

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Тально Ярослав Леонідович

УДК 639.3:631.22:621.798

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ПРИГОТУВАННЯ ТА РОЗДАЧІ КОРМО-СУМІШІ НА
РИБОФЕРМАХ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Тально Я.Л.

Керівник роботи

Грабар І.Г.

доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Талько Ярослав Леонідович. Вдосконалення технологічного процесу приготування та роздачі кормо-суміші на рибофермах. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У межах виконаної роботи розв'язано науково-технічну проблему підвищення результативності процесу виробництва повнораціонних кормо-сумішей на рибофермах із одночасним забезпеченням їх знезараження. Це досягнуто шляхом модернізації конструкції експандера та наукового обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів. За підсумками проведених досліджень сформульовано такі основні висновки.

Розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему експандера кормосумішей з удосконаленою формувальною насадкою, характерною особливістю якої є поєднання звуженої ділянки циліндра, увігнутого конуса та корончатої гайки. У процесі переміщення нагрітої пластифікованої кормової маси до звуженої зони формувальної насадки відбувається інтенсивне зростання тиску, а після проходження цієї ділянки його різке зниження.

У ході експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів було встановлено кількісні закономірності впливу технологічних параметрів на основні показники його роботи. Зокрема, визначено функціональні залежності продуктивності експандера Q , споживаної потужності N , питомих енерговитрат процесу експандування q та об'ємної щільності сформованого продукту ρ від вологості комбікормової суміші W , величини зазору між конусом і гайкою δ_c та частоти обертання гвинта n .

Ключові слова: кормо-суміш, експандер, насадка, продуктивність, потужність.

ANNOTATION

Talko Yaroslav Leonidovych. Improvement of the technological process of preparation and distribution of feed mixtures at fish farms. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Within the scope of the completed work, a scientific and technical problem of increasing the efficiency of the production process of complete feed mixtures at fish farms while simultaneously ensuring their disinfection has been solved. This was achieved through modernization of the expander design and scientific substantiation of its structural and technological parameters. Based on the results of the conducted studies, the following main conclusions were formulated.

A structural and technological scheme of a feed mixture expander with an improved forming nozzle has been developed and substantiated. A distinctive feature of this nozzle is the combination of a narrowed cylindrical section, a concave cone, and a castellated nut. During the movement of the heated plasticized feed mass toward the narrowed zone of the forming nozzle, an intensive increase in pressure occurs, followed by a sharp pressure drop after passing this section.

In the course of experimental studies of a small-scale feed expander, quantitative relationships describing the influence of technological parameters on its main performance indicators were established. In particular, functional dependences of the expander productivity Q , power consumption N , specific energy consumption of the expanding process q , and bulk density of the formed product ρ on the moisture content of the compound feed mixture W , the gap between the cone and the nut δ_c , and the screw rotational speed n were determined.

Keywords: feed mixture, expander, nozzle, productivity, power.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ АКТУАЛЬНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБґРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПАРАМЕТРИ ЕКСПАНДЕР ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	31
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку рибного господарства характеризується зростанням ролі аквакультури як одного з ключових джерел забезпечення населення повноцінними білковими продуктами тваринного походження. В умовах обмеженості природних водних ресурсів, підвищення вимог до екологічної безпеки та необхідності інтенсифікації виробництва особливої актуальності набуває вдосконалення технологій вирощування риби на рибофермах. Вирішальним чинником ефективності рибницьких господарств є система годівлі, оскільки витрати на корми та процеси їх приготування і роздачі становлять найбільшу частку в собівартості продукції аквакультури.

Недосконалість існуючих технологічних процесів приготування та роздачі кормо-сумішей на багатьох рибофермах призводить до перевитрат кормів, нерівномірного їх розподілу, зниження коефіцієнта засвоєння поживних речовин та погіршення гідробіологічного стану водойм. Нераціональна організація годівлі часто супроводжується підвищеним навантаженням на водне середовище, накопиченням органічних залишків і, як наслідок, погіршенням умов утримання риби та зростанням ризиків захворювань. У таких умовах підвищується потреба в науково обґрунтованих технологічних рішеннях, спрямованих на оптимізацію процесів приготування кормів та їх ефективну роздачу.

Особливої актуальності дослідження набуває з огляду на необхідність підвищення енергоефективності та автоматизації виробничих процесів у рибництві. Впровадження сучасних технологій дозування, змішування і подачі кормо-сумішей дає змогу забезпечити стабільну якість корму, точність його подачі відповідно до біологічних потреб риби та зменшити вплив людського фактора. Це сприяє підвищенню продуктивності рибоферм, зниженню експлуатаційних витрат і покращенню економічних показників господарств.

Удосконалення технологічного процесу приготування та роздачі кормо-сумішей також є важливим з позицій сталого розвитку та екологічної безпеки. Раціональне використання кормових ресурсів дозволяє зменшити антропогенне навантаження на водні екосистеми, скоротити обсяги кормових втрат і мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. В умовах інтеграції України до європейського простору та адаптації аграрного виробництва до сучасних стандартів якості і безпеки продукції аквакультури ці питання набувають стратегічного значення.

Таким чином, дослідження, спрямоване на вдосконалення технологічного процесу приготування та роздачі кормо-сумішей на рибфермах, є актуальним з наукової, практичної та соціально-економічної точок зору, а його результати можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування рибницьких господарств і конкурентоспроможності продукції аквакультури.

Мета роботи: розроблення та впровадження удосконаленої технології виробництва повнораціонних кормо-сумішей на рибфермах із поєднаним термічним знезараженням на основі модернізації експандерного обладнання та наукового обґрунтування його оптимальних конструктивних і технологічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

- модернізувати будову експандера для виробництва кормо-сумішей та науково обґрунтувати раціональну конструктивно-технологічну схему його функціонування;
- здійснити комплексні багатофакторні дослідження для встановлення впливу режимів роботи модернізованого експандера на якісні показники продукції, рівень продуктивності та енергоємність процесу;
- забезпечити практичне впровадження отриманих результатів у виробничі умови.

Об'єктом дослідження є технологічний процес приготування та роздачі кормо-суміші на рибофермах.

Предметом дослідження є залежності та особливості перебігу технологічного процесу експандування повнораціонних кормо-сумішей.

Методи наукового дослідження. Теоретичну частину досліджень спрямовано на комплексне аналізування процесів, що відбуваються під час контакту робочих елементів експандера з кормовою сировиною, із залученням інструментарію системного підходу, положень теоретичної механіки та механіки суцільних середовищ, а також апарату диференціального й інтегрального числення. Для поглибленого вивчення перебігу процесів застосовано методи чисельного моделювання з використанням програмного середовища Simcenter Star-CCM+. Експериментальну частину виконано на основі поєднання типових і спеціально розроблених методик із використанням фізичних моделей, дослідних зразків робочих органів, вимірювальних приладів і допоміжного обладнання. Дослідження здійснювалися як у лабораторних умовах, так і безпосередньо на виробництві, із застосуванням методів планування багатофакторних експериментів. Опрацювання та узагальнення отриманих результатів виконано з використанням математико-статистичних методів аналізу даних і прикладного програмного забезпечення Wolfram Cloud.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Грабар І.Г., Талько Я.Л. Умови утримання та проведення експериментів на рибній фермі. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.

2. Талько Я.Л. Технологічні властивості кормів для об'єктів аквакультури. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 93-96.

3. Грабар І.Г., Тально Я.Л. Технологічні особливості виробництва екструдованих кормів. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 420-423.

Практичну інтерес для аграрних підприємств представляє впровадження конструкції модернізованого у експандера для виробництва кормо-сумішей на рибофермах.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 29 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 60 сторінок комп'ютерного тексту, містить 35 рисунки та 3 таблиці.

РОЗДІЛ I

АНАЛІЗ АКТУАЛЬНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Технологічні властивості кормів для об'єктів аквакультури

Технологія екструзії зазвичай застосовується для виробництва кормів для риб, оскільки фізичні властивості, такі як водостійкість, довговічність, твердість, здатність до поглинання олії та контроль плавучості, як правило, кращі, ніж у парових гранульованих кормів [2].

Високоякісні гранули повинні бути міцними та залишатися цілими під час транспортування на конвеєрах, у процесі фасування та під час подачі корму у рибогосподарських установках. Зокрема, корми для лососевих повинні мати високу твердість і довговічність, оскільки у системах інтенсивного рибництва зазвичай застосовуються автоматичні кормові пристрої на основі пневматичного транспорту. Пелети піддаються стиранню під час пневматичного транспортування, що призводить до утворення пилу та дрібних частинок [2].

Водночас корми повинні мати таку текстуру та розмір, які сприяють високому споживанню корму та його ефективному перетравленню. Надмірно тверді гранули можуть спричинити розлади травлення у риб. Перегодовування твердими гранулами може призвести до здуття та розриву шлунка. З іншого боку, м'які гранули або гранули з низькою водостійкістю можуть викликати виділення олії та накопичення харчових жирів у шлунку риб [2].

Екструзія є складним процесом, і фізичні властивості, ступінь розширення та текстура корму залежать від складу інгредієнтів і параметрів екструзії. Використання зв'язувальних речовин дозволяє підвищити водостійкість до однієї доби. Проте водночас вони часто є недоступними для риб, а ступінь набухання прямо пропорційний водостійкості. Для прискорення процесу

набухання гранул використовують торф, річковий мох або бентонітову глину (3–10 %) [2].

Зазвичай низька водостійкість гранул обумовлена грубим помелом або недостатнім подрібненням компонентів кормової суміші чи високим вмістом у ній зерен та насінневої лузги. Зменшення розміру помелу з 1,2 до 0,6 мм підвищує водостійкість до 30 %. Видалення лузги насіння та зерна з кормової суміші знижує вміст клітковини на 20–30 %, що підвищує водостійкість на 80–120 % [2].

Використання зернових крохмалів як зв'язувальних речовин для аквакормів має переваги, що включають доступність цього компонента, його поживну цінність і зниження собівартості корму. У більшості випадків рекомендується додавати у кормову суміш 1–5 % зв'язувальної речовини. Із збільшенням її кількості підвищується водостійкість гранул, але водночас необхідно дотримуватися допустимих меж вмісту таких речовин [2].

Оптимальний діапазон водостійкості кормових гранул, призначених для годівлі різних видів риб, становить від 0,5 до 2 годин [2].

Для підвищення водостійкості гранул застосовують технологію їх виготовлення, за якої на поверхні формується плівка, що запобігає вимиванню поживних речовин корму. Плівку або захисний шар утворюють шляхом фізико-хімічної обробки поверхні гранул водовідштовхувальними речовинами: жиром, олією, гідролізатом білка [2].

Для виробництва комбікормів використовується понад 100 видів сировини. Цінність комбікорму полягає в тому, що, варіюючи склад сировини, можна максимально ефективно використовувати її поживні та технологічні властивості [2].

Годувати риб можна як повнораціонними кормами, так і відходами виробництва та харчової промисловості. Риби добре споживають відходи зерноочистки, муку, технічні висівки, мучний пил, пивну дробину та картопляну

мезгу. Із відходів тваринного походження застосовуються суміші з рослинними кормами, лялечки шовкопряда, риба, сушені молюски, трави [2].

З побічних продуктів борошномельного та зернового виробництва використовують пшеничні висівки, пшеничне борошно, комбікорм, вівсяний комбікорм, горохове борошно. Кормові продукти переробних виробництв становлять цінні білкові корми, отримані під час виробництва олій і жирів з рослинної сировини: соняшникова, лляна, соєва, арахісова мука [2].

Корма тваринного походження характеризуються високим вмістом повноцінного білка, амінокислот і вітамінів. До них належать рибне, м'ясокісткове та кров'яне борошно [2].

Використовуються кормові продукти гідролізної промисловості – гідролізовані дріжджі, а також білково-вітамінний концентрат, мінеральні корми, кухонна сіль, крейда, вапняк, мушлі. До складу преміксів входять вітаміни А, D, Е, групи В, вітамін С, сантохін [2].

Серед небілкових форм найбільш цінним є азот аміної групи, далі – аміачний азот, а найменш цінним є амідний азот. Якщо в раціоні риб достатньо жирів і вуглеводів, білки зазвичай використовуються у білковому обміні для росту організму. За відсутності у раціоні жирів і вуглеводів білки можуть використовуватися як джерело енергії у функціональному обміні. Це є неекономічним, оскільки білок – найдорожча частина корму [2].

Кормові суміші отримують за допомогою промислового синтезу. Цінними продуктами для рибництва є дріжджі, плісняві гриби, бактерії та інші організми, що утворюють велику кількість біомаси за короткий час і забезпечують отримання комплексних речовин як цінних кормових добавок [2].

Для виробництва комбікормів використовується високоякісна, нетоксична сировина. До якості рибного та м'ясо-кісткового борошна, альбуміну висуваються особливі вимоги. Вологість не повинна перевищувати 12 %, у м'ясо-кістковому борошні – не більше 13 %, вміст жиру – не більше 10 % [2].

Використовуються такі кормові суміші залежно від завдань і видів риб: стартери для годування личинок або мальків (у вигляді крупки); продукція для годівлі молоді та товарної риби (гранульована); лікувально-профілактичні, що виробляються з додаванням лікарських засобів, імуностимуляторів і підвищеної дози вітамінів [2].

Застосовуються такі види комбікормів. Тістоподібний комбікорм готується у комбікормовому цеху ферми, а у виробничому процесі використовують кормозмішувачі. Для запобігання втраті поживних речовин і зменшення ерозії у воді додають зв'язувальні речовини — лляну макуху, технічний крохмаль, борошно [2].

Брикетований комбікорм виробляється у вигляді прямокутної та циліндричної форми. Брикети отримують на решітчастих пресах, а для збільшення їхньої щільності стінки каналів матриці нагрівають водою [2].

Гранульований комбікорм виготовляють шляхом формування розсипчастої кормової суміші. Гранули можуть мати круглу, квадратну або неправильну форму [2].

Екструдований комбікорм виготовляють у вигляді гранул шляхом механічної деформації та термічної обробки сировини під тиском 40 атмосфер протягом 4–6 секунд із подальшим «вибухом» продукту внаслідок короткочасного зниження тиску та температури у прес-екструдері [2].

Експандований комбікорм отримують у вигляді зерна або гранул шляхом гідробарометричної обробки сировини за допомогою експандера при температурі 80–130 °C під тиском 40 атмосфер [2].

Під час годівлі важливо стежити за якістю корму та його поживною цінністю [2].

Сухий корм повинен бути міцним, водовідштовхувальним, виготовленим із якісної сировини та збалансованим за хімічним складом [2].

Про якість корму судять за кольором, запахом, вологістю та консистенцією, а також за ступенем окиснення жиру. Для гранульованих

кормових сумішей визначають ступінь набухання, ерозії гранул та вилучення поживних речовин у воду [2].

Поживність корму можна визначити за його доступністю, засвоюваністю, біохімічним складом, інтенсивністю росту риби, рівнем засвоєння корму та використанням трансформованої енергії на пластичний і функціональний обмін [2].

1.2 Технологічні особливості виробництва екструдованих кормів

В основі екструдування лежать два процеси: механохімічна деструкція на всіх етапах обробки кормової суміші та «вибух» або «декомпресійний шок» — на виході. У результаті екструзії відбуваються декстринізація і желатинізація крохмалю, деструкція целюлозно-лігнінових комплексів, стерилізація продукту, утворення мікропористої структури [3].

Склад високоефективних кормів для цінних видів риб (лососевих, осетрових) завжди ґрунтувався на сучасних уявленнях про харчові потреби риб. Такі корми характеризуються високим вмістом протеїнів і жирів, тому традиційно, протягом досить тривалого часу, їх основою були рибне борошно та риб'ячий жир, які забезпечують легко засвоювані білок і жир [3].

Застосування нових технологій екструдування кормової суміші та підвищеного введення рідких жирів дало змогу збільшити рівень вмісту сирого жиру в кормі та знизити кількість загальних вуглеводів, ступінь засвоєння яких нижчий, ніж у білків і жирів [1].

