

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 621.313.33:621.318.122

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ННІ ЕАіЕ

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій

\_\_\_\_\_ Каплун В.В.  
(підпис) (ПІБ)  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

\_\_\_\_\_ Окушко О.В.  
(підпис) (ПІБ)  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на тему: Дослідження електромагнітних і теплових характеристик  
електромеханічного гідролізера для переробки кератинової сировини

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітня програма — «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
другого (магістерського) рівня вищої освіти  
Орієнтація освітньої програми – Освітньо- наукова

Гарант освітньої програми  
Д-р техн. наук, проф. \_\_\_\_\_ Кривонос В.Є.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи  
Д-р техн. наук, проф. \_\_\_\_\_ Заблодський М.М.  
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав \_\_\_\_\_ Нариневич А. В.  
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри електротехніки,  
електромеханіки та електротехнологій  
канд. техн. наук, доц. \_\_\_\_\_ Окушко О.В.  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_ 2024 року**

**ЗАВДАННЯ  
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Наринович Анюті Вікторівні

Спеціальність **141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**  
Освітня програма - **«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**  
**другого (магістерського) рівня вищої освіти**

Орієнтація освітньої програми– **Освітньо- наукова**

Тема магістерської роботи **Дослідження електромагнітних і теплових характеристик  
електромеханічного гідролізера для переробки кератинової сировини**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “14” грудня 2023р.

№ 2269.С

Термін подання завершеної роботи на кафедру

Вихідні дані до магістерської роботи –

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз сучасних методів підвищення ефективності переробки кератиновмісних відходів
2. Узагальнення принципів формування електромагнітних і теплових характеристик і розробка конструктивно-технологічної схеми процесу конверсії кератиновмісної сировини
3. Дослідження електромагнітних і теплових характеристик електромеханічного гідролізера
4. Розробка разового технологічного регламенту з переробки кератиновмісних відходів і сировини у кормове борошно.

Перелік графічного матеріалу – презентація – наочні матеріали з результатами дослідження, алгоритми розрахунків і таблиці з отриманими результатами.

Дата видачі завдання “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_ 2024р.

**Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_ Заблудський М.М.**

**Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Нариневич А. В.**

## РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи: робота вміщує вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел, що налічує 47 позицій. Повний обсяг роботи складає 82 сторінки.

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної удосконалення технології і обладнання для переробки побічних продуктів птахівництва. Мета дослідження – підвищення ефективності гідролізера при переробці кератиновмісної сировини шляхом удосконалення технології і покращення електромагнітних і теплових характеристик одношнекового електромеханічного гідролізера.

Сформульовані принципи формування електромагнітних і теплових характеристик одношнекового електромеханічного гідролізера. Розроблена конструктивно-технологічна схема одношнекового електромеханічного гідролізера, в якому виконуються операції транспортування, деаерації, змішування, тонкого подрібнення і водного гідролізу кератину та короткочасного високотемпературного гідролізу перо-пухової сировини у тонкому шарі з впливом магнітного поля.

Наведено результати моделювання електромагнітних і теплових процесів електромеханічного гідролізера шляхом використання фізики магнітних полів, теплопередачі в твердих тілах та мультифізичного зв'язку в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Наведені результати випробувань експериментального зразка одношнекового електромеханічного гідролізера.

Розроблено разовий технологічний регламент з переробки кератиновмісних відходів і сировини у кормове борошно.

Ключові слова: магнітне поле, високотемпературний гідроліз, експериментальний зразок, електромеханічна система, кератиновмісна сировина.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕРОБКИ КЕРАТИНОВМІСНИХ ВІДХОДІВ	10
1.1. Методи, які використовуються для біоконверсії кератиновмісних відходів	10
1.2. Методи дослідження електромагнітних і теплових характеристик шнекових електромеханічних перетворювачів	15
1.3. Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА	19
2.1. Конструктивно-технологічна схема та особливості технологічного процесу конверсії кератиновмісної сировини	19
2.2. Електрофізичні та хімічні процеси в робочій зоні електромеханічного гідролізера	21
2.3. Принцип саморегуляції при розділенні на складові корисної потужності одношнекового електромеханічного гідролізера	28
2.4. Принципи безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення обертаючого моменту електромеханічного гідролізера	33
2.5. Висновки до розділу 2	38
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА	39
3.1. Моделювання електромагнітних процесів	39
3.2. Моделювання теплових процесів	43

3.3. Результати випробувань експериментального зразка одношнекового електромеханічного гідролізера	46
3.4. Висновки до розділу 3	53
<b>РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕГЛАМЕНТУ З ПЕРЕРОБКИ КЕРАТИНОВМІСНИХ ВІДХОДІВ І СИРОВИНИ У КОРМОВЕ БОРОШНО</b>	<b>56</b>
4.1. Характеристика вихідної сировини, матеріалів, реагентів, каталізаторів, напівфабрикатів і виготовленої продукції	56
4.2. Опис технологічного процесу і технологічної схеми виробництва	60
4.3. Норми технологічного режиму і метрологічне забезпечення	66
4.4. Контроль технологічного процесу виробництва	68
4.5. Основні положення пуску, експлуатації і зупинки виробничого об'єкта за нормальних умов	70
4.6. Безпечна експлуатація виробництва та охорона праці	71
4.7. Відходи при виробництві продукції, стічні води, викиди в атмосферу, методи їх утилізації, переробки	73
<b>ВИСНОВКИ</b>	<b>75</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>77</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕМП НЧ – електромагнітне поле низької частоти

MATLAB & Simulink – інтерактивний інструмент для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем

ШІМ – широтно-імпульсний перетворювач

ПУЕ – Правила улаштування електроустановок

ПЧ – перетворювач частоти

ТР – технологічний регламент

ШЕМГ – шнековий електромеханічний гідролізер

## ВСТУП

Зростаюча екологічна проблема, що пов'язана з забрудненням мікробною біомасою пухо-пір'яних відходів, формує нові підходи до потенційного використання відновлювальних ресурсів. Пухо-пір'яні відходи на 91 % складаються з білку кератину і потенційно можуть бути використані для виготовлення цінних матеріалів. Кератин являється одним з найбільш поширених структурних білків, а в організмі тварин поруч з колагеном він являється найбільш важливим біополімером. Кератини володіють високою міцністю та щільністю і не розчиняються в полярних та неполярних розчинниках. Існує декілька способів видобутку кератину з біомаси відходів включаючи кислотний гідроліз, лужний гідроліз, ферментативний гідроліз, гідроліз іонною рідиною і лужно-ферментативний гідроліз. Але жорсткі режими хімічних способів обробки приводять до втрати незамінних амінокислот, рацемізації амінокислот білкових гідролізатів, утворенню циклопептидів і зниження біологічної цінності кінцевих продуктів.

Борошно, як продукт переробки кератиновмісних відходів – цінна сировина у медичній, фармацевтичній, косметичній та біотехнологічній промисловості. В зв'язку з тим, що в останні роки зросли вимоги до якості білкових продуктів з кератиновмісної сировини, перш за все до ступеня перетравлення на рівні більше 80 % та засвоєння птицею і тваринами, нагальною проблемою є розробка більш ефективного способу переробки, який здатний формувати додаткові фізичні впливи на кератинову сировину і створення електротехнічних комплексів з поліфункціональними властивостями, що забезпечують контрольований технологічний процес. На сьогодні відсутні дослідження по обґрунтуванню структури електротехнологічного комплексу із застосуванням електромеханічного гідролізера за умов впливу магнітного поля на сировину. Тому дослідження електромагнітних, електромеханічних і теплових процесів агрегату для гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва і тваринництва під

впливом магнітного поля для підвищення енергоефективності переробки є актуальною науково-прикладною задачею.

Зміст поставлених завдань:

1. Аналіз сучасних методів підвищення ефективності переробки кератиновмісних відходів
2. Узагальнення принципів формування електромагнітних і теплових характеристик і розробка конструктивно-технологічної схеми процесу конверсії кератиновмісної сировини
3. Дослідження електромагнітних і теплових характеристик електромеханічного гідролізера
4. Розробка разового технологічного регламенту з переробки кератиновмісних відходів і сировини у кормове борошно.

**Мета дослідження** – підвищення ефективності гідролізера при переробці кератиновмісної сировини шляхом удосконалення технології і покращення електромагнітних і теплових характеристик одношнекового електромеханічного гідролізера.

**Об'єкт дослідження** – технологічні процеси при переробці кератиновмісної сировини.

**Предмет дослідження** – електромагнітні і теплові характеристики електромеханічного гідролізера та технологічний регламент виготовлення продукції з використанням одношнекового електромеханічного гідролізера.

Для досягнення мети та здійснення завдань було використано такі **методи**:

- теоретичні – аналіз, синтез, узагальнення, систематизація, порівняння для розкриття сутності та визначення базових понять досліджуваної проблеми, структурування, моделювання для розробки моделі;
- емпіричні – спостереження, порівняння, вимірювання, розрахунок, метод проб і помилок;
- кількісної обробки даних – визначення середніх значень, розрахунок заданих параметрів.

**Організація та експериментальна база дослідження.**

Теоретичні дослідження електромагнітних, теплових процесів і характеристик базуються на фундаментальних положеннях теорії електромагнітних пристроїв, теорії автоматизованого управління, термодинаміки нерівноважних процесів. Для верифікації розрахунків, перевірки теоретичних положень, нових технічних рішень виготовлені та досліджені макетні зразки.

**Практичне значення дослідження:** обґрунтування параметрів електромагнітної системи двошнекового електромеханічного гідролізера; результати експериментальних досліджень електромагнітних та теплових характеристик електромеханічного гідролізера при переробці кератиновмісної сировини.

**Інформація про апробацію результатів роботи та публікації:**

Заблодський М. М., Коваль Є.В., Мазуркевич О. І., Нариневич А. В. Конструктивні властивості, електромагнітні і теплові характеристики електромеханічного гідролізера для переробки кератиновмісної сировини. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної онлайн-конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта) м. Київ, 06-07 листопада 2024 р.

Участь у виготовленні і дослідженнях експериментального зразка електромеханічного гідролізера.

## 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕРОБКИ КЕРАТИНОВІСНИХ ВІДХОДІВ

### 1.1. Методи, які використовуються для біоконверсії кератиновісних відходів

Оскільки останнім часом застосування кератинового борошна в годівлі худоби підлягає суворим законодавчим обмеженням у більшості європейських країн, у відповідь на спалахи пріонних хвороб у минулому розробка нових методів перетворення стала критичною.

Пташине пір'я на 90% складається з кератину, тому потенційно може бути перетворене на цінні сполуки, або продукти, що складаються з білків кератину, або кератинових волокон. В свинячій щетині високий вміст сірковмісної амінокислоти цистеїну. Тим не менш, це також головна проблема, оскільки перетравність свинячої щетини низька через високу стабільність її структури. Свиняча щетина складається в основному з кератину (90% або більше), нерозчинного білка, наповненого волокнами, пов'язаними дисульфідними зв'язками. Кератин відомий своєю високою механічною стабільністю, нерозчинністю та стійкістю до деградації звичайними протеолітичними ферментами, такими як трипсин, пепсин і папаїн [5].

Звичайні методи, які використовуються для біоконверсії ороговілих відходів, що утворюються під час переробки тваринної сировини, базуються переважно на термічній та хімічній обробці. Застосування вапна або інших лугів, а також мінеральних кислот у поєднанні з термічною обробкою, наприклад для евечної вовни, є відомою практикою для перетворення кератинових матеріалів у гідролізати, застосовувані як компоненти корму, добрива ґрунту тощо, і забезпечує високу продуктивність процесу [6,7]. Обидва підходи дозволяють отримати побічні продукти помірно підвищеної засвоюваності, але зазвичай із поглибленим дисбалансом вмісту незамінних амінокислот. Впровадження ферментативного або мікробного розщеплення значно покращує біологічну та технологічну цінність кератинових шротів або

гідролізатів, забезпечуючи більш сприятливий амінокислотний баланс і високу засвоюваність. Тому багатообіцяючою альтернативою є розробки процесів, засновані на застосуванні кератинолітичних мікроорганізмів або їх протеолітичних ферментів [5,8].

Застосування сирої кератинази *Bacillus cereus* РСМ 2849 дозволило провести частковий гідроліз свинячої щетини з попередньою сульфітолітичною обробкою [8]. Було побудовано регресійну модель для опису процесу гідролізу з вивільненням вільних амінокислот при постійному навантаженні ферменту. Гідроліз у заданих умовах дозволив отримати гідролізат, багатий амінокислотами з розгалуженим ланцюгом. Представлений процес представляє альтернативний спосіб поводження зі свинячою щетиною, ороговілими відходами, які важко розкладаються.

Цінність кератинового матеріалу в значній мірі залежить від способу його переробки. Фізична та хімічна поведінка матеріалу залежить від доли амінокислотних залишків та їх розташування вздовж поліпептидних ланцюгів. Основними способами переробки кератину являються гідротермічний, кислотний, лужний і ферментативний.

Кислотний гідроліз кератину призводить до розриву усіх молекулярних зв'язків, можливий гідроліз до отримання суміші вільних амінокислот. В процесі кислотного гідролізу практично повністю руйнується триптофан і частково серин. Треонін, аспаргин і глютамін перетворюються в аспарагінову та глютамінову кислоти, звільняється аміак та утворюється сіль амонію. Лужний гідроліз супроводжується утворенням аміаку і альдегідів, які вступають в реакцію конденсації з аміногрупами. Аналіз досліджень [9] дозволяє зробити висновок, що жорсткі режими хімічних способів обробки призводить до втрати важливих амінокислот, рацемізації амінокислот білкових гідролізатів, утворення циклопептидів і зниження біологічної цінності кінцевого продукту.

Найпоширеніший метод переробки кератинового матеріалу – гідротермічний. Кератин еластичний, здатний розтягуватись при обробці

гарячим паром та скорочуватись під час висушування, таким чином відбувається перехід спірального  $\alpha$ -кератину в  $\beta$ -кератин. Механізм переходу пов'язаний з проникненням молекул води всередину фібрилярної структури і утворення водневих зв'язків. При цьому відбувається зменшення міжмолекулярних водневих зв'язків в білку. З ростом температури зменшується кількість водневих зв'язків, тому зменшується міцність кератину.

Гідротермічному методу переробки кератинових матеріалів присвячено велику кількість публікацій, однак кінцева якість продукту коливається в значних межах. Зокрема, серед існуючих відома технологія переробки пухо-пір'яних відходів, що включає нагрів, подрібнення, стерилізацію, гідроліз і сушку [10].



Рис 1.1. Установа високотемпературного гідролізу пухо-пір'яної сировини у тонкому шарі

Обладнання складається з чотирьох секцій (рис. 1.1):

- завантажувальний бункер з шнеками, що обертаються в протилежних напрямках і здійснюють попереднє подрібнення і нагрівання;
- секція подальшого нагріву, ущільнення до отримання надійної пробки і

подрібнення пера. В зоні максимального підтискання на вали встановлюються шнеки з зворотним напрямком витка, а температура пера в цьому місці повинна знаходитися в межах 60-120 °С.

- секція подрібнення пера, подальше нагрівання.
- секція високотемпературного гідролізу пухо-пир'яної сировини у тонкому шарі 30 мм. В кінці 4-ї секції розташований клапан – пристрій, що дозволяє вивести із зони високого тиску і температури перероблене перо в приймальну ємність з атмосферним тиском. Це пристрій являє собою об'ємний насос і перешкоджає об'ємному скипанню рідини в каналі і зниженню температури.

Всі чотири секції виконані у вигляді каналів, що мають форму, утворену двома або більше пересічними паралельними циліндрами, в яких обертаються шнеки, забезпеченими обігрівальними сорочками з циркуляцією теплоносія.

Основними недоліками способу є відсутність регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, низька енергоефективність через наявність чотирьох окремих секцій і електроприводів з різними характеристиками, втрата якості одержуваного продукту внаслідок нерівномірності температурного поля в зонах прогріву сировини та її окислення під час зростання продуктивності завантаження у 8-10 разів у порівнянні з продуктивністю шнеків.

Аналіз наукових джерел свідчить [12,13], що цілеспрямовану екстракцію кератинів здійснюють методами, які базуються на реакціях окиснення, відновлення та сульфітолізу. Реакції окиснення кератинів є необоротними та полягають в окисненні цистеїнових залишків до цистеїнової кислоти з утворенням кератоз. Натомість у разі використання відновників отримують кератеїни. У результаті сульфітолізу, що є оборотним процесом, утворюється S-сульфонат-аніон. Розглянуто перспективні напрями застосування екстрагованих кератинів з овечої вовни та людського волосся. Перший напрям стосується біомедичних технологій, від яких залежатиме

ефективність лікування патологій волоса. Другий напрям полягає у створенні біоматеріалів на основі кератинів із широким спектром застосування, а саме: тканинна інженерія, репаративна медицина, текстильна й аграрна промисловість, косметологія, виробництво очисного обладнання. Третій напрям пов'язаний із можливістю застосування кератинів для ідентифікації особи. Такі пошуки матимуть позитивний вплив на розвиток антропологічних досліджень і судово-медичної експертизи. Цьому сприяє висока стійкість білків волосся до несприятливих умов навколишнього середовища.

