177977}, {1, 1, -1, 1.48924288154577}, {1, 1, 0,
1.58797849977925}, {1, 1, 1, 1.68064926981579}}};
nlm = NonlinearModelFit[M, a00 + a10 *y1 + a20 * y2 + a30 *y3 +
a12* y1*y2 + a13 *y1*y3 + a23* y2*y3 +
a11* y1^2 + a22 *y2^2 + a33 *y3^2, {a00, a10, a20, a30, a12, a13,
a23, a11, a22, a33 }, {y1, y2, y3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"

$$\theta[y1\_ ,y2\_ ,y3\_ ] := 1.5323638937597643` + 0.10243324716124733` y1 - 0.13623516305219519` y1^2 + 0.07103302229792507` y2 + 0.015589156217536518` y1 y2 + 0.08480064203260675` y3 + 0.004776515082581474` y1 y3$$

"Розкодоване скорочене"
y10=20;
dy1=10;
y20=110;
dy2=30;
y30=1.5;
dy3=1.0;

$$\theta[w\_ ,t\_ ,d\_ ] := \theta [(w-y10)/ dy1 , (t-y20)/ dy2 , (d - y30 )/ dy3 ] ;$$

Expand[  $\theta[W,T,Dp]$  ]
Expand[  $\theta[G4 , H4 ,I4 ]$  ]
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{  $\theta[w , t ,d ]$  ,y10-dy1<=w<=y10+dy1,y20-dy2<=t<=y20+dy2,y30-dy3<=d<=y30+dy3},{w,y10-dy1},{ t,y20-dy2},{d,y30-dy3}]
wopt=w/.Last[Opt];
topt= t/.Last[Opt];
dopt=d/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{  $\theta[w , t ,y30]$  },{w,y10-dy1,y10+dy1},{ t,y20-
```

```

dy2,y20+dy2},ColorFunction->"SolarColors", AyesLabel->{"W, % ", "T,
°C", "Ψ"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
>20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{ θθ[y10,t,d]},{t,y20-dy2,y20+dy2},{d,y30-dy3,y30+dy3},ColorFunction-
>"SolarColors", AyesLabel->{"T, °C", "Dμ, мм", "Ψ"},LabelStyle-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme-
>"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{ θθ[w,y20,d]},{w,y10-dy1,y10+dy1},{d,y30-
dy3,y30+dy3},ColorFunction->"SolarColors", AyesLabel->{"W, % ", "Dμ,
мм", "Ψ"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
>20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Таблиця В.6 – Вирішення компромісної задачі лабораторних досліджень в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

y10=20;
dy1=10;
y20=110;
dy2=30;
y30=1.5;
dy3=1.0;
hae [w_ , t_ ,d_ ] :=27.993055555555546` +2.047222222222244` d-
0.166666666666667054` d2-0.080046296296295` t-0.0052777777777778595` d
t+0.00031481481481481004` t2-0.91944444444444441`
w+0.020166666666666663` w2;
psie [w_ , t_ ,d_ ] :=0.5235513932635325` +0.0752476118674438`
d+0.0013284903287617343` t+0.05830488872818553`
w+0.0004776515082581474` d w+0.000051963854058455065` t w-
0.0013623516305219519` w2;
se [w_ , t_ ,d_ ] :=3.389293161442785` -0.21417401058019356`
d+0.042574731071194874` d2-0.008790980267938214` t-0.11155813279673957`
w+0.00020169507126903391` t w+0.0009821900983943655` w2;
pe [w_ , t_ ,d_ ] :=82.23272636905777` -0.7964558811191207`
d+2.5395668924830432` t-0.010644682324250355` t2+6.510919648098649` w-
0.5343055277751202` d w-0.16343765004747138` w2;
Opt=FindMayimum[{ pe [w , t ,d ] psie [w , t ,d ] ,y10-dy1<=w<=y10+dy1,y20-
dy2<= t<=y20+dy2,y30-dy3<=d<=y30+dy3},{w,y10-dy1},{ t,y20-dy2},{d,y30-
dy3}]
wopt=w/.Last[Opt];
topt=t/.Last[Opt];
dopt=d/.Last[Opt];
pe [wopt , topt ,dopt ]
psie [wopt , topt ,dopt ]

```

Таблиця В.7 – Порівняння теоретичних і лабораторних досліджень пресування комбікорму в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

y10=1.5;
dy1=1;
y20=20;
dy2=10;
y30=0.3;
dy3=0.1;
y40=0.25;
dy4=0.25;
w0=20.7;
t0=137;
d0=0.5;
Slider[Dynamic[d0],{0.5,2.5}]
Print["D = ",Dynamic[d0]," мм"]
Slider[Dynamic[w0],{10,30}]
Print["W = ",Dynamic[w0]," %"]
Slider[Dynamic[t0],{80,140}]
Print["T = ",Dynamic[t0]," °C"]
"Експеримент";
hae [w_ , t_ ,d_ ] :=27.99305555555546` +2.047222222222244` d-
0.166666666666667054` d^2-0.080046296296295` t-0.005277777777778595` d
t+0.00031481481481481004` t^2-0.91944444444444441`
w+0.020166666666666663` w^2;
psie [w_ , t_ ,d_ ] :=0.5235513932635325` +0.0752476118674438`
d+0.0013284903287617343` t+0.05830488872818553`
w+0.0004776515082581474` d w+0.000051963854058455065` t w-
0.0013623516305219519` w^2;
se [w_ , t_ ,d_ ] :=3.389293161442785` -0.21417401058019356`
d+0.042574731071194874` d^2-0.008790980267938214` t-0.11155813279673957`
w+0.00020169507126903391` t w+0.0009821900983943655` w^2;
"Теорія";
hat[Dp_,Ep_,Up_,Wp_] :=26.688621258037074` +0.34482935802469217` Dp-
0.955516078304452` Ep+0.01517210179939286` Ep^2-5.2384372253122145`
Up+0.1428143044284358` Ep Up+0.92777777777776712`
Wp+1.0919753086421955` Wp^2;
psit[Dp_,Ep_,Up_,Wp_] :=1.246146164925608` +0.12359732025957626` Dp-
0.011726098828743044` Ep+0.0002931834232351936` Ep^2-
1.0696544248179805` Up+1.1166072016460953` Wp+0.10822572744539358`
Dp Wp-0.01423081196581198` Ep Wp+1.5625926020892569` Up Wp;
st[Dp_,Ep_,Up_,Wp_] :=-1.9179084416225756` -0.08010140546737182`
Dp+0.034902191410934716` Ep+11.756321358024694` Up-
0.12866734920634937` Ep Up+2.023849677601421` Wp-0.02497719597883584`