Жири (ліпіди) порівняно з протеїнами та вуглеводами (безазотистими екстрактивними речовинами) є найконцентрованішим джерелом енергії: під час повного окиснення 1 г сирого жиру виділяється 9,45 ккал теплової енергії. Таке ж кількість протеїну та вуглеводів дає відповідно 5,65 ккал і 4,10 ккал. Розподіл енергії в кормах відрізняється залежно від віку риби: протеїни становлять від 31

до 76 % від загального вмісту енергії, жири — від 17 до 60 %, вуглеводи — від 5 до 29 % [3].

Приклади продукційних кормів західного виробництва наведено в табл. 1 (за даними з етикеток кормів, 2024 р.). Наведені дані свідчать про суттєві зміни в підходах до формування рецептур кормів для форелі [3].

Найбільш значущими елементами ефективного виробництва екструдованих кормів для риб є подрібнення, змішування, екструдування у поєднанні з кондиціюванням кормової суміші, сушіння та фінішне нанесення рідких компонентів. Ті складники, яким необхідно зменшити розмір частинок до потрібної величини, піддаються подрібненню за допомогою молоткових дробарок. Розмір частинок сировини істотно впливає на текстуру та однорідність кінцевого продукту [3].

Таблиця 1.1 – Склад і показники поживності імпортованих продукційних кормів для райдужної форелі, %

Інгредієнт	Виробник		
	«BioMar», Данія	«Rehu Raisio», Фінляндія	
Мука рибна	36	44	41
Пшениця	5	10	11
Пшеничний глютен	16	4	3
Пшеничний крохмаль	-	-	2
Соеві боби	8	-	-
Боби кормові	14	-	-
Горох	4	-	-
Соевий шрот	-	4	4
Соевий білок	-	8	9
Жир рибий	9	19,5	20
Ріпакова олія	7	4,3	4,4
Премікси	1	4,2	5,6
Сирий протеїн, не менше	43,0	43,0	40,0
Сирий жир, не менше	26,0	28,0	30,0
Сира клітчатка, не більше	1,5	1,0	1,5
Сира зола, не більше	7,5	7,0	6,2

У процесі екструдуювання використовується широкий спектр ступенів помелу інгредієнтів. Однак бажано, щоб частинки мали однаковий розмір і густину, що, у свою чергу, дозволить підвищити якість екструдованих продуктів.

Однорідність частинок сировини забезпечує однорідність кінцевого продукту.

Якщо розмір частинок сировини занадто великий, це може призвести до зниження поїдання готового корму рибами. Також важливим є той факт, що однаковий розмір усіх інгредієнтів сприятиме рівномірному розподілу вологи між ними [1].

Згідно з рекомендаціями компанії Wenger (США), для продукційних кормів для риб оптимальним є 100%-й прохід подрібнених частинок крізь сито з розміром отворів 750 мікрон. При цьому ідеальним вважається вміст не менше 70 % частинок розміром від 400 до 450 мікрон [1]. Деякі компоненти не потребують процедури подрібнення. До них належать продукти з дуже малим діаметром частинок (наприклад, пшеничний глютен) і мікрокомпоненти, подрібнення яких може порушити їх якість і стабільність (вітаміни, солі мікроелементів, пробіотичні та пребіотичні комплекси, імуномодулюючі та інші спеціальні добавки). Такі компоненти вводяться безпосередньо у змішувач перед процесом екструдуювання [3].

Після змішування використаних сировинних компонентів порції кормової суміші надходять у прекондиціонер, де вони змішуються, нагріваються та звожуються шляхом упорскування гарячої води (70 °C) та/або пари. Інтенсивність змішування води й пари, які вводяться в суху суміш компонентів, а також можливість збільшення часу утримування (у процесі прекондиціонування) дозволяють зберігати оптимальний рівень вологості. Підтримання оптимального рівня вологості істотно зменшує зношування обладнання, тому процес прекондиціонування дає можливість підвищувати продуктивність екструдера. На додаток до цього застосовуються рідкі жири (рослинні олії або риб'ячий жир) [2, 3].

У результаті зволоження утворюється тістоподібна суміш із певним ступенем пластичності. За твердженням ряду авторів [2, 3], при вмісті жиру в сухій суміші понад 8 % починають послаблюватися міцність і структурні властивості тістоподібної суміші, знижується її здатність до набухання. Перевищення 17 % жиру в суміші призводить до повного зниження здатності до набухання, а понад 22 % - до втрати міцності кінцевого продукту [3].

Використання рибного борошна та ряду рослинних компонентів (соняшниковий, соєвий або ріпаковий шрот чи макуха), що містять відносно високий рівень жирів, дає змогу досягати в різних рецептурах кормів вмісту жиру в сухій суміші на рівні 6–9 %, що є близьким до оптимального рівня. Введення до рецептури кормів екструдованої повножирової сої підвищує відсоток сирого жиру в суміші, але не має негативного впливу на її структуру [1, 2, 3].

Аналіз рецептур кормів іноземного виробництва, представлених на українському ринку показує, що в процесі екструдування можна ефективно використовувати соєві боби, які попередньо піддаються тостуванню з метою усунення антипоживних факторів, а потім подрібнюються [3].

Крохмаль, що міститься насамперед у зернових культурах або додається у чистому вигляді як вид сировини, за умов високого тиску та високої температури утворює рідкий гель – відбувається процес желатинізації крохмалю. При цьому поглинається значна кількість води (гідратація), що, у свою чергу, підвищує в'язкість суміші. Саме крохмаль надає кінцевому продукту такі властивості, як набухання та зв'язування [1, 3].

У кормах для риби крохмаль у чистому вигляді не засвоюється і не має суттєвої поживної цінності. Після проходження процесу желатинізації та зміни вуглеводної структури крохмаль стає одним із джерел енергії. Відсотковий вміст крохмалю може змінюватися залежно від вимог до поживності та об'ємної густини кінцевого продукту. Одним із факторів, що визначає плавучість корму, є

високий вміст крохмалю. Мінімальний вміст крохмалю в тонучих кормах для риби становить 10 %, а в плаваючих кормах – понад 12 % [2, 3].

Основним джерелом крохмалю в рецептурах кормів для форелі є пшениця. Також можуть використовуватися пшеничне борошно або нативний (чистий) крохмаль [3].

Застосування цих компонентів є доцільним під час виробництва кормів із вмістом жиру понад 30 % та вмістом сирого протеїну нижче 38–40 %. Введення зерна пшениці є технологічно найбільш оптимальним, оскільки, окрім крохмалю, пшениця забезпечує до 5 % сирого протеїну від його загального вмісту в кормі та полегшує проходження кормової суміші по технологічній лінії виробництва. Таким чином, одним із основних умов створення рецептури тонучого корму для форелі є визначений відсотковий уміст пшениці, який забезпечує вміст крохмалю в сухій суміші на рівні близько 10 % [3].

1.3 Дослідження технічних і технологічних засобів, що застосовуються в процесах екструзійної та експандерної обробки кормів

Як зазначалося раніше, технологія експандування почала інтенсивно впроваджуватися з 1980-х років у відповідь на посилення санітарно-гігієнічних норм щодо виробництва комбікормів у країнах Європейського Союзу, Сполучених Штатах Америки та низці інших держав. Досягнення необхідного рівня мікробіологічної безпеки кормової продукції можливе також шляхом використання екструзійної обробки, однак цей метод насамперед орієнтований на покращення поживної цінності сировини, відзначається порівняно низькою пропускнуою здатністю обладнання та значними витратами енергії.

Першу установку для експандування кормів було запатентовано у 1965 році американською компанією Anderson International Corp. Аналіз конструктивної схеми (рис. 1.1) свідчить, що базові технічні рішення, закладені в дане обладнання, залишилися практично незмінними до сьогодні: робочий орган

виконаний у вигляді зонованого гвинта з функціонально різними ділянками, у камеру обробки здійснюється подача пари, а формувальний елемент має конічну конфігурацію з усіченою вершиною.

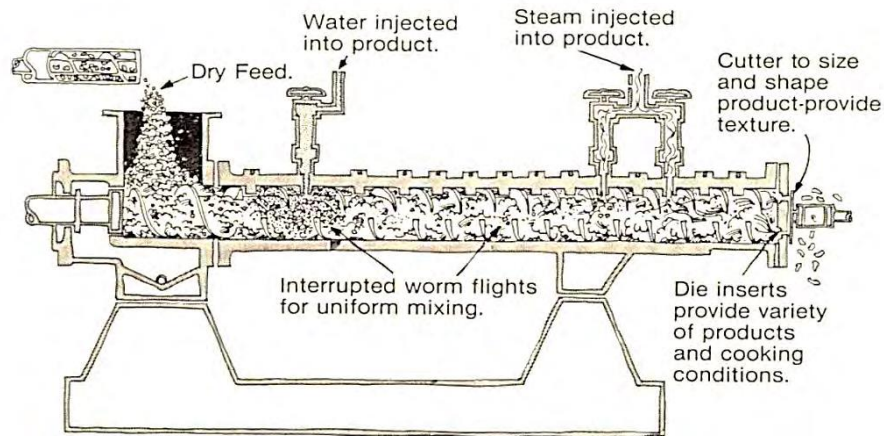


Рис. 1.1. Установка для експандування кормів фірми Anderson International Corp. (USA, 1965 р.)

Сфера використання експандерного обладнання постійно розширюється. На початковому етапі такі машини застосовувалися переважно як допоміжна ланка технологічної лінії перед процесом гранулювання кормів. У сучасних умовах експандери дедалі частіше функціонують як самостійні технологічні агрегати: їх залучають для покращення засвоюваності та поживної цінності повножирної сої та інших бобових культур, для знезараження окремих складників кормосумішей, а також, у ряді випадків, для виготовлення нескладних видів комбікормів [2, 3].

Процеси, що реалізуються в експандерах, мають багато спільних рис з екструзійною обробкою, оскільки в обох випадках матеріал піддається інтенсивному впливу підвищеного тиску та температури [4, 5, 6]. Водночас експандування вирізняється меншою питомою енергоємністю. Принциповою конструктивною відмінністю є відсутність традиційної матриці на виході: замість неї застосовується регульований запірний конус, положення якого змінюється гідроциліндром відносно вихідного каналу робочої камери (рис. 1.2). Таке рішення дозволяє безперервно змінювати площу вихідного перерізу експандату, а відповідно й рівень тиску всередині установки, без зупинки її роботи.

Додатковою характерною ознакою експандерів є обов'язкове використання системи введення перегрітої пари у зону обробки, при цьому тривалість перебування сировини в робочій камері зазвичай не перевищує 5 с [7, 8].

Порівняно з одnogвинтовими екструдерами харчового призначення, експандери відрізняються спрощеною конструктивною схемою та більш зручним регулюванням основних режимних параметрів. Важливу роль відіграє й економічна доцільність їх застосування: за наявними оцінками, експлуатаційні витрати експандера становлять близько 30 % витрат, характерних для двогвинтових харчових екструдерів, і приблизно 50 % витрат одnogвинтових аналогів. Разом із тим, функціональні можливості експандерів обмежені певним колом технологічних завдань, що не завжди дозволяє використовувати їх як універсальне обладнання.

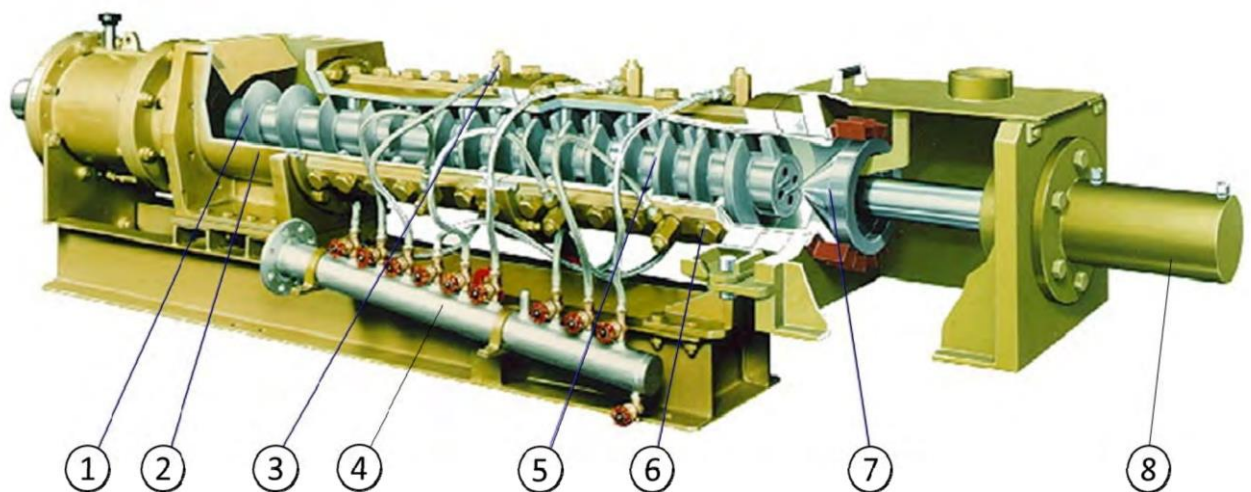


Рис. 1.2. Експандер з кільцевим зазором фірми Amandus Kahl: 1 – ділянка подавання сировини; 2 – обробна камера; 3 – розпилювач для введення пари; 4 – вузол розподілу пари; 5 – зона ущільнення та вирівнювання структури матеріалу; 6 – перемішувальний палець; 7 – регулювальний запірний конус; 8 – гідравлічний циліндр керування положенням конуса.

Подібно до екструзійних установок, експандери складаються з ряду базових конструктивних вузлів, ключовими з яких є гвинтовий робочий орган,

робоча камера та формувальний елемент. Доцільно детальніше зупинитися на конструктивних особливостях зазначених складових.

Гвинт експандера має модульну будову: його робочі елементи монтуються на шліцьовий вал і можуть комбінуватися в різних конфігураціях залежно від функціонального призначення окремих зон обробки матеріалу.

Що стосується загальної геометрії гвинта, то на прикладі експандерів серії ОЕ компанії Amandus Kahl підвищення тиску в робочій камері досягається не лише шляхом поступового зменшення кроку гвинтової нарізки, але й за рахунок збільшення діаметра його валу в зоні, безпосередньо прилеглій до вихідного формувального елемента (рис. 1.3).

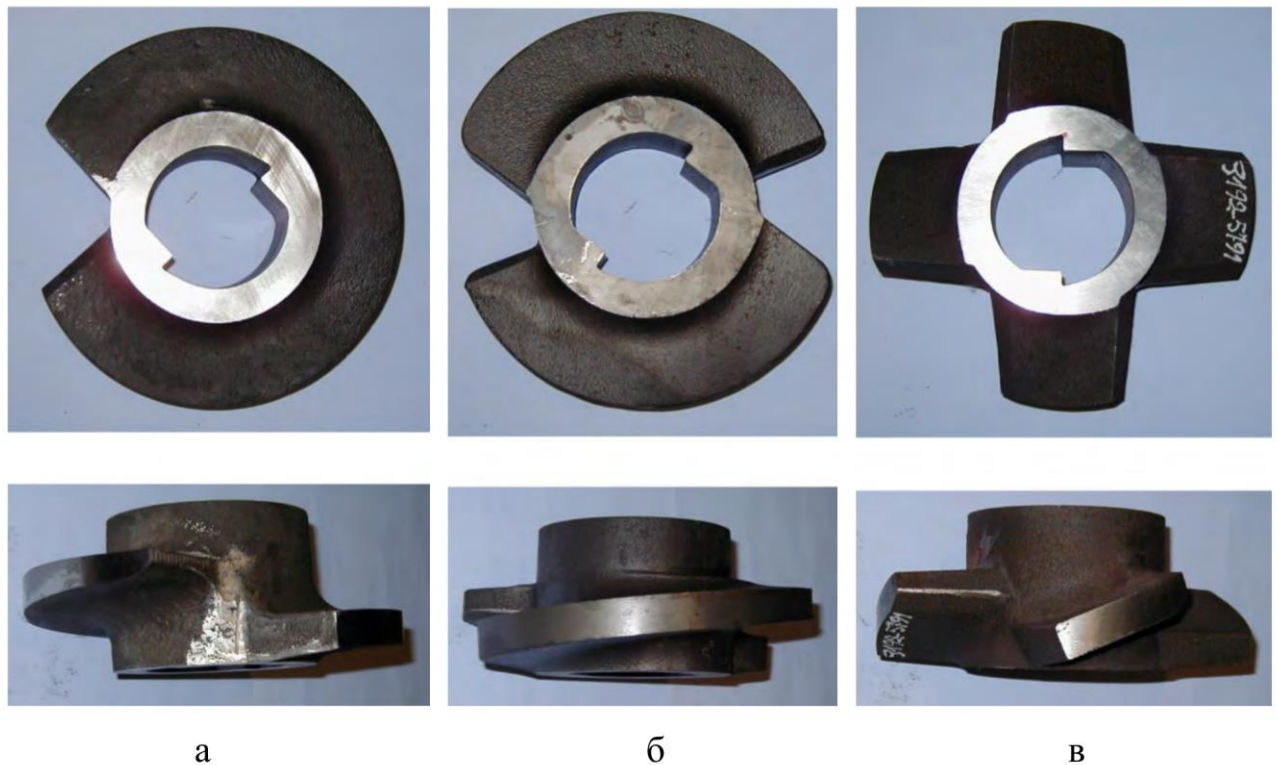


Рис. 1.3. Функціональні частини гвинта експандера серії ОЕ компанії Amandus Kahl: а – зона подавання та переміщення матеріалу; б – ділянка ущільнення; в – секція інтенсивного перемішування.