Незважаючи на те, що існує велика кількість літератури про вплив слабких електромагнітних полів надзвичайно низької частоти (ЕМП НЧ) на біохімічні реакції, все ж фізична природа цих ефектів здебільшого невідома. Основною проблемою є невідповідність між нескінченно малою кількістю енергії, яку несе збурення, та сутністю відповіді системи. Понад 10 років тому було стверджено, що слабкий струм може бути індукований у водному розчині глютамінової кислоти під впливом слабого магнітного поля певної частоти. Було перевірено вплив ЕМП НЧ на глютамінову кислоту за допомогою спектроскопії FTIR-ATR, щоб спостерігати структурні зміни, викликані впливом [14]. Зразки протягом 10, 20 або 30 хвилин піддавались впливу магнітного поля, створюваного котушками Гельмольца, а потім поміщались в спектрометр. Після експозиції розчини з різними значеннями рН завжди демонстрували зсув у бік депротонованих видів. Ефект триває кілька хвилин після експозиції до відновлення вихідної конфігурації.

Вплив поля, змінює структура води з точки зору відносної кількості когерентної та некогерентної фракцій. Кількість молекул води, що витісняються з когерентної фази, збільшує кількість молекул на межі області когерентності. Такий регіон найбільше реактивне місце в рідкій воді через велику кількість квазівільних електронів і існування хвоста електродинамічного поля, яке діє як джерело пондеромоторної сили, що діє на іони пропорційно до їх мас, індукуючи таким чином утворення цвітер -

іонної форми води  $\text{H}\equiv\text{O}-\text{H}$ . Завдяки своїм електричним зарядам цвітер-іон (хімічна сполука, в молекулах якої є просторово розділені електричні формально одиничні протилежні заряди) буде добре розчинний у воді, оскільки атоми водню в об'ємі некогерентної води негайно оточують негативно заряджену групу цвітер-іону, а атоми кисню негайно оточують позитивно заряджену групу цвітер-іону, тим самим повністю розчиняючи її. Цей процес може, нарешті, змінити іонний продукт води  $[\text{H}^+][\text{OH}^-]$  і вплинути на схему видоутворення глютамінової кислоти.

Розглянувши всі методи отримання гідролізату, можна дійти висновку, що необхідний ефект досягається при ферментативній обробці субстрату, оскільки при хімічному і та, частково гідротермічному, способах відбуваються небажані явища, пов'язані з розривом зв'язків у білку, рацемация окремих амінокислот. Переваги ферментативної деструкції з м'якими режимами обробки зумовлені тим, що максимально зберігається набір амінокислот нативних кератинів. Проте, тривалість ферментативної деструкції дуже велика. У зв'язку з цим, доцільно запропонувати комплексний метод біоконверсії кератину, який об'єднує переваги гідротермічного і ферментативного способів і набуває важливого значення у створенні різних білкових добавок та гідролізатів не тільки кормового, а й харчового призначення.

## 1.2. Методи дослідження електромагнітних і теплових характеристик шнекових електромеханічних перетворювачів

Публікації [15-21] всесторонньо розглядають шнекові електромеханічні перетворювачі, однак внаслідок особливості конструкцій, основну увагу приділено робочим елементам – шнекам і не достатньо розглянуто процеси, що виникають в різного роду приводах.

Серед існуючих публікацій відомо багато робіт присвячених дослідженню теплових процесів, що виникають в шнекових перетворювальних пристроях. Визначено, що ефект теплопередачі у двошнековому перетворювачі кращий,

а ніж в одношнековому. Визначено фундаментальні фізичні явища та взаємодії між фізичним переміщенням та хімічними реакціями в сировині переробки. Надано рекомендації з проектування шнекових перетворювачів. В роботі недостатньо уваги надано дослідженню впливу геометрії лопатей шнеку на продуктивність виходу та якість переробки сировини. Математичне моделювання процесів гідродинаміки, теплообміну і хімічних реакцій частинок в двошнековому перетворювачі виконано в роботі [22]. В публікації для побудови математичної моделі використано метод дискретних елементів. Визначено, що на процес переробки біомаси в двошнековому механізмі суттєво впливає на параметр теплоти реакції в кінетичній моделі. До недоліків запропонованої моделі можна віднести складність використання, що пов'язано з необхідністю ретельного калібрування параметру теплоти реакції для вдосконалення кінетичної моделі. В роботі [23] виявлено неефективність шнекового перетворювача у ділянці початкового змішування, що призводить до нерівномірної передачі тепла в неоптимальних умовах. Побудовано математичну модель, що усуває вказані неефективності, і, відповідно, збільшує початковий середній коефіцієнт тепловіддачі в порівнянні з початковою конструкцією шнекового перетворювача.

В опублікованій літературі обмежена кількість даних про вплив температури та тиску на магнітні властивості сталі, наприклад, у випадку занурювальних двигунів, що використовуються в нафтових свердловинах, або глибоководних маслоснаповнених двигунів [24, 25]. Важко визначити магнітні властивості листів електротехнічної сталі в середовищі, де є зв'язок температури та тиску, використовуючи відомі дані та моделі гістерезису. Тому, щоб підвищити точність проектних розрахунків ЕМ, необхідно знати магнітні властивості сталі за тих же умов. Такий аналіз здійснено в [26] і встановлено, що відносна проникність при низькій щільності потоку збільшується з підвищенням температури, а при вищій щільності потоку зменшується. В той же час коли напруження стиску перевищує 50 МПа, вплив напруження стиску на відносну проникність і втрати заліза зменшується.

Експериментально визначено відносну проникність і втрати заліза листової електротехнічної сталі в умовах від 30 °С до 200 °С і від 0,1 МПа до 140 МПа.

Окремі дослідження стосуються вимірювання магнітних властивостей сталі та інших м'яких магнітних, електропровідних матеріалів при високих температурах до температури Кюрі і трохи вище. Вимірювання показують, що поляризація насичення незначно зменшується до 500 °С, а потім падає до нуля при температурі вище 700 °С. В роботах [27, 28] експериментально та чисельно досліджені магнітні властивості магнітних матеріалів, збуджуваних синусоїдальною та широтно-імпульсною модуляцією на вході інвертора за високих температур навколишнього середовища використовуючи модель відтворення зі схемою Кауера.

Особливістю розглянутих методів і результатів досліджень електромеханічних перетворювачів є стаціонарні температурні умови оточуючого охолоджувального середовища. Але для широкого класу поліфункціональних електромеханічних перетворювачів технологічного призначення актуальними стають дослідження при нелінійних змінах навантажувально-охолоджуючого середовища.

З метою підвищення ефективності технологічного процесу переробки кератин-вмісної сировини, надійності роботи установки і стійкості реакції гідролізу у Національному університеті біоресурсів і природокористування України запропоновано концепцію електротехнологічного комплексу. Необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження, в результаті яких повинні бути отримані основні обґрунтовані конструктивні і технологічні параметри, при яких якісні показники виконання технологічного процесу мають оптимальні значення та задовольняють таким вимогам: регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини; енергоефективність через використання дисипативної складової електромеханічної частини установки; висока якість одержуваного продукту за рахунок виключення процесів окислення

сировини, забезпечення рівномірності температурного поля в зонах її прогріву та гарантованого існування в сировині води тільки в стані рідини.

### 1.3. Висновки до розділу 1

Розглянувши всі методи отримання гідролізату, можна дійти висновку, що необхідний ефект досягається за ферментативної обробки субстрату, оскільки при хімічному і та, частково гідротермічному, способах відбуваються небажані явища, пов'язані з розривом зв'язків у білку, рацемация окремих амінокислот. Переваги ферментативної деструкції з м'якими режимами обробки зумовлені тим, що максимально зберігається набір амінокислот нативних кератинів. Проте, тривалість ферментативної деструкції дуже велика.

У зв'язку з цим, доцільно запропонувати комплексний метод біоконверсії кератину, який об'єднує переваги гідротермічного і ферментативного способів і набуває важливого значення у створенні різних білкових добавок та гідролізатів не тільки кормового, а й харчового призначення.

Мета дослідження – підвищення ефективності гідролізера при переробці кератиновмісної сировини шляхом удосконалення технології і покращення електромагнітних і теплових характеристик одношнекового електромеханічного гідролізера. Для досягнення мети вирішувались такі задачі:

1. Аналіз сучасних методів підвищення ефективності переробки кератиновмісних відходів
2. Узагальнення принципів формування електромагнітних і теплових характеристик і розробка конструктивно-технологічної схеми процесу конверсії кератиновмісної сировини
3. Дослідження електромагнітних і теплових характеристик електромеханічного гідролізера.

4. Розробка разового технологічного регламенту з переробки кератиновмісних відходів і сировини у кормове борошно.

## РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА

### 2.1. Конструктивно-технологічна схема та особливості технологічного процесу конверсії кератиновмісної сировини

Для виробництва кормового білкового борошна запропонована конструктивно-технологічна схема одношнекового електромеханічного гідролізера (ШЕМГ), яка представлена на рис.2.1.

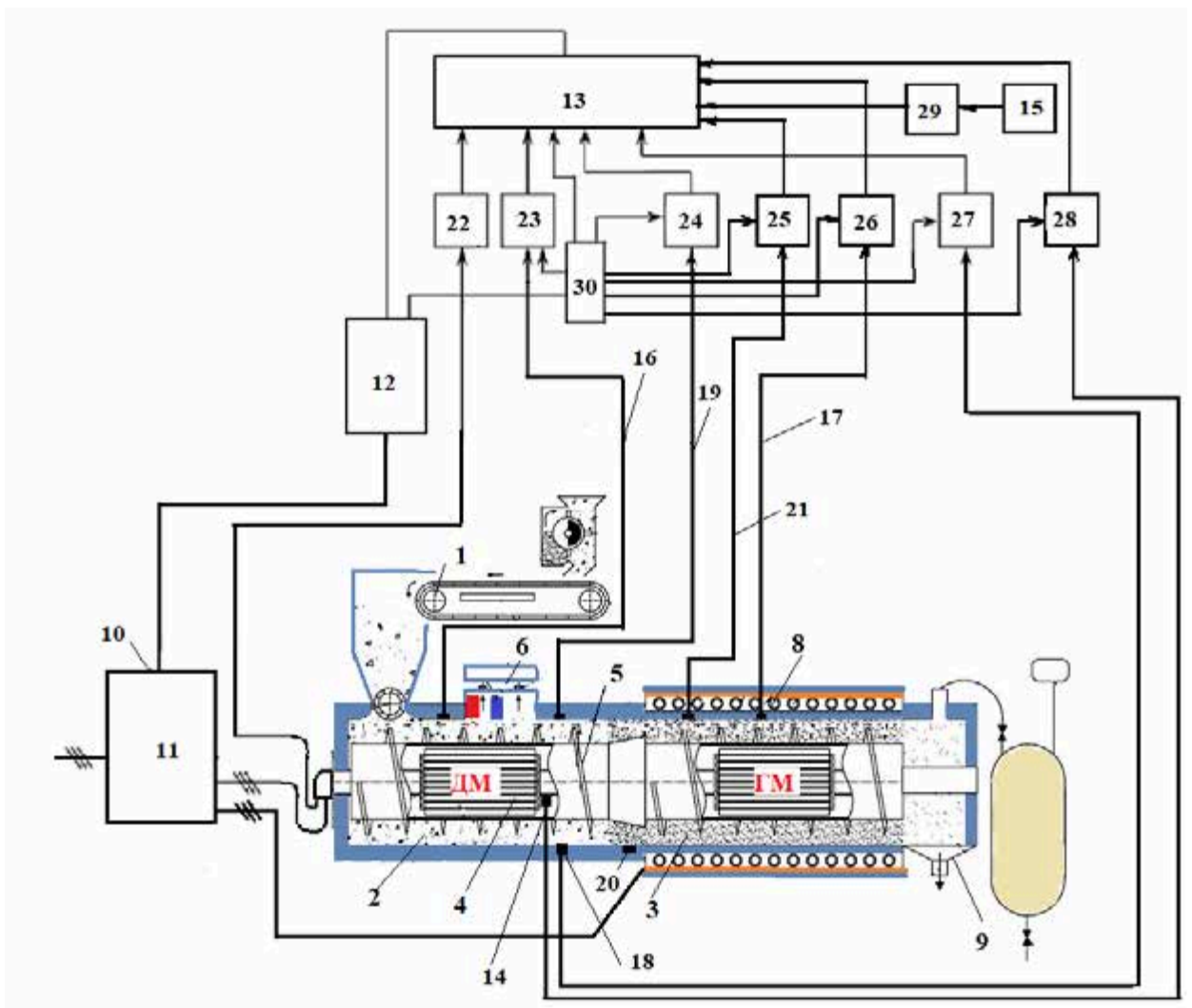


Рис.2.1. Конструктивно-технологічна схема одношнекового електромеханічного гідролізера для виробництва кормового білкового борошна

Ця розробка виконана на кафедрі електротехніки, електромеханіки та електротехнологій НУБіП України [29 -32].

Основні вузли і пристрої одношнекового електромеханічного гідролізера такі: 1 – завантажувальний пристрій з магнітним і електродинамічними сепараторами; 2,3 – ущільнююча і реакційна робочі зони; 4 – циліндричні індуктори обертового магнітного поля; 5 – ротор-шнек; 6 – камера магнітної деаерації сировини; 7 – коробка підключення кабелів електроживлення та кабелів системи керування; 8 – індукційний обігрівальний пристрій з теплоізоляцією і електромагнітним екраном; 9 – вакуумно - імпульсний пристрій вивантаження продукту.

Система автоматичного контролю та управління процесом гідролізу містить частотний регулятор 10, що складається з напівпровідникового перетворювача напруги 11 та блока імпульсно-фазового управління 12, мікроконтролер 13 з запрограмованим алгоритмом на базі нечіткої логіки, давач 14 вимірювання швидкості обертання шнеку, давач 15 вимірювання швидкості обертового циліндра бункера-живильника 1, перший 16 і другий 17 давач контролю температури сировини, давач контролю кислотно-лужного балансу сировини 18, перший 19, другий 20 і третій 21 давач контролю тиску, пристрої спряження 22 - 29 давачів з мікроконтролером, блок живлення 30 системи управління. Спряження - узгодження елементів всіх інших сімейств з мікроконтролером . По - перше, перетворення аналогового сигналу у цифрову форму, по-друге, забезпечення амплітуди вихідного сигналу, відповідності вимог по вхідних струмах і напрузі елементів напрузі джерела живлення тощо.

Другий давач 20 контролю тиску розташований в зоні конуса, змонтованого в центральній ділянці шнеку, і виконаний у вигляді п'єзоелектричного генератора, що складається з двох електродів. Перший електрод має форму тонкостінного порожнистого напівциліндра з високою електропровідністю, встановленого напроти конуса і прикріпленого через

шар електричної ізоляції до корпусу шнека, а в якості другого електрода використано конус цього шнека, при цьому конус виконаний з міді.

Перо-пухова сировина з вихідною вологістю 60-80 % подається в завантажувальний пристрій шнекової установки, в якому піддається впливу електромагнітних полів для видалення металевих часток і за допомогою стрічкового вакуум-фільтра здійснюється видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи (35-45 %). В першій робочій зоні шнеків створюється сировинне ущільнення (пробки) за рахунок зменшення прохідного перетину шнекової установки і забезпечення тиску від 1 МПа до 20 МПа. Одночасно з ущільненням здійснюють нагрів до температури 60°C, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією 0,025Т і магнітну деаерацію сировини. Далі сировина подається в реакційну робочу зону шнеків, де її розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків шнеків, перемішують і подрібнюють при температурі 180-260°C до отримання подрібненої маси. Одночасно в цій зоні установки здійснюють вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50Гц з індукцією 0,065Т і чотирьохстороннє підведення теплової енергії до шару пухо-пір'яної сировини. Вакуумний вплив через кожні 10-60 с здійснюють для отримання продукту з вологістю 8-12%.

## 2.2. Електрофізичні та хімічні процеси в робочій зоні електромеханічного гідролізера

При підключенні до джерела змінного струму циліндричні індуктори обертового магнітного поля 4 двигунового (ДМ) і гальмуючого (ГМ) модулів збуджують вихрові струми у феромагнітному спільному роторі-шнеку 5, за рахунок яких останні нагріваються. При взаємодії обертових магнітних полів і вихрових струмів створюються результуючі електромагнітні моменти, що обертають ротор-шнек і, відповідно, виконуються операції транспортування, змішування, тонкого подрібнення і водного гідролізу кератину та короткочасного високотемпературного гідролізу перо-пухової сировини у

тонкому шарі з впливом магнітного поля і поверхневих електричних потенціалів на поверхні ротора-шнека. Кератиновий матеріал з від'ємним значенням магнітної сприйнятливості відштовхується від джерела магнітного поля, що створює додатковий молекулярний тиск на перо-пухову сировину та покращує процес гідротермічного гідролізу.

В ущільнюючій порожнині 2 робочої частини електричного гідролізатора здійснюють ущільнення перо-пухової сировини в 8-10 разів, нагрів при тиску 0,5-5,0 МПа до температури 60°C, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,025Т для гальмування процесу випаровування вологи.

Водна компонента перо-пухової сировини при транспортуванні в каналі робочої зони шнекової установки піддається впливу напруженностей електромагнітного поля. Кратність магнітної обробки води значно збільшує рН водної компоненти, при цьому спостерігаються кілька процесів:

- зміщення електромагнітним полем рівноваги між структурними гідратованими іонами і компонентами води;
- збільшення центрів кристалізації солей, розчинених в заданому обсязі води, на мікрочлениках з дисперсних ферочасток.

