

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОВАЛЬЧУК СТАНІСЛАВ ІГОРОВИЧ

УДК 621.3:620.93:62-97/-98

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ГІДРОЛІЗНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА
ПІД ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ**

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

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник
ЗАБЛОДСЬКИЙ Микола Миколайович,
доктор технічних наук,
професор

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Ковальчук С. І. Електротехнологічний комплекс для гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля.

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У дисертації проведено дослідження, що мають за мету вирішити науково-технічну задачу підвищення енергоефективності переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах.

Кератин – поширений структурний білок, зокрема пов'язаний з організмом птахів і має місце в структурі кігтів та пір'я. Сьогодні багата кератином біомаса відходів птахівництва становить вагому загрозу для навколишнього середовища та живих істот. В цілях промисловості кератин є цінним продуктом для медичної, фармацевтичної, косметичної, біотехнологічної та інших галузей. Кератин виділяється своєю стійкістю до впливу різного роду фізичних та хімічних факторів. Видобуток кератину можливий лише за умов руйнування дисульфідних ковалентних зв'язків та водневих зв'язків в структурі матеріалу.

З метою досягнення найбільш ефективних параметрів технологічного процесу проведено глибокий аналіз існуючих публікацій, результатів досліджень і додаткові дослідження щодо термічних і електричних властивостей курячого пір'я. В залежності від діапазону температур можна виділити три стадії зміни властивостей курячого пір'я. На першій стадії, діапазон температури 25–230 °С, відбувається втрата вологи матеріалу, що становить близько 13 % від загальної маси. На другій стадії, діапазон температури 230–280 °С, відбувається часткове розкладання структури пера, втрата маси до 46 %. Під час третьої стадії, діапазон температури 380–550 °С, відбувається повна деградація, втрата маси 81–84 %. Основними електричними властивостями курячого пір'я є електричний опір, електрична

провідність та діелектрична проникність. Електричні властивості змінюються в залежності від структури пір'я. Куряче пір'я містить велику кількість повітряних карманів і має пористу структуру, яка властива ізоляційним матеріалам і здатна поглинати вологу. Ізоляційний матеріал з більшою пористістю буде поглинати більше води, що впливатиме на його електричні властивості. Діелектрична проникність матеріалу описує його загальну поведінку в магнітному полі. Внаслідок наявності повітряних пор в структурі пір'я, діелектрична проникність цього матеріалу становить 1,7.

На основі інформації про амінокислотний склад було розроблено візуальну модель молекулярної структури для проведення симуляцій молекулярної динаміки під впливом температури, тиску та магнітного поля. Кератинова сировина є діамагнітним матеріалом. Магнітна сприйнятливість кератинового матеріалу значною мірою залежить від амінокислотної послідовності в молекулярній структурі. Від'ємна намагніченість пов'язана з діамагнетизмом і, як правило, невелика. За відсутності зовнішнього магнітного поля, атоми діамагнетика не володіють магнітним моментом. Під дією магнітного поля атоми структури кератину відштовхуються від джерела магнітного поля, що створює додаткові умови впливу на руйнування дисульфідних ковалентних зв'язків та водневих зв'язків в структурі матеріалу.

Удосконалено спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини, що включає подавання перо-пухової сировини в завантажувальний пристрій шнекової установки, зниження вологості сировини до 35–45 %, ущільнення в робочій зоні шнеків до створення ущільнення (пробки) за рахунок зменшення прохідного перетину шнекової установки і забезпечення тиску від 1 до 20 МПа, подавання сировини в другу робочу частину шнеків, де її розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків шнеків, переміщують і подрібнюють при температурі 180–260 °С до отримання подрібненої маси, вакуумний вплив через кожні 10–60 секунд до отримання продукту з вологістю 8–12 %, який відрізняється тим, що неподрібнену перо-пухову сировину з вихідною вологістю 60–80 % безперервно подають на транспортер, на якому піддають впливу електромагнітних полів

з протилежним відносно осі транспортера напрямком для видалення металевих домішок, після чого за допомогою стрічкового вакуум-фільтра, вихід якого розташовано безпосередньо у завантажувальному пристрої шнекової установки, здійснюють видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи, необхідної для гідролізу, у першій робочій зоні шнекової установки одночасно з ущільненням здійснюють нагрів до температури $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, вплив градієнтного магнітного поля частотою $1\text{--}50\text{ Гц}$ з індукцією до $0,025\text{ Тл}$, деаерацію за допомогою камери вакуумування з двома ділянками вздовж робочої зони шнекової установки, на одній з яких здійснюють всмоктування парамагнітного кисню, а на другій ділянці камери вакуумування – всмоктування інших газів, у другій робочій зоні шнекової установки здійснюють вплив градієнтного магнітного поля частотою $1\text{--}50\text{ Гц}$ з індукцією $0,065\text{ Тл}$ і чотиристороннє підведення теплової енергії до шару перо-пухової сировини протягом 110 секунд .

Запропоновано електротехнологічний комплекс на базі двошнекового електромеханічного гідролізера, в якому статори розміщені на спільному, нерухомому валу і утворюють зустрічно направлені електромагнітні моменти, приводячи в рух зовнішній феромагнітний ротор без застосування механічного редуктора. Феромагнітний ротор одночасно переміщує, нагріває, подрібнює та створює вплив обертовим магнітним полем на матеріал переробки. Обрана конструкція двошнекового електромеханічного гідролізера та його головного органу – феромагнітного ротора обґрунтована численними математичними дослідженнями електромагнітних, електромеханічних, вібраційних та теплових властивостей, що мають місце в технологічному процесі. Математичні дослідження здійснено в програмних середовищах COMSOL Multiphysics, MATLAB & Simulink, VMD, NAMD, EssPresso та з допомогою бібліотек мови програмування Python. Ці математичні моделі розроблено відповідно до методу скінченних елементів, молекулярної динаміки, непрямого керування з орієнтацією на поле та із застосуванням рівнянь фізики магнітних полів, рухомих машин, теплопередачі в твердих тілах, динаміки тіл та ламінарного потоку.

За результатами математичного моделювання отримано тривимірні моделі робочого органу двошнекового електромеханічного гідролізера – феромагнітного ротора. Аналізуючи результати магнітної задачі, виявлено 6 широких зон з рівнем магнітної індукції 0,6 Тл і 6 вузьких зон з рівнем 0,1 Тл, які чергуються одна з одною по колу циліндричної поверхні феромагнітного ротора. Встановлено середнє – 0,34 Тл та максимальне – 0,78 Тл значення магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора. Отримано максимальне значення щільності струму на поверхні феромагнітного ротора – $1,5 \times 10^6$ А/м², мінімальне – $0,1 \times 10^6$ А/м², для верхньої грані шнекової навивки феромагнітного ротора ці значення становлять $2,1 \times 10^5$ та $0,6 \times 10^5$ А/м². Шляхом об'ємного інтегрування геометрії феромагнітного ротора проведено аналіз електромагнітного тензору напруженості, встановлено електромагнітний обертовий момент 26 Н×м та частоту обертання феромагнітного ротора 200 об./хв. Виявлено вібраційні сили у поперечному та осьовому напрямках, частота цих сил знаходиться в діапазоні 90–120 Гц. Визначено об'ємну щільність електричних втрат 6232,5 Вт/м, температуру нагріву феромагнітного ротора – 187,25–211,83 °С, нагрів оцінено шляхом аналізу результатів за час моделювання 25 хв.

Розроблено шляхи підвищення ККД електротехнологічного комплексу шляхом застосування нанорідини в повітряному проміжку феромагнітного ротора, що дозволяє підвищити показники системи завдяки акумуляції теплоти та зменшенню магнітного опору, що, в свою чергу, підвищує обертовий момент приблизно на 8–10 %.

Побудовано математичну модель непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером, отримано графічні залежності основних параметрів феромагнітного ротора за умов ступінчатої зміни обертового моменту та циклічної зміни кутової швидкості.

Опираючись на результати досліджень, розроблено та виготовлено експериментальний зразок двошнекового електромеханічного гідролізера.

Здійснено практичні дослідження електромагнітних, теплових та електромеханічних характеристик. Середні відхилення між моделюванням

та експериментом становили: для пускового моменту не більше $2 \text{ Н}\cdot\text{м}$; для магнітної індукції на поверхні ротора не більше $0,013 \text{ Тл}$; для магнітної індукції по верхній грані лопаток ротора не більше 3 мТл , відповідно математичні моделі можна вважати адекватними.

За результатами дисертаційного дослідження вирішено задачу підвищення ефективності технологічного процесу, надійності роботи електротехнологічного комплексу і стійкості реакції гідролізу, поліпшення якості готового продукту, зниження енергетичних витрат шляхом регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, високою енергоефективністю, що досягається використанням дисипативної складової електромеханічної частини установки, забезпеченням рівномірності температурного поля в зонах прогріву сировини. Технічну новизну розробленого електротехнологічного комплексу та способу виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини підтверджено патентами на винахід.

Ключові слова: гідролізер; дисипативна енергія; кератин; поліфункціональний електромеханічний перетворювач; магнітне поле; куряче пір'я; метод скінченних елементів; непряме полеорієнтоване керування; молекулярна динаміка.

ABSTRACT

Kovalchuk S. I. Electrotechnological complex for hydrolysis processing of poultry by-products under the influence of magnetic field. Qualifying Scientific Work on Manuscript Rights.

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

Research aimed at solving the scientific and technical problem of increasing the energy efficiency of processing poultry by-products on an industrial scale was carried out in the work.

Keratin is a common structural protein, particularly associated with birds, and occurs in the structure of claws and feathers. Today, the keratin-rich biomass of poultry waste poses a significant threat to the environment and living beings. For industrial purposes, keratin is a valuable product for medical, pharmaceutical, cosmetic, biotechnological, and other industries. Keratin stands out for its resistance to various physical and chemical factors. Extraction of keratin is possible only under conditions of the destruction of disulfide covalent bonds and hydrogen bonds in the structure of the material.

To achieve the most effective parameters of the technological process, an in-depth analysis of existing publications, research results, and additional research on the thermal and electrical properties of chicken feathers was carried out. Depending on the temperature range, there are three stages of change in the properties of chicken feathers. In the first stage, the temperature range of 25–230 °C, there is a loss of moisture in the material, which is about 13 % of the total mass. In the second stage, temperature range of 230–280 °C, there is a partial decomposition of the pen structure and weight loss of up to 46 %. During the third stage, in the temperature range of 380–550 °C, complete degradation occurs, and mass loss is 81–84 %. The main electrical properties of chicken feathers are electrical resistance, electrical conductivity, and dielectric constant. Electrical properties vary depending on the structure of the feathers. Chicken feathers contain a large number of air pockets and have a porous structure, which is characteristic of insulating materials

and can absorb moisture. Insulation material with higher porosity will absorb more moisture, which will affect its electrical properties. The dielectric constant of a material describes its general behavior in a magnetic field. Due to the presence of air voids in the feather structure, the dielectric constant of this material is 1.7.

Based on the information about the amino acid composition, a visual model of the molecular structure was developed to perform molecular dynamics simulations under the influence of temperature, pressure, and magnetic field. Keratin raw material is a diamagnetic material. The magnetic susceptibility of the keratin material depends largely on the amino acid sequence in the molecular structure. Negative magnetization is associated with diamagnetism and is usually small. In the absence of an external magnetic field, diamagnetic atoms have no magnetic moment. Under the action of a magnetic field, the atoms of the keratin structure are repelled from the source of the magnetic field, which creates additional conditions for the destruction of disulfide covalent bonds and hydrogen bonds in the structure of the material.