За даними, наведеними в роботі [7], визначальну роль у формуванні якісних експандованих продуктів відіграють ефективність перемішування та ступінь пластичного стану оброблюваної сировини. Інтенсифікація змішування може реалізовуватися як за рахунок перерозподілу частинок у потоці, так і

внаслідок дії зсувних напружень, що впливають на матеріал. Такий зсувний ефект забезпечується встановленням у робочій камері спеціальних перемішувальних штифтів (рис. 1.4). При цьому керування інтенсивністю зсуву та ступенем гомогенізації досягається шляхом варіювання кількості штифтів або зміни їх конструктивного виконання [8].

Подібні технічні рішення реалізовані, зокрема, в експандерах серії Solvex компанії Anderson Feed Technology (США) та моделі FEX34 виробництва Andritz Feed and Biofuel (Данія) [1, 2]. Отже, можна відзначити певні конструктивні розбіжності між робочими камерами експандерів і екструдерів: у перших для активізації процесу переважно застосовують повздовжні канавки на внутрішній поверхні камери, тоді як у других інтенсифікація здійснюється за допомогою встановлення перемішувальних штифтів.

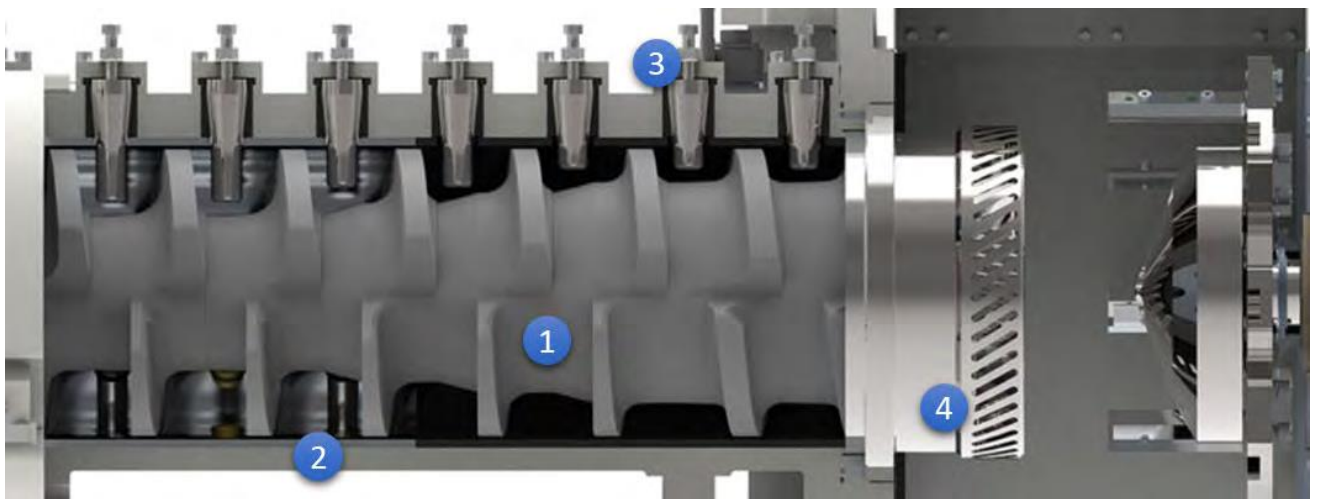


Рис. 1.4. Експандер серії OE компанії Amandus Kahl: 1 – гвинтовий робочий орган; 2 – камера обробки матеріалу; 3 – елементи інтенсивного перемішування; 4 – формувальний вузол.

Ще однією характерною особливістю експандерних установок, що відрізняє їх від екструдерів, є обов'язкове введення перегрітої пари безпосередньо в робочу камеру (підрозділ 1.5). Саме ця умова забезпечує оперативне підвищення температури оброблюваної сировини до заданого рівня, який зазвичай становить 120–130 °С.

Слід зазначити, що тривалість перебування матеріалу в робочій зоні екструдера є незначною (приблизно 5 с), у зв'язку з чим нагрів продукту виключно за рахунок сил тертя та тиску має обмежений характер [3].

Зміни температурно-тискових параметрів у процесі експандування були проілюстровані автором у роботі [4] (рис. 1.5). Для експандерів типовими є температури в межах 120–130 °С за максимального тиску 4–6 МПа. Використання пари при цьому дозволяє гнучко керувати темпами підвищення температури залежно від виду сировини та її початкового теплового стану.



Рис. 1.5. Експандер серії Solvex компанії Anderson Feed Technology

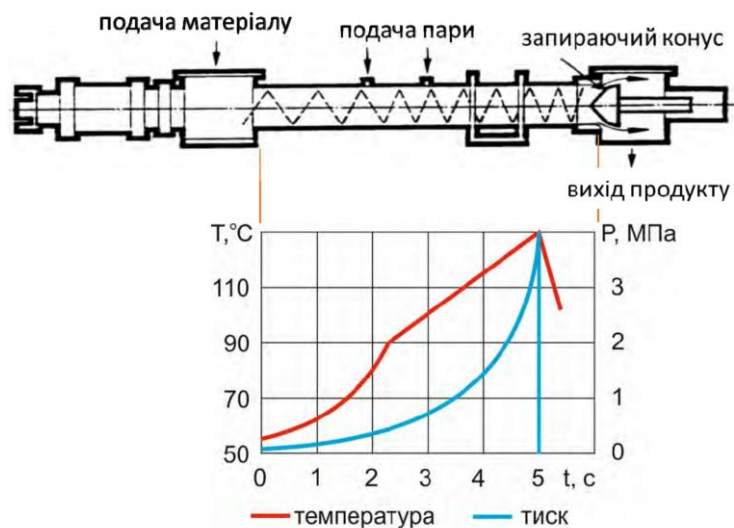


Рис. 1.6. Динаміка зміни тиску та температури вздовж траєкторії руху матеріалу в експандері [4].

Ключовим вузлом, що принципово відрізняє експандер від екструдера, є формувальний елемент на виході установки. У традиційних екструдерах він зазвичай виконаний у вигляді плоскої матриці з одним або кількома отворами фіксованого діаметра. Натомість в експандерних агрегатах надання форми продукту здійснюється в кільцевому проміжку між вихідним отвором робочої камери та запірним робочим органом. Найчастіше таким елементом слугує конус – суцільний або усічений. За такої схеми експандований продукт виходить із установки через регульований зазор у вигляді порожнистого циліндра («трубки»), причому товщина його стінки визначається величиною робочого проміжку. Цей параметр змінюють шляхом переміщення запірного конуса відносно виходу з робочої камери. У більшості сучасних експандерів регулювання положення конуса здійснюється гідравлічним циліндром, що дозволяє коригувати розмір зазору без зупинки обладнання. Для подальшого поділу сформованої «трубки» експандату застосовують спеціальні розділювальні пристрої, які розрізають матеріал на смуги (рис. 1.7), або ж використовують конуси з поздовжніми пазами на зовнішній поверхні, що забезпечують руйнування суцільної форми без додаткових механізмів (рис. 1.8).



Рис. 1.7. Запірний конус експандера серії ОЕ компанії Amandus Kahl.

Подальшим етапом удосконалення системи перекриття робочої камери експандера, реалізованої за допомогою конусного елемента, стало конструктивне рішення компанії Amandus Kahl, яке передбачає встановлення спеціального

подовжувача робочої камери у формі корони (рис. 1.9). Поєднання цього елемента з сателітним різальним ножом забезпечує можливість отримання експандованого продукту з круглим (рис. 1.10, а) або прямокутним поперечним перерізом (рис. 1.10, б), а також дає змогу регулювати довжину окремих частинок у широкому діапазоні.



Рис. 1.8. Запирний конус експандера серії Solvex компанії Anderson Feed Technology.

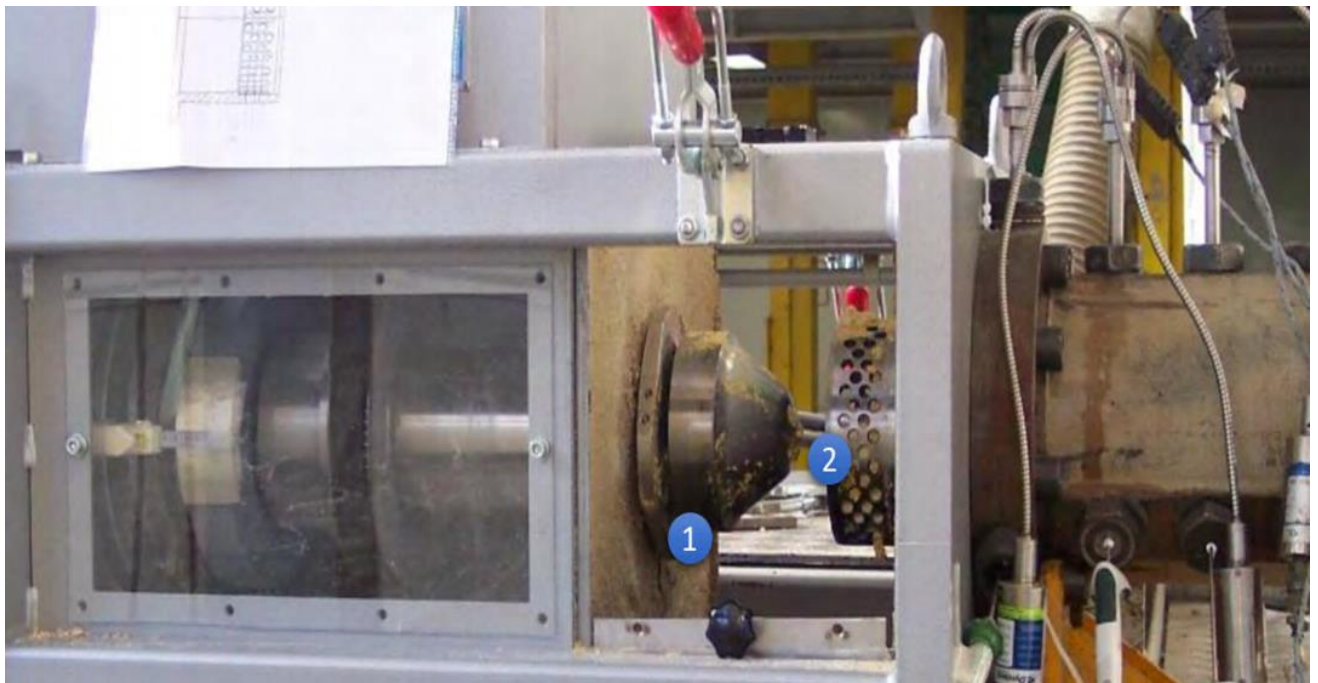


Рис. 1.9. Експандер Amandus Kahl з подовжувачем робочої камери, виконаним у формі корони: 1 – запирний конус; 2 – подовжувальний елемент.

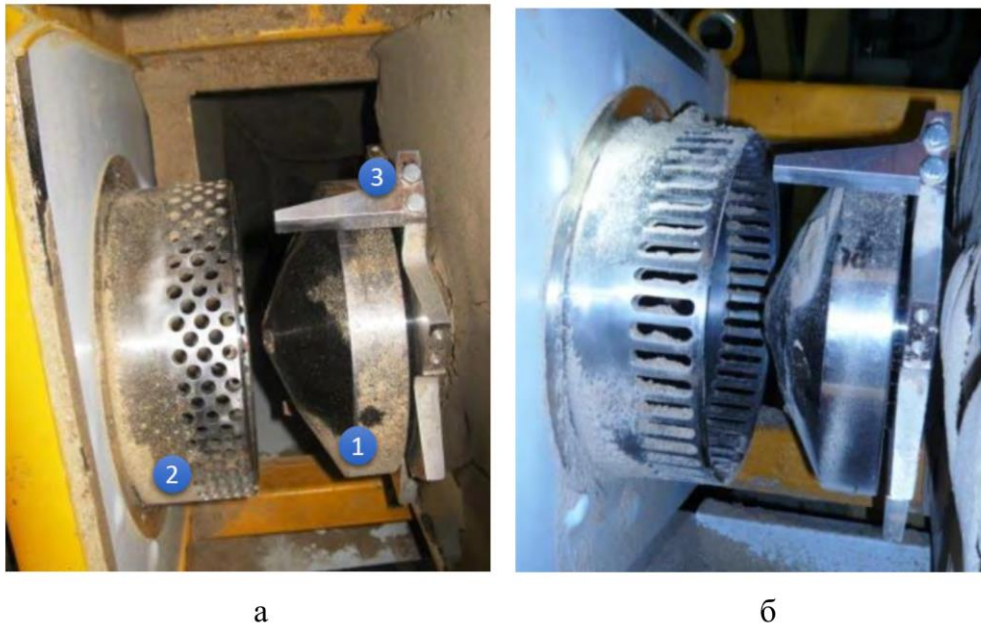


Рис. 1.10. Корончастий подовжувач експандера Amandus Kahl з отворами круглого (а) та прямокутного (б) перерізу: 1 – запірний конус; 2 – подовжувальний елемент робочої камери; 3 – сателітний різальний ніж.

Застосування такого конструктивного рішення забезпечує формування продукту (рис. 1.11), який не потребує додаткових технологічних операцій і може безпосередньо використовуватися або реалізовуватися, зокрема у вигляді готових гранул.



Рис. 1.11. Експандований продукт, отриманий на стандартному експандері Amandus Kahl (а) та на установці з подовжувачем робочої камери у вигляді корони (б) [5]

Узагальнену послідовність технологічних операцій процесу експандування кормів наведено на рис. 1.12. Кормова сировина з початковою вологістю 10–12 % і температурою навколишнього середовища з бункера, обладнаного шнековим живильником, надходить у потоковий змішувач (кондиціонер). У цю ж зону в контрольованій кількості подають пару, воду та інші рідкі добавки, зокрема мелясу, олію тощо.

У процесі проходження через потоковий змішувач вихідний матеріал зволожується до 14–17 %, проходить стадію теплової підготовки та нагрівається до 80–85 °С, після чого подається в експандер. У робочій камері експандера сировина піддається інтенсивному механічному впливу гвинта та дії перегрітої пари, що вводиться через спеціальні форсунки. Внаслідок цього температура матеріалу зростає до 120–140 °С за практично сталої вологості та тиску, який може досягати 6 МПа.

Під час виходу продукту через кільцевий проміжок між робочою камерою та запірним конусом відбувається різке зниження тиску до атмосферного рівня. Це спричиняє миттєве випаровування частини води та спінювання маси, в результаті чого формується експандат з вологістю 11–15 % і температурою 80–95 °С.

Подальша технологічна схема залежить від призначення отриманого продукту. У разі використання експандату як готового корму його охолоджують до 20–25 °С, що супроводжується зменшенням вологості до 10–12 %. Якщо ж експандований матеріал планується застосовувати як складову кормосуміші, його подрібнюють на валковій дробарці та подають на охолодження. Третій варіант передбачає подрібнення з подальшим гранулюванням і охолодженням. За такої технологічної схеми отримують кормові гранули з покращеними показниками транспортувальної придатності – підвищеною механічною міцністю (PDI) та більшою об'ємною щільністю порівняно з негранульованим експандатом.