Вода містить приблизно 0,2 мг / л заліза. У воді залізо найчастіше зустрічається у вигляді іонів  $Fe^{2+}$  і  $Fe^{3+}$ , які утворюють органічні і неорганічні сполуки. В ході сольвататермічного процесу іони  $Fe^{3+}$  спочатку адсорбуються і збагачуються на поверхні перо-пухової сировини і частково відновлюються до  $Fe^{2+}$  за рахунок неї, що забезпечує *in situ* утворення  $Fe_3O_4$ . Суть сольватаційного явища полягає в іонному русі в розчині разом з деякою частиною розчинника, що вступив з ними у взаємодію, і порушення ними структури розчинника. Після впливу на водневу компоненту низькочастотного змінного магнітного поля в діапазоні частот 1-50 Гц значно підвищується розчинююча здатність води. Максимальна розчинююча здатність спостерігається при впливі магнітного

поля з частотою 2-3 Гц. Іони  $Fe^{3+}$  підсилюють перетворення перо-пухової сировини в вуглецевий матеріал і, таким чином, викликають утворення нанокompозитів  $Fe_3O_4 / C$ .

Формування парамагнітного композиту  $Fe_3O_4 / C$  на першій стадії термічної обробки вологої кератинової сировини створює далі умови більшого ущільнення і тиску у тонкому шарі за рахунок зовнішнього магнітного поля ротора-шнека, що веде до більш інтенсивного процесу гідролізу кератинової сировини.

Одночасно в ущільнюючій порожнині 2 робочої частини електричного гідролізатора здійснюють деаерацію перо-пухової сировини за допомогою камери деаерації 6 з двома входами вздовж каналу робочої частини, в порожнині першого входу розташовані постійні магніти, що створюють високу магнітну напруженість для всмоктування парамагнітного кисню, а другий вхід камери деаерації розташований напроти індуктора обертового магнітного поля 4, що створюють в контактуючих з сировиною поверхнях ротора-шнека магнітну індукцію 0,025Т – для 80% інших газів, об'ємна магнітна сприйнятливості яких на два порядки нижча, ніж у кисню. Усі діамагнітні гази відштовхуються від контактуючих з сировиною намагнічених областей шнеків. Таким чином, в ущільнюючій порожнині 2 робочої частини електричного гідролізатора максимально прибираються порожнечі з пухо-пір'яний суміші, в яких можливе перетворення води на пару і надалі, за рахунок видалення кисню, виключаються втрати якості одержуваного продукту внаслідок окислення. Відведення газів здійснюється через виходи камери деаерації 6, які з'єднані з пристроєм вакуумування і відведення газоповітряної суміші.

В кінці ущільнюючої порожнини 2 робочої частини електричного гідролізатора за допомогою конусу відбувається подальше ущільнення сировини до утворення пробки між корпусом та конусом при тиску від 1 МПа до 20 МПа. Висока міцність ущільнення сировини гарантує надійний

захист персоналу від випадкового викиду із зони гідролізу та забезпечує герметизацію реакційної порожнини 3.

За хімічним складом кератинова сировина є природним концентратом білка, однак у натуральному стані пир'яна кератинова сировина не розчиняється у воді, не перетравлюється і не засвоюється в організмі тварин через наявність у молекулі білка дисульфідних зв'язків типу -S-S- між поліпептидними ланцюгами. Кератин еластичний, здатний розтягуватися при обробці гарячою водою і скорочуватися при висушуванні, що пояснюється переходом спірального  $\alpha$ -кератину в  $\beta$ -кератин, який має  $\beta$ -складчасту структуру. Механізм переходу пов'язаний з проникненням молекул води всередину фібрилярної структури і їх конкуренції при утворенні водневих зв'язків. За наявності магнітного поля, створеного індуктором обертового магнітного поля 4, відбувається інтенсифікація цих процесів за рахунок дії сил Лоренца на дипольні молекули води. При цьому спостерігається зменшення числа водневих зв'язків в білку. Чим вище температура, тим менше число міжмолекулярних водневих зв'язків, тобто менше міцність вихідного кератину.

Крім того, вплив магнітного поля на структуру води приводить до зміни кислотно-лужного балансу (рН), а саме веде до підвищення рН [33], продукує високу каталітичну ефективність, що сприяє здатності розщеплювати високонерозчинні кератинові субстрати до продуктів з доданою харчовою цінністю. Експериментально доведено, що оптимальне значення рН, прийняте для екстракції кератинів, знаходиться в межах 6,5–8,5, оскільки кератини не можуть розчинятися в кислому середовищі. Саме такий діапазон зміни рН використовується для регулювання процесу в залежності від властивостей кератиновмісної сировини і початкової вологості.

Підвищення температури покращує процес гідролізу кератиновмісної сировини, оскільки збільшує мобільність іонів шляхом зменшення в'язкості суміші. Проте, високі температури можуть порушувати структуру протеїну, призводити до негативного впливу на амінокислотний склад. Для

максимального збереження амінокислот і якості жиру тривалість високотемпературної обробки у тонкому шарі перо-пухової сировини в електричному гідролізаторі встановлена не вище 110 секунд.

Прикладене ззовні механічне напруження до перо-пухової сировини при її переході під тиском до 10 МПа з ущільнюючої порожнини 2 у реакційну порожнину 3 з тиском 5,0 МПа формує між першим електродом другого давача 20 контролю тиску та конусом, виконаним з міді, пружну деформацію у нецентросиметричному діелектрику, яким є куряче пір'я, і спричиняє електричну поляризацію, тобто перерозподіл в ньому електричних зарядів. Цей лінійний електромеханічний ефект прямо пропорційний величині деформації. Причиною п'єзоелектричного ефекту є електричні диполі, які спонтанно виникають в структурі високовпорядкованих кератинових волокон за рахунок утворення внутрішньо-молекулярних і міжмолекулярних водневих зв'язків, які з'єднують між собою та одна з одною  $\alpha$ -спіралі та  $\beta$ -листи [34]. Еквівалентний п'єзоелектричний коефіцієнт курячого пір'я, що характеризує поздовжній п'єзоэффект, знаходиться в інтервалі від 1.6 пКл/Н до 2.1 пКл/Н. При цьому структура шару курячого пір'я при переході з ущільнюючої порожнини під тиском до 10 МПа у реакційну порожнину з тиском 5 МПа формує напругу більше 10 В, що достатньо для використання цієї функції п'єзоелектричного генератора як джерела живлення другого давача тиску або одночасного живлення усіх світлодіодів індикації систем контролю і керування електричного гідролізатора. Створений електричний сигнал також використовується для безпосереднього визначення тиску в реакційній зоні 3 шляхом попереднього градування вихідної напруги п'єзоелектричного генератора (давача тиску) за величиною деформації. Безпосередній контроль тиску в зоні розташування конусу відомими вимірювальними засобами практично важко реалізувати, оскільки в означеній зоні діють такі фактори як висока температура і тиск, а також обмеженість об'єму для розташування давача.

Індуктор 8 обігрівального пристрою виконано з жаростійкого, нагрівального кабелю з магнезіальною ізоляцією. Металевий корпус шнека є одночасно приймачем енергії магнітного поля, генератором теплоти і служить несучою конструкцією. Змінний магнітний потік, створюваний індуктором 8, наводить в корпусі шнека вихрові струми, які додатково нагрівають його. В індукторі за рахунок електричних втрат виділяється 80 ... 85% всієї теплової енергії, в у корпусі за рахунок вихрових струмів - 15 ... 20%. Це формує інтенсивний тепловий потік вбік сировини, що обробляється в реакційній порожнині електричного гідролізатора. Індуктор виготовляють в однофазному або трифазному виконанні і залежно від технологічних вимог він може бути підключений на знижену або мережеву напругу. Для захисту від зовнішнього поля індуктора використовують електромагнітний екран у вигляді суцільного кожуха з листового матеріалу з малим питомим опором; втрати в такому екрані невеликі.

На виході шнеку оброблена сировина попадає в вакуумно - імпульсний пристрій вивантаження продукту 9, в якому є технологічна герметична ємність, де після закриття вузла вивантажування готового продукту, сировину піддають обробці вакуумними імпульсами шляхом швидкого з'єднання за допомогою швидкодіючого клапану з ресивером, в якому попередньо був створений вакуум вакуумним насосом. Вакуумні імпульси діють не лише на сировину розміщену безпосередньо в герметичній ємності, але й на частину сировини, що знаходиться в робочій зоні шнеку. При чому та частина сировини, що знаходиться в робочій зоні шнеку, піддається більшому впливу вакуумних імпульсів за рахунок надлишкового тиску в зоні.

За рахунок вакуумних імпульсів здійснюється видалення надлишку вологи з сировини до значення 8-12%. Під впливом вакууму на півфабрикат готового продукту, з нього видаляється вільна та молекулярно зв'язана волога внаслідок закипання та вибуху бульбашок вологи в структурі матеріалу. При цьому додатково відкриваються пори, відбувається руйнування структури та більш тонке подрібнення. По завершенню процесу обробки отримують

розсипчасту, дрібно помелену фракцію яку можна використовувати як білкову добавку для годівлі тварин та птиці без додаткового осушування.

За наявності підведення теплової енергії як збоку обігрівного пристрою 8 через корпус шнека, так і збоку шнеку 5 з витками, значно підвищується швидкість нагрівання сировини, рівномірність її температурного поля. Крім того, значно підвищується енергоефективність процесу виробництва білкового борошна за рахунок використання дисипативної складової електромеханічної частини шнекової установки. Внаслідок сумісної дії усіх факторів в оброблюваній білковій сировині проходять фізико-хімічні перетворення — відбувається процес гідролізу, який руйнує зв'язки, як між окремими частинами розгалужених макромолекул протеїну, так і між активними групами в межах амінокислотних елементів. Білок втрачає ферментний опір, завдяки чому набуває властивості легко перетравлюватися, підвищується його засвоюваність.

В залежності від виду сировини і її вихідної вологості необхідна швидкість обертання і температура зовнішніх поверхонь ротора-шнеку 5 встановлюється шляхом зміни глибини проникнення обертового магнітного поля у масив ротора та співвідношень електромагнітних моментів, які регулюється зміною частоти і напруги джерела живлення індукторів обертового магнітного поля 4 за допомогою системи автоматичного контролю та управління процесом гідролізу. Крім того, мікроконтролер 13 з запрограмованим алгоритмом на базі нечіткої логіки регулюванням рівня напруги і частоти живлення обігрівного пристрою 8 може змінювати інтенсивність нагріву сировини в реакційній порожнині 3. Рівні тиску в шарах перо-пухової сировини залежать від швидкості обертання шнеку і швидкості подавання сировини у бункері-живильнику 1.

Отже, запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, надійності роботи гідролізатора і стійкості реакції гідролізу, поліпшення якості білкового борошна і

підвищення засвоюваності готового продукту, зниження енергетичних витрат гідролізатора.

### 2.3. Принцип саморегуляції при розділенні на складові корисної потужності одношнекового електромеханічного гідролізера

Даний принцип визначає механізм пайового розподілу електромагнітної потужності одношнекового електромеханічного гідролізера на два корисні потоки вихідної потужності: потік механічної потужності і потік теплової потужності.

Розглянемо два характерні стани ШЕМГ:

А – нерухомий стан масивного ротора ( $S = 1$ ), відповідний штучному режиму стоянки під струмом згідно до вимоги технологічного процесу;

Б – стан прискорення обертання ротора ( $\frac{dn}{dt} > 0$ ), або його стабільний рух при транспортуванні матеріалу певної в'язкості.

Вологий матеріал, що переробляється, виступає в двох якостях: механічне навантаження для ротора електромеханічного гідролізера, що створюється силами в'язкого тертя матеріалу; охолоджувальне середовище, що омиває ротор-шнек і відбирає від нього теплову енергію. При цьому може здійснюватися фазовий перехід матеріалу та компонентів суміші в рідкий, і навіть газоподібний стан.

Стану А відповідає нерухомий ротор, коли електромагнітна енергія рухового  $P_{ED}$  і гальмуючого модулів  $P_{EG}$  повністю перетворюється в тепло, що виділяється в роторі.

Крім того, проходження струму по статорним обмоткам супроводжується джоульовими втратами  $P_{MID}$  і  $P_{MIG}$ . Ці процеси можуть бути відображені наступними виразами:

$$P_{ED} = m_1 \cdot E_{1D} \cdot \cos \psi_{2D} \cdot \sqrt{\frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I'_{2D})^2 dt}, \quad (2.1)$$

$$P_{EG} = m_1 \cdot E_{1G} \cdot \cos \psi_{2G} \cdot \sqrt{\frac{1}{tc} \int_0^{tc} (I'_{2G})^2 dt} , \quad (2.2)$$

$$P_{M1D} = m_1 \cdot \frac{1}{tc} \cdot \int_0^{tc} (I_{1D})^2 \cdot R_{1D}(t) dt , \quad (2.3)$$

$$P_{M1G} = m_1 \cdot \frac{1}{tc} \cdot \int_0^{tc} (I_{1G})^2 \cdot R_{1G}(t) dt , \quad (2.4)$$

де  $E_{1D}$ ,  $E_{1G}$ ,  $I_{1D}$ ,  $I_{1G}$ ,  $I'_{2D}$ ,  $I'_{2G}$ ,  $R_{1D}$ ,  $R_{1G}$  – ЕРС взаємоіндукції, первинні і приведені вторинні струми, активні опори статорних обмоток відповідно рухового (ДМ) і гальмуючого (ГМ) модулів;

$t_c$  – час стоянки під струмом.

Знаходження струмів і активних опорів в підінтегральних виразах указує на температурний дрейф цих величин протягом часу  $t_c$ . Сумарна теплова енергія  $W_{ТП} = t_c (P_{ED} + P_{EG} + P_{M1D} + P_{M1G})$  визначається з умови  $t_c \leq t_{гр}$ , коли за період стоянки під струмом температура статорних обмоток не досягає граничного по класу нагрівостійкості ізоляції значення, але матеріал в міжлопатевої зоні, дотичний до ротора, вже переходить в стан меншої в'язкості. Природно, що тепловий стан обмоток повинен контролюватися автоматичною системою, при необхідності, знижуючи величину або перериваючи подачу напруги живлення на якийсь час, достатній для охолодження обмотки до безпечної температури за рахунок віддачі тепла матеріалу.

Стан Б настає в мить, коли в'язкість матеріалу, що переробляється, знижується настільки, що створюваний їм гальмівний момент  $M_C$  стає менше сумарного електромагнітного моменту обох модулів електромеханічного

гідролізера. При цьому електромагнітна енергія  $W_{\text{ЕД}}$  в зазорі ДМ перетвориться в два інших вида енергії: механічну  $W_{\text{мех.д}}$  і теплову  $W_{\text{тп.д}}$ .

Введемо параметри при  $S = 1$ ,  $I_2'' = I_{1H} = 1$ , узяті з досліду короткого замикання при номінальному струмі статора :

$$R_2'(1) = \frac{K_A K_L a_R}{Z_B} \sqrt{0,5 \mu_2(1) \rho_2 \cdot \omega_1}, \quad (2.1)$$

$$X_2'(1) = \frac{a_X}{a_R} R_2'(1),$$

де  $Z_B^D = U_{1H} / I_{1H}$  – базисний імпеданс статора ДМ;

$$K_A^D = \frac{2m_1 (W_{1D} \cdot K_{об1})^2 \cdot \tau_D}{P_D \cdot \tau_D} \quad \text{– коефіцієнт приведення питомих}$$

параметрів до системи повних опорів статора;

$$K_L^D = 1 + \frac{2 \tau_D}{\pi \tau_{2D}} \quad \text{– коефіцієнт кінцевої довжини ділянки ротора,}$$

відповідного ДМ;

$a_R = 1,4 \div 1,6$ ;  $a_X = 0,6 a_R$  – коефіцієнти, що враховують зміну магнітної проникності і гістерезис;

$\mu_2(1)$  – магнітна проникність, визначувана по основній кривій намагнічування матеріалу ротора при співвідношенні поверхневої

тангенціальної напруженості магнітного поля на поверхні ротора і амплітуди

$$\frac{H_{2xo}}{A_{1H}} = 1$$

номінального лінійного навантаження статора

Значення параметрів головного ланцюга, наприклад, Г-подібної схеми заміщення, залежних від ковзання, знаходимо по формулах:

$$\frac{R''_{2SD}}{s} = \frac{R'_2(1) \cdot C_1^2}{\sqrt{sI''_{2D}}}, \quad (2.2)$$

$$\frac{X'_{2D}}{s} = 0,6 \frac{R''_{2SD}}{s}, \quad (2.3)$$

$$\text{де } C_1 \cong 1 + \frac{X_1}{X_m}.$$

Тоді пайовий розподіл вихідної енергії в стані Б характеризується двома складовими:

$$W_2^B = W_{2III} + W_{2мех.} = m_1 \cdot R'_2(1) \cdot C_1^2 \cdot (t_g - t_c)^{0,25} \cdot \left[ \int_{t_c}^{t_g} \{I''_2(t)\}^2 dt \right]^{0,75} \times$$

$$\times \left[ \sqrt{\frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{EMP}(t) - M_C(t)\} dt} + \frac{1 - \frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{EMP}(t) - M_C(t)\} dt}{\sqrt{\frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{EMP}(t) - M_C(t)\} dt}} \right], \quad (2.4)$$

де  $(t_g - t_c)$  – період часу від моменту руху ротора ШЕМГ до сталого значення швидкості.

Закон зміни ковзання в період  $(t_g - t_c)$ :

$$s_D = \frac{1}{H} \int_{t_c}^{t_g} \{M_{EMP}(t) - M_C(t)\} dt \quad , \quad (2.5)$$

де  $H$  – інерційна постійна ротора ШЕМГ ;

$M_{EMP} = M_{EM,D} \pm M_{EM,T}$  – результуючий електромагнітний момент ДМ і ГМ. Знак «+» - відповідає згідному обертанню ДМ і ГМ.