An improved method for the production of feed protein meal from feather and down raw materials, which includes feeding feather and down raw materials into the feeding device of the screw plant, reducing the moisture content of the raw material to 35–45 %, compaction in the working area of the screws to create a raw material seal (plug) by reducing the flow section of the screw plant and providing a pressure of 1 to 20 MPa, feeding raw materials into the second working part of the screws, where it is loosened by a reduced diameter part of the screw turns, mixed and crushed at a temperature of 180–260 °C to obtain a crushed mass, vacuum exposure every 10–60 seconds to obtain a product with a moisture content of 8–12 %, which is characterized by the fact that the uncrushed feather-down raw material with an initial moisture content of 60–80 % is continuously fed to a conveyor, which is exposed to electromagnetic fields with the opposite direction to the axis of the conveyor to remove metal impurities, after that, with the help of a belt vacuum filter, the outlet of which is located directly in the loading device of the screw unit, the water-air component is removed from the raw material to the level of residual moisture necessary for hydrolysis, in the first working zone of the screw unit, simultaneously with compaction, heating to a temperature of 60 °C, the effect of a gradient magnetic field with a frequency

of 1–50 Hz with an induction of up to 0.025 T is carried out, deaeration with the help of a vacuum chamber with two sections along the working area of the screw unit, one of which is used for suction of paramagnetic oxygen, and the second section of the vacuum chamber is used for suction of other gases, in the second working area of the screw unit, the impact of a gradient magnetic field with a frequency of 1–50 Hz with an induction of up to 0.065 T and four-sided supply of thermal energy to the layer of feather and down raw materials for 110 seconds.

An electrotechnological complex based on a twin-screw electromechanical hydrolyzer is proposed, in which the stators are placed on a common, fixed shaft and form counter-directed electromagnetic moments, driving an external ferromagnetic rotor without the use of a mechanical gearbox. The ferromagnetic rotor simultaneously moves, heats, grinds, and creates an impact with a rotating magnetic field on the processing material. The chosen design of the twin-screw electromechanical hydrolyzer and its main body – the ferromagnetic rotor is substantiated by numerous mathematical studies of electromagnetic, electromechanical, vibration, and thermal properties that take place in the technological process. Mathematical research is carried out in the software environments COMSOL Multiphysics, MATLAB & Simulink, VMD, NAMD, EssPresso, and with the help of Python programming language libraries. These mathematical models are developed in accordance with the finite element method, molecular dynamics, indirect field-oriented control, and using the equations of physics of magnetic fields, moving machines, heat transfer in solids, body dynamics, and laminar flow.

According to the results of mathematical modeling, three-dimensional models of the working body of a twin-screw electromechanical hydrolyzer – a ferromagnetic rotor were obtained. Analyzing the results of the magnetic problem, 6 wide zones with a level of the magnetic induction of 0.6 T and 6 narrow zones with a level of 0.1 T, which alternate with each other along the circumference of the cylindrical surface of the ferromagnetic rotor, were found. The average – 0.34 T and maximum – 0.78 T values of magnetic induction in the air gap of the ferromagnetic rotor were established. The maximum value of the current density on the surface of the ferromagnetic rotor was obtained – 1.5×10^6 A/m², the minimum – 0.1×10^6 A/m², for the upper edge of the screw winding of the ferromagnetic

rotor these values are 2.1×10^5 and 0.6×10^5 A/m². By volumetric integration of the geometry of the ferromagnetic rotor, the analysis of the electromagnetic stress tensor was carried out, and the electromagnetic torque of 26 N×m and the rotational speed of the ferromagnetic rotor of 200 rpm was established. Vibration forces in the transverse and axial directions were detected, the frequency of these forces is in the range of 90–120 Hz. The volumetric density of electrical losses was determined to be 6232.5 W/m, the heating temperature of the ferromagnetic rotor was 187.25–211.83 °C, and the heating was estimated by analyzing the results for a simulation time of 25 minutes.

Ways to increase the efficiency of the electrotechnological complex have been developed by using nanofluid in the air gap of the ferromagnetic rotor, which allows to increase in the performance of the system due to the accumulation of heat and reduces the magnetic resistance, which in turn increases the torque by about 8–10 %.

A mathematical model of indirect field-oriented control of a twin-screw electromechanical hydrolyzer is constructed, and graphical dependences of the main parameters of the ferromagnetic rotor are obtained under conditions of a step change of torque and cyclic change of angular velocity.

Based on the research results, an experimental sample of a twin-screw electromechanical hydrolyzer was developed and manufactured.

Practical studies of electromagnetic, thermal, and electromechanical characteristics were carried out. The average deviations between simulation and experiment were: for the starting torque no more than 2 N×m; for magnetic induction on the rotor surface no more than 0.013 T; for magnetic induction on the upper edge of the rotor blades no more than 3 mT, respectively, mathematical models can be considered adequate.

According to the results of the dissertation research, the problem of increasing the efficiency of the technological process, the reliability of the electrotechnological complex, and the stability of the hydrolysis reaction, improving the quality of the finished product, reducing energy costs by adjusting the parameters and productivity of the hydrolysis process when changing the properties of raw materials, high energy efficiency, which is achieved by using the dissipative component of the electromechanical part

of the installation, ensuring the uniformity of the temperature field in the heating zones of raw materials.

The technical novelty of the developed electrotechnological complex and the method of production of feed protein meal from feather and down raw materials is confirmed by patents for the invention.

Key words: hydrolyzer; dissipative energy; keratin; polyfunctional electromechanical converter; magnetic field; chicken feather; finite element method; indirect field-oriented control; molecular dynamics.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Заблодський М. М., **Ковальчук С. І.** Еталонна модель адаптивної системи керування лінійним двигуном. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». 2020. № 3. С. 78–83. *(Здобувачем здійснено розробку та аналіз методу керування лінійним двигуном).*

2. **Kovalchuk S.**, Zablodskiy N., Zhylytsov A., Chuenko R., Gritsyuk V. The numerical analysis of thermal processes in a twin-screw electromechanical hydrolyser for poultry by-products processing. Electrotechnic and Computer System. 2021. Vol. 34 (110). P. 96–103. *(Здобувачем здійснено дослідження теплових процесів, двошнекового електромеханічного гідролізера, розроблено математичну модель, проведено порівняння практичних та математичних досліджень).*

3. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.** Емпіричне дослідження теплових властивостей шнекового електромеханічного гідролізера для переробки побічних продуктів птахівництва. Енергетика і автоматика. 2022. № 4. С. 5–15. *(Здобувачем здійснено обґрунтування методу дослідження, розроблення і виготовлення експериментального зразка та визначення параметрів теплового режиму гідролізера).*

Стаття у науковому виданні іншої держави, включеному до міжнародних наукометричних баз даних **Scopus та/або Web of Science Core Collection**

4. Zablodskiy M. M., Pliuhin V. E., **Kovalchuk S. I.**, Tietieriev V. O. Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer. Electrical Engineering & Electromechanics. 2022. № 1. P. 3–11. *(Здобувачем здійснено розроблення методу непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером, побудовано математичну модель).*

**Публікації у матеріалах наукових конференцій,
включених до міжнародних наукометричних бази даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

5. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.** The main aspects of the technology of processing keratin raw materials under the influence of a magnetic field. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 278–282. *(Здобувачем здійснено дослідження електромагнітних процесів, що мають місце в технологічному процесі двошнекового електромеханічного гідролізера, проведено аналіз впливу магнітного поля на сировину переробки – куряче пір'я).*

6. Zablodskiy N., Chuenko R., Gritsyuk V., **Kovalchuk S.**, Romanenko O. The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer. 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). 2021. P. 130–135. *(Здобувачем здійснено дослідження електромеханічних характеристик, що мають місце в технологічному процесі двошнекового електромеханічного гідролізера, побудовано математичну модель згідно методу скінченних елементів, проведено аналіз результатів математичних та практичних досліджень).*

7. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Chuenko R., Romanenko O., Gritsyuk V. The nanofluids application in a twin-screw electromechanical hydrolyser. 2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO). 2021. P. 108–111. *(Здобувачем здійснено дослідження застосування нанорідини в повітряному проміжку робочого органу двошнекового електромеханічного гідролізера – феромагнітного ротора, розроблено математичну модель згідно методу скінченних елементів).*

8. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Chuenko R., Zhyltsov A., Gritsyuk V. The numerical investigation of magnetic properties of metal-oxide based nanofluid. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 562–566. *(Здобувачем здійснено дослідження магнітних властивостей нанорідини, побудовано математичну модель згідно методів молекулярної динаміки).*

9. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Bereziuk A., Zhyltsov A., Gritsyuk V. The Numerical Analysis of Vibration Parameters in the Working Element of Twin-Screw

Electromechanical Hydrolyser for Poultry by-Products Processing. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2021. P. 1–6. *(Здобувачем здійснено дослідження вібраційних процесів, що мають місце в технологічному процесі двошнекового електромеханічного гідролізера, побудовано математичну модель згідно методу скінченних елементів).*

Патенти України на винахід та корисні моделі

10. Заблодський М. М., Марченко О. А., **Ковальчук С. І.**, Радько І. П. Електрична шнекова установка для виготовлення протеїнової кормової добавки з пухо-перової сировини: патент України на корисну модель № 147388, МПК (2021.01), А23К 10/00, А23К 10/26 (2016.01), В03С 1/02 (2006.01), В03С 1/23 (2006.01), В03С 3/36 (2006.01). Заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u202007097. Заявлено 05.11.2020. Опубліковано 05.05.2021. Бюл. № 18. *(Здобувачем проведено патентний пошук і здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, розроблено конструктивно-технологічну схему установки).*

11. Заблодський М. М., Марченко О. А., **Ковальчук С. І.**, Радько І. П. Спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини: патент України на винахід № 125774, А23К 10/26. Заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № a202007099. Заявлено 02.06.2022. Опубліковано 01.06.2022. Бюл. № 22. *(Здобувачем проведено патентний пошук і здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, обґрунтовано режимні параметри і характеристики запропонованого способу).*

Тези наукових доповідей

12. Заблодський М. М., Наливайко В. А., **Ковальчук С. І.** Основні аспекти технології гідротермічної обробки пухо-пір'яної сировини у тонкому шарі з впливом електромагнітного поля. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: V Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. *(Здобувачем сформовано*

основні аспекти технології переробки побічних продуктів птахівництва в двошнековому електромеханічному гідролізері).

13. Заблодський М. М., **Ковальчук С. І.** Електромагнітна біостимуляція пухопір'яної сировини у двошнековому електромеханічному гідролізері. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): IX Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 19–22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 107–108. *(Здобувачем здійснено аналіз впливу магнітного поля на побічні продукти птахівництва під час переробки в двошнековому електромеханічному гідролізері).*

14. Zablodskiy M. M., **Kovalchuk S. I.** Structural characterization, electromagnetic and thermodynamic properties of poultry by-products. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials (ICEPOM-12): XII International Conference, June 01–05, 2020. P. 288. *(Здобувачем здійснено аналіз результатів дослідження теплових та електричних властивостей курячого пір'я).*

15. Заблодський М. М., Шворов С. А., Клендій П. Б., Андрієвський А. П., **Ковальчук С. І.**, Сподоба М. О. Інноваційна система переробки побічних продуктів птахівництва з впливом електромагнітного поля і автономним енергозабезпеченням. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й Міжнародний конгрес, м. Львів, 23–25 вересня 2020 року: тези доповіді. Львів, 2020. С. 134. *(Здобувачем обґрунтовано застосування двошнекового електромеханічного гідролізера в складі інноваційної системи переробки побічних продуктів птахівництва з автономним енергозабезпеченням).*

16. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Chuenko R., Romanenko O., Gritsyuk V. The nanofluids application in a twin-screw electromechanical hydrolyser. 2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO), 28–30 July 2021. Montreal, Canada 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9514326>. *(Здобувачем розроблено математичну модель і встановлено основні закономірності застосування нанорідини в двошнековому електромеханічному гідролізері).*

ЗМІСТ

ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА	26
1.1. Аналіз існуючих технологій і обладнання для переробки перо-пухової сировини.....	26
1.2. Аналіз досліджень фізико-хімічних властивостей кератинової сировини та механізмів впливу магнітного поля на її структуру	36
1.3. Аналіз досліджень по створенню комплексних математичних моделей електромагнітних, електромеханічних і теплових процесів електромеханічних перетворювачів технологічного призначення.....	37
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИРОБНИЦТВА КОРМОВОГО БІЛКОВОГО БОРОШНА З ПЕРО-ПУХОВОЇ СИРОВИНИ ПІД ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ	42
2.1. Дослідження фізико-хімічних властивостей побічних продуктів птахівництва.....	42
2.2. Молекулярна динаміка побічних продуктів птахівництва	45
2.3. Обробка побічних продуктів птахівництва електромагнітним полем	50
2.4. Розробка способу виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини під впливом магнітного поля	54
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ, ТЕПЛОВИХ І ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ДВОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА	63
3.2. Моделювання електромеханічних процесів	74
3.3. Моделювання вібраційних процесів	78
3.4. Моделювання теплових процесів	82