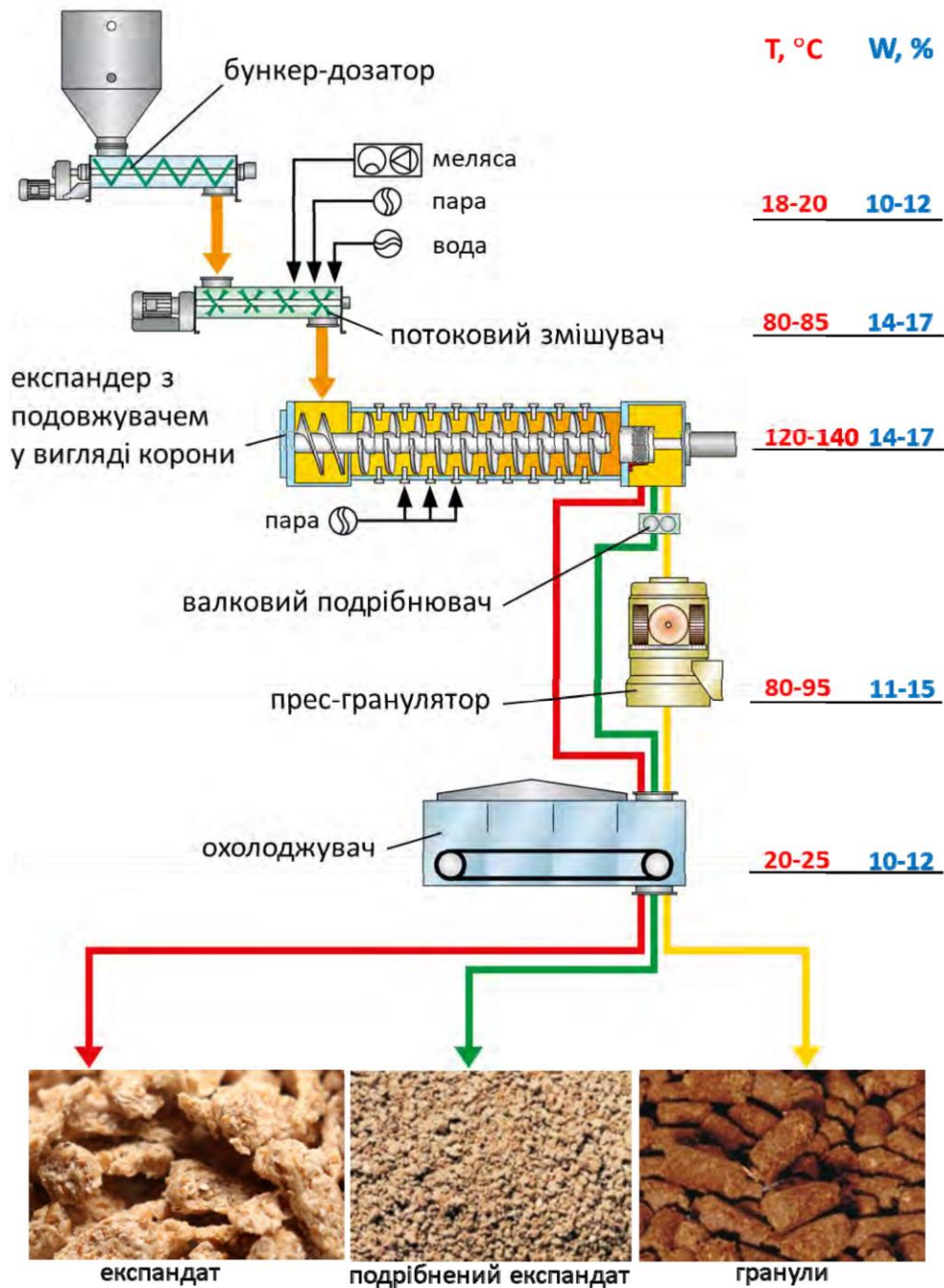


Рис. 1.12. Схематичне зображення технологічної лінії виробництва кормів із застосуванням експандера Amandus Kahl

Аналіз технологічної схеми, наведеної на рис. 1.12, свідчить, що включення експандера до лінії виробництва кормових гранул забезпечує низку суттєвих переваг. Зокрема, підвищується ступінь перетравності корму, що позитивно впливає на його конверсію. З'являється можливість більш раціонального залучення сировини з пониженими якісними показниками, а

також окремих побічних продуктів і відходів. Важливим є й ефект знезараження матеріалів, уражених мікрофлорою.

Крім того, використання експандера сприяє точнішому та стабільнішому дозуванню рідких компонентів у складі кормосуміші, зменшує питомі витрати енергії на процес гранулювання та одночасно забезпечує зростання продуктивності преса-гранулятора. Додатковими перевагами є можливість переробки сировини з підвищеним вмістом клітковини, а також зменшення пиловиділення і втрат матеріалу безпосередньо під час формування гранул.

Сучасні тенденції вдосконалення процесу експандування спрямовані насамперед на впровадження автоматизованих комп'ютерно-інтегрованих систем управління технологічними режимами (рис. 1.13). Як зазначають розробники [7], система ESEP забезпечує повністю автономну роботу обладнання відповідно до заздалегідь заданих параметрів і дозволяє централізовано керувати функціонуванням дозувального шнека, змішувача, експандера, подрібнювача та преса-гранулятора.

При цьому система здійснює регулювання ключових параметрів технологічного процесу, зокрема узгодження продуктивності експандера та преса-гранулятора, коригування загальної продуктивності лінії, оптимізацію питомих енерговитрат експандування шляхом зміни частоти обертання гвинта та положення запірного конуса, а також контроль подачі пари, води й інших рідких компонентів у змішувач.

Узагальнюючи результати аналізу, можна дійти висновку, що на сучасному етапі переважна більшість експандерів характеризується типовими, усталеними конструктивними рішеннями. Зокрема, гвинт експандера має модульну будову з чітко сформованими функціональними зонами по довжині, призначеними для транспортування матеріалу, його ущільнення та інтенсивного перемішування; при цьому перед формувальним вузлом для створення необхідного тиску зазвичай передбачено збільшення діаметра валу гвинта.

Робоча камера експандера, як правило, виконана у вигляді порожнистого циліндра з постійним внутрішнім діаметром, оснащеного форсунками для введення пари та змінними перемішувальними штифтами. Формувальний вузол реалізується у вигляді кільцевого зазору між торцем робочої камери та запірним конусом, який може мати суцільне або усічене виконання, а також гладку поверхню або поздовжні пази. Подальший розвиток конструкції матриці пов'язаний із застосуванням різних типів подовжувачів робочої камери, при цьому геометрія та принцип дії запірної конуса зазвичай залишаються незмінними.

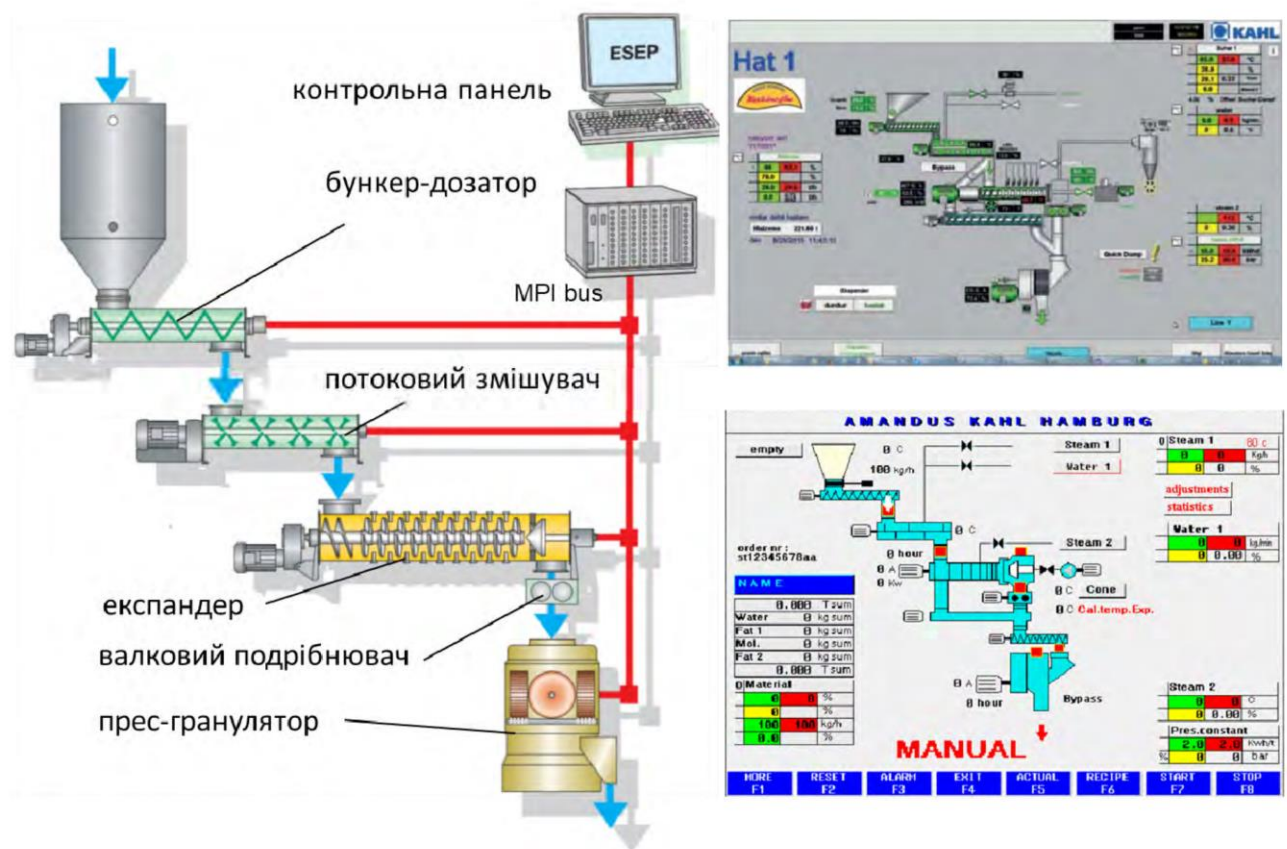


Рис. 1.17. Структурна схема автоматизованої системи керування Electrical Control System of the ExPander (ESEP) компанії Amandus Kahl

Встановлено, що на сучасному етапі підвищення енергоефективності експандерів досягається переважно не за рахунок подальшого удосконалення їх конструктивних рішень, а шляхом упровадження комп'ютерно-інтегрованих автоматизованих систем управління роботою обладнання. Такі системи

забезпечують оперативне регулювання ключових технологічних параметрів, зокрема частоти обертання гвинта та положення запірнього конуса відносно торцевої поверхні робочої камери, що дозволяє оптимізувати питомі енерговитрати процесу експандування.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПАРАМЕТРИ ЕКСПАНДЕР ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування конструктивно-технологічної структури експандера для виробництва кормо-суміші на рибофермах

За підсумками проведеного патентно-інформаційного дослідження, наведеного, було прийнято рішення щодо модернізації формувального вузла експандера для виробництва комбікормів.

Конструктивно-технологічну схему експандера з удосконаленою формувальною насадкою подано на рис. 2.1. Установка включає основу 1, на якій змонтовано асинхронний електродвигун 2 та редуктор 3. Вхідний вал редуктора 3 з'єднаний з валом електродвигуна 2, забезпечуючи передачу обертового моменту. До редуктора приєднано живильний вузол 4, у верхній частині якого закріплено бункер 5 для подавання сировини. Збоку у верхній зоні живильника 4 встановлено патрубок 6 для введення пари. Живильник 4 переходить у робочий циліндр 7 та з'єднується з ним за допомогою напрямних 8 і гайок. У середині циліндра 7 з можливістю вільного обертання розташований гвинт 9, жорстко з'єднаний з вихідним валом редуктора 3. На зовнішній поверхні циліндра 7 розміщено нагрівальний елемент 10, який забезпечує додатковий тепловий вплив на оброблюваний матеріал. Робочий циліндр 7 переходить у формувальну насадку 11, яка є основним об'єктом удосконалення. Формувальна насадка 11 включає звужену ділянку 12 циліндра, увігнутий конус 13, корончасту гайку 14 та напрямну пластину 15. Корончата гайка 14 нагвинчується на зовнішню різьбу циліндра 11, забезпечуючи фіксацію та регулювання елементів насадки. Напрямна пластина 15 встановлена на напрямних 8 і закріплена гайками. У центральний отвір напрямної пластини 15 вкручено увігнутий конус 13, який заходить у звужену частину 12 циліндра 11. На протилежному кінці увігнутого

конуса 13 жорстко зафіксовано гайку 16, що забезпечує стабільність його положення під час роботи експандера.

Робота експандера здійснюється таким чином. Попередньо змішані складники корму завантажуються в бункер 5, з якого надходять до живильного вузла 4. Через патрубок 6 у живильник під тиском подається пара з температурою 120–180 °С, унаслідок чого відбувається теплова обробка кормової суміші та її зволоження. Далі оброблений матеріал за допомогою гвинта 9, що приводиться в обертання редуктором 3 від асинхронного електродвигуна 2, транспортується вздовж робочого циліндра 7. У зоні розташування нагрівального елемента 10 кормова маса зазнає інтенсивного баро-термічного впливу: температура матеріалу підвищується до 80–140 °С за тиску до 6 МПа, в результаті чого компоненти корму переходять у пластичний, гомогенізований стан.

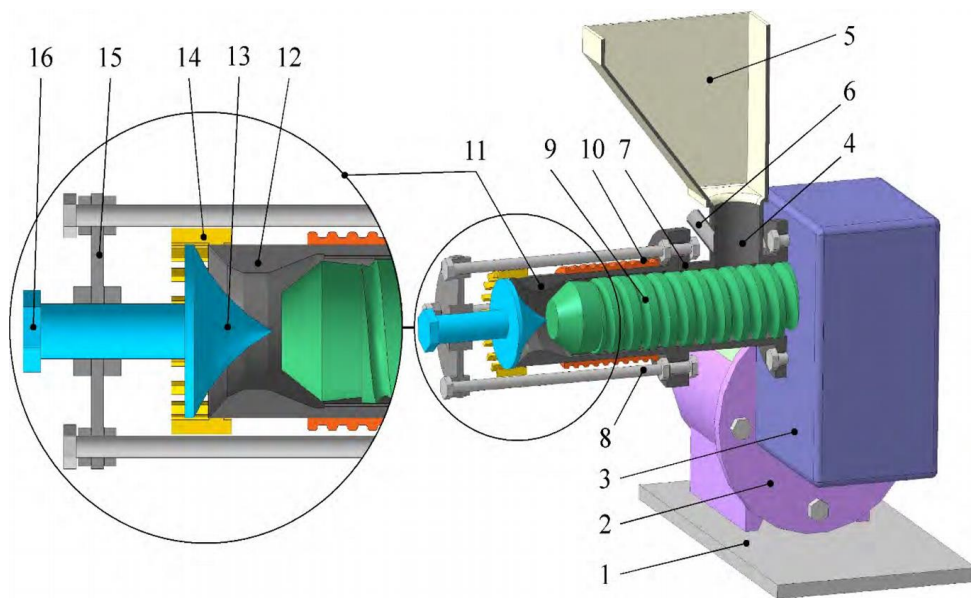


Рис. 2.1. Конструктивно-технологічна схема експандера для виробництва комбікормів: 1 – опорна рама; 2 – асинхронний електродвигун; 3 – редукторний вузол; 4 – живильний механізм; 5 – завантажувальний бункер; 6 – патрубок подавання пари; 7 – робочий циліндр; 8 – напрямний елемент; 9 – гвинтовий робочий орган; 10 – нагрівальний елемент; 11 – формувальна насадка; 12 – звужена ділянка; 13 – увігнутий конус; 14 – корончата фіксувальна гайка; 15 – напрямна пластина; 16 – кріпильна гайка.