У виразі (2.4) для стану Б повинне бути узятє середнє значення питомого опору ротора

$$\rho_2 = \frac{1}{t_B - t_C} \int_{t_c}^{t_g} \rho_2(t) dt \quad . \quad (2.6)$$

Аналогічні вирази можуть бути отримані і для ГМ з тією лише різницею, що значення ковзання необхідно визначати відповідно до виразу

$$s_T = \frac{p_\Gamma}{p_D} (1 - s_D) \pm 1 \quad , \quad (2.7)$$

де  $p_D, p_\Gamma$  – число пар полюсів відповідно ДМ і ГМ.

Знак «+» відповідає зустрічному, а «-» – згідному обертанню магнітних полів ДМ і ГМ.

Крім того, вихідна енергія ГМ може формуватися по трьом варіантам:

а) при зустрічному обертанні магнітних полів ГМ отримує електричну енергію з мережі і механічну від ДМ. В результаті вся отримана енергія повністю дисипує, перетворюючись в тепло ;

б) при згідному обертанні магнітних полів і  $p_\Gamma = p_D, M_D > M_\Gamma$  електромагнітна енергія в зазорі ГМ перетвориться в теплову і механічну енергію ротора;

в) при згідному обертанні магнітних полів і  $p_\Gamma > p_D, M_D \gg M_\Gamma + M_C$  ГМ працює в генераторному режимі з рекуперацією електричної енергії в мережу і частковим виділенням тепла в роторі.

При нерухомому роторі (стан А) відведення тепла і передача його в периферійні об'єми матеріалу здійснюється за допомогою теплопровідності відповідно до закону Фур'є

$$q_{\lambda} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.8)$$

де  $q_{\lambda}$  – питомий тепловий потік;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

Обертання ротора (стан Б) створює переважні умови для вимушеного конвективного теплообміну не тільки між ротором і прикордонною областю матеріалу, але і в периферійних об'ємах матеріалів відповідно до закону Ньютона

$$q_{\alpha} = \alpha \cdot \Delta T, \quad (2.9)$$

де  $\alpha = \frac{1}{t_B - t_C} \int_{t_c}^{t_B} \alpha(t) dt$  – середній коефіцієнт тепловіддачі при

конвективному теплообміні протягом періоду розгону і обертання ротора.

Паралельно йде процес зміни агрегатного стану шарів матеріалу, і всі нові шари залучаються до конвективного теплообміну.

В стані Б виділяється менша кількість теплової енергії, чим в стані А  $W_{ТП}^A > W_{ТП}^B$ . Проте, за рахунок посилення швидкості передачі теплової енергії теплові потоки обох станів для матеріалів практично однакові.

*Тривалість роботи електромеханічного гідролізера в режимі короткого замикання достатня для отримання і передачі через теплообмінну систему електромеханічного гідролізера такої кількості теплової енергії, яка здатна здійснити фазовий перехід в матеріалі і не*

перевищує часу настання граничного перевищення температури електричної ізоляції електромеханічного гідролізера.

Пайовий розподіл електромагнітної потужності на два потоки корисної потужності здійснюється по поточному ковзанню, яке виходячи із співвідношення електромагнітних моментів рухового і гальмівного модулів встановлюється на рівні, що забезпечує необхідну для даного технологічного режиму корисну механічну і теплову потужність.

2.4. Принципи безредукторного забезпечення малої частоти обертання і кратного посилення обертаючого моменту електромеханічного гідролізера

Умови розміщення ротора-шнека ШЕМГ в технологічному середовищі матеріалу, що переробляється, такі, що він завжди матиме нерівність питомих активних опорів і комплексної магнітної проникності в окремих елементах масиву. Вказана нерівність породжує в роторі асиметричні струми, які за відомим правилом можуть бути розкладені на дві симетричні системи, що становлять, з позитивним (пряма МРС) і негативним (зворотна МРС) порядками проходження фаз. Для провідного модуля частоти обертання – прямий і зворотною МРС щодо ротора відповідно будуть такими:

$$(n_c - n_p); \quad -(n_c - n_p) = -s_l n_c ; \quad (2.10)$$

у просторі

$$n_{нр1} = n_p + (n_c - n_p) = n_c; \quad (2.11)$$

$$n_{обр1} = n_p - (n_c - n_p) = -n_c + 2n_p = n_c (1 - s_l)$$

де  $n_c$  – синхронна частота обертання;

$n_{нр}$ ;  $n_{обр1}$  – частоти обертання відповідно прямій і зворотної МРС у просторі;

$s_1$  – ковзання провідного модуля.

Пряма МРС провідного модуля обертається з синхронною частотою у напрямі обертання ротора і, будучи, таким чином, нерухомою відносно МРС статора, створює результуючий магнітний потік і обертаючий момент як при симетрії ротора-шнека.

Потік від зворотної МРС обертається щодо статора з частотою  $n_c = (1 - 2s_1)$  і генерує в ньому ЕРС частоти  $f_{обр1} = f_1(1 - 2s_1)$ .

Для веденого (гальмуючого) модуля частоти обертання прямої і зворотної щодо ротора відповідно рівні:

$$-(n_c + n_p); \quad (n_c + n_p); \quad (2.12)$$

у просторі

$$n_{np.2} = n_p - (n_c + n_p) = -n_c; \quad (2.13)$$

$$n_{обр2} = 2n_p + n_c = n_c(2s_2 - 1) = n_c(3 - 2s_1)$$

де співвідношення ковзань провідного і веденого модулів відповідає виразу  $s_2 = 2 - s_1$ .

Пряма МРС веденого модуля обертається з синхронною частотою протилежно обертання ротора і нерухома відносно МРС статора, створює результуючий потік і гальмівний момент електромеханічного гідролізера, як при симетрії частини масивного ротора на відповідній довжині статора веденого модуля.

Потік від зворотної МРС обертається щодо статора веденого модуля з частотою  $n_c(3 - 2s_1)$  і генерує в ньому ЕРС частоти  $f_{обр2} = f_1(3 - 2s_1)$ .

ЕРС в статорах створюють в обмотках струми частоти  $f_{обр1}$  і  $f_{обр2}$ , які замикаються через обмотки джерел і приймачів енергії в дану мережу.

Зворотні МРС двох ділянок ротора і МРС відповідних статорів утворюють результуючі потоки, що обертаються щодо статорів з частотами

$n_{обр1}$  і  $n_{обр2}$ , і які взаємодіють із струмами статорів відповідних частот, дають додаткові, так звані, зворотні моменти.

Зворотний момент  $M_{об1}$ , як слідує з (2.11), змінює свій знак залежно від частоти обертання. Поки частота обертання ротора менше  $0,5 n_c$ , маємо негативну частоту обертання  $n_{обр1}$ . Отже, зворотний потік обертається щодо статора в напрямі, зворотному обертанню ротора. Взаємодіючи із струмами статора провідного модуля тієї ж частоти, він створює рушійний момент.

При частоті обертання ротора  $n_p = 0,5 n_c$  матимемо  $n_{обр1} = 0$ , тобто зворотне поле провідного модуля нерухоме в просторі і в статорі ЕРС не індукується.

Частоти обертання ротора  $n_p > 0,5 n_c$  в шнековому електромеханічному гідролізері, як правило, не досягаються, оскільки включається в роботу ведений (гальмуючий) модуль і частота обертання ротора прагне до робочої номінальної частоти обертання 5-50 об/хв.

У момент включення веденого модуля його пусковий момент діє як ударний гальмівний момент, що викликає процес гальмування ротора шнека. При цьому зворотний момент  $M_{об}$ , як слідує з (2.11), не міняє знаку при змінах частоти обертання ротора. Згідно (2.13) зворотний потік  $\Phi_{обр2}$  має позитивну частоту обертання, співпадаючу з напрямом обертання ротора. Взаємодіючи із струмами статора веденого модуля тієї ж частоти  $f_{обр2} = f_1(3 - 2s_1)$ , він створює гальмівний момент.

Обертаючий момент шнекового електромеханічного гідролізера є сумою діючих прямих і зворотних моментів відповідно провідного і веденого модулів:

$$M = M_{np1} + M_{np2} + M_{обр1} + M_{обр2} \quad (2.14)$$

На рис.2.3 показані розрахункові характеристики моментів шнекового електромеханічного гідролізера при асиметрії опорів активних зон ротора-шнека.

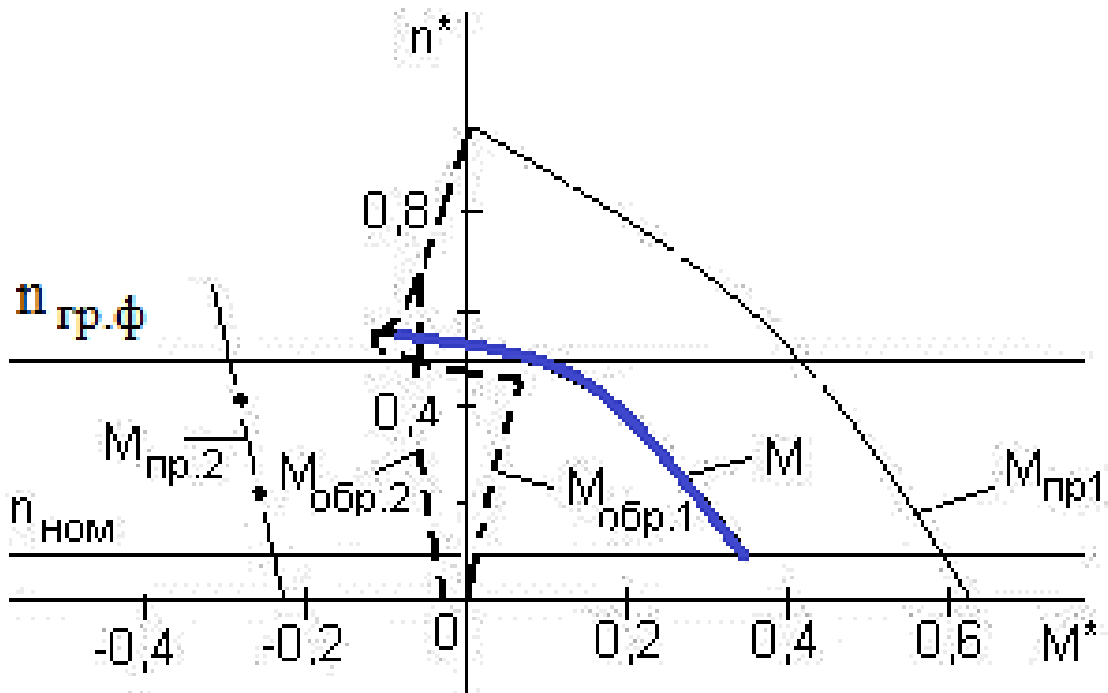


Рис.2.3. Характеристики моментів шнекового електромеханічного гідролізера при асиметрії опорів активних зон масивного ротора

Необхідно відзначити два рівня частоти обертання ротора:  $n_{грф}$  – гранична частота обертання для форсованого режиму;  $n_{ном}$  – номінальна частота обертання. Відносні значення досліджуваних величин визначаються по виразах:  $n^* = n/n_c$ ;  $M^* = M/M_{кр}$ .

Зворотний момент  $M_{обр1}$  хоча і є позитивним при частотах обертання  $n \leq n_{грф}$ , але приводить до збільшення пологості механічної характеристики і, як наслідок, до посилення нестійкості роботи електромеханічного гідролізера при навантаженні. Крім того, очевидно, що тривалості затримки включення гальмівного модуля необхідно вибрати з умови досягнення необхідного результуючого моменту електромеханічного гідролізера, що обертає, який перевищує діючий момент опору матеріалу, що транспортується.

*Електромеханічний гідролізер, до складу якого входять як мінімум два (умовно рухового і гальмівного) електромагнітні модулі, що складаються із статорів і активних зон загального ротора-шнека ШЕМГ, короткочасно, періодично або постійно працюють в одному з режимів:*

*а) узгоджений напрям відповідно прямих і зворотних МРС обертаючих синхронних магнітних полів модулів, що створюють при взаємодії з вихровими струмами ротора-шнека, який обертається в згідному з прямими МРС поля напрямі, сумарний електромагнітний момент, кратно збільшений по відношенню до номінального (форсований режим);*

*б) протилежний напрям відповідно прямих і зворотних МРС обертових синхронних магнітних полів модулів, що створюють при взаємодії з вихровими струмами ротора-шнека різних частот, визначуваних співвідношенням ковзань ДМ і ГМ, електромагнітні моменти протилежних напрямів, які формують при навантаженні електромеханічного гідролізера частоту обертання з 10...20-кратним зниженням по відношенню до синхронної без застосування механічного редуктора.*

У результаті реалізується альтернативний спосіб безредукторного отримання низьких частот обертання електромеханічного гідролізера. Необхідність в кратному збільшенні результуючого обертаючого моменту шнекового електромеханічного гідролізера може виникнути в двох випадках:

- важкий пуск в умовах застиглої маси матеріалу;
- форсований режим по моменту при заштибуванні шнека в період руху.

При цьому гальмівний модуль електромеханічного гідролізера або повністю відключається від мережі, або включається згідно по обертанню з руховим модулем на якийсь час не більше 0,2 с.

## 2.5. Висновки до розділу 2

Запропоновані технічні рішення побудови одношнекового електромеханічного гідролізера забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, надійності роботи гідролізатора і стійкості реакції гідролізу, поліпшення якості білкового борошна і підвищення засвоюваності готового продукту, зниження енергетичних витрат гідролізатора.

ШЕМГ як поліфункціональний пристрій виконує операції транспортування, змішування, тонкого подрібнення і водного гідролізу кератину та короткочасного високотемпературного гідролізу перо-пухової сировини у тонкому шарі з впливом градієнтного магнітного поля і поверхневих електричних потенціалів на поверхні ротора-шнека

Вплив магнітного поля на структуру води приводить до зміни кислотно-лужного балансу (рН) , а саме веде до підвищення рН, продукує високу каталітичну ефективність, що сприяє здатності розщеплювати високонерозчинні кератинові субстрати до продуктів з доданою харчовою цінністю.

Використання пружної деформації у нецентросиметричному діелектрику, яким є куряче пір'я, що спричиняє електричну поляризацію, тобто перерозподіл в ньому електричних зарядів. Цей лінійний електромеханічний ефект прямо пропорційний величині деформації і використовується у вигляді п'єзоелектричного генератора.

Пайовий розподіл електромагнітної потужності на два потоки корисної потужності здійснюється по поточному ковзанню, яке виходячи із співвідношення електромагнітних моментів рухового і гальмівного модулів встановлюється на рівні, що забезпечує необхідну для даного технологічного режиму корисну механічну і теплову потужність.

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА

### 3.1 Моделювання електромагнітних процесів

Для визначення ефекту впливу магнітного поля на кератиновий матеріал доцільно оцінити значення магнітної індукції в пристрої. Моделювання виконано в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла. Формулювання векторного потенціалу виконано згідно наступних рівнянь [35-38]:

$$\nabla \times H = J \quad (3.1)$$

де  $H$  – вектор напруженості магнітного поля, А/м;  $J$  – вектор щільності струму, А/м<sup>2</sup>.

$$B = \nabla \times A \quad (3.2)$$

де  $B$  – вектор щільності магнітного поля, Т;  $A$  – векторний магнітний потенціал, Вб/м.

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.3)$$

де  $E$  – вектор напруженості електричного поля, В/м.

$$J = \sigma E \quad (3.4)$$

де  $\sigma$  – електропровідність, См.

Формулювання скалярного потенціалу виконано згідно рівняння:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.5)$$

На зовнішній межі з магнітним скалярним потенціалом, нормальна складова щільності магнітного потоку прирівнюється до нуля:

$$n \cdot B = 0 \quad (3.6)$$

Намагніченість феромагнітного ротора задана як В-Н крива і визначається з рівняння:

$$B = f(|H|) \frac{H}{|H|} \quad (3.7)$$

В якості джерела струму в моделі використовуються багатовиткові обмотки статора. Обмотки забезпечують зовнішню щільність струму в напрямку провідників згідно рівняння:

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A} e_{coil} \quad (3.8)$$

де  $N$  – кількість витків в обмотці;  $A$  – загальний переріз, площа домену обмотки,  $m^2$ ;  $I_{coil}$  – струм, А;  $e_{coil}$  – векторна змінна, для візуалізації напрямку витків в обмотці.

Моделювання здійснено для геометрії феромагнітного ротора (рис. 3.1). Кінцево-елементну сітку моделі було створено в програмному середовищі Comsol Multiphysics як сітку під контролем програмної фізики.

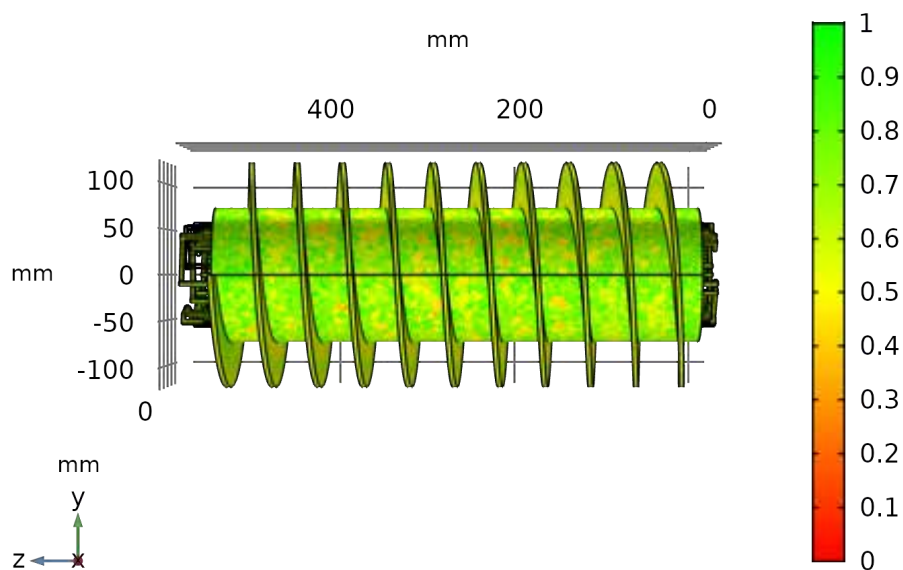


Рис. 3.1. Кінцево-елементна сітка феромагнітного ротора ШЕМГ

Матеріалами моделі були обрані: Soft iron (without losses) в якості матеріалу статорів; Iron в якості матеріалу не рухомого валу; Copper в якості матеріалу обмотки статорів. Матеріали були обрані з бібліотеки матеріалів програмного середовища. В якості матеріалу для феромагнітного ротора було обрано сталь Ст3.