```

```

Ep Wp-11.637707936507944` Up Wp+0.9793586567901001` Wp^2;
Dynamic[ContourPlot3D[{ hat [d0 , Ep , Up ,Wp ]== hae [w0 , t0 ,d0 ] , psit [d0 ,
Ep , Up ,Wp ]== psie [w0 , t0 ,d0 ] , st [d0 , Ep , Up ,Wp ]== se [w0 , t0 ,d0 ]
},{Ep,y20-dy2-2,y20+dy2+2},{ Up,y30-dy3-0.1,y30+dy3+0.1},{Wp,y40-
dy4,y40+dy4+0.1},ContourStyle->{Red,Green,Blue},AyesLabel->{"Ep,
MΠa","μp","Wp, H/M"},PlotLegends->{"ha","ψ","SΔP"}]]
Print["ha = ",Dynamic[ hae [w0 , t0 ,d0 ] ] , " MM" ]
Print["Psi = ",Dynamic[ psie [w0 , t0 ,d0 ] ] , "" ] ;
Print["S = ",Dynamic[ se [w0 , t0 ,d0 ] ] , " MΠa" ] ;
Dynamic[Opt=NSolve[{ hat [d0 , Ep , Up ,Wp ]== hae [w0 , t0 ,d0 ] , psit [d0 , Ep
, Up ,Wp ]== psie [w0 , t0 ,d0 ] , st [d0 , Ep , Up ,Wp ]== se [w0 , t0 ,d0 ] ,y20-
dy2-2<=Ep<=y20+dy2+2,y30-dy3-0.1<= Up <=y30+dy3+0.1,y40-
dy4<=Wp<=y40+dy4+0.1},{ Ep , Up ,Wp}]
Ep0=Ep/.Last[Opt];
Up0= Up/.Last[Opt];
Wp0=Wp/.Last[Opt];
Dynamic[ hae [w0 , t0 ,d ] ]
Dynamic[ hat [d , Ep0 , Up0 ,Wp0 ] ]
Dynamic[Plot[{ hae [w0 , t0 ,d ] , hat [d , Ep0 , Up0 ,Wp0 ]},{d,y10-
dy1,y10+dy1},PlotStyle->{Green, Red},AyesLabel->{"d, MM","ha, MM
"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],GridLines-
>Automatic,GridLineStyle->Directive[Black]]]
Dynamic[ psie [w0 , t0 ,d ] ]
Dynamic[ psit [d , Ep0 , Up0 ,Wp0 ] ]
Dynamic[Plot[{ psie [w0 , t0 ,d ] , psit [d , Ep0 , Up0 ,Wp0 ]},{d,y10-
dy1,y10+dy1},PlotStyle->{Green, Red},AyesLabel->{"d, MM","ψ"},LabelStyle-
>Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],GridLines-
>Automatic,GridLineStyle->Directive[Black]]]
Dynamic[ se [w0 , t0 ,d ] ]
Dynamic[ st [d , Ep0 , Up0 ,Wp0 ] ]
Dynamic[Plot[{ se [w0 , t0 ,d ] , st [d , Ep0 , Up0 ,Wp0 ]},{d,y10-
dy1,y10+dy1},PlotStyle->{Green, Red},AyesLabel->{"d, MM","SΔP, MΠa
"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],GridLines-
>Automatic,GridLineStyle->Directive[Black]]]