Розігріта та ущільнена пластифікована маса надходить у формувальну насадку 11. Під час її просування до звуженої ділянки 12 насадки відбувається подальше зростання тиску, а після проходження цієї зони — його різке зниження. Такий ефект зумовлений збільшенням об'єму робочого простору, що забезпечується геометрією увігнутого конуса 13. Унаслідок цього пластифікований матеріал інтенсивно розширюється та виходить із формувальної насадки 11 через корончату гайку 14. За рахунок конструкції корончатої гайки 14 розширена маса розділяється на окремі частини, утворюючи готовий продукт — експандат. Під час обертання гайки 16 увігнутий конус 13 здійснює осьовий зворотно-поступальний рух, що дає можливість регулювати величину зазору між ним і звуженою ділянкою 12 формувальної насадки 11. Завдяки цьому забезпечується встановлення необхідних геометричних параметрів і щільності отриманого експандованого продукту.

2.2. Моделювання формувальної насадки експандера кормів

З огляду на те, що повномасштабне чисельне моделювання роботи експандера кормів у САЕ-системі STAR-CCM+ є надзвичайно ресурсо- та часозатратним процесом (тривалість одного розрахункового експерименту може сягати до 10 діб реального часу і потребує високопродуктивних обчислювальних ресурсів), було прийнято рішення виконувати моделювання поетапно. На першому етапі передбачено проведення чисельного аналізу лише формувальної насадки експандера.

Формувальна насадка експандера кормів включає циліндр 1, корончату гайку 2 та конус 3 (рис. 2.2). Відповідно до результатів аналізу наукових джерел [9, 10], геометрія конуса може мати три основні варіанти виконання (рис. 2.3): I — конус традиційної форми; II — конус із заокругленою поверхнею; III — увігнутий конус.

Для порівняльної оцінки якості формування експандованого продукту у формувальних насадках зазначених типів прийнято однакові конструктивні параметри, наведені на рис. 2.2. Корончата гайка виконана з 20 поздовжніми жолобками, по яких здійснюється відведення сформованих експандатів. Циліндр формувальної насадки має незначне звуження в центральній частині, призначене для підвищення тиску в зоні формування продукту.

Зміна об'єму порожнини між циліндром формувальної насадки та конусом у напрямку переміщення компонентів кормової суміші вздовж осі Ох наведена на рис. 2.3. Аналіз цього графіка свідчить, що характер варіювання об'єму суттєво відрізняється залежно від геометричної форми конуса. Отриману залежність використано в подальших розрахунках для визначення зміни щільності компонентів кормової суміші вздовж траєкторії їх руху.

Схематичне зображення чисельної моделі формувальної насадки подано на рис. 2.4. Початково загальна кількість частинок кормових компонентів становила 12 000 одиниць, які були рівномірно розміщені у внутрішньому об'ємі циліндра. На наступному етапі поршень починав переміщення у напрямку конуса зі швидкістю 0,01 м/с, здійснюючи ущільнення кормової маси та її переміщення до вихідних отворів, утворених зазором між конусом і жолобками корончатої гайки.

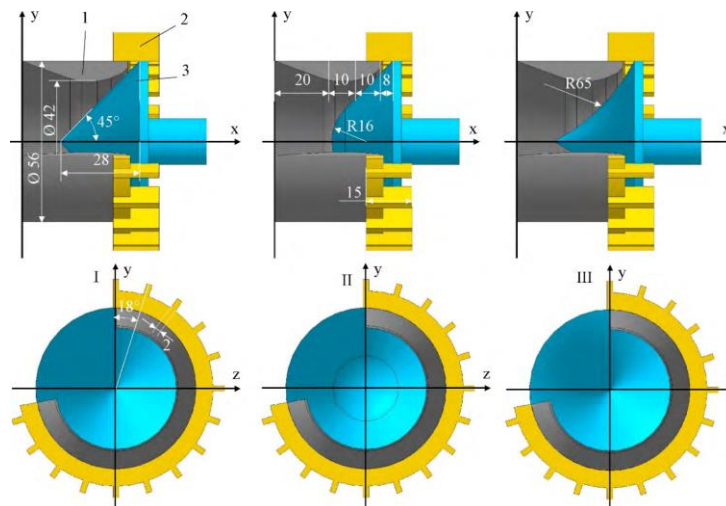


Рис. 2.2. Конструктивні варіанти формувальної насадки експандера кормів: 1 – циліндрична частина; 2 – корончата гайка; 3 – конус; I – конус традиційної форми; II – конус із заокругленою поверхнею; III – увігнутий конус.

Під час чисельного моделювання були використані такі моделі континуума: безсіткова модель дискретних елементів (DEM), лагранжева багатофазна постановка, модель граничних сил DEM, нестационарний неявний розв'язувач, модель інтерполяції розрахункового розв'язку та врахування дії сили тяжіння. Компоненти кормової суміші змодельовано у вигляді сукупності суцільних сферичних частинок DEM із постійним значенням щільності. Контактна взаємодія між окремими частинками, а також між частинками та поверхнями стінок, описувалася відповідно до моделей Герца–Міндліна з урахуванням опору коченню та лінійного зчеплення.

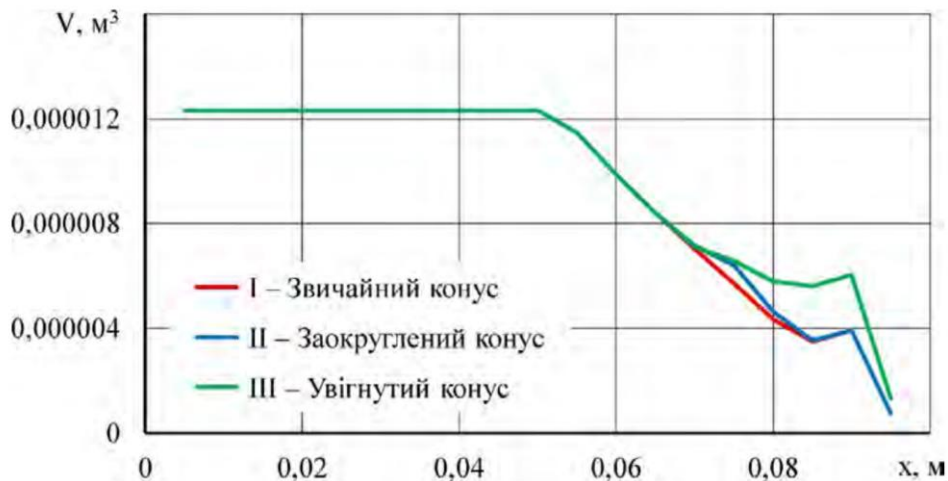


Рис. 2.3. Варіація об'єму зазору між циліндром формувальної насадки та конусом у напрямку переміщення компонентів кормової суміші вздовж осі Ox .

На рис. 2.5 наведено результати розподілу компонентів кормової суміші в зоні формувальної насадки для трьох варіантів геометрії конуса за величиною сили тиску F_p та сили контактної взаємодії між частинками корму $F_{ic\ j \leftrightarrow (i+1)j}$.

Аналіз даних, поданих на рис. 2.5, показує, що в області вершини заокругленого конуса відбувається інтенсивне накопичення частинок кормових компонентів, які взаємодіють між собою та з поверхнею конуса з максимальною силою тиску, що становить $5,2 \pm 0,1\text{Н}$, при цьому сила контактної взаємодії дорівнює $0,65 \pm 0,02\text{Н}$. Для увігнутого конуса характерним є істотне зниження як сили тиску, так і сили міжчастинкової взаємодії вздовж напрямку руху

кормової маси. Натомість при русі компонентів корму вздовж поверхні звичайного конуса спостерігається поступове, більш рівномірне зменшення зазначених сил.

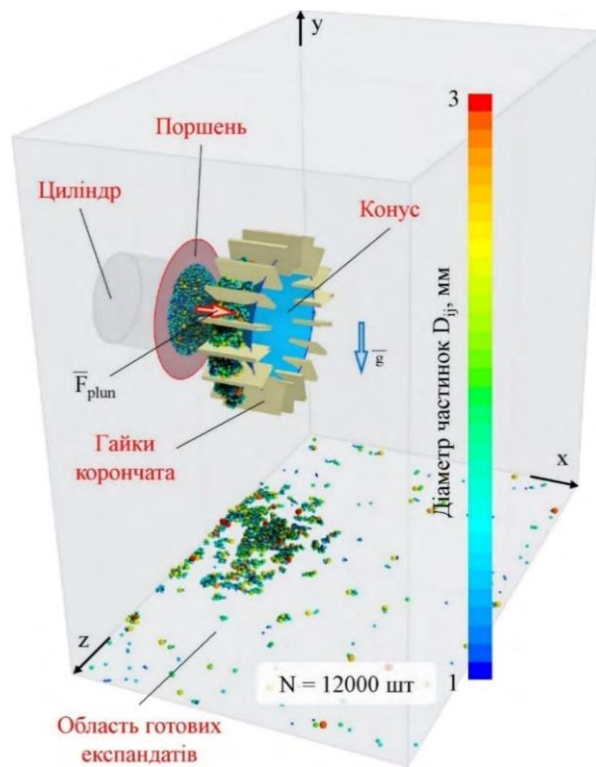


Рис. 2.4. Розрахункова схема чисельного моделювання формувальної насадки експандера

Аналіз результатів, наведених на рис. 2.6, дозволяє зробити висновок, що формувальна насадка зі звичайним конусом характеризується найбільшими значеннями сил стиску, які діють на поршень і конус, і становлять відповідно $1416 \pm 41\text{Н}$ та $232 \pm 35\text{Н}$. Для варіанта із заокругленим конусом зазначені сили зменшуються до $1163 \pm 63\text{Н}$ для поршня та $178 \pm 20\text{Н}$ для конуса. У разі використання увігнутого конуса фіксуються найменші значення сил стиску — $741 \pm 109\text{Н}$ для поршня та $85 \pm 21\text{Н}$ для конуса.

Для кожної з розглянутих конфігурацій конуса було визначено зміну об'ємної маси та сумарної сили стиску залежно від абсолютної деформації кормових компонентів Δx (рис. 2.7).

З аналізу рис. 2.7 випливає, що всі три конструктивні варіанти забезпечують практично однакові значення щільності кормової суміші на виході,

які знаходяться в межах 224–252 кг/м³. Водночас, з урахуванням даних рис. 2.4, досягнення цієї щільності відбувається за різних рівнів зусилля стиску поршня. Оскільки мінімальні значення сил стиску характерні саме для увігнутого конуса, його доцільно прийняти як базовий конструктивний елемент, параметри якого будуть обґрунтовані на наступних етапах дослідження.

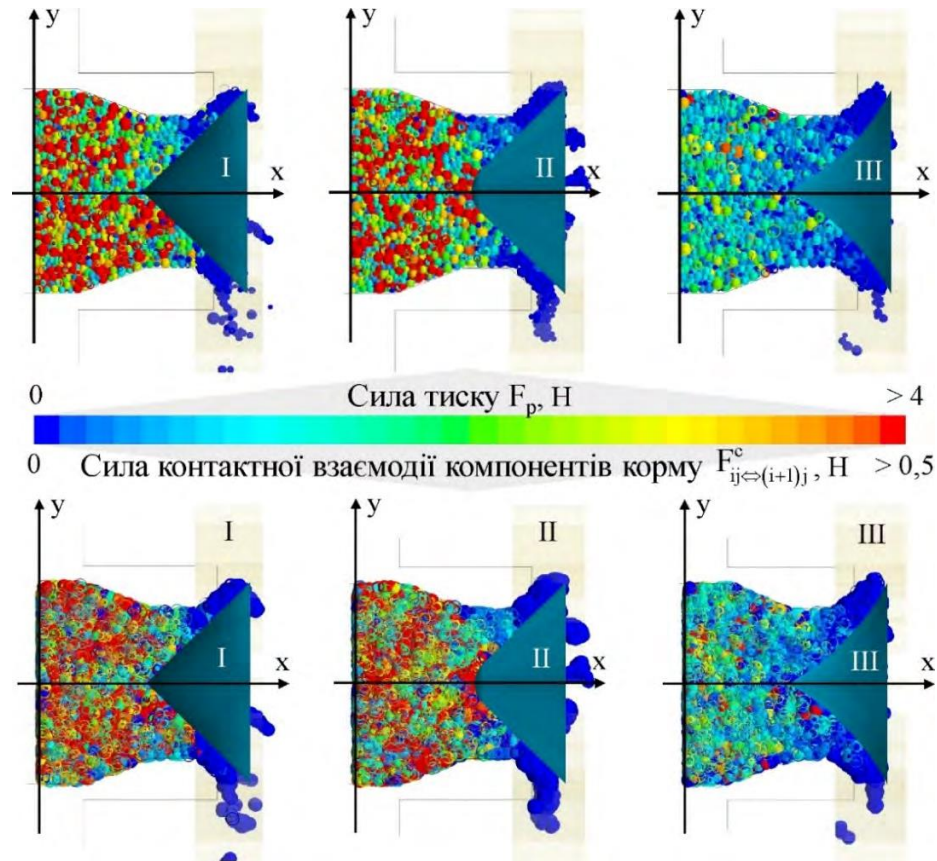


Рис. 2.5. Розподіл компонентів кормової суміші в зоні формувальної насадки для трьох варіантів конуса за величинами сили тиску F_p та сили контактної взаємодії між частинками корму: I – конус стандартної геометрії; II – конус із заокругленою формою; III – конус увігнутого профілю.

Як керовані змінні в дослідженні обрано ключові геометричні характеристики формувальної насадки з увігнутим конусом (рис. 2.8), а саме: радіус зони звуження циліндричної частини насадки R_r , радіус увігнутого конуса R_c та величину зазору між конусом і внутрішньою поверхнею циліндра δ_c . Саме ці параметри визначають умови стиску, розширення та формування експандованого продукту.

Для проведення чисельних досліджень було застосовано повний факторний план експерименту, що передбачає варіювання кожного з трьох факторів на трьох рівнях, у результаті чого загальна кількість розрахункових варіантів становила $3^3 = 27$.

Результати геометричного аналізу, зокрема розраховані залежності зміни об'єму робочої порожнини між циліндром формувальної насадки та конусом уздовж напрямку руху компонентів кормової суміші (вісь Ox), для окремих комбінацій параметрів чисельного експерименту подано на рис. 2.9.

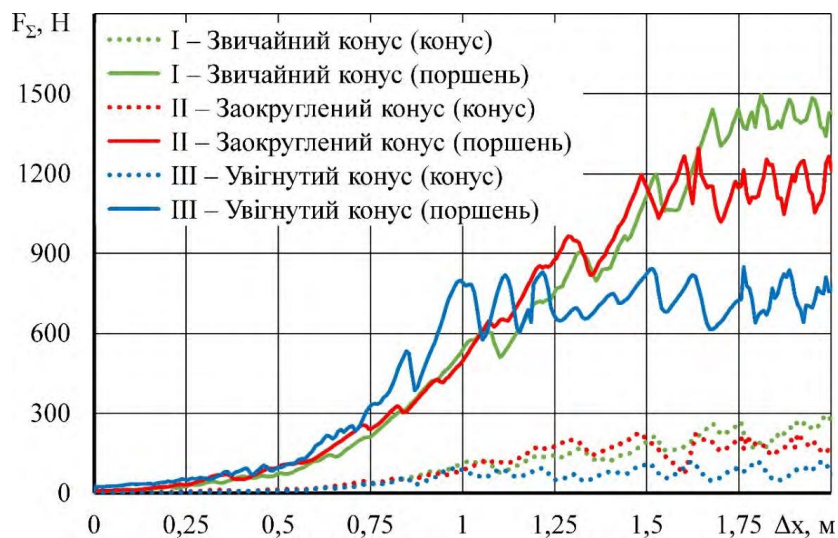


Рис. 2.6. Графічна залежність сумарного зусилля стиску, що діє на поршень і конус F_{Σ} , від величини абсолютної деформації кормових компонентів Δx для трьох конструктивних конфігурацій конуса.