Розподіл магнітної індукції на поверхні феромагнітного ротора представлений на рисунках 3.2, 3.3. Помітно, що дискретне розташування статорів по осьовій лінії гідролізера утворює стабільні зони з циклічним рівнем інтенсивності магнітного поля. В межах довжини пакета статора середній рівень магнітної індукції на циліндричній поверхні ротора становить 0,5 Т, а в проміжках між статорами – 0,15 Т. По колу циліндричної поверхні ротора утворені 6 широких зон з рівнем магнітної індукції 0,6 Т і 6 вузьких зон з рівнем 0,1 Т, які чергуються одна з одною.

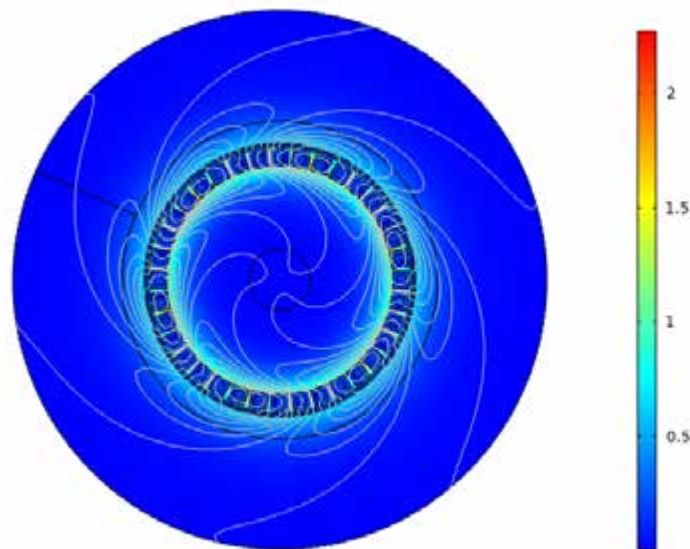


Рис.3.2 – Зображення розподілу магнітної індукції для поперечного перерізу гідролізера, Т

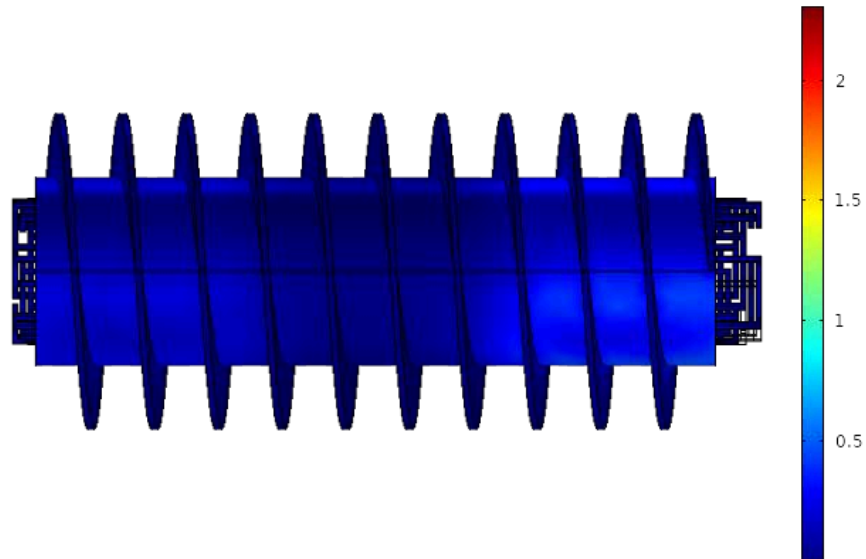


Рис.3.3 – Тривимірне зображення розподілу магнітної індукції на поверхні феромагнітного ротора, Т

Розподіл магнітного векторного потенціалу представлено на рисунку 3.4. Векторний магнітний потенціал надає прямий вплив на хвильові функції електронів. Векторний потенціал супроводжує електричні струми, в том числі вихрові, і поширюється на значні відстані від області їх локалізації, зменшуючись з відстанню  $r$  як  $r^{-1}$ , на відміну від магнітної індукції, що зменшується як  $r^{-2}$ .

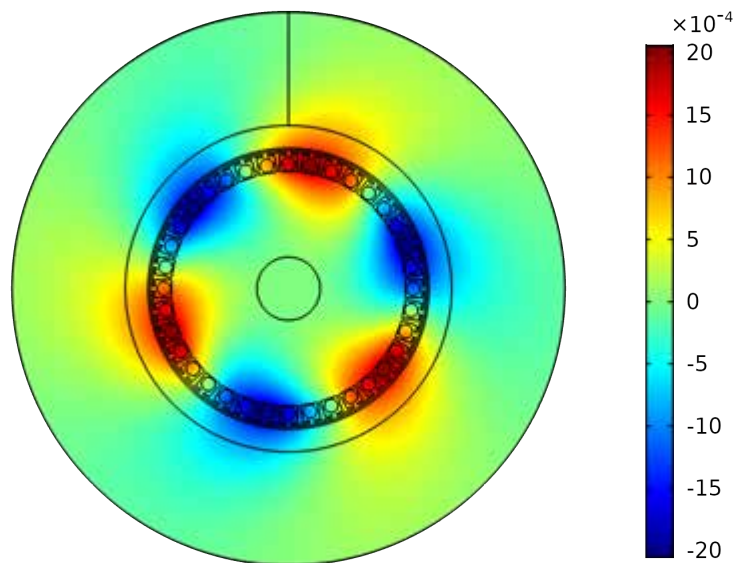


Рис.3.4. Розподіл магнітного векторного потенціалу для поперечного перерізу геометрії, Вб/м

Оскільки магнітне поле зосереджено всередині феромагнітних зон статора, ротора і гвинтової навивки, то зовні ж від них існує лише безроторний векторний потенціал. В областях руху вологої кератинової сировини векторний потенціал діє як електродинамічний імпульс і впливає через зсув фази хвильових функцій, що проявляється в колективних взаємодіях атомів, іонів і молекул.

### 3.2 Моделювання теплових процесів

Моделювання нагріву феромагнітного ротора електромеханічного гідролізера реалізовано шляхом використання фізики магнітних полів, теплопередачі в твердих тілах та мультифізичного зв'язку – електромагнітний нагрів у частотно-перехідній області дослідження. Рівняння теплообміну відповідає диференціальній формі закону Фур'є, яка може містити такі розширення, як джерело тепла:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted} \quad (3.9)$$

де  $d_z$  – товщина домену в неплюському напрямку, м;  $\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг · К);  $T$  – температура, К;  $t$  – час, с;  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості, м/с;  $\mathbf{q}$  – теплопровідний потік, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q$  – джерело тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_0$  – внутрішній тепловий потік, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{ted}$  – термопружне демпфування, Вт/м<sup>3</sup>.

$$\mathbf{q} = -d_z k \nabla T \quad (3.10)$$

де  $k$  – теплопровідність, Вт/(м · К).

Теплоізоляція на зовнішній межі моделі визначається з рівняння:

$$-n \cdot q = 0 \quad (3.11)$$

де  $n$  – показник заломлення.

Тепловий потік з поверхні феромагнітного ротора та його лопатей визначається за рівняння:

$$-n \cdot q = d_z q_0 \quad (3.12)$$

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (3.13)$$

де  $h$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_{ext}$  – зовнішня температура, К.

Випромінювання від поверхні моделі до навколишнього середовища визначається з рівняння:

$$-n \cdot q = d_z \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.14)$$

де  $\varepsilon$  – випромінювальна здатність поверхні;  $\sigma$  – постійна Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);  $T_{amb}$  – температура зовнішнього середовища, К.

Мультифізична зв'язка електромагнітного нагріву реалізована згідно наступних виразів:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (3.15)$$

де  $Q_e$  – електромагнітне джерело тепла, Вт/м<sup>3</sup>.

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (3.16)$$

де  $Q_{rh}$  – резистивні втрати, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{ml}$  – магнітні втрати, Вт/м<sup>2</sup>.

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(J \cdot E^*) \quad (3.17)$$

$$Q_{ml} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(i\omega B \cdot H^*) \quad (3.18)$$

де  $\operatorname{Re}$  – число Рейнольдса;  $E^*$  – вектор напруженості електричного поля за заданої частоти в певний момент часу, В/м;  $H^*$  – вектор напруженості магнітного поля за заданої частоти в певний момент часу, А/м.

Просторове зображення об'ємної щільності електричних втрат феромагнітного ротора представлено на рис.3.5. Найбільша щільність електричних втрат спостерігається на внутрішній поверхні феромагнітного ротора. Для більш точної оцінки щільності електричних втрат на зовнішній поверхні було проведено просторове інтегрування геометрії феромагнітного ротора та встановлено, що середнє значення щільності електричних втрат становить 6232,5 Вт/м за частоти  $f = 50$  Гц.

Результати моделювання теплової задачі, представлені на рис. 3.6, 3.7. З температурного розподілу помітно, що максимальна температура феромагнітного ротора становить 211,83 °С, мінімальна 187,25 °С відповідно. Як згадувалось раніше, для проведення гідротермічного гідролізу необхідно досягнути температури 180-230 °С на різних етапах процесу.



Рис.3.5.Просторове зображення об'ємної щільності електричних втрат,  
Вт/м<sup>3</sup>

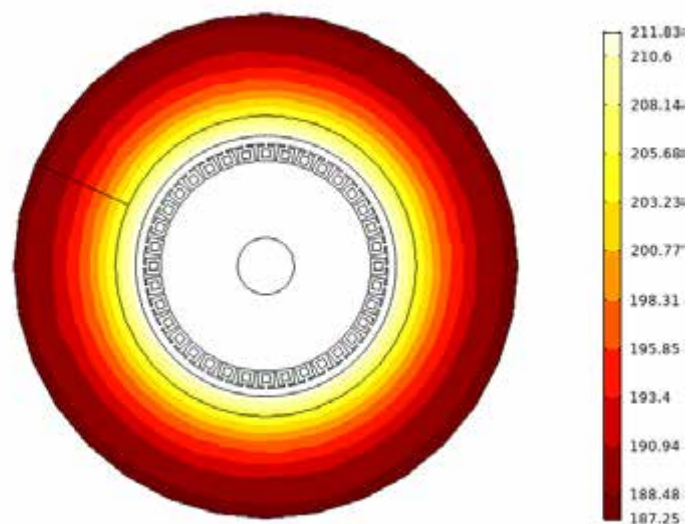


Рис 3.6. Просторове зображення температури феромагнітного ротора,  
°C

На рис. 3.7 представлено графік зміни температури феромагнітного ротора за час попереднього нагріву гідролізера.

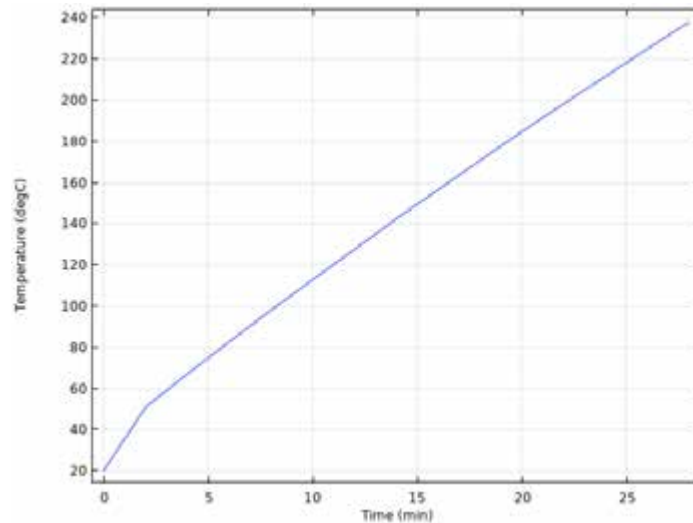


Рис.3.7. Графік зміни температури феромагнітного ротора за час попереднього нагріву гідролізера

З рисунка 3.7 помітно, що феромагнітний ротор нагріється до температури необхідної для проведення гідротермічного гідролізу за 25 хв. Подальше регулювання температурного режиму при наявності кератиновмісної сировини здійснюється регулюванням напруги та частоти в мережі живлення статорів та індукційного нагрівача.

### 3.3. Результати випробувань експериментального зразка одношнекового електромеханічного гідролізера

Метою випробувань є перевірка конструктивно-технологічних параметрів модифікації експериментального зразка електромеханічного гідролізера для переробки кератинової сировини. На рис. 3.8, 3.9 показано відповідно загальний вигляд експериментального зразка одношнекового електромеханічного гідролізера та блок керування і завантаження одношнекового електромеханічного гідролізера (без зовнішнього захисного корпусу). Результати випробувань представлені в табл.3.1.



Рис.3.8. Загальний вигляд експериментального зразка одношнекового електромеханічного гідролізера





Рис.3.9. Блок керування і завантаження одношнекового електромеханічного гідролізера (без зовнішнього захисного корпусу)

Таблиця 3.1 Технічні характеристики

Найменування параметрів і характеристик	Нормоване значення	Визначено при випробуваннях
<i>Електромагнітні параметри і характеристики</i>		
Діапазон регулювання напруги і частоти живлення гідролізера	3/PE 400/480 V (320 V...528 V) 50/60 Гц (48 Гц...62 Гц)	3/PE 400/480 V (320 V...528 V) 50 Гц (48 Гц...60 Гц)
Рівень індукції і частоти магнітного поля в ущільнюючій порожнині робочої частини гідролізера для гальмування процесу випаровування вологи.	Градiєнтне магнітне поле частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,025Т	Магнітне поле частотою 1-50 Гц з індукцією в діапазоні від 5 до 25 мТ
Рівень магнітної індукції в реакційній порожнині робочої частини гідролізера	Градiєнтне магнітне поле частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,065Т	Градiєнтне магнітне поле частотою 1-50 Гц з індукцією від 10 до 65 мТ
Значення опору обмоток статора постійному струму в холодному стані машини	Значення опорів різних фаз обмотки не повинні відрізнятися один від одного або від попередніх вимірювань, а також від даних підприємства-виробника більше ніж на 2 %.	Середнє значення опорів фаз складає 11,1 Ом. Значення опорів різних фаз обмотки відрізняються один від одного на 1,2 %.
Значення напруги спрацювання та кількість операцій під час випробувань контакторів, магнітних пускачів і автоматичних вимикачів	Значення напруги на шинах оперативного струму - 0,9 (0,85) Уном Кількість операцій увімкнення - 5	Проведено по 6 увімкнень магнітних пускачів і автоматичних вимикачів при значенні напруги на шинах оперативного струму - 0,9 (0,85) Уном

<i>Теплові параметри</i>		
Температура в ущільнюючій порожнині робочої частини гідролізера	Середня температура 60°C	Діапазон виміряної температури склав 57- 62 °С
Температура в реакційній порожнині робочої частини гідролізера	Температура 180-260°C	При переробці курячого пір'я з початковою вологістю 40% виміряна температура знаходилась в діапазоні 195 220°C
Температура зовнішнього корпусу гідролізера	Не вище 50°C	Температура зовнішнього захисног корпуса гідролізера склала 35°C
Температура зовнішнього корпусу мотор-редуктора,	Менше 60°C	Температура зовнішнього корпусу мотор-редуктора 38,3°C
<i>Гідродинамічні параметри</i>		
Тиск в ущільнюючій порожнині робочої частини гідролізера	Тиск 0,5-5,0 МПа при змінах швидкості подавання сировини	Тиск в ущільнюючій порожнині - 1,5 МПа
Тиск в зоні ущільнюючих конусів гідролізера	Тиск від 1 МПа до 20 МПа.	При переробці курячого пір'я з початковою вологістю 40% тиск склав від 5 МПа до 10 МПа.
Тиск в реакційній порожнині робочої частини гідролізера	Тиск від 1,0 МПа до 5,0 МПа	При переробці курячого пір'я з початковою вологістю 40% тиск склав від 1,5 МПа до 4 МПа.
Перевірка рівня вакууму в ресивері для камери готового продукту	Не менше (-0,3 Па)	(-0,55 Па)
<i>Енергетичні параметри і показники ефективності</i>		
Напруга живлення	380 В	

Споживана електрична потужність	Одношнекового електромеханічного гідролізера – не вище 2,5 кВт•	Середня споживана електрична потужність 0,85 кВт.
Коефіцієнт потужності	Не нижче 0,77	Загальний коефіцієнт потужності гідролізера 0,85
Продуктивність по готовому продукту	Одношнекового електромеханічного гідролізера – не нижче 2,0 кг/год.	Продуктивність по готовому продукту 2,5 кг/ год.
Енергоємність процесу (відношення споживаної потужності до продуктивності).	Одношнекового електромеханічного гідролізера -не вище 345 кВт/ т	Енергоємність процесу –340 кВт/ т
Попередня перевірка здатності виробництва продукту	Борошно повинно мати розсипчасту, дрібно помелену фракцію з вологістю 8-12 %	Борошно має розсипчасту, дрібну фракцію з вологістю 9 % (вигляд наведено у Додатку Б)
<i>Ергономічні вимоги, показники безпеки обладнання</i>		
Опір ізоляції електродвигунів будь-якої потужності, на напругу до 1кВ	Абсолютне значення опору ізоляції не менше ніж 0,5 МОм за температури ізоляції від 10°C до 30°C. Коефіцієнт абсорбції не нормується	Опір ізоляції електродвигуна мотор-редуктора - 350 МОм, статорів обертового магнітного поля -285 МОм
Опір ізоляції електровиробів та апарати на напругу понад 100 до 380 В	Значення опору ізоляції повинно відповідати даним, наведеним у паспорті або ТУ на конкретний вид виробу, але не менше ніж 0,5	Опір ізоляції апаратів управління не нижче 300 МОм

Опір ізоляції стрічкового електричного або кільцевого нагрівача	Не менше ніж 0,5 МОм	Опір ізоляції кільцевого нагрівача у нагрітому стані– 35 МОм
Наявність і опір заземлення	З'єднання захисного затискача електрообладнання з РЕ-провідником електроустановки. Наявність захисного затискача, знака  або літери «РЕ» або жовто-зелених смуг. У мережах з ізолюваною нейтраллю при напрузі електроустановки до 1000 В опір заземлювача повинен становити до 4 Ом.	Наявність захисного затискача і знака  Опір заземлювача становить до 3,6 Ом.
Значення вібрації підшипників шнека та електродвигуна мотор-редуктора	Допустима амплітуда вібрації підшипників: електродвигуна мотор-редуктора - 60 мкм; шнека гідролізера - 95 мкм	Амплітуда вібрації підшипників: електродвигуна мотор-редуктора - 55 мкм; шнека гідролізера - 85 мкм
Перевірка наявності індикації, дисплеїв, приладів, що відображають поточний стан електричних, пневматичних, теплових і електромеханічних ділянок гідролізера	Наявність	Пульт управління і вимірювальні прилади мають індикацію поточний стан електричних, пневматичних, теплових і електромеханічних ділянок гідролізера
Частини електродвигунів і обертові частини, які з'єднують електродвигуни з механізмами (муфти, шківни, ланцюгові передачі), повинні мати	Наявність ( пункт 5.3.9 ПУЕ)	захисні огороження від випадкових дотиків присутні

захисні огороження від випадкових дотиків.		
--	--	--

Гідролізоване пір'яне борошно було досліджено на вміст протеїну, жиру, клітковини та золи згідно існуючих стандартів. Результати досліджень представлені в табл. 3.2 .