3.5. Дослідження двошнекового електромеханічного гідролізера із застосуванням ферроколоїдної нанорідини.....	87
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГІДРОЛІЗНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА ПІД ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ 102

4.1. Формування структури і характеристик електротехнічного комплексу ...	102
4.2. Обґрунтування вибору системи керування електромеханічною системою електротехнологічного комплексу	109
4.3. Розробка, виготовлення та випробування макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера з зовнішнім нагрівом і впливом електромагнітного поля.....	120
4.3.1. Складові компоненти макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера	120
4.3.2. Методика випробувань макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера	122
4.3.3. Результати визначення теплових характеристик макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера.....	125
4.3.4. Моделювання електромагнітних і теплових процесів макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера.....	127
4.3.5. Реалізація гідротермічного гідролізу пухо-пир'яної сировини з використанням макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера	132
4.4. Розробка, виготовлення та випробування макетного зразку активної частини двошнекового електромеханічного гідролізера з внутрішнім розташуванням індукторів електромагнітного поля.....	136

4.5. Рекомендації щодо реалізації енергоефективної електротехнології та обладнання для переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах.....	139
ВИСНОВКИ.....	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	145
ДОДАТКИ.....	157

ВСТУП

В останні роки інтенсивного темпу розвитку набула галузь промислового птахівництва, зокрема, вирощування та переробка курчат-бройлерів. Пухо-пір'яні відходи забруднені мікробною біомасою та вимагають тривалого періоду часу для розкладання природним шляхом, що ускладнює процес утилізації. Зростаюча екологічна проблема викликає інтерес до потенційного використання відновлювальних ресурсів. Пухо-пір'яні відходи на 91 % складаються з білку кератину і потенційно можуть бути використані для виготовлення цінних матеріалів.

Актуальність теми. 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. Аналіз існуючого досвіду дозволяє зробити висновок, що жорсткі режими хімічних способів обробки приводять до втрати незамінних амінокислот, рацемізації амінокислот білкових гідролізатів, утворенню циклопептидів і зниження біологічної цінності кінцевих продуктів.

Найбільшого поширення отримав метод гідротермічного гідролізу. Кератин еластичний, здатний розтягуватись при обробці гарячим паром і стискатись під час висушування, що пояснює процес переходу кератину до шарової структури. Гідротермічний режим переробки курячого пір'я у вакуум-горизонтальних котлах малоефективний, так як не забезпечує повного гідролізу кератинових дисульфідних зв'язків в молекулах пір'яного білку. Технологія виготовлення кормових добавок з побічних продуктів птахівництва з використанням екструдерів і двошнекових систем, де процес тонкого подрібнення та водний гідроліз кератину суміщені і проходять в тонкому шарі, забезпечує перетравність отриманої білкової кормової добавки з пухо-пір'яної сировини на рівні 80 %. Однак цей спосіб двоступінчастого нагріву і наступного гідролізу володіє декількома недоліками: низька енергоефективність

технологічного процесу за відсутності використання дисипативної складової енергії електроприводу; наявність в зоні гідролізу сировини з різною вологістю, від чого залежить ступінь нагріву і глибина гідролізу; неповне руйнування кератинових дисульфідних зв'язків в молекулах пір'яного білку; низький ступінь регулювання процесу.

В зв'язку з тим, що в останні роки зросли вимоги до якості білкового кормового борошна з пухо-пір'яної сировини, нагальною проблемою є розробка більш ефективного способу переробки, який здатний формувати додаткові фізичні впливи на кератинову сировину і забезпечувати регульований процес та, відповідно, створення електротехнологічних комплексів з поліфункціональними властивостями. На сьогодні відсутні дослідження по обґрунтуванню структури електротехнологічного комплексу із застосуванням двошнекового електромеханічного гідролізера за умов використання дисипативної енергії, встановленню закономірностей електромагнітних, електромеханічних, теплових та вібраційних процесів.

Тому розробка електротехнологічного комплексу гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля для підвищення енергоефективності переробки в промислових масштабах є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була виконана згідно з науково-дослідною тематикою кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій Національного університету біоресурсів і природокористування України при виконанні держбюджетних тем “Розробка електротехнологічного комплексу з гібридною системою енергозабезпечення для переробки побічних продуктів птахівництва у паливо, біологічні корми та добрива” (номер державної реєстрації 0120U102105, 2020-2022 рр.) та “Науково-технічні основи створення комплексу енерготехнологічної переробки біомаси для отримання речовини з новими властивостями і підвищення їх комерційної цінності” (номер державної реєстрації 0121U113746, 2021 р.), у яких здобувач був співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи – розробка електротехнологічного комплексу гідролісної переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля для підвищення енергоефективності переробки в промислових масштабах.

Для досягнення мети сформовані такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан проблеми, віднайти та оцінити існуючі технічні системи для переробки побічних продуктів птахівництва, виявити їх переваги та недоліки;
- дослідити фізико-хімічні властивості сировини переробки – курячого пір'я та механізми впливу магнітного поля на структуру та фізико-хімічні властивості кінцевого продукту переробки – пір'яного борошна;
- розробити спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини;
- обґрунтувати структуру і технічні рішення електротехнологічного комплексу із застосуванням двошнекового електромеханічного гідролізера;
- побудувати математичну модель та на її основі дослідити закономірності електромагнітних, електромеханічних, теплових та вібраційних процесів електротехнологічного комплексу;
- розробити, виготовити та дослідити експериментальні зразки електротехнологічного комплексу з двошнековим електромеханічним гідролізером та системою керування;
- розробити рекомендації щодо реалізації енергоефективної електротехнології та обладнання для переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах.

Об'єкт дослідження – фізичні, енергетичні та технологічні процеси в комплексах для гідролісної переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах.

Предмет дослідження – закономірність електромагнітних, електромеханічних, теплових та вібраційних процесів електротехнологічного комплексу та спосіб

виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини під впливом магнітного поля.

Методи дослідження. Дослідження ґрунтуються на основних положеннях електродинаміки, тепломасообміну, математичного моделювання методом скінченних елементів, молекулярної динаміки, теорії автоматичного керування і статистичної обробки даних з використанням комп'ютерних технологій. Перевірка розроблених теоретичних положень проводилась у практичних умовах, де була підтверджена їх ефективність.

Достовірність результатів проведеного дослідження, висновків та рекомендацій, що викладені в дисертації. Наукові положення та висновки, сформульовані в дисертаційній роботі, належним чином обґрунтовані. Достовірність результатів дослідження підтверджена теоретичними та експериментальними дослідженнями електротехнологічного комплексу з двошнековим електромеханічним гідролізером.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Удосконалено математичну модель вібраційних процесів феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера шляхом об'ємного інтегрування геометрії феромагнітного ротора, введення аналізу електромагнітного тензору напруженості, виявленню амплітуд і частоти вібраційних сил у поперечному та осьовому напрямках, визначенню об'ємної щільності електричних втрат.

2. Вперше на основі застосування розробленої математичної тривимірної моделі двошнекового електромеханічного гідролізера отримано розподіл магнітної індукції, щільності струму і магнітного векторного потенціалу на поверхні феромагнітного ротора та верхньої грані шнекової навивки.

3. Вперше розроблено комплексу математичну модель електромагнітних і теплових процесів, динаміки руху кластерів нанорідини для двошнекового електромеханічного гідролізера з застосуванням нанорідини у порожнині феромагнітного ротора, що дає змогу формувати умови підвищення енергетичних показників системи завдяки акумуляції теплоти та зменшенню магнітного опору.

4. Вперше на основі застосування розробленої схеми заміщення електромагнітного гідролізера для dq компонент струмів і потокозчеплень та відповідної імітації моделі непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером отримано залежності основних електромеханічних параметрів за умов ступінчастої зміни обертового моменту та циклічної зміни кутової швидкості.

5. Розвинуто метод непрямого полеорієнтованого керування для складних електромеханічних систем з формуванням відповідних керуючих команд регуляторів магнітного потоку і обертового моменту, який дозволяє вести непряме керування з орієнтацією на поле без вимірювання потоку в повітряному зазорі у випадку орієнтації з низькою швидкістю і адаптації до постійної зміни індуктивностей намагнічування та опору роторів двошнекового електромеханічного гідролізера.

6. Запропонована візуальна модель молекулярної структури кератинової сировини для проведення симуляцій молекулярної динаміки під впливом температури, тиску та магнітного поля, що дозволяє формувати додаткові умови впливу на руйнування дисульфідних ковалентних зв'язків та водневих зв'язків в структурі матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено візуальну модель молекулярної структури для проведення симуляцій молекулярної динаміки кератинової сировини під впливом температури, тиску та магнітного поля.

Розроблено комплексну математичну модель електромагнітних і теплових процесів, динаміки руху кластерів нанорідини для двошнекового електромеханічного гідролізера з застосуванням нанорідини у порожнині феромагнітного ротора, що дає змогу формувати умови підвищення енергетичних показників системи завдяки акумуляції теплоти та зменшенню магнітного опору.

Розвинуто метод непрямого полеорієнтованого керування для складних електромеханічних систем з формуванням відповідних керуючих команд регуляторів магнітного потоку і обертового моменту, який дозволяє вести непряме керування з орієнтацією на поле без вимірювання потоку в повітряному зазорі у випадку

орієнтації з низькою швидкістю і адаптації до постійної зміни індуктивностей намагнічування та опору роторів двошнекового електромеханічного гідролізера.

Обґрунтовано структуру і технічні рішення електротехнологічного комплексу із застосуванням двошнекового електромеханічного гідролізера. Оригінальність системи захищено патентом України №147388 на корисну модель.

Розроблено шляхи підвищення ККД електротехнологічного комплексу шляхом застосування нанорідини в повітряному проміжку феромагнітного ротора, що дозволяє підвищити показники системи завдяки акумуляції теплоти та зменшенню магнітного опору, що в свою чергу підвищує обертовий момент приблизно на 8-10 %.

Удосконалено спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини з впливом магнітного поля, який захищено патентом України №125774 на винахід.

Створено експериментальний зразок електротехнологічного комплексу з двошнековим електромеханічним гідролізером та системою керування.

Розроблені рекомендації щодо реалізації енергоефективної електротехнології переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах.

Особистий внесок здобувача у розв'язанні конкретної наукової проблеми.

Дисертація є результатом самостійно проведеного наукового дослідження. Наукова новизна, висновки та рекомендації, викладені у роботі, сформульовано на підставі даних отриманих автором особисто. Особистий внесок у роботах, опублікованих у співавторстві, визначено у списку опублікованих праць.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались та обговорювались на: V Міжнародна науково-практична конференція “ПРЕАП-2019” (2019р., м. Київ, Україна); IX Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)” (2020р., м. Київ, Україна); XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEROM-12) (2020р., м. Кам'янець-Подільський, Україна); 6-й міжнародний конгрес сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування (2020р., м. Львів, Україна); 2020 IEEE KhPI Week on Advanced

Technology (KhPIWeek) (2020р., м. Харків, Україна); Міжнародна науково-практична конференція “Електротехнічні та комп’ютерні системи: теорія та практика” ЕЛТЕКС – 2021 (2021р., м. Одеса, Україна); 2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO) (2021р., м. Монреаль, Канада); 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT) (2021р., м. Деггендорф, Німеччина); 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (2021р., м. Харків, Україна); 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (2021р., м. Кременчук, Україна).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень опубліковано у 16 наукових працях, з яких 3 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому фаховому виданні України, що включено до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 5 публікацій в матеріалах конференцій, що входять до наукометричної бази даних Scopus, 5 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, 1 патент України на винахід і 1 патент України на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, який налічує 104 найменування. Роботу викладено на 180 сторінках друкованого тексту, що містить 102 рисунки та 8 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА

1.1. Аналіз існуючих технологій і обладнання для переробки перо-пухової сировини

Галузь птахівництва відіграє важливу роль в задоволенні зростаючого попиту у виробництві продуктів харчування, однак її діяльність призводить до загострення екологічної проблеми. Куряче пір'я складає 5-10 % ваги курки, тому воно становить чималу кількість відходів галузі. Щорічно внаслідок діяльності галузі виробляється близько 12 мільйонів тон пір'я [1, 2]. Оскільки пір'я, як побічний продукт, являється масою у суміші з кров'ю, то ці відходи створюють значне вірусне навантаження [3, 4], а їх накопичення призводить до забруднення навколишнього середовища, несе небезпеку здоров'ю людей та тварин.