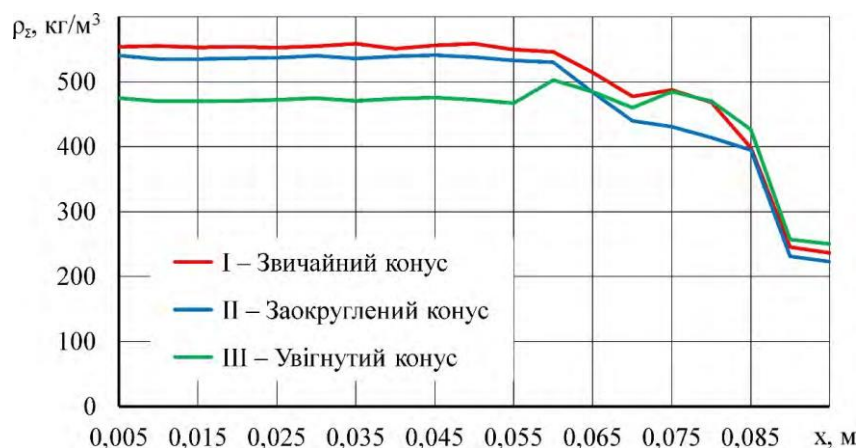


Рис. 2.7. Зміна об'ємної щільності, що відповідає сумарній силі стиску ρ_{Σ} , залежно від абсолютної деформації кормових компонентів Δx для трьох варіантів геометрії конуса

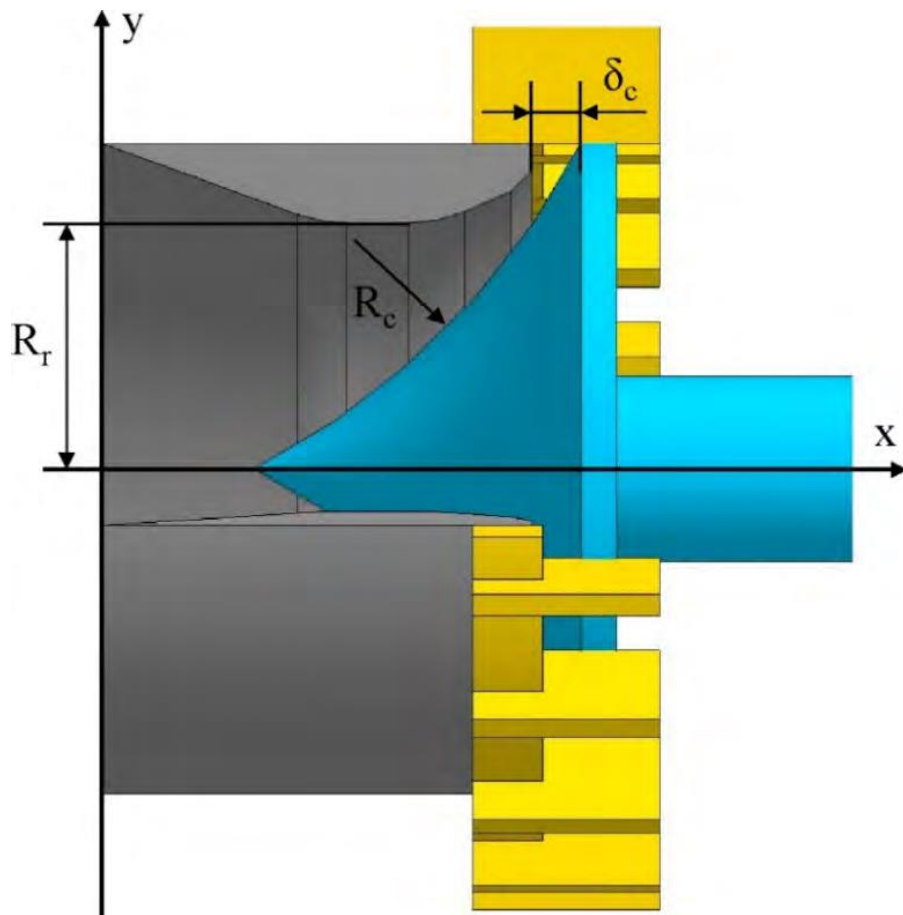


Рис. 2.8. Узагальнена схема змінних параметрів чисельного дослідження процесу ущільнення компонентів кормової суміші у формувальній насадці з увігнутим профілем конуса.

Для оцінювання енерговитрат процесу як основний розрахунковий показник прийнято сумарний тиск поршня P_{Σ} , що забезпечує проштовхування кормової маси крізь формувальний вузол.

Характеристику якості формування продукту визначали за значенням об'ємної щільності ρ_{Σ} пластифікованої кормової маси на виході з формувальної насадки.

На рис. 2.10 наведено результати чисельного аналізу просторового розташування частинок кормової суміші в робочому зазорі між циліндричною частиною формувальної насадки та конусом для варіанта № 14 (параметри: $R_r = 15\text{мм}$, $R_c = 70\text{мм}$, $\delta_c = 6\text{мм}$). Розподіл частинок охарактеризовано за величиною локального тиску F_p та інтенсивністю контактної взаємодії між окремими компонентами кормової маси.

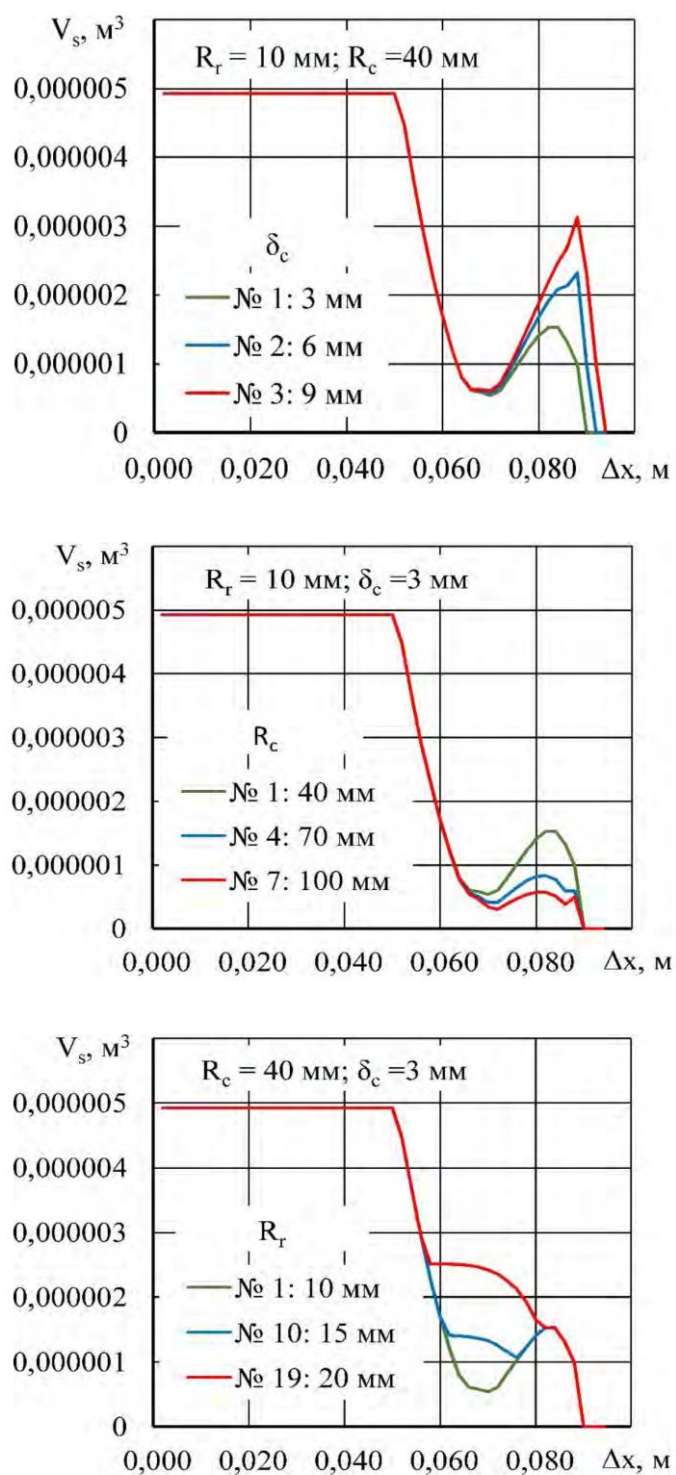


Рис. 2.9. Просторовий розподіл об'єму робочого зазору між циліндричною частиною формувальної насадки та конусом уздовж траєкторії переміщення кормових компонентів (вісь Ox)

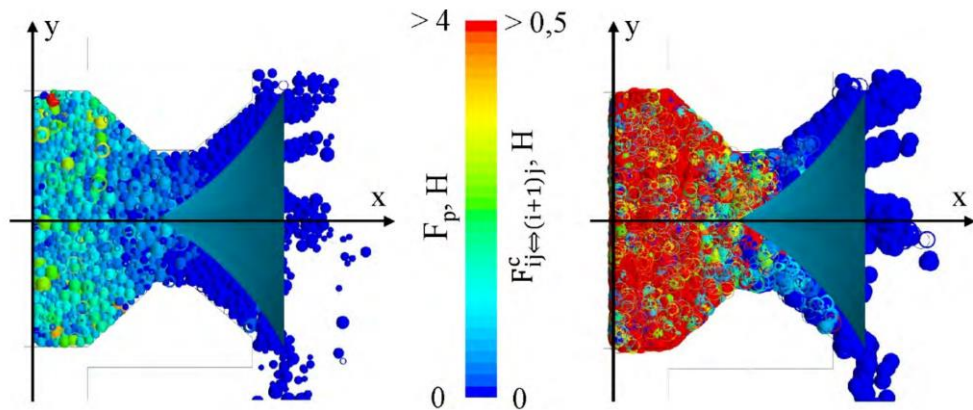


Рис. 2.10. Картина розміщення частинок кормової суміші у формувальній зоні насадки з урахуванням розподілу сил тиску F_p та міжчастинкових контактних зусиль $F_{ij \leftrightarrow (i+1)j}^c$ для розрахункового варіанта № 14 ($R_r = 15$ мм, $R_c = 70$ мм, $\delta_c = 6$ мм)

У результаті розв'язання оптимізаційної задачі у середовищі *Wolfram Cloud* із урахуванням співвідношень і застосуванням процедури FindMinimum було визначено раціональні значення варійованих параметрів формувальної насадки. Зокрема, оптимальними виявилися такі геометричні характеристики: радіус звуження $R_r = 14,3$ мм, радіус увігнутого конуса $R_c = 89,8$ мм та зазор між конусом і циліндром $\delta_c = 3,8$ мм. За зазначених параметрів забезпечується досягнення об'ємної щільності продукту на виході $\rho_{out} = 331,3$ кг/м³ при максимальному тиску процесу $P_{max} = 1,85$ МПа.

2.3 Методичні підходи до проведення експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

На початковому етапі експериментальних робіт здійснювали підготовку модельних зразків комбікорму з наперед заданим гранулометричним складом, у якому розмір частинок перебував у межах 1,2–2,4 мм. Кормову суміш формували з чотирьох компонентів, узятих у рівних масових частках (по 25 % кожного): зерна пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшникової макухи. Попередне

подрібнення сировини виконували на дисковому подрібнювачі, застосування якого забезпечує більш високий рівень однорідності помелу (приблизно 92 %) порівняно з молотковими дробарками, що має принципове значення для відтворюваності результатів експериментів [5].

Приготування комбікормової суміші здійснювали із застосуванням лабораторного спірально-гвинтового змішувача сипких матеріалів (рис. 3.8), конструкція якого забезпечує формування високоякісних однорідних сумішей з показником гомогенності в межах 94–98 % [6].

Початковий рівень вологості підготовлених зразків, а також її зміни в процесі експериментів визначали відповідно до методик і з використанням вимірювального обладнання, описаних у п. 3.2.

За підсумками проведених теоретичних розрахунків і лабораторних випробувань було спроектовано та виготовлено дослідний зразок експандера для комбікормів. Саме цей агрегат було використано як базовий елемент експериментальної установки, загальний вигляд якої наведено на рис. 3.9.

У ході експериментальних досліджень як змінні параметри розглядали величину зазору між запірним конусом і корончатою гайкою δ_c , частоту обертання гвинта n та вологість комбікормової суміші W (табл. 2.1). Оцінювання ефективності роботи експандера здійснювали за такими критеріями оптимізації: споживана потужність N , продуктивність установки Q та об'ємна щільність сформованих експандатів ρ .

Таблиця 2.1 – Рівні варіювання досліджуваних факторів

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

Порівняльний аналіз відомих схем планування експериментів показав, що плани типу Бокса–Бенкіна ВВЗ, на відміну від класичних ортогональних і ротатабельних планів, потребують меншої кількості експериментальних дослідів. Водночас вони забезпечують достатньо високий рівень статистичної надійності

та точності отриманих результатів, що підтверджується даними, наведеними в роботі [6].

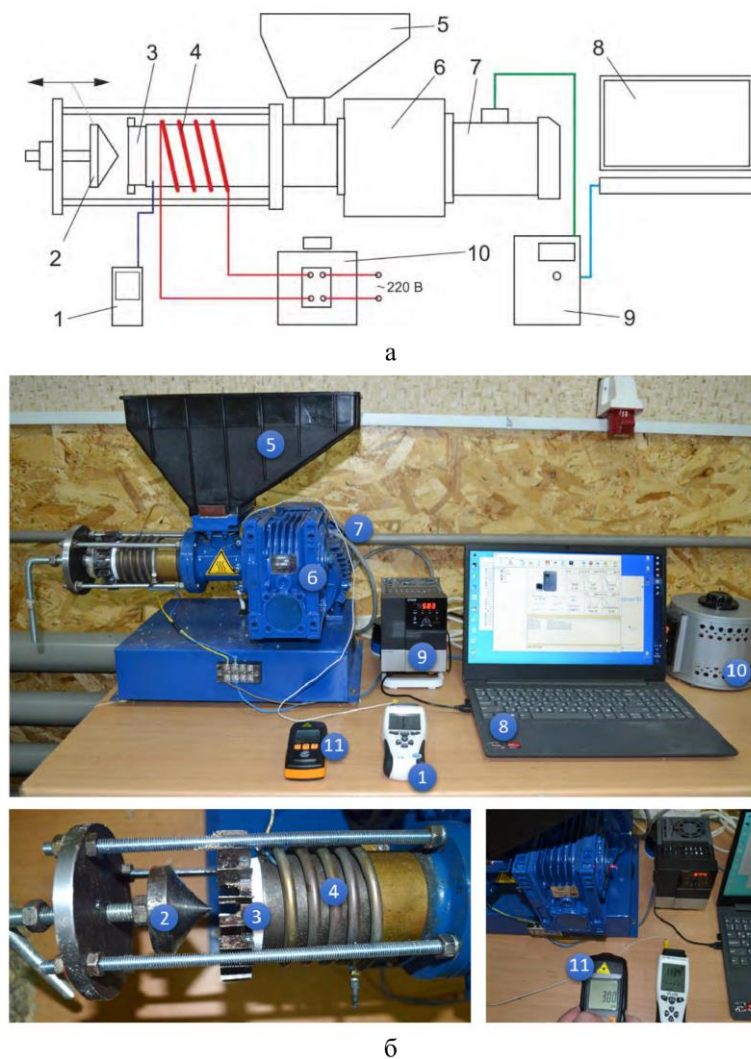


Рис. 2.11. Принципова схема (а) та зовнішній вигляд (б) експериментальної установки: 1 – електронний термометр з термопарою FLUS ET-960; 2 – запірний конус; 3 – гайка з елементом розподілу потоку; 4 – повітряний трубчастий електронагрівач робочої камери; 5 – завантажувальний бункер; 6 – черв'ячний редуктор NMRV-63 (передаточне число 1:25); 7 – електродвигун типу AIP/5AI80A4; 8 – персональний комп'ютер; 9 – частотний перетворювач HYUNDAI N700E; 10 – лабораторний автотрансформатор ЛАТР-1М; 11 – цифровий тахометр Benetech GM8905.

Необхідне значення частоти обертання гвинта задавали за допомогою частотного перетворювача Hyundai N700E, а фактичні оберти контролювали з

використанням тахометра Venetech GM8905. Регулювання величини зазору між запірним конусом і гайкою здійснювали шляхом обертання гвинта, на якому закріплено конус, при цьому точність встановлення зазору перевіряли за допомогою глибиноміра штангенциркуля типу ШЦ-150-0,1 (рис. 2.12).