Таблиця 3.2 – Результати досліджень зразків пір'яного борошна

Показник	Результати, г/кг	
	В сухій речовині корму	В кормі натуральної вологості
Волога	115	
Суха речовина	885	
Сирий протеїн	883,4	781,81
Сирий жир	4,3	3,81
Сира клітковина	0,0	0,00
Безазотисті екстрактивні речовини (БЕР)	99,8	88,35
Сира зола	12,5	11,03

На рис. 3.10 наведено зображення вихідної сировини. Як результат переробки на одношнековому електромеханічному гідролізері було отримано сипуче, гідролізоване борошно коричневого кольору, що володіє специфічним запахом, але не гнильним і не затхлим ( рис.3.11).

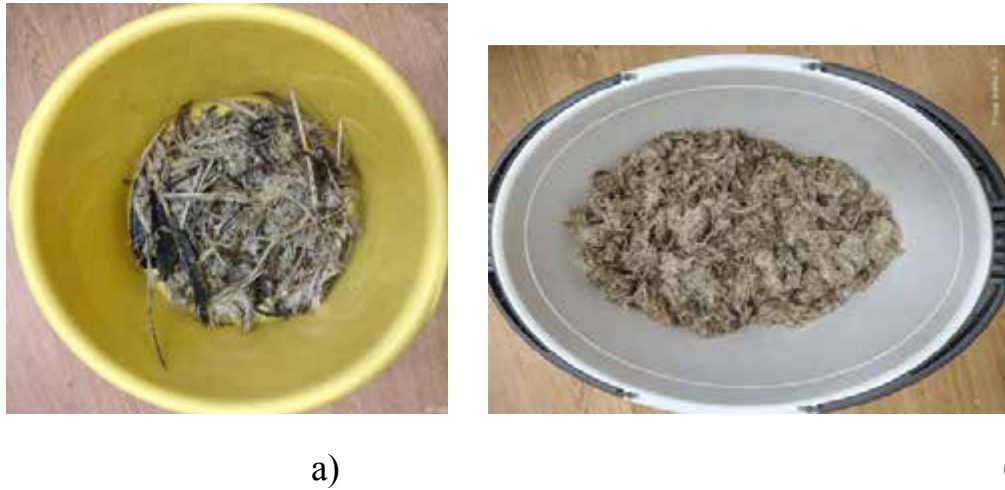


Рис.3.10. Вихідна кератиновмісна сировина: а – велике за розміром перо; б – грубо подрібнене пташине пір'я



Рис.3.11. Зразки гідролізованого борошна з курячого пір'я, отримані при різних режимах обробки

Порівнюючи результати дослідження зразків пір'яного борошна, підданих випробуванням та вимог згідно ДСТУ 8039:2015 можна стверджувати, що отриманий продукт повністю відповідає вимогам та може бути застосований як кормова добавка.

### 3.4. Висновки до розділу 3

Результати моделювання показали, що дискретне розташування статорів по осьовій лінії гідролізера утворює стабільні зони з циклічним рівнем інтенсивності магнітного поля, яке задовільняє умовам технологічного режиму переробки кератинової сировини.

Магнітне поле електромеханічного гідролізера зосереджено всередині феромагнітних зон статора, ротора і гвинтової навивки, то зовні ж від них існує лише безроторний векторний потенціал. В областях руху вологої кератинової сировини векторний потенціал діє як електродинамічний імпульс і впливає через зсув фази хвильових функцій, що проявляється в колективних взаємодіях атомів, іонів і молекул.

Найбільша щільність електричних втрат спостерігається на внутрішній поверхні феромагнітного ротора. Для більш точної оцінки щільності електричних втрат на зовнішній поверхні було проведено просторове інтегрування геометрії феромагнітного ротора та встановлено, що середнє значення щільності електричних втрат становить 6232,5 Вт/м за частоти = 50 Гц.

Результати моделювання теплової задачі показують, що максимальна температура феромагнітного ротора становить 211,83 °C, мінімальна 187,5 °C відповідно. Це задовільнений результат, оскільки для проведення гідротермічного гідролізу необхідно досягнути температури 180-230°C на різних етапах процесу.

Результати випробувань модифікації експериментального зразка електромеханічного гідролізера для переробки кератинової сировини показали відповідність конструктивно-технологічних параметрів умовам забезпечення режимів отримання гідролізованого борошна.

Як результат переробки на одношнековому електромеханічному гідролізері було отримано сипуче, гідролізоване борошно коричневого кольору, що володіє специфічним запахом, але не гнильним і не затхлим. Порівнюючи результати дослідження зразків пир'яного борошна, підданих

випробуванням та вимог згідно ДСТУ 8039:2015 можна стверджувати, що отриманий продукт повністю відповідає вимогам та може бути застосований як кормова добавка.

## РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕГЛАМЕНТУ З ПЕРЕРОБКИ КЕРАТИНОВІСНИХ ВІДХОДІВ І СИРОВИНИ У КОРМОВЕ БОРОШНО

Разовий технологічний регламент (ТР) розроблено для дослідних, стендових і модельних установок, що знаходяться в Національному університеті біоресурсів і природокористування України і не виробляють товарної продукції.

В НУБіП України виготовлено і встановлено експериментальну технологічну лінію з використанням одношнекового електромеханічного гідролізера для відпрацювання електротехнології переробки кератиновмісних відходів і сировини у кормове борошно.

4.1. Характеристика вихідної сировини, матеріалів, реагентів, каталізаторів, напівфабрикатів і виготовленої продукції

Характеристика вихідної сировини, матеріалів, реагентів, каталізаторів, напівфабрикатів і готової продукції наведена в табл.4.1. табл.4.2.

Таблиця 4.1- Характеристика вихідної сировини, матеріалів, реагентів

Назва вихідної сировини, матеріалів, реагентів, каталізаторів, напівфабрикатів, в,	Міждержавний, національний чи галузевий стандарт, технічні умови або методика	Показники якості, обов'язкові для перевірки (назва та одиниця виміру)	Норма (припустимі межі) за нормативними документами	Сфера застосування
Пухо-пір'яна сировина (малоцінне пір'я бройлерів, пір'я та пух домашніх	ДСТУ 4609:2006 Сировина пір'яно-пухов а. Технічні умови	Вміст вологи,% Пір'я, яке було в ужитку, приймається, якщо воно слабко пружне, зі змінним кольором та структурою, без	не більше 12	Гідротермічний гідроліз. Складова кінцевого продукту

птахів, борових та водоплавних диких, а також гагачий пух, підкрилка та відходи перо- пухового виробництва,		плісняви і гнильного запаху. Домішки, %, бруд і пил,%, Ураження міллю і пір'їноюдом ,%	не більш 15%, не більш 3  не більше 5	
Щетина свиней, Щетина-шпарк а.	ДСТУ 3938-99 М'ясна промисловість . Продукти забою худоби. Терміни та визначення ДСТУ 3116-95 Щетина заводська. Технічні умови.	Щетина не повинна бути прілою та горілою Довжина щетини Товщина щетини - Масова частка вологи, %, Масова частка жиру, %, Масова частка сторонніх домішок,%, Щетину-шпарку після промивання додатково обробляють з метою вивільнення від епідермісу та різних забруднювачів.	від 3 до 10 см., - 175-300мкм.  не більше 12 не більше 4  не більше 7  2% розчину сульфонафтенної кислоти при температурі 62-65° С протягом 6-7 годин	Гідротерм ічний гідроліз
Рогокопитна сировина худоби. Мілкі роги та ратиці	ДСТУ 3938-99 М'ясна промисловість	Сировина повинна бути чистою, сухою, без стрижнів, кісток та зайвих домішок з		Гідротерм ічний гідроліз0

всіх видів забійної худоби, які не відповідають першій групі, а також відходи виробництва (обрізки, тирса)	. Продукти забою худоби. Терміни та визначення ГОСТ 18253-72 Сырье рого-копытно е. Технические условия	терміном зберігання не більше 12 місяців.		
Вовна овеча неоднорідна груба і напівгруба Вовна козяча. Відходи фабрик первинної обробки вовни та вовнопереробних підприємств	ДСТУ 8366:2015 Вовна овеча неоднорідна груба і напівгруба. Загальні технічні умови	Вовна тонка, кросбредна, остьова. Вміст вологи, %	не більше 12	Гідротермічний гідроліз

Таблиця 4.2- Характеристика готової продукції, напівфабрикатів (компонентів)

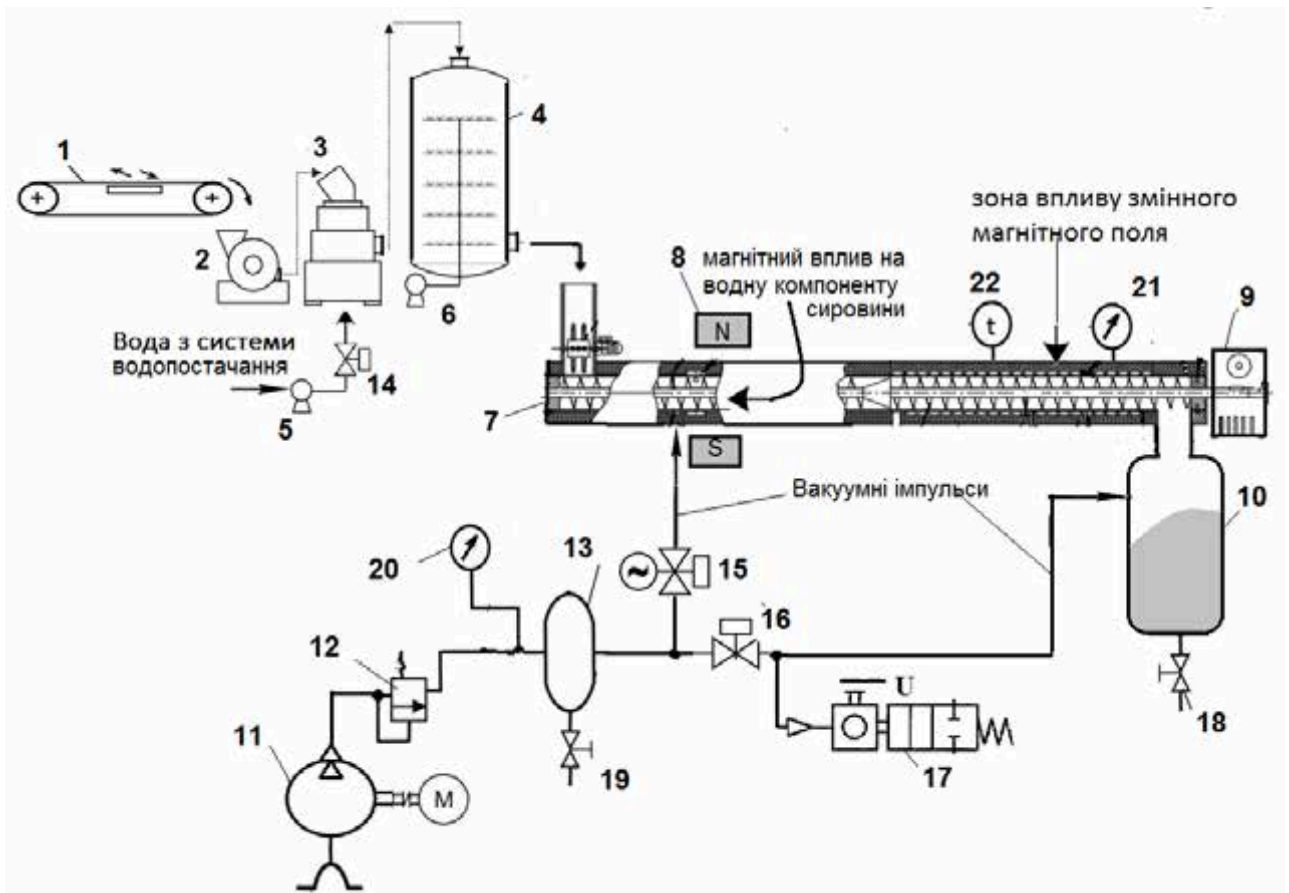
Назва, виготовленої продукції, напівфабрикатів	Міждержавний, національний чи галузевий стандарт,	Показники якості, обов'язкові для перевірки (назва та одиниця виміру)	Норма (припустимі межі) за нормативними	Сфера застосування
--	---	---	---	--------------------

(компонентів )	технічні умови або методика		документами	
Кормове борошно із гідролізованого пера	ДСТУ 8039:2015 Борошно кормове з відходів перероблення птиці. Технічні умови	Зовнішній вигляд  Запах  Масова частка (МЧ) залишку часток у ситі з діаметром отворів 3 мм, % Залишок часток на ситі з діаметром отворів 5 мм  МЧ сторонніх домішок: - металомагнітних у вигляді часток до 2,0 мм, мг на 1 кг борошна - металомагнітних у вигляді часток з гострими краями - піску, скла й ін.  МЧ білку, %, не менш МЧ, %, не більше: - вологи - жиру - золи - безазотистих речовин і клітковини	Суха розсипчаста маса без щільних грудок Специфічний, але не гнильний і не затхлий  5 Не допускається  150 Не допускається Не допускається  75 9 4 8	Приготування кормових сумішей для годівлі тварин і птиці

		Наявність патогенних мікроорганізмів	4	
			Не допускається	
Гідролізованого борошна з грубої вовни і відходів	Порядок поводження з побічними продуктами тваринного походження, що належать до категорій I-III. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 08 лютого 2024 р. за № 202/41547			Напівфабрикат, компонент для виробництва нановолокон

#### 4.2. Опис технологічного процесу і технологічної схеми виробництва

Опис технологічного процесу наводиться у відповідності до принципової технологічної схеми виробництва гідролізованого борошна з кератиновмісної сировини, яка зображена на рис.4.1. Для виробництва кормового борошна із гідролізованого пера використовують підкрилок, малоцінне або з яких-небудь причин браковане перо, дрібні частини пера від рубальних машин, пил від пероочисних машин та машин для остаточного очищення готових виробів, а також інші відходи, що отримуються на птахофабриках і на фабриках перо-пухових виробів.



Індекс апарата за схемою	Назва устаткування	Кількість
1	Конвеєр з електродинамічним сепаратором	1
2	Подрібнювач кератиновмісної сировини	1
3	Система очищення сировини і відходів	1
4	Установка для зневоднення відходів	1
5, 6	Насос	2
7	Двошнековий електромеханічний гідролізер	1
8	Система постійних магнітів	1
9	Мотор- редуктор	1
10	Камера готового продукту	1
11	Вакуумний насос	1
12	Впускний клапан	1
13	Ресивер	1

14,15,16	Електромагнітний клапан	3
17	Електронне реле часу	3
18, 19	Випускний клапан	2
20	Вакуумметр	
21	Манометр	1
22	Вимірювач і регулятор температури	1

Рис. 4.1. Принципова технологічна схема виробництва гідролізованого борошна з кератиновмісної сировини

Транспортування сировини здійснюють трубами або повітроводами в спеціальних візках або ящиках, в ківшах по підвісному шляху, в бочках та іншій тарі. Найбільш ефективно транспортування сировини трубопроводами повітрям (передувка сировини).

Тару перед поверненням її до місця збирання сировини необхідно промити гарячою водою і пропарити гострим паром, а при необхідності провести дезінфекцію.