```


Додаток Г

Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

Таблиця Г.1 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

№	x ₁	x ₂	x ₃	W, %	δ _c , мм	n, об/хв	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				ρ, кг/м ³			
							1	2	3	Сер	1	2	3	Сер	1	2	3	Сер	1	2	3	Сер
1	1	1	0	30	5	45	22,9	22,0	22,6	22,5	783	770	775	776	34,8	34,2	34,5	34,5	329.0	313.0	318.0	320.0
2	1	-1	0	30	1	45	20,9	19,0	19,5	19,8	855	840	849	848	43,6	42,0	42,8	42,8	359.8	345.8	352.8	352.8
3	-1	1	0	20	5	45	26,0	24,8	24,8	25,2	924	913	917	918	37,0	35,9	36,5	36,5	335.6	324.6	331.6	330.6
4	-1	-1	0	20	1	45	22,4	20,7	20,5	21,2	976	947	957	960	45,8	44,8	45,3	45,3	385.4	356.4	375.4	372.4
5	0	0	0	25	3	45	27,1	25,8	26,0	26,3	891	867	876	878	33,9	32,9	33,4	33,4	368.4	347.4	365.4	360.4
6	1	0	1	30	3	60	25,6	23,9	24,0	24,5	806	787	792	795	32,9	32,0	32,4	32,4	339.4	319.4	332.4	330.4
7	1	0	-1	30	3	30	15,4	13,4	14,4	14,4	527	510	517	518	36,7	35,4	35,9	36,0	361.4	345.4	356.4	354.4
8	-1	0	1	20	3	60	31,0	28,9	29,5	29,8	1029	1009	1013	1017	35,0	33,2	34,1	34,1	348.0	326.0	340.0	338.0
9	-1	0	-1	20	3	30	17,2	15,5	17,2	16,6	653	637	645	645	39,6	37,9	38,8	38,8	367.0	351.0	359.0	359.0
10	0	0	0	25	3	45	20,2	18,9	20,3	19,8	625	607	622	618	32,1	30,3	31,2	31,2	357.4	338.4	340.4	345.4
11	0	1	1	25	5	60	35,0	33,5	33,9	34,1	1163	1143	1147	1151	34,2	33,2	33,8	33,7	336.0	314.0	328.0	326.0
12	0	1	-1	25	5	30	20,5	19,6	20,4	20,2	771	751	764	762	38,5	37,2	37,7	37,8	361.0	344.0	354.0	353.0
13	0	-1	1	25	1	60	25,1	24,2	24,5	24,6	1049	1032	1048	1043	43,2	41,4	42,3	42,3	357.8	340.8	341.8	346.8
14	0	-1	-1	25	1	30	14,0	12,8	14,5	13,8	648	627	639	638	47,2	45,5	46,5	46,4	386.8	363.8	370.8	373.8
15	0	0	0	25	3	45	27,0	25,6	25,7	26,1	863	840	847	850	33,2	31,9	32,6	32,6	365.4	341.4	356.4	354.4

Таблиця Г.2 – Обробка даних продуктивності експандера Q в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M={{1,1,0,22.5},{1,-1,0,19.8},{-1,1,0,25.1856},{-1,-
1,0,21.2},{0,0,0,26.3},{1,0,1,24.5},{1,0,-1,14.4},{-1,0,1,29.808},{-1,0,-
1,16.632},{0,0,0,19.8},{0,1,1,34.125},{0,1,-1,20.16},{0,-1,1,24.6428571428571},{0,-1,-
1,13.75},{0,0,0,26.1}}};
y10=25;
dy1=5;
y20=3;
dy2=2;
y30=45;
dy3=15;
y1[y1_,y2_,y3_]=24.06666666666667+-
1.4532y1+2.82221785714286y2+6.01673214285714y3+-0.3214000000000001y1 y2+-
0.7690000000000001y1 y3+0.768035714285714y2 y3+-1.86486547619048y1 y1+-
0.0304011904761925y2 y2+-0.866801190476197y3 y3;
y2[y1_,y2_,y3_]=24.06666666666667+0y1+2.82221785714286y2+6.01673214285714y3+
0y1 y2+0y1 y3+0y2 y3+0y1 y1+0y2 y2+0y3 y3;
y3[y1_,y2_,y3_]=y2[(y1-25)/5,(y2-3)/2,(y3-45)/15];
Y={1,y1,y2,y3,y1*y2,y1*y3,y2*y3,y1^2,y2^2,y3^2};
y0 [ y1_ , y2_ ,y3_ ] = Fit[M,Y,{y1,y2,y3}];
"Повне закодоване рівняння в Wolfram Cloud"
y0[y1,y2,y3]
"Повне закодоване рівняння в Excel"
y1[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння закодоване"
y2[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння розкодоване"
Simplify[ y3 [ W ,δс , n ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMayimum[{
y3[y1,y2,y3],y10-dy1<=y1<=y10+dy1,y20-
dy2<=y2<=y20+dy2,y30-dy3<=y3<=y30+dy3},{y1,y10-dy1},{y2,y20-dy2},{y3,y30-
dy3}]
y1opt=y1/.Last[Opt];
y2opt=y2/.Last[Opt];
y3opt=y3/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{ y3[y1 , y2 ,y3opt]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{ y2,y20-dy2,y20+dy2},PlotStyle-
>Cyan, AyesLabel->{"W, % ", "δс, мм", "Q, кг/год"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1,y2opt,y3]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{y3,y30-dy3,y30+dy3},PlotStyle-
>Cyan, AyesLabel->{"W, % ", "n, об/хв", "Q, кг/год"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1opt,y2,y3]},{y2,y20-dy2,y20+dy2},{y3,y30-dy3,y30+dy3},PlotStyle-

```