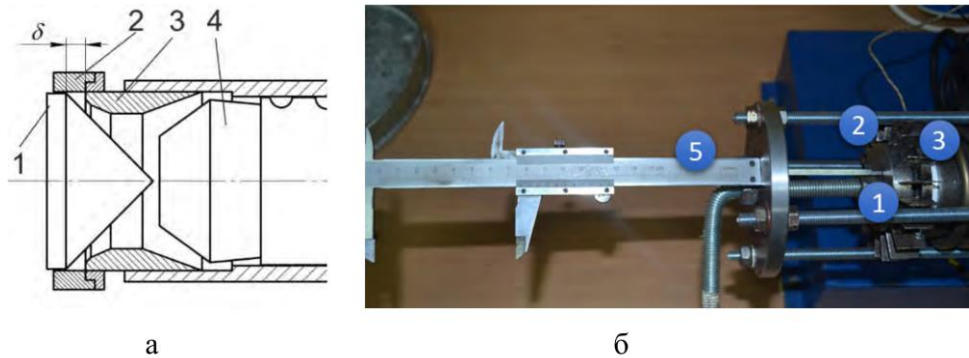


Рис. 2.12. Схематичне зображення процесу налаштування (а) та вимірювання (б) зазору між конусом і гайкою

Температурний режим у робочій камері підтримували на рівні $136 \pm 2^\circ\text{C}$ із використанням повітряного трубчастого електронагрівача. Інтенсивність нагріву регулювали шляхом зміни струму живлення за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М.

Визначення споживаної потужності приводу здійснювали засобами частотного перетворювача Hyundai N700E, при цьому значення параметрів у режимі реального часу реєстрували на персональному комп'ютері з установленим програмним забезпеченням N700 HIMS (рис. 2.13).

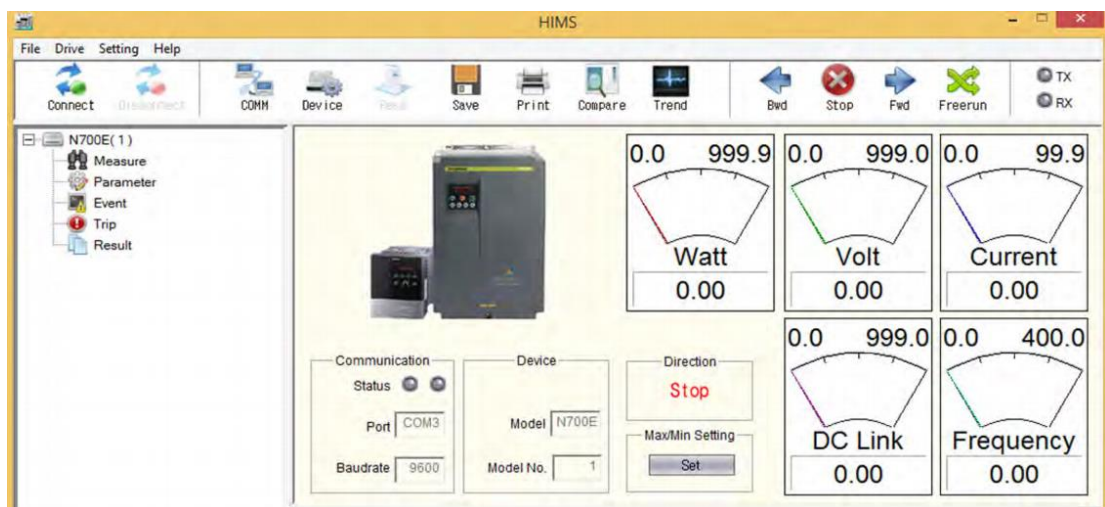


Рис. 2.13. Інтерфейс програмного забезпечення N700 HIMS

Визначення продуктивності експандера здійснювали за масою готового продукту, отриманого протягом фіксованого проміжку часу. Для цього проводили контрольний відбір експандату масою 1 кг і за тривалістю його накопичення розраховували фактичну продуктивність установки (рис. 2.14).



Рис. 2.14. Процес переробки контрольної наважки кормосуміші.

Тривалість виконання операції фіксували з використанням секундоміра.

2.4. Умови утримання та проведення експериментів на рибній фермі

У період адаптації риба утримувалася в басейнах УЗВ об'ємом 3000 л із системами механічної та біологічної фільтрації та щоденною підміною 10% води (рис. 2.15, г). Для проведення експериментів використовувалися дві лінії басейнів об'ємом 750 літрів (рис. 2.15, а) [1].



Рис. 2.15. Інфраструктурний ресурс для проведення експериментів: (а, б) – баки для проведення експериментальних робіт, лінія 4+1 з баками об'ємом 750 літрів (усього 12 баків); (в, г) – ємності для утримання риб об'ємом 3000 л [1].

Експериментальна установка, у якій відбувалася акліматизація особин райдужної форелі перед початком експерименту, являє собою «Універсальний мультипрофільний стенд аквабіотехнологій» із загальним водним об'ємом 22 м³ – прототип науково-експериментального обладнання, організований на напірному магістральному водопостачанні (5–7% витрати після заповнення системи водою) та оборотному водопостачанні за замкненою схемою (із системами механічного, біологічного та бактерицидного очищення) (рис. 5) [1].



Рис. 2.16. Рибний модуль «Універсального мультипрофільного стенда аквабіотехнологій» УНУ, у якому проходила підготовка форелі до експерименту.

Стенд являє собою єдиний універсальний дослідно-експериментальний комплекс для мультипрофільних досліджень, дослідів і експериментів, створення та апробації технологій на модельних аквакультурних розчинах, живих гідробіонтах, нижчій водній рослинності та органічних відходах життєдіяльності риб, а також у дослідженні гідроекологічних ризик-факторів гідробіосистем, спеціалізованих рішень для окремих видів аквакультури, систем рибозахисту та біобезпеки [1].

Контроль основних гідрохімічних параметрів води та їх відповідність основним рибницьким нормативам вирощування райдужної форелі здійснювався протягом усього періоду експерименту. Повний гідрохімічний аналіз води проводився один раз на 7 діб [1].

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Підсумки експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів

Відповідно до розробленої методики досліджень було виконано серію багатофакторних експериментів, спрямованих на вивчення особливостей функціонування малогабаритного експандера кормів. Зовнішній вигляд зразків отриманого експандованого продукту представлено на рис. 3.1.

Узагальнені результати проведених експериментальних досліджень наведені в додатку Г. З використанням методів статистичної обробки експериментальних даних, описаних у середовищі Excel було створено відповідну розрахункову програму та визначено рівняння регресії для кожного з обраних критеріїв оцінювання. Додатково в програмному середовищі Wolfram Cloud побудовано тривимірні графічні залежності, що наочно відображають встановлені закономірності.

У результаті математичної обробки експериментальних даних отримано узагальнену залежність продуктивності експандера Q від впливових факторів у закодованій формі:

$$Q = 24,0667 - 1,4532 x_1 - 1,86487 x_1^2 + 2,8222 x_2 - 0,3214 x_1 x_2 - 0,030401 x_2^2 + 6,0167 x_3 - 0,769 x_1 x_3 + 0,76803 x_2 x_3 - 0,8668 x_3^2. \quad (3.1)$$

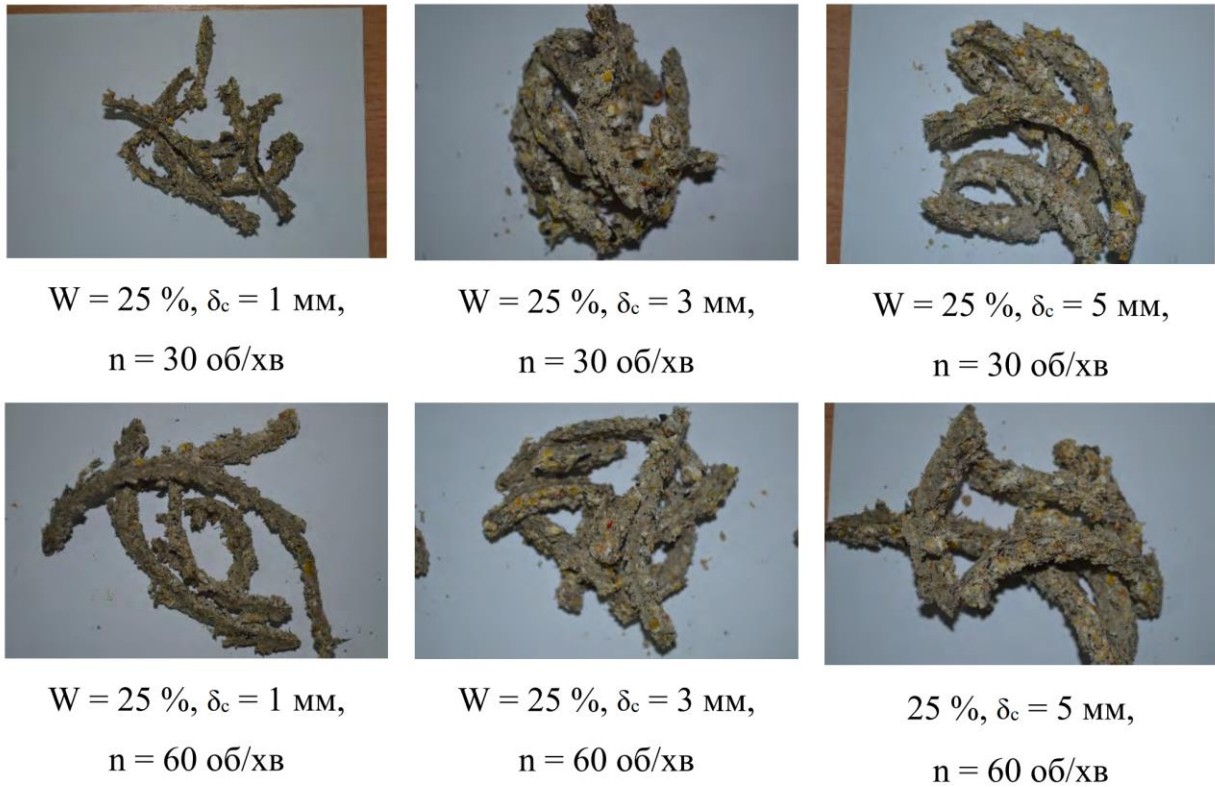


Рис. 3.1. Зразки експандованого кормового продукту

З урахуванням виключення статистично незначущих коефіцієнтів регресійної моделі та після виконання операції розкодування рівняння (3.15) було отримано остаточний аналітичний вираз, що описує залежність продуктивності експандера Q від досліджуваних факторів.

$$Q = 1,78314 + 0,401115 n + 1,41111 \delta_c. \quad (3.2)$$

Графічну інтерпретацію цієї залежності подано на рис. 3.2.

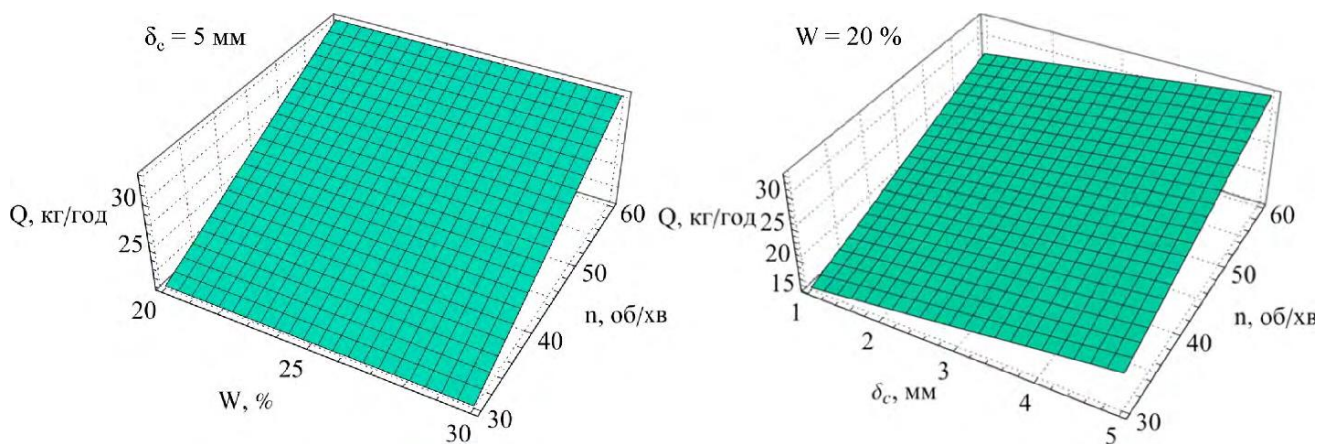


Рис. 3.2 Вплив вологості комбікорму W , величини зазору між конусом і гайкою δ_c та частоти обертання гвинта n на продуктивність експандера Q

Аналіз графіків, наведених на рис. 3.2, переконливо свідчить, що підвищення частоти обертання гвинта n та збільшення зазору між конусом і гайкою δ_c приводять до зростання продуктивності експандера Q . При цьому встановлено, що зміна вологості комбікормової суміші W у досліджуваному діапазоні практично не впливає на значення продуктивності установки.

За результатами статистичної обробки експериментальних даних було також отримано узагальнену регресійну залежність споживаної потужності N від досліджуваних факторів у закодованій формі:

$$N = 782,019 - 75,5111 x_1 - 30,8183 x_1^2 + 14,7292 x_2 - 7,42467 x_1 x_2 + 124,3 x_2^2 + 180,343 x_3 - 23,7039 x_1 x_3 - 4,04761 x_2 x_3 - 7,5962 x_3^2. \quad (3.3)$$

З аналізу результатів, поданих на рис. 3.3, випливає, що зі зростанням частоти обертання гвинта n споживана експандером потужність N закономірно підвищується, що узгоджується з фізичною суттю процесу.

Крім того, зниження вологості комбікормової суміші W також призводить до збільшення енергоспоживання, що обумовлено зростанням сил внутрішнього та контактного тертя між частинками корму і поверхнями робочих елементів експандера. Щодо величини зазору між конусом і гайкою, то для нього встановлено наявність оптимального значення $\delta_c = 3,1$ мм, за якого споживана потужність експандера N набуває мінімального значення.