Як правило, відходи птахівництва вивозять на звалища або спалюють. Лише незначна частина пухо-пір'яних відходів піддається переробці. Пір'яне борошно, як продукт переробки пухо-пір'яних відходів – цінна сировина у медичній, фармацевтичній, косметичній та біотехнологічній промисловості [5, 6]. Продукти цих галузей являються інноваційними, однак використовують пір'яне борошно у незначній кількості, або мають вузький спектр практичного застосування [7], що в основному пов'язано зі складністю переробки пір'я. Пір'я являється різновидом білкового матеріалу і на 90 % складається з кератину. Кератин – це структурний білок, що виділяється своєю стійкістю до впливу різного роду фізичних та хімічних факторів [8]. 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.

Кератинові матеріали утворені спеціально зорганізованими кератинізованими клітинами заповненими в основному волокнистими білками, являють собою природні полімерні композити, які володіють структурою поліпептидних ланцюгів, шарово-матричною структурою та багат шаровою структурою в різному розмірному діапазоні. Стабільність структури кератинового матеріалу являється результатом

внутрішньо молекулярних та міжмолекулярних дисульфідних зв'язків, водневих зв'язків та їх кристалічної структури. Ці властивості відрізняють кератини від інших волокнистих білків, таких як міофібріляр та білок колагену. Під дією факторів, що зменшують гідратацію білкових частинок (наприклад, водовіднімальних засобів) і нейтралізують їх заряд, розчинність білків знижується і вони можуть випасти в осад. Дисульфідні зв'язки окислюються під впливом повітря та світла. Перо стійке до дії ферментів [9].

Видобуток кератину можливий лише за умов руйнування дисульфідних ковалентних зв'язків та водневих зв'язків в структурі матеріалу. Основними методами видобутку кератину з пухо-пір'яних відходів являються методи гідротермічного, кислотного, лужного і ферментативного гідролізу.

Глибокий кислотний гідроліз кератину пір'я призводить до розриву всіх молекулярних зв'язків, можливий гідроліз до отримання суміші вільних амінокислот. При цьому майже повністю руйнується триптофан і частково сирін та треонін. Аспарагін і глютамін в свою чергу перетворюються в аспарагінову та глютамінову кислоту, а вільний аміак утворює сіль амонію [10].

Глибокий лужний гідроліз призводить до руйнування метіоніну цистеїну і цистину. Призводить до часткової рацемізації амінокислот та утворенню циклопептидів. Лужний гідроліз супроводжується утворенням аміаку і альдегідів, які вступають в реакцію конденсації з аміногрупами [11]. Відома технологія [12] переробки пухо-пір'яних відходів у вакуум-горизонтальних котлах чи сталевих реакторах-гідролізерах типу 0110-5,0-4 – СА10 з використанням їдкого натрію (NaOH) в якості каталізатора. За такої технології, на першому етапі отримують концентрат білковий пір'яний. Гідроліз пір'яної сировини проводиться в 4 % розчині NaOH за середньої температури 115 °C впродовж двох годин. По закінченню отриманий концентрат з значенням рН 10,8 нейтралізується 35-40 % розчином фосфорної кислоти до значення рН 7-7,6. Нейтралізований білковий концентрат з 25-35 % вмістом сухих речовин відправляється на осушування. В готовому кормовому продукті вміст сирого протеїну становить 70 %, у тому числі 35 % водорозчинних білків, 28 % пептидів і 7 % вільних амінокислот.

Аналіз досліджень [13] дозволяє зробити висновок, що жорсткі режими хімічних способів обробки призводять до втрати важливих амінокислот, рацемізації амінокислот білкових гідролізатів, утворення циклопептидів і зниження біологічної цінності кінцевого продукту.

Одним з найефективніших методів переробки пухо-пір'яних відходів в промислових масштабах являється метод гідротермічного гідролізу. Переробку відходів забою птиці на кормові цілі проводять у вакуум-горизонтальних котлах різної конструкції, які, в основному, використовувались для утилізації відходів пташиного походження на санітарно-ветеринарних заводах, рис. 1.1.

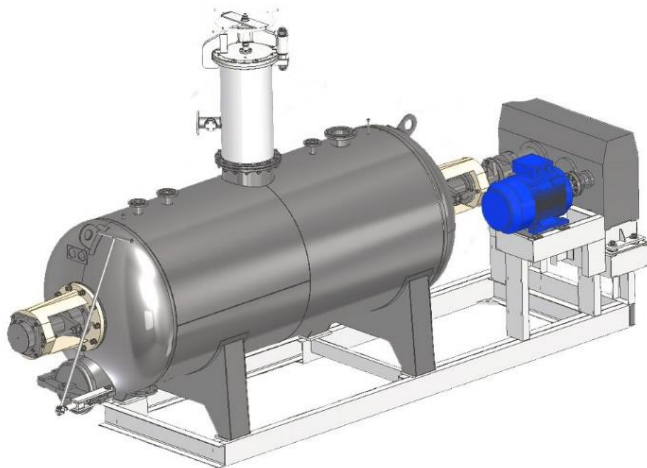


Рис. 1.1. Вакуум-горизонтальний котел

З метою підвищення ефективності переробки відходів тваринного походження на кормові добавки проведено ряд удосконалень вакуум-горизонтальних котлів, зокрема, впровадження електрокотлів для термічної обробки. Процес гідротермічного гідролізу – перетворення біомаси під тиском за помірних температур 180-230 °С через ряд реакцій гідролізу, конденсації, декарбоксілювання та дегідрації [14]. Вода виступає у ролі зеленого розчиннику, оскільки вона дешева, доступна і нетоксична. В умовах гідротермічного гідролізу, вода знаходиться у субкритичній

рідкій фазі, яка характеризується підвищеною здатністю до розчинності органічних речовин.

Все частіше гідротермічний гідроліз побічних продуктів птахівництва виконують в шнекових перетворювальних пристроях. Використання шнекового перетворювача приваблює універсальністю в переробці різного роду матеріалів незважаючи на темп технологічного процесу [15-17].

Кератин еластичний, здатний розтягуватись при обробці гарячим паром та скорочуватись під час висушування. Таким чином відбувається перехід спірального α -кератину в β -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, відома розробка інноваційної технологічної лінії з виробництва комбінованої високопротеїнової кров'яно-пир'яної кормової добавки [18]. Перо з цеху забою птиці транспортується в цех виробництва кормових добавок і розвантажується в прийомний бункер, звідки за допомогою гвинтового конвеєра подається в стрічковий металодетектор для видалення металевих частин з пир'яної сировини. З стрічкового конвеєра перо подається в гідролізер безперервної дії за допомогою гвинтового конвеєра, де пир'яна сировина гідролізується. Завантаження, процес гідролізу і розвантаження гідролізера контролюється за допомогою комп'ютера. Гідролізований пир'яний продукт видаляється з гідролізера під тиском пари і надходить в прийомний бункер дискової сушарки, де він перемішується з кров'ю.

Відомий спосіб отримання білкової кормової добавки з кератиновмісної сировини, що містить екструдер, за вихідної вологості сировини 35-95 % [19]. Згідно даної технології відбувається ущільнення та нагрів в каналі змішувача – подрібнення при безперервній подачі під тиском 0,4-10 МПа і температурі сировини 60-120 °С з

подальшою гідротермічною обробкою сировини за температури 150-250 °C протягом 5-300 с з одночасним тонким подрібненням та стиранням. Після чого перероблена сировина виходить в зону атмосферного тиску. Процес тонкого подрібнення та і водний гідроліз кератину суміщені і проходять в тонкому шарі до 30 мм. В результаті перетравність отриманої білкової кормової добавки з пухо-пир'яної сировини досягає значення в 80 %.

Однак цей спосіб двоступінчастого нагріву і наступного гідролізу володіє декількома недоліками:

- За температури 60-120 °C і вологості вище 50 % пухо-пир'яна сировина значно втрачає механічну міцність, тиск попереднього ущільнення не в значних межах перевищує значення тиску в зоні гідролізу і може змінюватись в широких межах. Це призводить до проникнення в зону гідролізу сировини з різною вологістю, від чого залежить ступінь нагріву і глибина проникнення гідролізу.

- Низька міцність матеріалу за температури 60-120 °C з однієї сторони знижує затрати механічної енергії на його ущільнення, однак являє собою потенційну небезпеку для обслуговуючого персоналу. Висока температура сировини в зоні ущільнення, пошук зони ущільнення в гарячій зоні і механічний вплив на сировину призводить до зменшення і так низького значення міцності матеріалу, а в випадку нерівномірної подачі сировини або засмічення і втрати продуктивності механізму випуску пару призводить до підвищення тиску в зоні гідролізу вище межі міцності сировини в місці його ущільнення, що призводить до руйнування ущільнюючої пробки і некерованому викиду усієї перегрітої маси із зони гідролізу на вхід каналу змішувача. Що являється небезпечною ситуацією для обслуговуючого персоналу.

- Пошук зони ущільнення матеріалу після попереднього нагріву до 60-120 °C в гарячій зоні викликає пересихання залишків сировини в тонкому шарі 30 мм після зупинки процесу та його запуску. В більшості випадків такі залишки плавляться і перетворюються в пластик. Як правило, це тверде монолітне утворення завжди створює перешкоду для запуску процесу.

- Використання сировини з вихідною вологістю 35-95 % допускає до зони гідролізу продукт з вологістю 45-60 %, так як ущільнення сировини після

попереднього нагріву пропускає через себе збитково велику кількість води. Збиткова волога призводить до втрати енергії під час нагріву.

Серед існуючих відома удосконалена технологія переробки пухо-пир'яних відходів, що включає нагрів, подрібнення, стерилізацію, гідроліз і сушку [20]. Обладнання складається з чотирьох секцій (рис. 1.2):

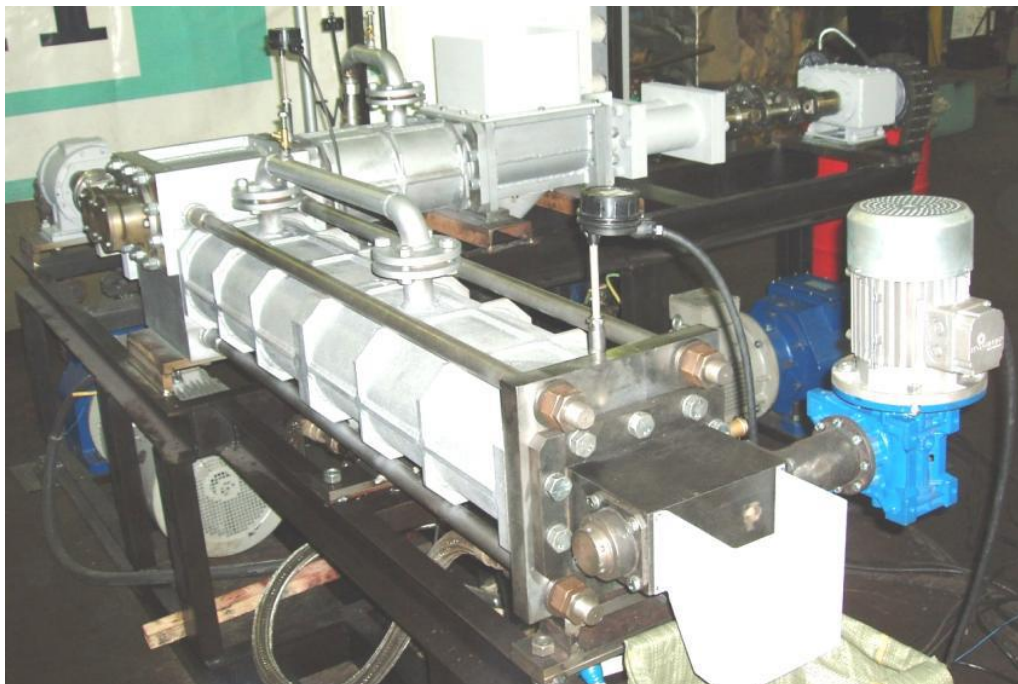


Рис. 1.2. Установа високотемпературного гідролізу пухо-пир'яної сировини у тонкому шарі

1. Завантажувальний бункер з шнеками, що обертаються в протилежних напрямках і здійснюють попереднє подрібнення і нагрівання.