```
>Cyan, AyesLabel->{" $\delta_c$ , мм", "n, об/хв", "Q, кг/год"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed"]
```

Таблиця Г.3 – Обробка даних споживаної потужності експандера N в програмному пакеті Wolfram Cloud

```
M={{1,1,0,775.65366},{1,-1,0,847.7141112},{-1,1,0,918.1351041984},{-1,-1,0,960.4968672},{0,0,0,878.42},{1,0,1,794.97208},{1,0,-1,517.824},{-1,0,1,1016.79201504},{-1,0,-1,644.82829488},{0,0,0,617.76},{0,1,1,1151.14545},{0,1,-1,762.4262016},{0,-1,1,1043.11292142857},{0,-1,-1,638.203225},{0,0,0,849.87603}};
y10=25;
dy1=5;
y20=3;
dy2=2;
y30=45;
dy3=15;
y1[y1_,y2_,y3_]=782.0186766666667+-
75.5110537648y1+14.7291613712287y2+180.342593123571y3+-7.42467204960005y1
y2+-23.70391004y1 y3+-4.04761200714282y2 y3+-30.8182965221049y1
y1+124.299555505038y2 y2+-7.5962826645623y3 y3;
y2[y1_,y2_,y3_]=782.0186766666667+-
75.5110537648y1+0y2+180.342593123571y3+0y1 y2+0y1 y3+0y2 y3+0y1
y1+124.299555505038y2 y2+0y3 y3;
y3[y1_,y2_,y3_]=y2[(y1-25)/5,(y2-3)/2,(y3-45)/15];
Y={1,y1,y2,y3,y1*y2,y1*y3,y2*y3,y1^2,y2^2,y3^2};
y0 [ y1_ , y2_ , y3_ ] = Fit[M,Y,{y1,y2,y3}];
"Повне заповнене рівняння в Wolfram Cloud"
y0[y1,y2,y3]
"Повне заповнене рівняння в Excel"
y1[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння заповнене"
y2[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння розповнене"
Simplify[ y3 [ W ,  $\delta_c$  , n ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{
y3[y1,y2,y3],y10-dy1<=y1<=y10+dy1,y20-
dy2<=y2<=y20+dy2,y30-dy3<=y3<=y30+dy3},{y1,y10-dy1},{y2,y20-dy2},{y3,y30-
dy3}]
y1opt=y1/.Last[Opt];
y2opt=y2/.Last[Opt];
y3opt=y3/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{ y3[y1 , y2 ,y3opt]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{ y2,y20-dy2,y20+dy2},PlotStyle-
>Orange, AyesLabel->{"W, % ", " $\delta_c$ , мм", "N, Вт"}, LabelStyle->Directive[FontSize-
>14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed"]
```