Щоб уникнути розвитку мікроорганізмів і псування сировини, всі відходи необхідно переробляти відразу ж після їх отримання зі складу або з цеху. Зберігати нетривалий час можна тільки суху сировину (вміст вологи не більше 12%) у сухому приміщенні, оберігаючи її від попадання вологи. Найбільш ефективним є зберігання кератинової сировини в приміщенні, що охолоджується.

Неподрібнена перо-пухова сировина безперервно подається на транспортер, на якому піддається впливу електромагнітних полів з протилежним відносно вісі транспортера напрямком для видалення металевих домішок, що підвищує надійність і безперервність роботи шнекової установки. Далі здійснюється подрібнення сировини до розмірів часток не більше 30 мм за допомогою подрібнювача з електроприводом і подавання до системи очищення сировини і відходів, де відбувається

промивка теплою водою з температурою 35- 40°C на протязі 10...30 с ,очищення від рослинних, ґрунтових і інших сторонніх включень. Після цього сировина поступає в установку для зневоднення відходів, де здійснюється видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи (35-45 %), необхідної для гідролізу.

Далі сировину подають у робочу зону двошнекового електромеханічного гідролізера, в корпусі якого розташовані ротори-шнеки. У робочій зоні, яка поділена на ущільнюючу і реакційну зони, виконуються операції транспортування, змішування, тонкого подрібнення і водного гідролізу кератину та короткочасного високотемпературного гідролізу пухо-пир'яної сировини у тонкому шарі з впливом магнітного поля і поверхневих електричних потенціалів.

У першій ущільнюючій робочій зоні одночасно здійснюють ущільнення сировини в 8-10 разів, нагрів при тиску 0,5-5,0 МПа до температури 60°C, вплив постійного магнітного поля з індукцією, що змінюється в місцях транспортування сировини по перерізу шнеків від 0,025 до 0,5 Т.

Одночасно у першій робочій зоні шнекової установки здійснюють деаерацію за допомогою камери вакуумування, яка розташована в зона дії системи постійних магнітів, що створюють високу магнітну напруженість для всмоктування парамагнітного кисню. При цьому максимально прибираються порожнечі з пухо-пир'яний суміші, в яких можливе перетворення води на пару і надалі, за рахунок видалення кисню, виключаються втрати якості одержуваного продукту внаслідок окислення. В кінці ущільнюючої робочої зони за допомогою конусів на шнеках відбувається подальше ущільнення сировини до утворення пробки між корпусом шнека та конусами при тиску від 1 МПа до 20 МПа. Висока міцність ущільнення сировини, гарантує надійний захист персоналу від випадкового викиду із зони гідролізу. Після переходу ущільненої сировини у другу (реакційну) робочу зону електромеханічного гідролізера здійснюється вплив на сировину градієнтного магнітного поля частотою 1 – 50 Гц з індукцією 0,025 - 0,5 Т і нагрів до

температури 180-250°C за допомогою стрічкового нагрівача ЕНГЛУ-400 та індукційного нагрівача регульованої частоти.

Одразу після проходження конусів сировина розпушується зменшеною в діаметрі частиною витків шнеків, перемішується і подрібнюється до отримання маси, схожої на тісто з включеннями окремих волокон.

Водна компонента перо-пухової сировини при транспортуванні в каналі робочої зони шнекової установки піддається впливу напруженностей електромагнітного поля. Кратність магнітної обробки води значно збільшує рН водної компоненти, при цьому відбувається кілька процесів:

- зміщення електромагнітним полем рівноваги між структурними гідратованими іонами і компонентами води;
- збільшення центрів кристалізації солей, розчинених в заданому обсязі води, на мікровключеннях з дисперстних ферочасток;
- кератиновий матеріал з негативною магнітною сприйнятливістю відштовхується в напрямку від джерела магнітного поля, що створює додатковий молекулярний тиск на сировину і покращує процес гідротермального гідролізу.

Вода містить приблизно 0,2 мг/л заліза. У воді залізо найчастіше зустрічається у вигляді іонів  $Fe^{2+}$  і  $Fe^{3+}$ , які утворюють органічні і неорганічні сполуки. В ході сольвататермічного процесу іони  $Fe^{3+}$  спочатку адсорбуються і збагачуються на поверхні перо-пухової сировини і частково відновлюються до  $Fe^{2+}$  за рахунок неї, що забезпечує *in situ* утворення  $Fe_3O_4$ . Суть сольватаційного явища полягає в іонному русі в розчині разом з деякою частиною розчинника, що вступив з ними у взаємодію, і порушення ними структури розчинника. Після впливу на водневу компоненту низькочастотного змінного магнітного поля в діапазоні частот 1-50 Гц значно підвищується розчинююча здатність води. Максимальна розчинююча здатність спостерігається при впливі магнітного поля з частотою 2-3 Гц. Іони  $Fe^{3+}$  підсилюють перетворення перо-пухової

сировини в вуглецевий матеріал і, таким чином, викликають утворення нанокompозитів  $Fe_3O_4 / C$ .

Формування парамагнітного композиту  $Fe_3O_4 / C$  на першій стадії термічної обробки вологої кератинової сировини створює далі умови більшого ущільнення і тиску у тонкому шарі за рахунок зовнішнього магнітного поля ротора-шнека, що веде до більш інтенсивного процесу гідролізу кератинової сировини.

Кератин еластичний, здатний розтягуватися при обробці гарячою водою і скорочуватися при висушуванні, що пояснюється переходом спіралевидного  $\alpha$ -кератину в  $\beta$ -кератин, який має  $\beta$ -складчасту структуру. Механізм переходу пов'язаний з проникненням молекул води всередину фібрилярної структури і їх конкуренції при утворенні водневих зв'язків. За наявності магнітного поля відбувається інтенсифікація цих процесів за рахунок дії сил Лоренца на дипольні молекули води. При цьому спостерігається зменшення числа дисульфідних зв'язків типу -S-S- між поліпептидними ланцюгами та водневих зв'язків в білку. Чим вище температура, тим менше число міжмолекулярних водневих зв'язків, тобто менше міцність вихідного кератину. Крім того, вплив магнітного поля на структуру води веде до підвищення рН, продукує високу каталітичну ефективність, що сприяє здатності розщеплювати високонерозчинні кератинові субстрати до продуктів з доданою харчовою цінністю. В робочій зоні двошнекового електромеханічного гідролізера значення рН знаходиться в межах 6,5–8,5, прийнятне для екстракції кератинів.

При дії на дисульфід відновника, а саме пероксиду водню, який утворюється при впливі магнітного поля на воду у суміші піря, ковалентні зв'язки розриваються:



На виході шнеків розміщено герметичну ємність для прийому готової обробленої сировини, де після закриття вузла вивантажування готового

продукту, сировину піддають обробці вакуумними імпульсами шляхом швидкого з'єднання за допомогою швидкодіючого клапану та ресиверу, в якому попередньо був створений середній вакуум (тиск  $10 \dots 10^{-1}$  Па) за допомогою масляного вакуумного насоса. Вакуумні імпульси діють не лише на сировину розміщену безпосередньо в герметичній ємності, але й на частину сировини, що знаходиться в робочій зоні шнеків. При чому та частина сировини, що знаходиться в робочій зоні шнеків, піддається більшому впливу вакуумних імпульсів за рахунок надлишкового тиску в зоні. Частково заповнена сировиною герметична ємність, періодично піддається впливу вакуумних імпульсів, за рахунок чого здійснюється видалення надлишку вологи з сировини до значення 8-12% та процес закипання та вибуху вологи в структурі сировини. У нижній точці ресивера змонтований кран для зливу рідини, яка в ньому накопичилася.

Для максимального збереження амінокислот і якості жиру тривалість високотемпературної обробки в двошнекового електромеханічного гідролізера встановлена не вище 110 секунд і повинна регулюватись на рівні десятисекундного діапазона.

Внаслідок сумісної дії усіх факторів в оброблюваній білковій сировині проходять фізико-хімічні перетворення — відбувається процес гідролізу, який руйнує зв'язки, як між окремими частинами розгалужених макромолекул протеїну, так і між активними групами в межах амінокислотних елементів. Білок втрачає ферментний опір, завдяки чому набуває властивості легко перетравлюватися, підвищується його засвоюваність.

#### 4.3. Норми технологічного режиму і метрологічне забезпечення

Норми технологічного режиму для виробництва гідролізованого борошна з кератиновмісної сировини представлені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Назва стадії процесу, апарата, показники режиму	Номер позиції приладу за схемою	Одиниця виміру	Припустимі межі технологічних параметрів	Необхідний клас точності вимірювальних приладів за ДСТУ OIML R 34:2014
1	2	3	4	5
Подавання сировини та видалення металевих домішок	1	мм	Металеві частинки не більше 2 мм	Похибка 10 мкм
Подрібнення сировини до розмірів часток не більше 30 мм	2	мм	Розміри часток не більше 30 мм	Похибка 1,0 мм
Очищення сировини і відходів. Промивка водою	3	°C сек.	Температура 35- 40°C на протязі 10...30 с	Клас точності 1,5
Видалення водоповітряної компоненти з сировини	4	%	Залишкова волога (35-45 %)	Клас точності 1,5
Транспортування і ущільнення сировини в ущільнюючій зоні	7	МПа	0,5-5,0 МПа.	Клас точності 1,5
Нагрів сировини в ущільнюючій зоні	7	°C	до температури 60°C	Клас точності 1,5
Вплив постійного магнітного поля в ущільнюючій зоні	7, 8	Т	по перерізу шнеків 0,025 до 0,5 Т	Клас точності 0,5
Деаерація сировини в ущільнюючій зоні. Видалення кисню	7	мг/кг	Вміст кисню в сировині не більше 0,05 мг/кг.	Клас точності 0,5
В кінці ущільнюючої робочої зони ущільнення сировини до утворення пробки між корпусом шнека та конусами	7, 21	МПа	Ущільнення сировини від 1 МПа до 20 МПа	Клас точності 1,5

Реакційна робоча зона електромеханічного гідролізера. Вплив на сировину градієнтного магнітного поля	7	Гц Т	Частота 1 – 50 Гц з індукцією 0,025 – 0,5 Т	Клас точності 0,5
Реакційна робоча зона електромеханічного гідролізера. Нагрів сировини .	7, 22	°С	Нагрів до температури 250°С	Клас точності 1,5
Тривалість високотемпературної обробки в електромеханічному гідролізері	7, 22	с	Не більше 110с	Клас точності 0,5
Водневий показник (рН )в робочій зоні електромеханічного гідролізера	7		6,5–8,5	Клас точності 0,5
Обробка сировини вакуумними імпульсами	7, 10, 13	Па, сек	Тиск в ресивері $10 \dots 10^{-1}$ Па Тривалість імпульсу 2 с. Періодичність імпульсів 30- 60 с	Клас точності 0,5
Вологість продукту при вивантаженні	10,18	%	8-12	Клас точності 1,5

#### 4.4. Контроль технологічного процесу виробництва

Зміст контрольних операцій відображено в табл. 4.4, 4.5.

Таблиця 4.4. Контроль мікробіологічної чистоти

Об'єкт контролю та показник, що визначається	Метод контролю	Періодичність перевірки та порядок відбору проби	Нормативна характеристика показника, що визначається
2	3	4	5
Руки та спец одяг працівників, мікробіологічна чистота	Мікробіологічне дослідження змивів	Один раз на 15 днів	Мікробне число та кількість патогенних мікроорганізмів відповідно СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2008
Посуд та обладнання, мікробіологічна чистота	Мікробіологічне дослідження мазків	Один раз на 15 днів	Мікробне число та кількість патогенних мікроорганізмів відповідно СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2008
Повітря, мікробіологічна чистота	Аспіраційний метод	Один раз на 15 днів	Мікробне число та кількість патогенних мікроорганізмів відповідно СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2008
Виробничі комунікації, мікробіологічна чистота	Мікробіологічне дослідження мазків	Один раз на 15 днів	Мікробне число та кількість патогенних мікроорганізмів відповідно СТ-Н МОЗУ 42-4.0:2008

Таблиця 4.5. Контроль обладнання і готового продукту

Об'єкт контролю та показник, що визначається	Метод контролю	Періодичність	Нормативна характеристика показника
Реактор, змішування	Відповідно до технічної документації приладу	Кожного процесу	1 об/хв
Реактор, температура	Візуально на датчику температури	Кожного процесу	40,0±0,5оС
Насос, рівень	Рівнемір	Кожного процесу	0,12±0,15 м
Шприц, тиск	Візуально на датчику тиску	Кожного процесу	0...10 Мпа
Колектор, обертання	Візуально на датчиках швидкості	Кожного процесу	90 – 1400 об/хв
Готовий продукт, повний хімічний контроль	Відповідно до технічного протоколу	Один раз на місяць	Відповідно до технічного протоколу
Пакування, кількість одиниць готового продукту в упаковках, інформація на етикетці та коробках	Візуально	Один раз на місяць	Відповідно до технічного протоколу

4.5. Основні положення пуску, експлуатації і зупинки виробничого об'єкта за нормальних умов

*Підготовка гідролізера:*

1. Приєднати термореле до термопари та міканітового нагрівача:
2. Перевірити рівень масла у вакуумному насосі.
3. Приєднати вакуумний насос.
3. Перевірити цілісність, справність шлангів, клапанів, манометру вакуумного насосу.
4. Перевірити фіксацію зовнішньої оболонки гідролізера.
5. Передбачити електричний захист, приєднати кабелі живлення (нагрівний кабель, статори, нагрівач з реле, вакуумний насос).

*Процес переробки:*

1. Подати електричне живлення до обладнання гідролізера.
2. Встановити верхню межу температури на реле 220- 250 °С.
3. Попередньо робочі зони макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера прогріти протягом 20 хв.
4. Перевірити натяг спиць (шнек при обертанні не повинен тертись об зовнішню оболонку).
5. Подрібнене куряче пір'я невеликими, розпушеними порціями подавати у гідролізера з обертанням шнеку
6. При вільному проходженню пір'я усього шляху, закрити завантажувальний та вивантажувальний бункери кришками, продовжити обертання шнеків для переробки; з інтервалом в 60 секунд вмикати вакуумний насос.
7. По завершенню процесу переробки очистіть витки та поверхню шнеку від залишків пір'я. вимкніть електричне живлення.
8. Залиште гідролізер до повного охолодження.

#### 4.6. Безпечна експлуатація виробництва та охорона праці

Безпечна експлуатація виробництва та охорона праці організована згідно з чинним Державним стандартом України 7748:2015 "Безпека праці. Біологічна безпека. Загальні вимоги" від 22.06.2015, ДСТУ ГОСТ 12.1.038:2008 «Електробезпека. Гранично допустимі значення дотиків і струмів».

Нормуються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату для робочої зони виробничих приміщень з урахування постійних та непостійних робочих місць. Допустимі норми мікроклімату застосовуються в приміщеннях, в яких теплові надлишки будуть перевищувати 23Дж/м<sup>3</sup> с. Це приміщення, в яких технологічне обладнання живиться тепловою, або електричною енергією.

*Вентиляція* – обмін повітря, що здійснюється за допомогою різних систем і пристроїв. Головна мета вентиляції - це подача необхідної кількості очищеного повітря, видалення всіх можливих шкідливих домішок, забезпечення основних показників мікроклімату якими є температура, вологість повітря, а також створення повітряно-теплого балансу разом з опаленням. Фрамуги розташовуються у верхній частині вікна і відкриваються під кутом 45° вгору до стелі. При цьому зовнішнє холодне повітря спрямовується вгору до стелі, де змішується з теплим і надходить у робочу зону. Це дозволяє уникнути протягів і простудних захворювань. Щоб посилити інтенсивність витяжної вентиляції застосовують штучну вентиляцію з примусовим нагнітанням зовнішнього повітря і видаленням забрудненого у приміщенні з інтенсивним забрудненням повітря виробничими викидами.. Припливне повітря повинне відповідати певним гігієнічним вимогам: температура повітря має бути не нижче ніж 12°C, відносна вологість 30...60%, швидкість руху в робочій зоні 0,2...1 м/с. У зимовий період припливне повітря підігрівають за допомогою калорифера так, щоб різниця температур між повітрям приміщень і повітрям, що

подається, становила не більше ніж 5°C, а влітку охолоджують, забезпечивши різницю температур не більше ніж 10°C. У закритих приміщеннях повітря повинно підлягати обміну в середньому 40-80 м<sup>3</sup> на годину. Витяжна вентиляція планується окремо для кожної групи приміщень. Щоб не допустити підвищення температури повітря в приміщеннях з обладнанням, що виділяє значну кількість тепла, його покривають теплоізоляцією. Температура поверхонь електромеханічного гідролізера не повинна перевищувати 30-40 °С. Обладнання, при експлуатації якого відбувається виділення вологи, закривають кожухами, кабінами, ковпаками або кришками з місцевою витяжною вентиляцією. Шкідливі гази і пари перед випуском в атмосферу очищають. У цехах з відкритим технологічним процесом передбачають очищення зовнішнього повітря від пилу. Відбір приточного повітря для виробничих приміщень проводиться в зоні найменшого забруднення.

*Освітлення виробничих приміщень* повинно відповідати санітарним і ветеринарним вимогам до проектування підприємств виробництва кормів. У виробничих цехах, де постійно перебувають люди, повинно бути освітлення приміщення природним. Без такого освітлення чи з неякісним природним освітленням можна допустити приміщення, в яких робітники будуть перебувати лише 50% часу протягом дня, або коли цього вимагають умови технології. Вікна забороняється закривати тарою, обладнанням як в середині, так і ззовні будівлі. В усіх виробничих і адміністративно-побутових приміщеннях освітлення має відповідати вимогам СНиП II-4-79\*. Природне і штучне освітлення.