2. 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.

3. Секція подрібнення пера, подальше нагрівання.

4. 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.

Відома установка для переробки кератиновмістних відходів тваринництва (рис. 1.3), яка містить послідовно пов'язані між собою і забезпечені шнеками секції подачі сировини А, реакційну гідролізу секцію В і секцію вивантаження переробленого продукту С [21].

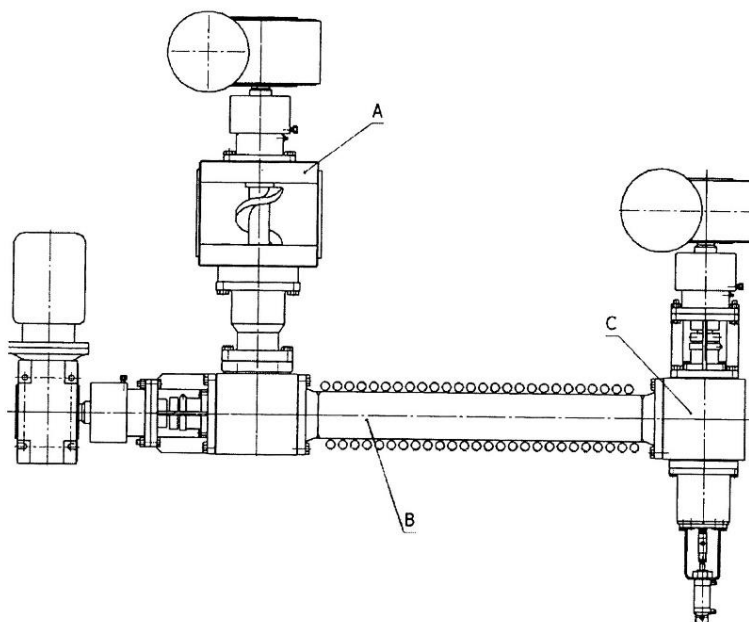


Рис. 1.3. Установка для переробки кератиновмістних відходів тваринництва

Секція подачі сировини містить приймальний бункер з воронкою і корпус робочого пристрою, по загальній осі яких встановлено шнек і проставка, що з'єднують секцію подачі сировини з приймальною ємністю реакційної секції.

Реакційна секція виконана у вигляді труби, що забезпечена засобами її обігріву, містить по осі шнек, при цьому реакційна секція оснащена засобами для подачі реагентів і засобами контролю параметрів процесу гідролізу, ємність для збору продуктів гідролізу розміщена в кінці реакційної секції і забезпечена циліндричним каналом з розміщеним в ньому шнеком, причому на вихідному кінці згаданого каналу виконаний отвір, забезпечений рухомим клапаном, встановленим з можливістю виведення переробленого продукту в зону атмосферного тиску, а вихідний отвір каналу шнека подачі сировини виконано у вигляді сопла Лавалю.

Недоліком аналога є низький загальний ККД установки, неможливість забезпечення рівномірної і по справжньому безперервної подачі сировини в робочу зону.

Відомий спосіб [22] виготовлення кормової білкової добавки з відходів сировини тваринного походження і пристрій для здійснення способу, який містить екструдер з циліндром, що має зони завантаження і вивантаження готового продукту з вихідним отвором на кінці, та встановлений в циліндрі шнек зі спіральним витком на сердечнику, що в сукупності з внутрішньою поверхнею циліндра утворює робочий об'єм, який зменшується від зони завантаження до зони вивантаження, зона завантаження виконана необігрівною, на внутрішній поверхні циліндра виконані подовжні пази, ділянка шнека, що знаходиться на початку обігрівної зони, оснащена підпирним елементом, а на кінці шнека розміщено підпирний елемент, який в сукупності з внутрішньою поверхнею циліндра утворює вихідний отвір.

Недоліки аналогу полягають у низькій енергоефективності через наявність операцій зневоднення центрифугуванням і просушуванням, значних енерговитрат для створення високого рівня тиску 15 МПа і температури 280 °С в екструдері, втраті якості одержуваного продукту внаслідок окислення при просушуванні і нагріванні сировини під час транспортування.

Найближчий аналог [21] до електротехнологічного комплексу, запропонованого даним дисертаційним дослідженням, є спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової і кератиновмісної сировини, який здійснюється, за допомогою шнекової установки, зображеної на рис.1.4.

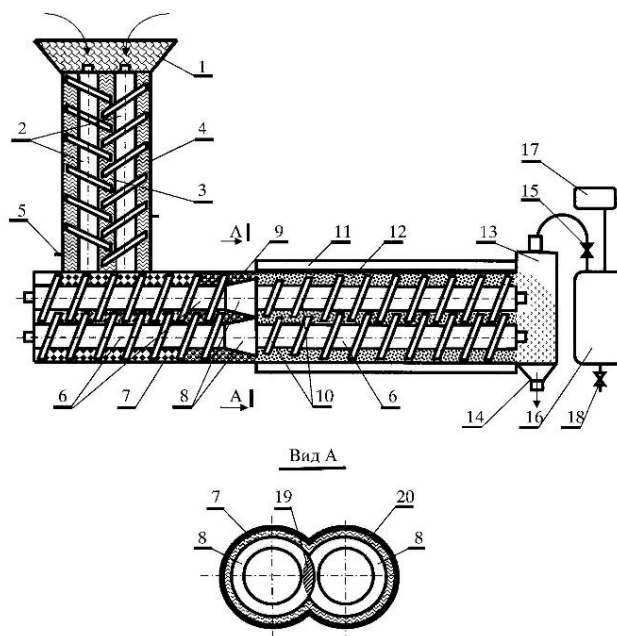


Рис. 1.4. Шнекова установка для здійснення способу виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової і кератиновмісної сировини

Волога перо-пухова кератиновмісна маса після відділення надлишку води, необхідної для транспортування пера з забійного цеху, подається в завантажувальний отвір 1. Сировина подається в канал, утворений двома поздовжньо з'єднаними паралельними циліндрами з розміщеними в них шнеками 2. Вода, що знаходиться в масі, віджимається шнеками і видаляється з корпусу 4 шнеків 2 за допомогою відповідних патрубків 5 вологи. Віджата до вологості 35-45 % сировина надходить у робочу зону шнеків 6, де здійснюється подальше ущільнення сировини до утворення сировинного ущільнення, так званої холодної пробки між корпусом 7 шнеків 6 і конусами 8. При переході сировини в другу робочу частину шнеків 6, зменшена в діаметрі частина витків 10 шнеків 6 починає розпушувати ущільнену конусами 8 сировину, що пройшла через прохідний переріз 20 між корпусом 7 і конусами 8. Зовні корпусу 7 другої частини шнеків 6, де відбувається нагрівання та гідроліз сировини,

змонтовано обігриваючий пристрій 11, в порожнині якого циркулює теплоносії і який швидко, протягом декількох секунд нагріває розпушену сировину 12 до температури 180-260 °С. Наступні витки шнеків 6, у міру нагрівання, продовжують розпушувати, рівномірно розподіляють по об'єму порожнини корпусу шнеків сировину. Під впливом температури, тиску та механічного впливу, сировина переходить у стан дрібно подрібненої маси, схожої на тісто з включеннями окремих волокон. Крім того, шнеки виконують транспортну функцію - переміщують перо-пухову кератиновмісну масу (сировину) всередині каналу, при заданих параметрах - температурі 180-260 °С, тиск від 1,0 МПа до 5,0 МПа. У завантажувальному шнеку обертання шнеків виконане в протилежні сторони для кращого захоплення сировини. На виході шнеків 6 змонтовано технологічну герметичну ємність 13, що приймає вихідний з порожнини корпусу шнеків оброблений продукт, в якій сировину, після закривання механізму 14 розвантаження продукту піддають вакуумним імпульсам, шляхом швидкого з'єднання за допомогою швидкодіючого клапана 15 з ресивером 16, в якому попередньо створили вакуум. Вакуумні імпульси впливають не тільки на сировину, що знаходиться в ємності 13, але і на частину сировини, що знаходиться в порожнині корпусу 7 шнеків 6 в безпосередній близькості до ємності 13. При цьому та частина сировини, яка знаходиться в безпосередній близькості до ємності 13, піддається більш глибоким вакуумним імпульсам від надлишкового позитивного тиску до вакуумного впливу та більш ефективного впливу на оброблювану сировину. При періодичному наповненні сировиною технологічної герметичної ємності 13 здійснюють вакуумний вплив на сировину і видаляють надлишки вологи, приводячи вологість готової продукції до необхідної 8-12 %. При цьому в структурі сировини відбувається вибухове закипання та руйнування сировини на дрібні частки. Після процесу обробки отримують розсипчасту подрібнену фракцію (борошно), яку можна використовувати як білкову добавку для годування птиці та інших видів тварин без додаткового підсушування.

Суттєвими недоліками найближчого аналогу є відсутність регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, низька енергоефективність через невикористання дисипативної складової

електромеханічної частини установки, що суттєво знижує її ККД, обумовлює значні габарити та високу енергозатратність, втрата якості одержуваного продукту внаслідок окислення сировини, нерівномірності температурного поля в зонах її прогріву та відсутності гарантій безумовного існування в сировині води тільки в стані рідини.

1.2. Аналіз досліджень фізико-хімічних властивостей кератинової сировини та механізмів впливу магнітного поля на її структуру

Аналіз фізико-хімічних властивостей побічного продукту птахівництва – курячого пір'я, являється важливим завданням для визначення імовірних методів переробки цієї біомаси відходів. Хоча хімічні, фізичні та морфологічні властивості курячого пір'я були всесторонньо розглянуті в публікаціях [2, 23-29], в цілях даного дисертаційного дослідження існує необхідність в їх узагальненні та адаптації до процесу гідротермічного гідролізу.

Серед сучасних публікацій значний інтерес викликають праці, які присвячені дослідженням впливу магнітного поля і сил намагнічування на ріст кристалів білка [30]. Кератин також являється білковим матеріалом, тому знання з впливу магнітного поля доцільно використовували для переробки кератинової сировини. Кератинова сировина являється діамагнітним матеріалом. Магнітна сприйнятливність кератинового матеріалу в значній мірі залежить від амінокислотної послідовності в молекулярній структурі. Від'ємна намагніченість, пов'язана з діамагнетизмом, як правило, не велика. За відсутності зовнішнього магнітного поля атоми діамагнетика не володіють магнітним моментом [31, 32].

Оскільки перо-пухова сировина має досить високу вихідну вологість, необхідно враховувати вплив магнітного поля на цю водну компоненту. Розуміючи, що у воді під дією магнітного поля відбувається її структурна перебудова, а на деякі хімічні елементи і сполуки теж впливає магнітне поле, можна простежити вплив (прямий чи опосередкований) на конкретний технологічний результат. Декілька прикладів внесуть ясність у таке твердження. Багато досліджень показали, що вода, яка раніше зазнавала впливу електромагнітних, електричних, вібраційних або магнітних полів,

зберігає свою біологічну активність протягом тривалих періодів часу. При цьому спостерігається зміна питомої електропровідності, магнітної сприйнятливості, поверхневого натягу та в'язкості [33]. Вода зберігає та передає інформацію, що стосується розчинених речовин, за допомогою водневої мережі. Еволюція фізико-хімічних параметрів у часі передбачає тригерний ефект будови молекулярних агрегатів після процедури потенціювання [34]. Магнітна система, налаштована на режим деструктуризації води, забезпечує збільшення в її структурі мономолекул до 30 %. Оскільки мономолекули води мають мінімальний розмір у порівнянні з кластерами, то вони легко проникають у клітини. Крім того, вони аномально полярні, і, отже, здатні швидко розчинити мікрокристалики солей, а концентрація водневих іонів (рН) може істотно впливати на розвиток процесу гідролізу.