```

Plot3D[{ y3[y1,y2opt,y3]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{y3,y30-dy3,y30+dy3},PlotStyle->Orange, AyesLabel->{"W, % ", "n, об/хв", "N, Вт"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1opt,y2,y3]},{y2,y20-dy2,y20+dy2},{y3,y30-dy3,y30+dy3},PlotStyle->Orange, AyesLabel->{"δс, мм", "n, об/хв", "N, Вт"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]

```

Таблиця Г.4 – Обробка даних питомої енергоємності процесу експандування q в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M={{1,1,0,34.473496},{1,-1,0,42.813844},{-1,1,0,36.454764},{-1,-1,0,45.306456},{0,0,0,33.4},{1,0,1,32.44784},{1,0,-1,35.96},{-1,0,1,34.11138},{-1,0,-1,38.77034},{0,0,0,31.2},{0,1,1,33.7332},{0,1,-1,37.81876},{0,-1,1,42.32922},{0,-1,-1,46.41478},{0,0,0,32.5623}};
y10=25;
dy1=5;
y20=3;
dy2=2;
y30=45;
dy3=15;
y1[y1_,y2_,y3_]=32.38743333333333+-1.11847y1+-4.29801y2+-2.04278y3+0.127836y1 y2+0.2867000000000003y1 y3+0y2 y3+1.311553333333335y1 y1+6.063153333333336y2 y2+1.623403333333334y3 y3;
y2[y1_,y2_,y3_]=32.38743333333333+-1.11847y1+-4.29801y2+-2.04278y3+0y1 y2+0y1 y3+0y2 y3+1.311553333333335y1 y1+6.063153333333336y2 y2+1.623403333333334y3 y3;
y3[y1_,y2_,y3_]=y2[(y1-25)/5,(y2-3)/2,(y3-45)/15];
Y={1,y1,y2,y3,y1*y2,y1*y3,y2*y3,y1^2,y2^2,y3^2};
y0 [ y1_ , y2_ ,y3_ ] = Fit[M,Y,{y1,y2,y3}];
"Повне закодоване рівняння в Wolfram Cloud"
y0[y1,y2,y3]
"Повне закодоване рівняння в Excel"
y1[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння закодоване"
y2[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння розкодоване"
Simplify[ y3 [ W ,δс , n ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ y3[y1,y2,y3],y10-dy1<=y1<=y10+dy1,y20-dy2<=y2<=y20+dy2,y30-dy3<=y3<=y30+dy3},{y1,y10-dy1},{y2,y20-dy2},{y3,y30-dy3}]
y1opt=y1/.Last[Opt];
y2opt=y2/.Last[Opt];
y3opt=y3/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{ y3[y1 , y2 ,y3opt]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{ y2,y20-dy2,y20+dy2},PlotStyle->Orange, AyesLabel->{"W, % ", "n, об/хв", "N, Вт"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]

```

```

>Green, AyesLabel->{"W, % ", "δс, мм", "q, кВт·год/т"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1,y2opt,y3]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{y3,y30-dy3,y30+dy3}, PlotStyle->Green, AyesLabel->{"W, % ", "n, об/хв", "q, кВт·год/т"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1opt,y2,y3]},{y2,y20-dy2,y20+dy2},{y3,y30-dy3,y30+dy3}, PlotStyle->Green, AyesLabel->{"δс, мм", "n, об/хв", "q, кВт·год/т"}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed"]

```

Таблиця Г.5 – Обробка даних щільності експандатів ρ в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

M={{1,1,0,320.029431558},{1,-1,0,352.811052758},{-1,1,0,330.609471558},{-1,-1,0,372.391092758},{0,0,0,360.440278158},{1,0,1,330.420242158},{1,0,-1,354.420242158},{-1,0,1,338.000282158},{-1,0,-1,359.000282158},{0,0,0,345.440278158},{0,1,1,326.049467558},{0,1,-1,353.049467558},{0,-1,1,346.831088758},{0,-1,-1,373.831088758},{0,0,0,354.440278158}};
y10=25;
dy1=5;
y20=3;
dy2=2;
y30=45;
dy3=15;
y1[y1_,y2_,y3_]=353.440278158+-5.290020000000003y1+-14.5158106y2+-12.375y3+2.25y1 y2+-0.75y1 y3+0y2 y3+-6.980016000000009y1 y1+-2.500000000000011y2 y2+-1.000000000000011y3 y3;
y2[y1_,y2_,y3_]=353.440278158+-5.290020000000003y1+-14.5158106y2+-12.375y3+0y1 y2+0y1 y3+0y2 y3+-6.980016000000009y1 y1+0y2 y2+0y3 y3;
y3[y1_,y2_,y3_]=y2[(y1-25)/5,(y2-3)/2,(y3-45)/15];
Y={1,y1,y2,y3,y1*y2,y1*y3,y2*y3,y1^2,y2^2,y3^2};
y0 [ y1_ , y2_ , y3_ ] = Fit[M,Y,{y1,y2,y3}];
"Повне закодоване рівняння в Wolfram Cloud"
y0[y1,y2,y3]
"Повне закодоване рівняння в Excel"
y1[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння закодоване"
y2[y1,y2,y3]
"Скорочене рівняння розкодоване"
Simplify[ y3 [ W , δс , n ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMayimum[{ y3[y1,y2,y3],y10-dy1<=y1<=y10+dy1,y20-dy2<=y2<=y20+dy2,y30-dy3<=y3<=y30+dy3},{y1,y10-dy1},{y2,y20-dy2},{y3,y30-dy3}]
y1opt=y1/.Last[Opt];

```