Ще однією гігієнічною вимогою буде регулярне очищення світильників, тому що забруднена арматура буде знижувати освітленість робочих місць на 25-30%.

#### *Шум, вібрація ультразвук та інфразвук*

Допустимі рівні звукового тиску на робочих місцях у виробничих приміщеннях дорівнюють - 80 дБ. Допустимі рівні звукового тиску на

робочих місцях звукових та ультразвукових коливань, що поширюються повітряним шляхом, не повинні перевищувати - 110 дБ. Рівні звукового тиску інфразвуку в октавних смугах у відповідності до санітарних норм не повинні перевищувати 105дБ.

#### *Безпека процесів праці*

Електробезпека – система заходів організаційного і технічного характеру, яка повинна забезпечити захист людей від вкрай небезпечної дії електричного струму, чи електричної дуги, що виникає за високої температури між електродами, електричного поля і статичної електрики (заряди, які накопичуються на обладнанні). (ДСТУ 7237:2011 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека.). Гранично допустимий струм, що проходить крізь тіло людини при нормальному (безаварійному) режимі роботи електроустановки, не може перевищувати 0,3 міліампера для змінного струму та одного міліампера для постійного. При нормальному (безаварійному) режимі роботи електроустановки гранично допустима напруга на людині не може перевищувати три вольта для змінного струму і вісім вольт для постійного.

Пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватися згідно до ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення системою запобігання пожежі, а також системою протипожежного захисту.

4.7. Відходи при виробництві продукції, стічні води, викиди в атмосферу, методи їх утилізації, переробки

Необхідно здійснювати нейтралізацію та знешкодження всіх відходів, включаючи тверді та рідкі, відпрацьовані матеріали та повітря, перш ніж їх викинути, щоб уникнути забруднення навколишнього середовища. Операції знешкодження слід виконувати в окремому приміщенні, яке не має контакту з виробничими зонами.

Рідкі нетоксичні та малотоксичні відходи можна розводити водопровідною водою перед зливом у міську каналізацію. Рідкі відходи, які контактували з зливаються в марковані герметичні ємності з дезінфікуючими розчинами та підлягають фінальній обробці хлорним вапном, перед тим як бути відданими на спалювання. Тверді нешкідливі відходи необхідно збирати у спеціальні мішки та віддавати спеціальним службам для вивезення на міське звалище.

В виробничому процесі утворюються стоки при мийці технологічного обладнання, оснастки та тари, які містять залишки сировини та матеріалів. Окрім цього при виробництві використовується вода дистильована, яку використовують у лабораторії. При її отриманні, сиру водопровідну воду обробляють хлоридом натрію. Внаслідок чого до виробничої каналізації потрапляють хлориди. Допустима концентрація хлоридів у стічних водах, які відводяться до міської каналізації, становить 350 г/м<sup>3</sup> – «Правила приймання стічних вод підприємств у комунальні та відомчі системи каналізації населених пунктів України», Київ, 2002.

Допустима концентрація СПАР у стічних водах, які відводяться до міської каналізації, становить 20 г/м – «Правила приймання стічних вод підприємств у комунальні та відомчі системи каналізації населених пунктів України», Київ, 2002.

Відповідно до санітарно-гігієнічного висновку, враховуючи незначну кількість виробничих стоків підприємства та багатократне їх розбавлення міськими стоками в міській каналізаційній мережі м. Київ, спорудження на підприємстві локальних очисних споруд є недоцільним. З наведеним складом виробничі стічні води виробничого містять в собі такі забруднюючі речовини і в такій кількості, які не можуть призвести до збоїв роботи каналізаційної мережі та інженерних споруд споруд, не складають небезпеки для робочого персоналу та повторно очищаються на станції очисти разом з побутовими стічними водами та господарськими.

## ВИСНОВКИ

Запропоновано комплексний метод біоконверсії кератину, який об'єднує переваги гідротермічного і ферментативного способів і набуває важливого значення у створенні різних білкових добавок та гідролізатів не тільки кормового, а й харчового призначення.

Запропоновані технічні рішення побудови одношнекового електромеханічного гідролізера забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, надійності роботи гідролізатора і стійкості реакції гідролізу, поліпшення якості білкового борошна і підвищення засвоюваності готового продукту, зниження енергетичних витрат гідролізатора.

ШЕМГ як поліфункціональний пристрій виконує операції транспортування, змішування, тонкого подрібнення і водного гідролізу кератину та короткочасного високотемпературного гідролізу перо-пухової сировини у тонкому шарі з впливом градієнтного магнітного поля і поверхневих електричних потенціалів на поверхні ротора-шнека.

Вплив магнітного поля на структуру води приводить до зміни кислотно-лужного балансу (рН), а саме веде до підвищення рН, продукує високу каталітичну ефективність, що сприяє здатності розщеплювати високонерозчинні кератинові субстрати до продуктів з доданою харчовою цінністю.

Пайовий розподіл електромагнітної потужності на два потоки корисної потужності здійснюється по поточному ковзанню, яке виходячи із співвідношення електромагнітних моментів рухового і гальмівного модулів встановлюється на рівні, що забезпечує необхідну для даного технологічного режиму корисну механічну і теплову потужність.

Результати моделювання показали, що дискретне розташування статорів по осьовій лінії гідролізера утворює стабільні зони з циклічним рівнем інтенсивності магнітного поля, яке задовільняє умовам технологічного режиму переробки кератинової сировини.

Магнітне поле електромеханічного гідролізера зосереджено всередині феромагнітних зон статора, ротора і гвинтової навивки, то зовні ж від них існує лише безроторний векторний потенціал. В областях руху вологої кератинової сировини векторний потенціал діє як електродинамічний імпульс і впливає через зсув фази хвильових функцій, що проявляється в колективних взаємодіях атомів, іонів і молекул.

Найбільша щільність електричних втрат спостерігається на внутрішній поверхні феромагнітного ротора. Для більш точної оцінки щільності електричних втрат на зовнішній поверхні було проведено просторове інтегрування геометрії феромагнітного ротора та встановлено, що середнє значення щільності електричних втрат становить 6232,5 Вт/м за частоти = 50 Гц.

Результати моделювання теплової задачі показують, що максимальна температура феромагнітного ротора становить 211,83 °C, мінімальна 187,5 °C відповідно. Це задовільнений результат, оскільки для проведення гідротермічного гідролізу необхідно досягнути температури 180-230°C на різних етапах процесу.

Результати випробувань модифікації експериментального зразка електромеханічного гідролізера для переробки кератинової сировини показали відповідність конструктивно-технологічних параметрів умовам забезпечення режимів отримання якісного гідролізованого борошна, яке може бути застосовано як кормова добавка.

Розроблено разовий технологічний регламент з переробки кератиновмісних відходів і сировини у кормове борошно.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. E. Salminen, J. Rintala, "Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review", *Bioresource Technology*, Vol. 83(1), pp. 13-26, 2002. doi:10.1016/S0960-8524(01)00199-7
2. I. Davidson, "Diverse Uses of Feathers with Emphasis on Diagnosis of Avian Viral Infections and Vaccine Virus Monitoring", *Brazilian Journal of Poultry Science*, Vol. 11(3), pp. 139-148, 2009. doi:10.1590/S1516-635X2009000300001
3. I. Sinkiewicz, A. Śliwińska, H. Staroszczyk, I. Kołodziejaska, "Alternative Methods of Preparation of Soluble Keratin from Chicken Feathers", *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 8, pp. 1043–1048, 2017. doi:10.1007/s12649-016-9678-y
4. I. V. Korh, I. I. Murzha, V. G. Kebko, M. V. Zubets, B. I. Kobal, I. N. Zazulya, "Innovative technological line for the production of a combined high-protein blood-feather feed additive", *Naukovo-tekhnichnyybyuletten IT NAAN*, Vol. 118, pp. 94-104, 2017.
5. Gonzalo, Milena, et al. "Pig bristles—an underestimated biomass resource." *Proceedings of the 62nd International Congress of Meat Science and Technology, Proc. Bangkok, Thailand*. 2016.
6. Coward-Kelly, G., Agbogbo, F.K., Holtzapple, M.T.: Lime treatment of keratinous materials for the generation of highly digestible animal feed: 2. Animal hair. *Bioresour. Technol.* 97, 1344–1352 (2006)
7. Nustorova, M., Braikova, D., Gousterova, A., Vasileva-Tonkova, E., Nedkov, P.: Chemical, microbiological and plant analysis of soil fertilized with alkaline hydrolysate of sheep's wool waste. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 22(4), 383–390 (2006)
8. Łaba, Wojciech, et al. "Enzymatic degradation of pretreated pig bristles with crude keratinase of *Bacillus cereus* PCM 2849." *Waste and biomass valorization* 8 (2017): 527-537.

9. S. Sharma, A. Kumar, “Keratin as a Protein Biopolymer: Extraction from Waste Biomass and Applications”, Springer, 2019. doi:10.1007/978-3-030-02901-2
10. I. V. Korh, I. I. Murzha, V. G. Kebko, M. V. Zubets, B. I. Kobal, I. N. Zazulya, “Innovative technological line for the production of a combined high-protein blood-feather feed additive”, *Naukovo-tekhnichnyybyuleten IT NAAN*, Vol. 118, pp. 94-104, 2017
11. Спосіб виготовлення кормової білкової добавки з відходів сировини тваринного походження та пристрій для здійснення способу. Патент 61868, А23К1/10, А23J1/10, А23N17/00, В29С47/38, заявник і патентовласник ТОВ “ТЕХНОЦЕНТР ТЕХАГРО-РЕСУРС”. - № 2003065404, заявл. 10.06.2003, опубл. 17.11.2003, Бюл. №11.15.
12. Mykhaliuk, V. V., & Havryliak, V. V. (2019). Methods of keratin extraction from wool and hair and prospects of their application in biomedicine and bioengineering. *Біологічні студії/Studia Biologica*, 13(2), 117-130.
13. Havryliak, V., & Mykhaliuk, V. (2020). The comparative analysis of the methods for keratin extraction from sheep wool and human hair. *Біол. Тварин*, 22, 9-
14. DE NINNO, A.; CASTELLANO, A. Congiu. On the effect of weak magnetic field on solutions of glutamic acid: the function of water. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2011. p. 012025.
15. X. Shi, F. Ronsse, J. Roegiers, J. G. Pieters, “3D Eulerian-Eulerian modeling of a screw reactor for biomass thermochemical conversion. Part 1: Solids flow dynamics and back-mixing”, *Renewable Energy*, Vol. 143, pp. 1465-1476, 2019. doi:10.1016/j.renene.2019.05.098
16. S. Jalalifar, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Salehi, S. Papari, K. Hawboldt, V. Strezov, “CFD analysis of fast pyrolysis process in a pilot-scale auger reactor”, *Fuel*, Vol. 273, 2020. doi:10.1016/j.fuel.2020.117782
17. V. Bulgakov, I. Sevostianov, G. Kaletnik, I. Babyn, S. Ivanovs, I. Holovach, Y. Ihnatiev, “Theoretical Studies of the Vibration Process of the Dryer

for Waste of Food”, *Rural Sustainability Research*, Vol. 44, pp. 32-45, 2020. doi:10.2478/plua-2020-0015

18. T. Tupolskikh, N. Gucheva, O. Kirishiev, “Simulation of the process of movement of bulk material in a vibrating conveyor-mixer”, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 224, 2018. doi:10.1051/mateconf/201822405021

19. A. N. Yatsunov, A. V. Chernyakov, V. S. Koval, A. P. Shevchenko, A. V. Evchenko, M. A. Begunov, “The effect of particle motion on mixing intensity in a vibrating mixer”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Vol. 659, 2021. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012042

20. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, J. Trojanowska, M. Edl, D. Peraković, “Advances in Design, Simulation and Manufacturing II”, 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019, June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine, 2019. doi:10.1007/978-3-030-22365-6

21. G. Fülöp, A. Domokos, D. Galata, E. Szabó, M. Gyürkés, B. Szabó, A. Farkas, L. Madarász, B. Démuth, T. Lendér, T. Nagy, D. Kovács-Kiss, F. Van der Gucht, G. Marosi, Z.K. Nagy, “Integrated twin-screw wet granulation, continuous vibrational fluid drying and milling: A fully continuous powder to granule line”, *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 594, 2021. doi:10.1016/j.ijpharm.2020.120126

22. F. Qi, M. M. Wright, “A DEM modeling of biomass fast pyrolysis in a double auger reactor”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 150(2), 2020. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119308

23. A. Funke, R. Grandl, M. Ernst, N. Dahmen, “Modelling and improvement of heat transfer coefficient in auger type reactors for fast pyrolysis application”, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol. 130, pp. 67–75, 2018. doi:10.1016/j.cep.2018.05.023

24. Zhang, S. B., Zheng, X. W., Feng, L. J., Wang, Y. F., & Liu, Z. F. (2016). The design and experimental research of cooling structure in deep well

submersible motor. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 19(3), 837-848.

25. Zou, J., Qi, W., Xu, Y., Xu, F., Li, Y., & Li, J. (2012). Design of deep sea oil-filled brushless DC motors considering the high pressure effect. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(11), 4220-4223.

26. Xiao, L., Yu, G., Zou, J., Xu, Y., & Liang, W. (2019). Experimental analysis of magnetic properties of electrical steel sheets under temperature and pressure coupling environment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 475, 282-289

27. Boehm A, Hahn I (2014) Measurement of magnetic properties of steel at high temperatures. In: 40th Annu Conf Ind Electron Soc (IECON), IEEE, pp 715–721 <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048579>

28. Yao, A., Odawara, S., & Fujisaki, K. (2018). Iron loss and hysteretic properties under PWM inverter excitation at high ambient temperatures. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 7(4), 298-304.

29. Патент України на винахід № 126120. МПК А23N 17/00 (2016.01). Система переробки побічних продуктів птахівництва у добриво, корм та паливо. / Заблодський М.М., Марченко О. А., Голуб Г.А., Радько І.П., Наливайко В.А./ Національний університет біоресурсів і природокористування України – заявл. 15.07.2019 р., опубл. 17.08.2022, бюл. № 33.

30. Патент України на винахід № 125774. МПК А23К 10/26 (2016.01). Спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини. / Заблодський М.М., Марченко О. А., Ковальчук С. І., Радько І.П./ Національний університет біоресурсів і природокористування України – заявл. 05.11.2020 р., опубл. 01.06.2022, бюл. № 22.

31. Патент України на корисну модель №147388, МПК (2006) А23К 10/00, А23К 10/26 (2016.01), В03С 1/02 (2006.01), В03С 1/23 (2006.01), В03С 3/36 (2006.01). Електрична шнекова установка для виготовлення протеїнової кормової добавки з пухо-перової сировини. /Заблодський М. М.; Марченко

О.А.; Ковальчук С. І; Радько І. П./ Національний університет біоресурсів і природокористування України. Опубл. 05.05.2021, бюл. № 18/2021

32. Патент України на корисну модель № 158661, МПК А23К 10/26 (2016.01) , В03С 1/02 (2006.01). Електричний гідролізатор для виготовлення білкового борошна з перо-пухової сировини. / Заблодський М.М., Каплун В.В.,

Троханяк В.І., Коваль Є.В., Васюк В.В. / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Дата подання заявки: 27.05.2024, дата публікації 05.03.2025, Бюл. № 10.

33. Михалюк В. В. Біохімічна характеристика кератинів та створених на їх основі моделей біоматеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.04 «Біохімія». – Інститут біології тварин НААН, м. Львів, 2021.

34. Біоматеріали у мікро- та наноелектроніці [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальностей 161 «Хімічні технології та інженерія» і 176 «Мікро- та наносистемна техніка» / Барбаш В.А., Ключко Н.П., Копач В.Р.; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,96 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 327 с.

35. Zablodskiy M.M., Chuenko R.M., Kovalchuk S.I., Kruhliak H.V., Kovalchuk O.I. Internal capacitive compensation of the reactive power of the screw electromechanical converter. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 3, pp. 11-21.

36. H. Abu-Rub, A. Iqbal, J. Guzinski, "High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models", John Wiley & Sons, 2012

37. N. Zablodsky, R. Chuenko, V. Gritsyuk, S. Kovalchuk, O. Romanenko, "The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer", 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, 2021. doi:10.1109/acit52158.2021.9548392

38. M. Zablodskiy, V. Pliuhin, S. Kovalchuk, V. Tietieriev, "Indirect Field-Oriented Control of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer", *Electrical Engineering & Electromechanics*, Vol. 1, pp. 3-11, 2022. doi:10.20998/2074-272X.2022.1.01/

39. ДСТУ 4609:2006 Сировина пір'яно-пухова. Технічні умови/  
ДСТУ 3938-99. М'ясна промисловість. Продукти забою худоби.  
Терміни та визначення .

40. ДСТУ 3116-95 Щетина заводська. Технічні умови.

41. ДСТУ 8366:2015 Вовна овеча неоднорідна груба і напівгруба.  
Загальні технічні умови

42. ДСТУ 8039:2015 Борошно кормове з відходів перероблення птиці.  
Технічні умови/

43. Порядок поводження з побічними продуктами тваринного походження, що належать до категорій I-III. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України

08 лютого 2024 р. за № 202/41547

44. ДСТУ 7748:2015 "Безпека праці. Біологічна безпека. Загальні вимоги" від 22.06.2015, ДСТУ ГОСТ 12.1.038:2008 «Електробезпека. Гранично допустимі значення дотиків і струмів».

45. СНиП II-4-79\*. Природне і штучне освітлення.

46. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення системою запобігання пожежі, а також системою протипожежного захисту.

47. «Правила приймання стічних вод підприємств у комунальні та відомчі системи каналізації населених пунктів України», Київ, 2002.