1.3. Аналіз досліджень по створенню комплексних математичних моделей електромагнітних, електромеханічних і теплових процесів електромеханічних перетворювачів технологічного призначення

Використання шнекового гідролізера приваблює універсальністю в переробці різного роду матеріалів. Йому властива простота конструкції, а механічні зусилля, що виникають під час роботи, покращують процеси перемішування та теплопередачі, що підвищує ефективність переробки. Серед останніх публікацій відомо багато робіт, присвячених дослідженням обертового моменту шнекових електромеханічних перетворювачів. Обертовий момент, що виникає під час роботи шнекового гідролізера, являється вагомим фактором експлуатаційних витрат, тому для забезпечення ефективної промислової переробки і контрольованого споживання енергії існує необхідність в оптимізації змінних в часі операцій гідролізу, таких як швидкість шнеку та температура середовища переробки [16, 35, 36]. Вплив параметрів гідролізу на прикладі одно- та двошнекового електромеханічного перетворювача, а саме: температури середовища переробки, швидкості обертання шнеку та вологість сировини на обертовий момент перемішування досліджено в роботах [15-17]. В роботах були створенні моделі регресії поверхневого відклику для кореляції параметрів системи з змінними у часі параметрами. Встановлено, що при

підвищені температури переробки понад встановлені норми, в'язкість сировини, тиск в середовищі переробки та питома механічна енергія зменшуються. Проблеми високих енергетичних витрат на переробку в шнековому електромеханічному перетворювачі вирішуються в роботі [37]. В роботі проведено математичне моделювання і визначені силові та енергетичні параметри технічної системи.

Серед останніх публікацій відомо багато робіт, присвячених вібраційним процесам шнекових електромеханічних перетворювачів [38-44]. Аналіз цих робіт дозволяє отримати знання про існуючі методи моделювання робочих режимів електромеханічних систем. Дослідження динаміки твердих тіл в шнекових електромеханічних перетворювачах досліджено в роботах [38, 39]. В публікаціях було розраховано розподіл часу переробки твердих матеріалів і проаналізовано ступінь зворотного переміщення відносно прямого руху роботи пристрою. Було визначено, як параметри швидкості переміщення впливають на якість технологічного процесу.

Перспективна технологія осушування і переробки вологих відходів під впливом вібрації розглянута в роботі [40]. В публікації проаналізовано процес коливань шнекового електромеханічного перетворювача разом з розміщеними в ньому матеріалами, побудовано еквівалентну схему пристрою, визначені диференціальні рівняння коливання системи та отримано їх аналітичне рішення чисельним методом.

Дослідження впливу вібрації на процес перемішування сипучих матеріалів виконано в публікаціях [41-44]. В роботах представлено теоретичні траєкторії руху матеріалу переробки, що підтверджують інтенсифікацію процесу перемішування.

Публікації [38-44] всесторонньо розглядають шнекові електромеханічні перетворювачі, однак внаслідок особливості конструкцій, основну увагу приділено робочим елементам – шнекам і недостатньо розглянуто процеси, що виникають в різного роду приводах.

Серед існуючих публікацій відомо багато робіт, присвячених дослідженню теплових процесів, що виникають в шнекових перетворювальних пристроях. В роботі [35] проведені дослідження ефектів передачі тепла матеріалу переробки. 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 [45]. В публікації для побудови математичної моделі використано метод дискретних елементів. Визначено, що на процес переробки біомаси в двошнековому механізмі суттєво впливає 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 [46] 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. Проблеми високих енергетичних витрат на переробку в шнековому електромеханічному перетворювачі вирішуються в роботі [37]. В роботі проведено математичне дослідження та виконано аналіз отриманих даних. Побудовано графічні залежності силових та енергетичних параметрів технічної системи дослідження.

Висновки до першого розділу та задачі дослідження:

1. Проведено огляд наукових робіт за напрямком переробки побічних продуктів птахівництва. Встановлено, що на сьогодні, дослідницький підхід направлений не лише на збільшення виробництва та економії витрат, а й до включення аспектів, пов'язаних із збереженням ресурсів та стійкістю системи.

2. Суттєвими недоліками існуючих технологій і обладнання для переробки перо-пухової сировини є відсутність регулювання параметрів і продуктивності процесу гідролізу при зміні властивостей сировини, низька енергоефективність через невикористання дисипативної складової електромеханічної частини установки, що

суттєво знижує її ККД, обумовлює значні габарити та високу енергозатратність, втрата якості одержуваного продукту внаслідок окислення сировини, нерівномірності температурного поля в зонах її прогріву та відсутності гарантій безумовного існування в сировині води тільки в стані рідини.

3. Аналіз фізико-хімічних властивостей побічного продукту птахівництва – курячого пір'я, являється важливим завданням для визначення імовірних методів переробки цієї біомаси відходів, в їх узагальненні та адаптації до процесу гідротермічного гідролізу. В першу чергу це стосується впливу магнітного поля і сил намагнічування на ріст кристалів білка і водної компоненти перо-пухової сировини.

4. Відомі наукові публікації всесторонньо розглядають шнекові електромеханічні перетворювачі, однак внаслідок особливості конструкцій, основну увагу приділено робочим елементам – шнекам і недостатньо розглянуто процеси, що виникають в різного роду приводах. Обертний момент, що виникає під час роботи шнекового гідролізера, являється вагомим фактором експлуатаційних витрат, тому для забезпечення ефективної промислової переробки і контрольованого споживання енергії існує необхідність в оптимізації змінних в часі операцій гідролізу, таких як швидкість шнеку та температура середовища переробки.

Виходячи з отриманих результатів аналізу наукових робіт та сучасних тенденцій у галузі переробки побічних продуктів птахівництва сформовано такі задачі дослідження:

- дослідити фізико-хімічні властивості сировини переробки – курячого пір'я та механізми впливу магнітного поля на структуру та фізико-хімічні властивості кінцевого продукту переробки – пір'яного борошна;
- розробити спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини;
- обґрунтувати структуру і технічні рішення електротехнологічного комплексу із застосуванням двошнекового електромеханічного гідролізера;
- побудувати математичну модель та на її основі дослідити закономірності електромагнітних, електромеханічних, теплових та вібраційних процесів електротехнологічного комплексу;

- розробити, виготовити та дослідити експериментальні зразки електротехнологічного комплексу з двошнековим електромеханічним гідролізером та системою керування;

- розробити рекомендації щодо реалізації енергоефективної електротехнології переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ВИРОБНИЦТВА КОРМОВОГО БІЛКОВОГО БОРОШНА З ПЕРО-ПУХОВОЇ СИРОВИНИ ПІД ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

2.1. Дослідження фізико-хімічних властивостей побічних продуктів птахівництва

Перед дослідженням курячого пір'я необхідно здійснити ряд операцій. Під час збору сировини, пір'я являє собою біомасу у суміші з кров'ю та плоттю, тому їх необхідно вимити за температури води 50 °С, після чого висушити за температури 60 °С протягом 24 годин. Осушене пір'я необхідно кондиціонувати за відносної вологості 65 % і температури 20 °С [2].

Теплові властивості. Термогравіметричний аналіз. Теплова стабільність курячого пір'я оцінена шляхом термогравіметричного аналізу. Термогравіметричний аналіз являє собою вимірювання маси зразку протягом деякого періоду часу за постійної температури і являє собою режим нагрівання біомаси 5 °С/хв в атмосфері азоту зі швидкістю потоку 50 мл/хв в діапазоні температур 30-550 °С [2]. Результати аналізу зображені на рис. 2.1. Термічні властивості курячого пір'я в залежності від температури можна поділити на три стадії:

- На першій стадії, діапазон температури 25-230 °С, відбувається втрата вологи матеріалу, що становить близько 13 % від загальної маси.
- На другій стадії, діапазон температури 230-280 °С, відбувається часткове розкладання структури пера, втрата маси до 46 %. Втрата маси пов'язана з складними процесами піролізу та деполімеризації поліпептидних ланцюгів, зневоднення, деградацію та розпад структурного білка на окремі одиниці [47-49]. Другій стадії належать процеси руйнування водневих, дисульфідних зв'язків між поліпептидними ланцюгами, денатурації β -листової структури, що залежать від амінокислот цистеїну і окислення вуглецю [50, 51].
- Під час третьої стадії, діапазон температури 380-550 °С, відбувається повна деградація, втрата маси 81-84 %.

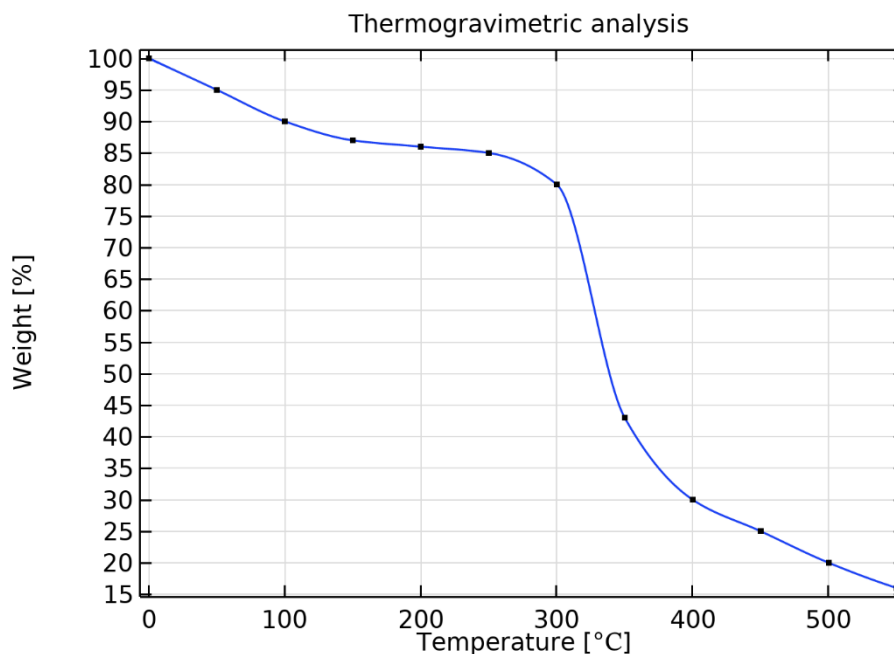


Рис. 2.1. Графік термогравіметричного аналізу курячого пір'я

За результатами дослідження можна стверджувати, що температура сушіння курячого пір'я повинна бути в межах 100-125 °С, температура переробки – 230-280 °С.

Диференціальна-скануюча калориметрія. В методі диференціально-скануючої калориметрії теплоту визначають через тепловий потік – похідну теплоти по часу. Теплові потоки вимірюються за різницею температури в двох точках вимірювальної системи в один момент часу. Диференціально-скануюча калориметрія курячого пір'я проводилась за температури 5 °С/хв в атмосфері азоту зі швидкістю потоку 50 мл/хв в діапазоні температур 30-550 °С [2]. Результати аналізу зображені на рис. 2.2.

Під час нагрівання пір'яна маса пройшла дві стадії перерозподілу теплоти в діапазоні температур 30-550 °С: з поступовим перерозподілом за температури 45-140 °С і різким – за температури 230-550 °С. Поступовий перерозподіл пов'язаний з водневими зв'язками в структурі кератину. На цьому етапі активується процес випаровування води. За температури 230-275 °С відбувається часткове плавлення кристалічної структури та руйнування міцних водневих зв'язків в структурі кератину. Термічне руйнування дисульфідних зв'язків і денатурація спіральної структури пір'я

спостерігається за температури 280-340 °С. За такої температури відбувається повне розкладання кератинової структури курячого пір'я. Це пов'язано з реакціями, які викликані термічною обробкою амінокислот, що містяться в пір'ї.