```

y2opt=y2/.Last[Opt];
y3opt=y3/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{ y3[y1 , y2 ,y3opt]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{ y2,y20-dy2,y20+dy2},PlotStyle-
>Gray, AxesLabel->{"W, % ", "δc, мм", "ρ, кг/м3"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1,y2opt,y3]},{y1,y10-dy1,y10+dy1},{y3,y30-dy3,y30+dy3},PlotStyle-
>Gray, AxesLabel->{"W, % ", "n, об/хв", "ρ, кг/м3"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]
Plot3D[{ y3[y1opt,y2,y3]},{y2,y20-dy2,y20+dy2},{y3,y30-dy3,y30+dy3},PlotStyle-
>Gray, AxesLabel->{"δc, мм", "n, об/хв", "ρ, кг/м3"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed"]
yt[y1_,y2_,y3_]:=381.881-22.7835 y3+1.46774 y2-4.25958 y1+0.661457 y3 y1-
0.0568048 y2 y1;
yt[14.2,89.9,δc]
y3 [ 27.131956762053605` ,δc , 54.43748831371227` ]
Plot[{yt[14.2,89.9,y], y3[27.131956762053605` ,y,54.43748831371227` ]},{y,y20-
dy2,y20+dy2},GridLines->Automatic,PlotLegends->"Eypressions",PlotRange->{0,400}]
y3 [27.131956762053605`,3.708873710266321`,54.43748831371227` ]
yt[14.2,89.9,3.708873710266321`]

```

Додаток Д

УДК 631.563

№ держреєстрації № 0120U100322

Міністерство освіти і науки України
 Дніпровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ)
 49000, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної
 діяльності ДДАЕУ,
 доктор с.-г. наук, проф.,

Юрій ТКАЛІЧ

8.12.2022



ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ
 БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У БІОЛОГІЧНО
 ЦІННІ ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ І КОРМОВІ ДОБАВКИ
 (остаточний)

Начальник відділу науки та інновацій
 ДДАЕУ, канд. хім. наук, доц.

Андрій ТОКАР

8.12.2022

Керівник НДР
 канд. техн. наук, доц.

Світлана МИКОЛЕНКО

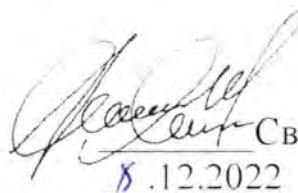
8.12.2022

2022

Рукопис закінчено 8 грудня 2022 р.
 Результати роботи розглянуто науково-технічною радою ДДАЕУ,
 протокол від 8 грудня 2022 р. № 3

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,
провідний науковий співробітник,
канд. техн. наук, доц.



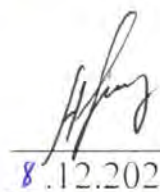
Світлана МИКОЛЕНКО
8.12.2022 (вступ, розділи
4.1, 4.2, 6, 7,
висновки)

Відповідальний виконавець:
старший науковий співробітник,
канд. техн. наук



Наталія СОВА
8.12.2022 (розділи 1.3, 2.1-
2.5, висновки)

Виконавці:
Провідний науковий співробітник,
д-р техн. наук, старш. дослід.



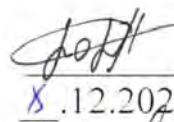
Ельчин АЛІЄВ
8.12.2022 (розділи 2.6, 3, 4.1-
4.2, висновки)

Провідний науковий співробітник,
канд. наук з держ. упр., доц.



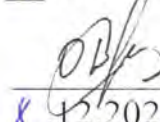
Людмила БЕЗУГЛА
8.12.2022 (розділ 1.1, 1.2,
висновки)

Старший науковий співробітник,
канд. техн. наук



Денис ДОЛГІХ
8.12.2022 (розділ 3.2)

Науковий співробітник



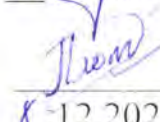
Ольга АЛІЄВА
8.12.2022 (розділи 3.2, 4.1,
4.2)

Науковий співробітник



Ольга ПІДДУБЦЕВА
8.12.2022 (розділи 6.1, 6.2)

Науковий співробітник



Любов ПЛОТКА
8.12.2022 (розділи 6.3, 6.4)

Молодший науковий співробітник




Яна ГЕЗЬ
8.12.2022 (розділ 3.5)

Молодший науковий співробітник

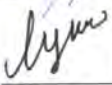


Дмитро ТИМЧАК
8.12.2022 (розділ 5)


Молодший науковий співробітник


Крістіна ХУДАЙБЕРДІЄВА
8.12.2022 (розділи 6.4, 6.5)

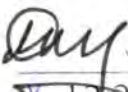
Молодший науковий співробітник


Кристина ЛУПКО
8.12.2022 (розділи 3.1, 4.3)

Молодший науковий співробітник


Микола ЛІНКО
8.12.2022 (розділ 3.4)

Технік


Роман МАЛЄГІН
8.12.2022 (розділи 2.6, 3.3)

Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), д-р с.г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ

м.п.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ ВО «Восход»

Олена ГУЛА



АКТ про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які виконані здобувачем третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Лінком Миколою Олександровичем під керівництвом професора кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету, д-р техн. наук, старшого дослідника Алієва Ельчина Бахтияра огли впроваджені та використані на виробництві ТОВ ВО «Восход» (49098, Україна, м. Дніпро, вул. Любарського, 86) ТОВ ВО «Восход» в особі директора Олени ГУЛИ отримало дослідний зразок і конструкторську документацію конструктивно-технологічну схему експандера комбікормів, який розроблено згідно науково-дослідної роботи БМ-14/2020 «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки» (№ ДР 0120U100322) Лінком М. О і Алієвим Е. Б.

Підприємство ТОВ ВО «Восход» зацікавлене у виготовленні дослідної партії експандера комбікормів у кількості 5 одиниць для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ДДАЕУ

Професор кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
д-р. техн. наук, старш. дослідн.

Ельчин АЛІЄВ

Від ТОВ ВО «Восход»

Інженер з налагодження й випробування

Владислав ОВДІЄНКО

Здобувач третього освітньо-наукового
рівня вищої освіти ОНП «Галузеве
машинобудування»

Микола ЛІНКО

«1» листопада 2023 р.

«1» листопада 2023 р.

Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор – проректор з навчальної роботи Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ),