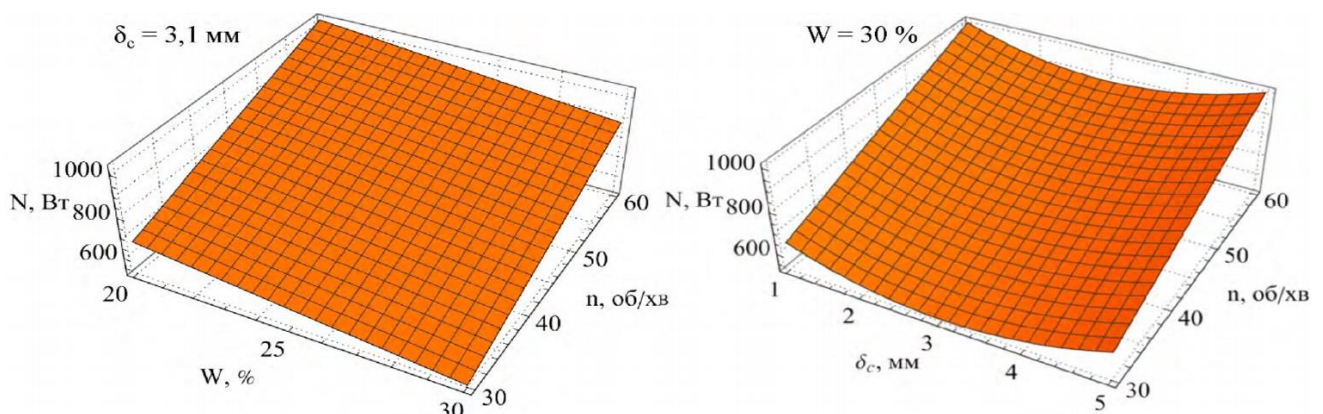


Рис. 3.3. Вплив вологості комбікорму W , величини зазору між конусом і гайкою δ_c та частоти обертання гвинта n на споживану потужність експандера N

У результаті статистичної обробки експериментальних даних було встановлено узагальнену регресійну залежність питомої енергоємності процесу експандування q від досліджуваних факторів у закодованій формі:

$$q = 32,3874 - 1,11847 x_1 + 1,31155 x_1^2 - 4,29801 x_2 + 0,127836 x_1 x_2 + 6,06315 x_2^2 - 2,04278 x_3 + 0,2867 x_1 x_3 + 2,22 \cdot 10^{-16} x_2 x_3 + 1,6234 x_3^2. \quad (3.4)$$

З урахуванням виключення статистично невагомих коефіцієнтів регресійної моделі та після виконання процедури розкодування рівняння (3.5) було отримано кінцевий аналітичний вираз, що описує залежність питомої енергоємності процесу експандування q від досліджуваних факторів. Відповідна графічна інтерпретація цієї залежності наведена на рис. 3.4.

$$q = 111,597 - 0,785547 n + 0,00721513 n^2 - 2,8468 W + 0,0524621 W^2 - 11,2437 \delta_c + 1,51579 \delta_c^2. \quad (3.5)$$

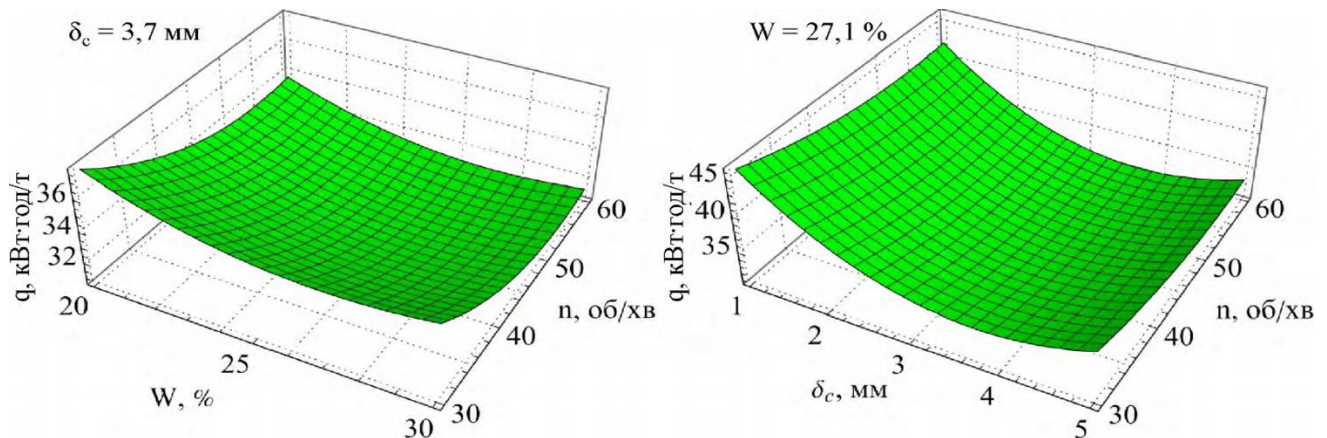


Рис. 3.4. Вплив вологості комбікорму W , величини зазору між конусом і гайкою δ_c та частоти обертання гвинта n на питому енергоємність процесу експандування q

У результаті оптимізаційних розрахунків, виконаних у програмному середовищі *Wolfram Cloud*, визначено комбінацію факторів, за якої питома енергоємність процесу експандування досягає мінімального значення $q = 30,7$ кВт·год/т. За цих умов оптимальні параметри процесу становлять: вологість комбікорму $W = 27,1\%$, зазор між конусом і гайкою $\delta_c = 3,7$ мм та частота обертання гвинта $n = 54,4$ об/хв. При цьому експандер працює з продуктивністю $Q = 28,9$ кг/год, а споживана потужність приводу становить $N = 889$ Вт.

3.2 Проведення виробничих випробувань експандера для приготування коросуміші на рибофермах

Промислові випробування експандера комбікормів, оснащеного раціонально обґрунтованими конструктивними та технологічними параметрами, здійснювали в умовах рибної ферми



Рис. 3.5. Загальний вигляд експандера для виробництва кормів

На досліджуваний експандер було змонтовано розроблену формувальну прес-матрицю з попередньо обґрунтованими оптимальними конструктивно-технологічними параметрами. Зокрема, співвідношення радіуса увігнутого конуса до радіуса звуженої ділянки циліндра формувальної насадки становило $R_c/R_r = 6,33$, величина зазору між конусом і гайкою — $\delta_c = 3,7\text{мм}$, а частота обертання гвинта була встановлена на рівні $n = 54,4\text{об/хв}$.

На початковому етапі виробничих випробувань упродовж однієї робочої зміни здійснювали реєстрацію показників продуктивності та споживаної потужності експандера в стандартній комплектації. Загальний обсяг переробленого комбікорму при цьому становив 58 534 кг.

Під час подальших випробувань експандера OEE 20 NG, оснащеного розробленою прес-матрицею, було перероблено 4 653 кг комбікорму з початковою вологістю 14,3 %. Визначення продуктивності експандера здійснювали шляхом періодичного зважування отриманого продукту через задані інтервали часу, тоді як значення потужності приводу фіксували за даними автоматизованої системи керування *Electrical Control System of the ExPander (ESEP)*.

Питому енергоємність процесу обчислювали як відношення споживаної потужності приводу до фактичної продуктивності експандера. Упродовж усього періоду випробувань відмов або зупинок обладнання, пов'язаних із роботою розробленої прес-матриці, зафіксовано не було.

Для комплексної оцінки якості отриманого експандованого продукту використовували два основні показники — об'ємну щільність та індекс водопоглинання (WAI). Вимірювання цих характеристик проводили відповідно до методик.

Підсумкові результати виробничих випробувань узагальнено та наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Підсумкові показники виробничих випробувань розробленої прес-матриці в складі експандера OEE 20 NG

№	Показники	Існуюча конструкція	Модернізована конструкція	%
1	Продуктивність, кг/год	985	1020	+ 3,6
2	Потужність на привід, Вт	33300	29700	– 10,8
3	Питома енергоємність, Вт·год/кг	33,8	29,1	– 13,9
4	Об'ємна щільність, кг/м ³	330,25	329,3	– 0,3
5	Індекс водопоглинання (WAI), г/г	3,37	3,42	+ 1,5

Отже, для модернізованого експандера встановлено зростання продуктивності на 3,6 % та одночасне зниження споживаної потужності приводу на 10,8 %, що в сукупності забезпечило скорочення питомих енерговитрат на

13,9 %. Водночас показники якості готового продукту – об’ємна щільність та індекс водопоглинання – відрізняються від базового варіанта в межах лише 0,3–1,5 %. Це свідчить про збереження необхідного рівня якості експандату при помітному підвищенні енергоефективності процесу.

Як зазначалося в розділі 1, ключовою функцією процесу експандування є забезпечення знезараження кормової сировини від патогенних мікроорганізмів. Хоча безпосередні мікробіологічні дослідження в межах даної роботи не проводилися, з огляду на те, що температурно-тискові режими в робочій камері експандера удосконаленої конструкції відповідали режимам базового обладнання, можна зробити обґрунтований висновок про належний рівень біобезпеки отриманого експандованого продукту.

В результаті використання кормосуміші приготовленої на удосконаленому експандері отримуємо продукцію вищої якості (рис. 3.6)

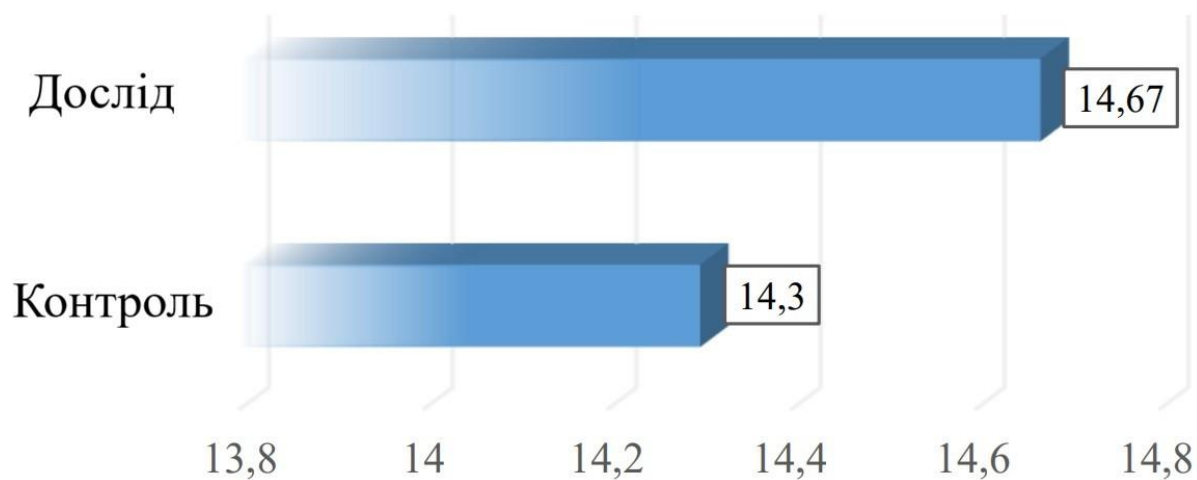


Рис. 3.6. Сумарний вміст визначених амінокислот у м'язовій тканині форелі радужної, %

Висновки по розділу

Виробничі випробування експандера комбікормів, укомплектованого розробленою прес-матрицею з раціонально обґрунтованими конструктивно-

технологічними параметрами (співвідношення радіуса увігнутого конуса до радіуса звуженої частини циліндра формувальної насадки $R_c/R_r = 6,33$, величина зазору між конусом і гайкою $\delta_c = 3,7\text{мм}$, частота обертання гвинта $n = 54,4\text{об/хв}$) засвідчили підвищення продуктивності на 3,6 % і одночасне зниження споживаної потужності приводу на 10,8 %. Сукупний ефект від цих змін проявився у скороченні питомих енерговитрат процесу на 13,9 %. При цьому основні показники якості готового продукту – об’ємна щільність та індекс водопоглинання – відхиляються від значень, характерних для базової конструкції, лише в межах 0,3–1,5 %, що свідчить про збереження необхідного рівня якості експандату за умов підвищення енергоефективності процесу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У межах виконаної роботи розв'язано науково-технічну проблему підвищення результативності процесу виробництва повнораціонних кормосумішей на рибофермах із одночасним забезпеченням їх знезараження. Це досягнуто шляхом модернізації конструкції експандера та наукового обґрунтування його конструктивно-технологічних параметрів. За підсумками проведених досліджень сформульовано такі основні висновки.

Розроблено та обґрунтовано конструктивно-технологічну схему експандера кормосумішей з удосконаленою формувальною насадкою, характерною особливістю якої є поєднання звуженої ділянки циліндра, увігнутого конуса та корончатої гайки. У процесі переміщення нагрітої пластифікованої кормової маси до звуженої зони формувальної насадки відбувається інтенсивне зростання тиску, а після проходження цієї ділянки його різке зниження. Такий ефект забезпечується збільшенням об'єму робочої порожнини, зумовленим геометрією увігнутого конуса. Унаслідок цього пластифікована маса розширюється та виходить через корончасту гайку формувальної насадки у вигляді сформованих експандатів.

У ході експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів було встановлено кількісні закономірності впливу технологічних параметрів на основні показники його роботи. Зокрема, визначено функціональні залежності продуктивності експандера Q , споживаної потужності N , питомих енерговитрат процесу експандування q та об'ємної щільності сформованого продукту ρ від вологості комбікормової суміші W , величини зазору між конусом і гайкою δ_c та частоти обертання гвинта n .

За допомогою оптимізаційних розрахунків у програмному середовищі *Wolfram Cloud* визначено комбінацію параметрів, за якої досягається мінімальне значення питомої енергоємності процесу експандування, що становить $q = 30,7 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$. За цих умов оптимальні значення факторів дорівнюють: вологість

комбікорму $W = 27,1\%$, зазор між конусом і гайкою $\delta_c = 3,7\text{мм}$ та частота обертання гвинта $n = 54,4\text{об/хв}$. При цьому експандер забезпечує продуктивність $Q = 28,9\text{кг/год}$, споживану потужність $N = 889\text{Вт}$ та об'ємну щільність експандатів $\rho = 336\text{кг/м}^3$.

Оскільки величина зазору між конусом і гайкою δ_c використовувалася як змінний параметр як у теоретичних, так і в експериментальних дослідженнях, зіставлення результатів виконували саме за цим фактором. Для обґрунтованих раціональних параметрів побудовано відповідні графічні залежності, а також визначено коефіцієнт кореляції Пірсона, значення якого склало 0,94, що підтверджує високу узгодженість теоретичних і експериментальних результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабар І.Г., Тально Я.Л. Умови утримання та проведення експериментів на рибній фермі. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (01-17 жовтня 2025 р.). URL: <http://animal-conf.inf.ua/conf.html>.
2. Тально Я.Л. Технологічні властивості кормів для об'єктів аквакультури. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 93-96.
3. Грабар І.Г., Тально Я.Л. Технологічні особливості виробництва екструдованих кормів. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 420-423.
4. Haloyan L., Mruk A., Kucheruk A., Terteryan L. Productive characteristics of age-3 brood brown trout (*Salmo trutta*) reared in the conditions industrial aquaculture. Рибогосподарська наука України. 2017. No 1(39). P. 64-72.
5. Khater E. S. G., Bahnasawy A. H., Ali S. A. Physical and mechanical properties of fish feed pellets. Journal of Food Processing & Technology. 2014. Vol. 5. № 10. P. 1–6.
6. Габич А. О. Технологія виробництва комбікормів. Київ : Урожай, 2018. 320 с.
7. Іванишин В. В., Шевчук М. Й. Механізація та автоматизація кормовиробництва. Львів : Сполом, 2019. 284 с.
8. Ковальчук І. М. Обладнання комбікормових заводів. Київ : НУБіП України, 2020. 356 с.

9. Мельник Ю. Ф., Гончар О. М. Сучасні технології підготовки кормів. Харків : Факт, 2017. 240 с.
10. Поліщук А. А. Теплові процеси в кормовиробництві. Вінниця : ВНАУ, 2021. 198 с.
11. Савченко В. П. Енергоефективність технологічних процесів АПК. Київ : Аграрна наука, 2016. 312 с.
12. Шпичак О. М. Інноваційні технології в комбікормовій промисловості. Київ : ІАЕ, 2022. 265 с.
13. Яценко В. М. Машини і обладнання для приготування кормів. Полтава : ПДАУ, 2018. 290 с.
14. Behnke K. C. Feed manufacturing technology. Kansas State University Press, 2015. 420 p.
15. Thomas M., van der Poel A. F. B. Physical quality of pelleted animal feed. Animal Feed Science and Technology, 2016, Vol. 179, pp. 1–17.
16. Singh R. P., Heldman D. R. Introduction to food engineering. Academic Press, 2014. 800 p.
17. Guy R. Extrusion cooking: technologies and applications. Woodhead Publishing, 2019. 650 p.
18. Frame N. D. The technology of extrusion cooking. Springer, 2018. 340 p.
19. Harper J. M. Food extrusion. CRC Press, 2017. 310 p.
20. Falk J., Schleining G. Energy efficiency in feed processing systems. Biosystems Engineering, 2020, Vol. 193, pp. 25–36.
21. Riaz M. N. Extruders in food applications. CRC Press, 2016. 480 p.
22. Müller H. Futtermitteltechnologie. Stuttgart : Ulmer Verlag, 2017. 390 S.
23. Kunze W. Technologie der Futtermittelherstellung. Berlin : Springer Vieweg, 2018. 420 S.
24. Schubert R., Becker T. Thermische Prozesse in der Lebensmittel- und Futtermitteltechnik. München : Hanser, 2019. 360 S.

25. Vogel A. Maschinen und Anlagen der Futtermittelindustrie. Leipzig : Fachbuchverlag, 2016. 295 S.
26. Hartmann C. Energieeinsatz in der Agrar- und Futtertechnik. Wiesbaden : Springer, 2021. 310 S.
27. Kruse K. Modellierung von Strömungs- und Wärmeprozessen. Berlin : Springer, 2020. 280 S.
28. FAO. Feed manufacturing and quality control. Rome : FAO, 2017. 180 p.
29. ISO 22000. Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain. Geneva : ISO, 2018.