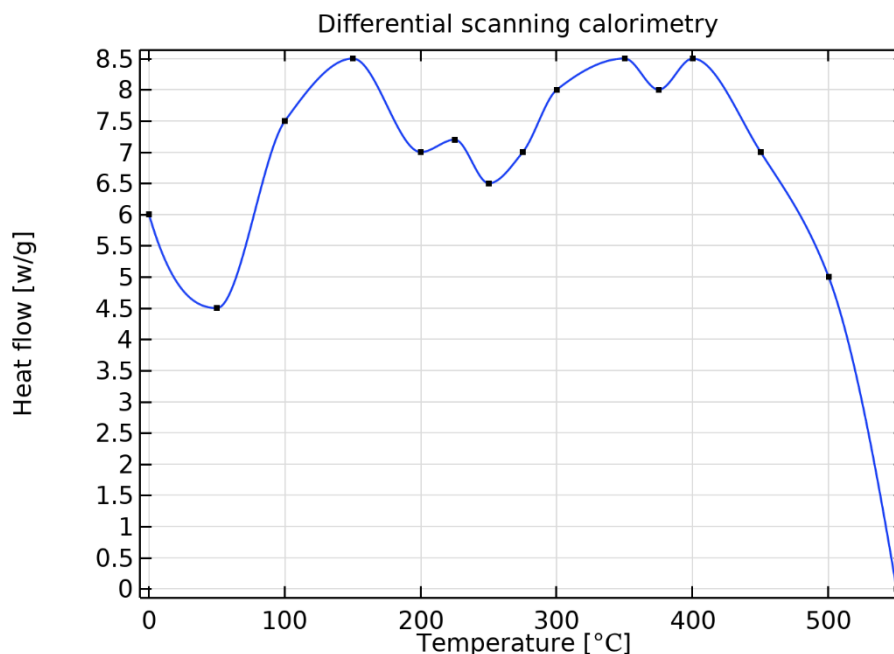


Рис. 2.2. Графік диференціально-скануючої калориметрії курячого пір'я

Електричні властивості. Основними електричними властивостями курячого пір'я є електричний опір, електрична провідність та діелектрична проникність. Електричні властивості, так само як і інші фізичні чи термічні, можуть змінюватись в залежності від структури пір'я. Куряче пір'я у своїй структурі містить велику кількість повітряних карманів і має пористу структуру. Така структура, як правило, властива ізоляційним матеріалам, які здатні поглинати вологу. Ізолюючі матеріали з більшою пористістю будуть поглинати більше води, що впливатиме на їх електричні властивості.

Діелектрична проникність матеріалу описує його загальну поведінку в магнітному полі. Внаслідок наявності повітряних пустот в структурі пір'я діелектрична проникність цього матеріалу становить 1,7. Визначення електричних властивостей курячого пір'я здійснено двохелектродним методом.

Вимірювання здійснені при відносній вологості курячого пір'я 65 % і температурі 22 °C [2]. Вимірювання електричного опору здійснено за напруги в межах від 0 до 5 В, рис. 2.3. В середньому опір пір'я становить $2,76 \cdot 10^{11}$ Ом.

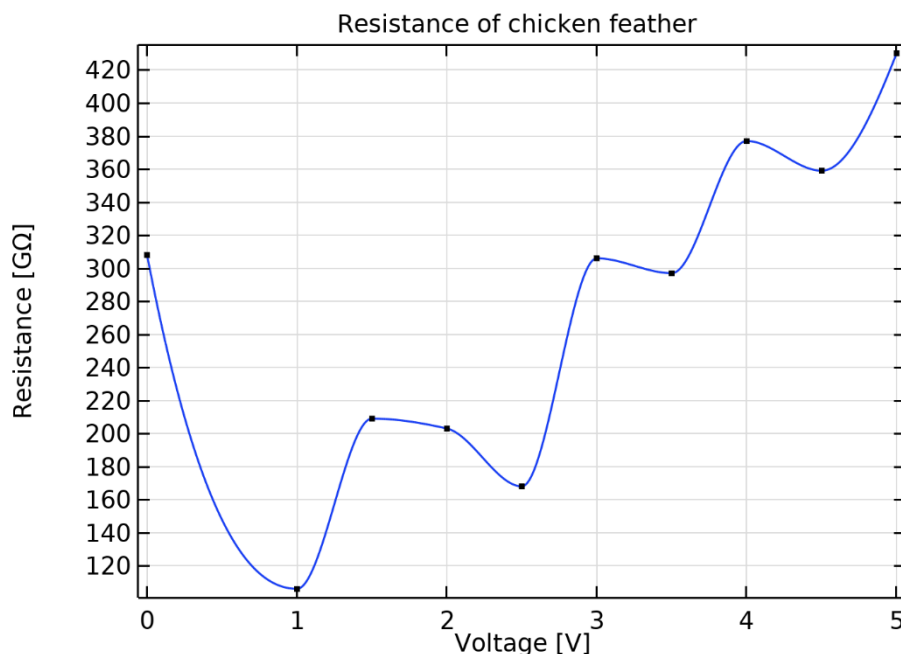


Рис. 2.3. Електричний опір курячого пір'я

2.2. Молекулярна динаміка побічних продуктів птахівництва

Куряче пір'я – кератинова сировина, під час реакцій гідротермічного гідролізу в ній відбуваються процеси утворення відповідних амінокислот і пептидів, які дуже розчинні у воді [52, 53]. Такі особливості гідротермічного гідролізу курячого пір'я дають можливість проведення аналізу сировини шляхом реалізації методів молекулярної динаміки.

Молекулярна візуалізація та моделювання молекулярної динаміки курячого пір'я здійснено в програмних середовищах VMD, QwikMD та NAMD. Амінокислотна послідовність курячого пір'я встановлена згідно методів, які запропоновані в працях [54-56]. Молекулярна візуалізація та амінокислотна послідовність курячого пір'я представлена на рис. 2.4-2.7. В послідовності знаходиться 155 амінокислот, для зручності відображення амінокислоти на зображеннях розділені на діапазони з порядковими номерами.