канд. с.-г. наук, проф.

М.П. Дмитро ОНОПРИЄНКО

М.П.

«05» грудня 2023 року



А К Т

про використання результатів дисертації

на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

Лінка Миколи Олександровича

«Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експандера комбікормів»

у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А. М. та членів – завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін В. Ю., професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослід. Алієв Е. Б. підтверджує впровадження науково-практичних результатів за дисертаційною роботою на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії аспіранта Лінка Миколи Олександровича «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експандера комбікормів» у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ і констатує

– аспірантом Лінком М. О. впроваджено в курс дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія наступне: лабораторна робота «Дослідження процесу експандування комбікормів». Мета роботи – визначення

оптимальних конструкційно-технологічних параметрів експандера комбікормів при роботі з різними матеріалами. Матеріальне забезпечення – дослідна установка та методики випробувань згідно дисертаційної роботи.

– аспірантом Лінком М. О. впроваджено в курс дисципліни «Чисельне моделювання процесів сільськогосподарського виробництва» для студентів освітнього рівня магістр за спеціальністю 208 – Агроінженерія наступне: завдання до виконання курсової роботи «Симуляція деформації зернової суміші». Мета – визначити параметри деформації зерна в залежності від його фізико-механічних властивостей.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного
факультету ДДАЕУ,
д-р наук з держ. управ., проф.

Андрій ПУГАЧ

Члени комісії:

завідувач кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц.

Володимир ДУДІН

професор кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
д-р техн. наук, старш. дослід.

Ельчин АЛІЄВ

Додаток І

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності
Дніпровського державного аграрно-економічного
університету, д. с.-т. н., проф.


Юрій КАЛІЧЕ
« 10 » 02 2024 р.


ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «НВП «Глобинський
свинокомплекс»


Микола КРЕМЕЗЬ
« 10 » 02 2024 р.


А К Т

про виробничі випробування експандера комбікормів

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Лінко Микола Олександрович, науковий керівник професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослідн. Алієв Ельчин Бахтияр огли, завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін Володимир Юрійович, з однієї сторони, і представник ТОВ «НВП «Глобинський свинокомплекс» (ЄДРПОУ 33604720, Полтавська обл., Кременчуцький р-н, м. Глобине, вул. Володимирівська, буд. 222-Е) головний технолог Мойсей Ігор Степанович, з другої сторони, склали цей акт про те, що в умовах ТОВ «НВП «Глобинський свинокомплекс» проводились виробничі випробування експандера комбікормів з обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами.

В результаті випробування встановлено, що серійний експандер кормів OE 30.2 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) виконує технологічний процес експандування кормів з продуктивністю 0,94...1,2 т/год, при цьому середня споживана потужність складає 33,20 кВт. Встановлення розробленої прес-матриці із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами (відношення радіуса увігнутого конуса до радіуса звуження циліндра формуючої насадки $R_c/R_r = 6,33$, зазор між конусом та гайкою $\delta_c = 3,7$ мм, частота обертання гвинта $n = 54,4$ об/хв) на серійний експандер кормів OE 30.2 (Amandus Kahl GmbH & Co. KG) дозволив зменшити середню споживану потужність на 9-11 % (29,60 кВт), при цьому продуктивність складала 0,98...1,05 т/год.

Встановлено, що використання прес-матриці експандера із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами дозволяє виконувати технологічний процес експандування комбікормів більш ефективно.


Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Від ДДАЕУ

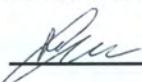
завідувач кафедри інжинірингу технічних систем
ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц.


Володимир ДУДІН

професор кафедри інжинірингу технічних систем
ДДАЕУ, д-р техн. наук, старш. дослідн.


Ельчин АЛІЄВ

здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої
освіти ОНП «Галузеве машинобудування»


Микола ЛІНКО

Від ТОВ «НВП «Глобинський
свинокомплекс»

Головний технолог
ТОВ «НВП «Глобинський
свинокомплекс»


Ігор МОЙСЕЙ

Додаток К

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Aliiev E., Dudin V., Kobets O., **Linko M.** (2023). Development of feed expander. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 16 (65), 2: 115–130. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.2.8 *(Здобувачу належить чисельного моделювання і обґрунтування параметрів формуючої насадки).*

2. Aliiev E., Dudin V., **Linko M.** (2022). Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. Machinery & Energetics, 13 (3): 9–16. DOI: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16. *(Здобувачу належить розробка фізико-математичного апарата).*

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

3. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1 (116): 51–57. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-6. *(Здобувачу належить проведення аналізу і формування висновків).*

4. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.**, Алієва О. Ю. (2022). Симуляція процесу експандованого приготування кормів. Центральнoукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 5 (36), II: 176–185. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185. *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів).*

5. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Лінко М. О.** (2023). Результати лабораторних досліджень процесу формування експандатів. Вібрації в техніці та технологіях. 2

(109): 20-29. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-3. *(Здобувачу належить проведення лабораторних досліджень і обробка даних).*

6. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2023). Обґрунтування конструктивних параметрів формуючої насадки експандера кормів. Механіка та автоматика агропромислового виробництва, 2 (116): 143–152. DOI: 10.37204/2786-7765-2023-2-15. *(Здобувачу належить проведення чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів).*

7. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Лінко М. О.** (2023). Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 53: 121–130. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.121-130 *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і обробка даних).*

Розділи монографії:

8. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., Малегін Р. Д., Лупко К. О., **Лінко М. О.**, Гезь Я. В., Безугла Л. С. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0 *(Здобувачу належать розділ «3.4 Експандер для приготування харчових продуктів і кормів»).*

Патент України на корисну модель:

9. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., **Лінко М. О.** (2023). Експандер для приготування кормів. Заявка на корисну модель № u202304732. Заявл. 06.10.2023 *(Здобувачу належить ідея форми насадки експандера у вигляді увігнутого конуса).*

Статті у інших наукових виданнях:

10. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. Корми і факти, 9 (145): 8–10. *(Здобувачу належить проведення аналізу і формування висновків).*

Тези і матеріали конференцій:

11. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2022). Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій – інновації молодих вчених для забезпечення сталого розвитку агропромислового комплексу» (20 травня 2022 року). Херсон: ІЗЗ НААН, 160–161. *(Здобувачу належить розробка моделі процесу експандованого приготування кормів).*

12. Алієв Е., **Лінко М.** (2022). Експандоване приготування кормів. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (14–16 травня 2022 р.). Кропивницький: ЦНТУ, 38–40. *(Здобувачу належить аналіз процесу експандованого приготування кормів).*

13. **Лінко М. О.** (2023). Чисельне моделювання формуючої насадки експандера кормів. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (21 березня 2023 р.). Запоріжжя: ІОК НААН, 127–128.

14. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2023). Експандування насіння сої на кормові цілі. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції присвяченої 90 річчю від Дня народження Д. І. Нікітчина «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (15 березня 2022 р.). ІОК НААН, 64–65. *(Здобувачу належить формуванн переваг використання експандерів на лінії переробки кормових гранул із насіння сої).*

15. **Лінко М. О.** (2023). Порівняння теоретичних і лабораторних досліджень пресування комбікорму. Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (1 грудня 2023 р.). Дніпро. ДДАЕУ, 10–12.

16. Алієв Е.Б., **Лінко М. О.** (2023). Результати чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів. Міжнародної науково-практичної конференції «Використання сучасних технологій та техніки в аграрному

виробництві» (20–21 квітня 2023 р.): зб. наукових праць. ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Ніжин, 17–22. *(Здобувачу належить розробка моделі процесу експандованого приготування кормів).*

17. Алієв Е.Б., **Лінко М. О.** (2023). Порівняння результатів чисельного моделювання і лабораторних досліджень процесу пресування комбікорму. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (2–20 жовтня 2023 р.). ІМА АПВ, НУБіП. <http://animal-conf.inf.ua/conf.html> *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів).*

18. Алієв Е. Б., **Лінко М. О.** (2023). Експериментальні дослідження експандера кормів. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2023 року). НУБіП: 229–232. *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і обробка даних).*

Депоновані звіти:

19. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгіх Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., Лупко К., **Лінко М.**, Малегін Р. Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322 *(Здобувачу належать розділ 3.4 і висновки).*