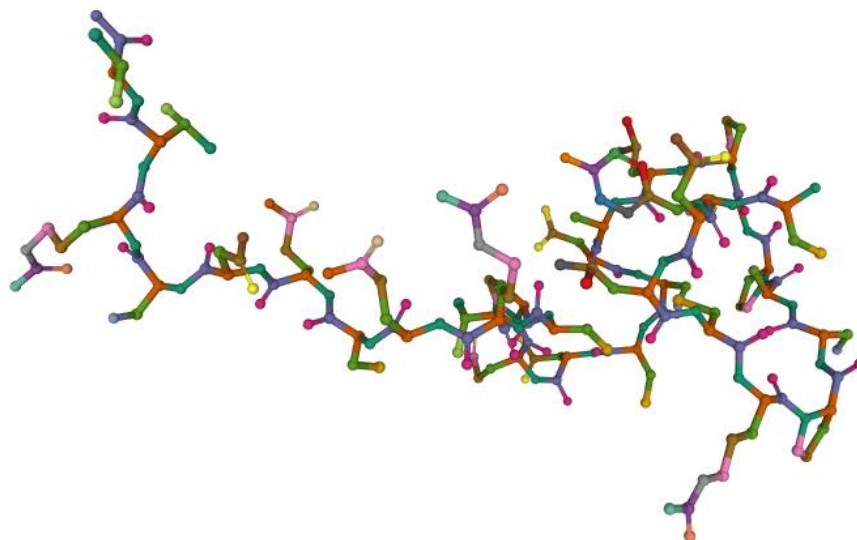


Рис. 2.4. Модель молекулярної візуалізації курячого пір'я

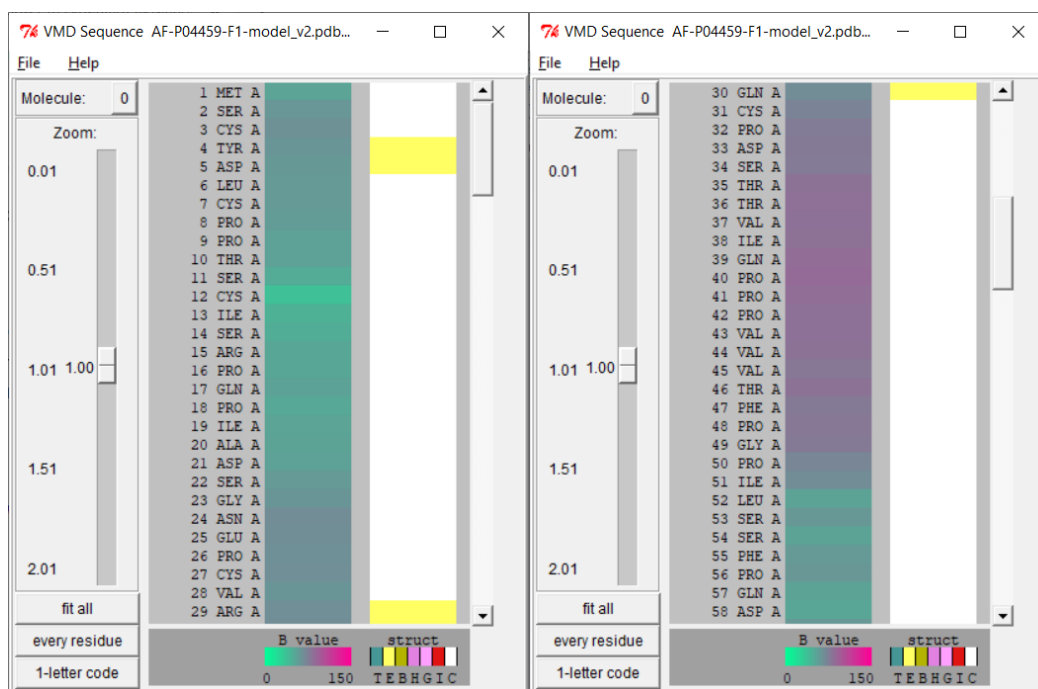


Рис. 2.5. Амінокислотна послідовність курячого пір'я в діапазоні 1-58

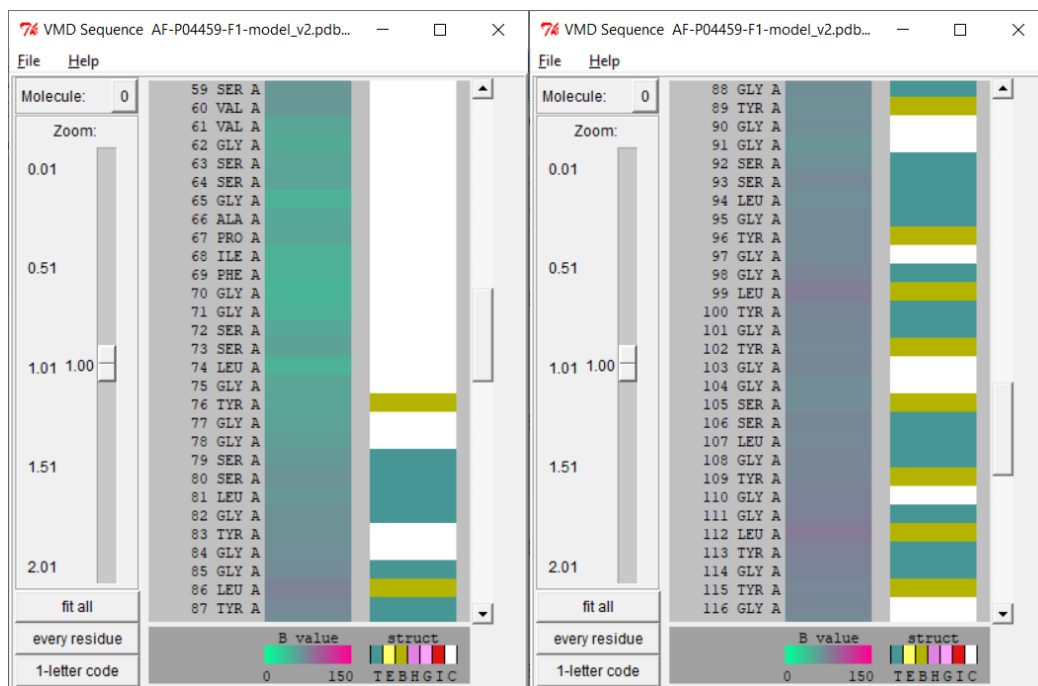


Рис. 2.6. Амінокислотна послідовність курячого пір'я в діапазоні 59-116

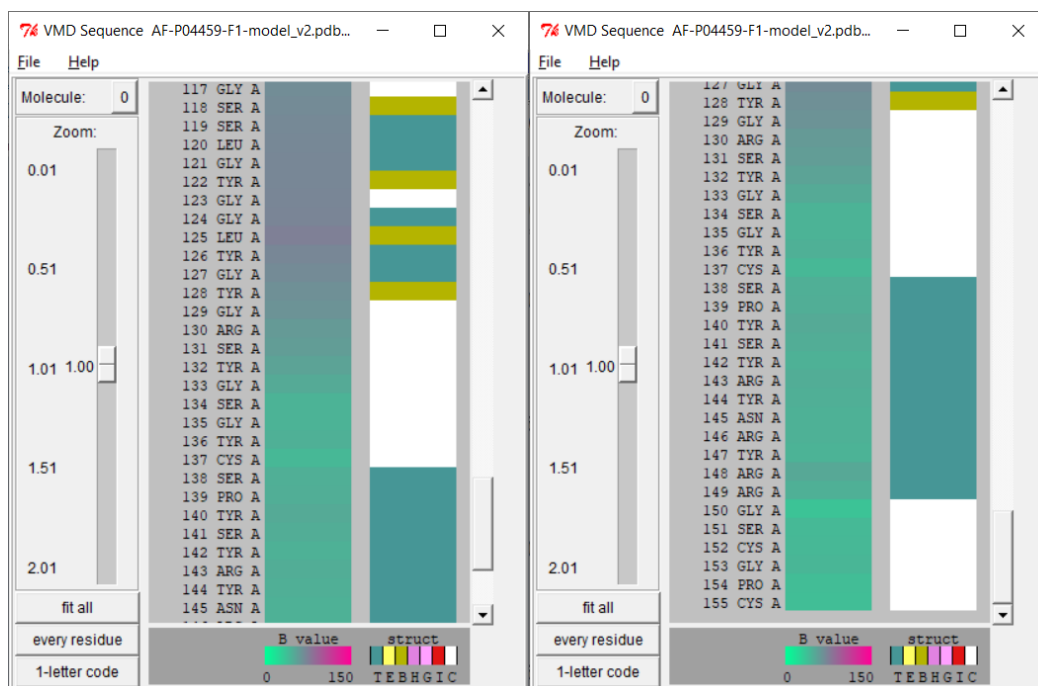


Рис. 2.7. Амінокислотна послідовність курячого пір'я в діапазоні 117-155

Володіючи даними молекулярної структури курячого пір'я в форматі PDB, проведено моделювання молекулярної динаміки під впливом мінімальної температури – 180 °С, необхідної для здійснення гідролізу в двошнековому електромеханічному гідролізері. Мінімальне значення параметру обране у зв'язку з необхідністю досягнення можливості здійснення моделювання, що вимагає значних

затрат комп'ютерних ресурсів. Моделювання впливу температури здійснено припускаючи знаходження курячого пір'я в середовищі неявного розчинника під впливом параметрів гідролізу протягом часу – 10 нс. За результатами дослідження отримано графічні залежності, які представлені на рис. 2.8-2.10.

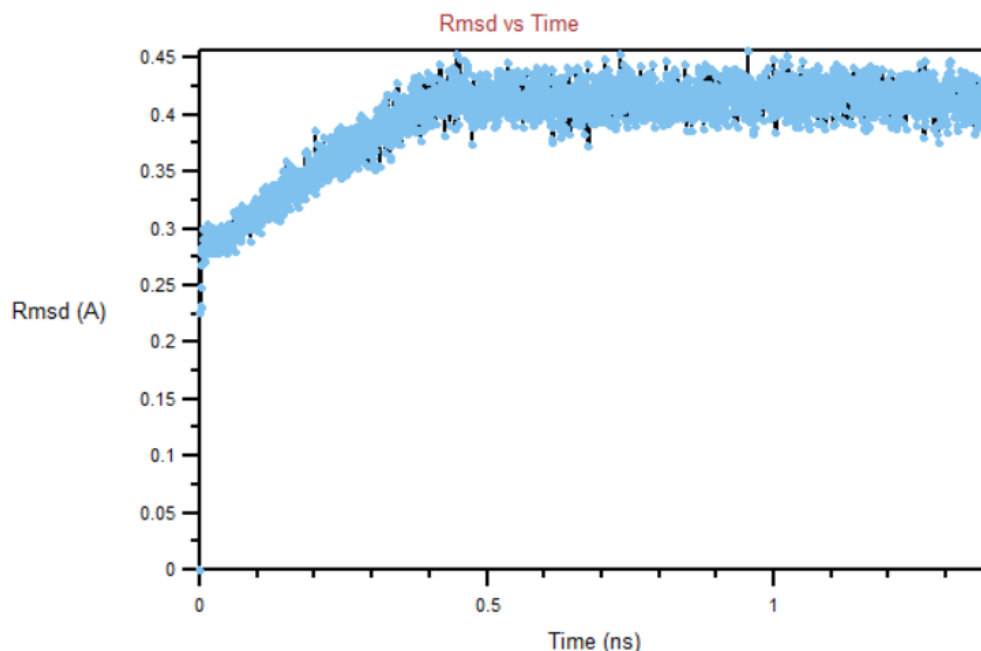


Рис. 2.8. Середньоквадратичне відхилення положень атомів

RMSD – середньоквадратичне відхилення, міра оцінки розбіжностей значень вибірки, що передбачені моделлю і отриманими результатами дослідження. За результатами даного дослідження значення RMSD не дорівнює нулю і не володіє від'ємними значеннями, що вказує на повну відповідність даним.

На рис. 2.9 представлено графічну залежність повної енергії моделювання молекулярної динаміки. Повна енергія є доказом фізичної можливості здійснення моделювання. Під час моделювання молекулярної динаміки приймається замкнене середовище, в якому зберігається енергія. Повна енергія (потенційна + кінетична) повинні залишитися в межах середовища моделювання. Чим меншим значення потенційної енергії володіє середовище, тим швидше рухаються атоми. З рис. 2.9 помітно, що загальна енергія має тенденцію повільно зростати з часом, що викликано числовими помилками округлення.

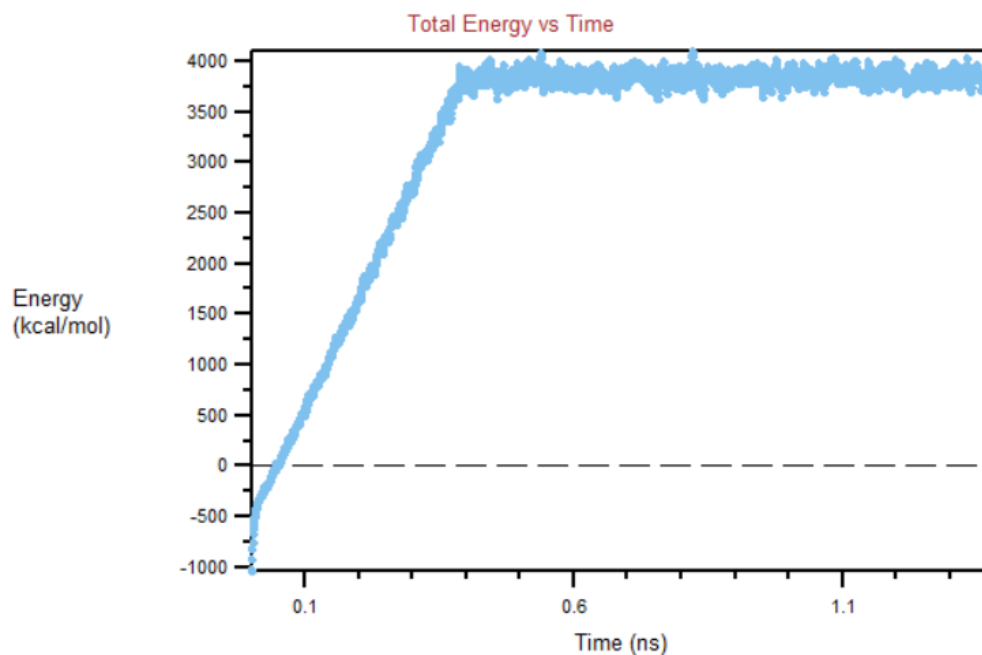


Рис. 2.9. Повна енергія моделювання молекулярної динаміки

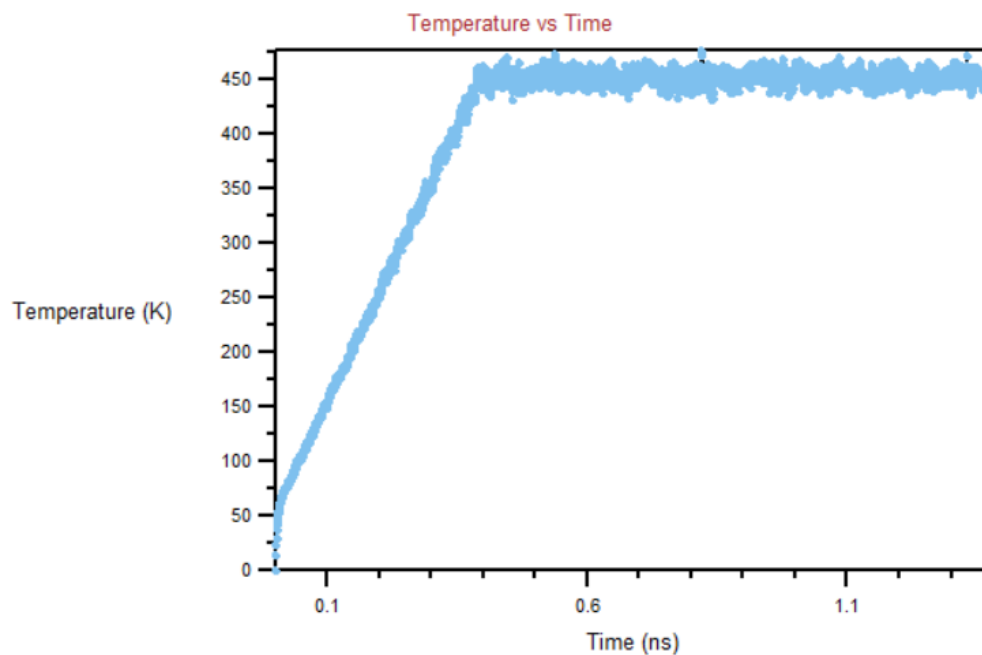


Рис. 2.10. Миттєва температури під час врівноваження

Миттєва температура моделювання представлена на рис. 2.10. З графічної залежності помітно лінійне зростання. Помітно, що в кінці моделювання миттєва температура становить 453 K (180 °C). Коливання викликані числовими помилками округлення.

2.3. Обробка побічних продуктів птахівництва електромагнітним полем

Серед сучасних публікацій значний інтерес викликають праці, які присвячені дослідженням впливу магнітного поля і сил намагнічування на ріст кристалів білка [30]. Куряче пір'я – кератиновий матеріал також являється білком, тому знання з впливу магнітного поля доцільно використовувати для переробки кератинової сировини.

Вектор намагніченості є однією з основних макроскопічних характеристик для опису магнітних властивостей речовини. У деяких речовинах існує лінійна залежність між намагніченістю та напруженістю магнітного поля. Цю залежність можна описати виразом:

$$M = \chi H \quad (2.1)$$

де M – вектор намагніченості, А/м; χ – магнітна сприйнятливості; H – напруженість магнітного поля, А/м.

Кератинова сировина є діамагнітним матеріалом. Магнітна сприйнятливості кератинового матеріалу значною мірою залежить від амінокислотної послідовності в молекулярній структурі. Від'ємне значення магнітної сприйнятливості, пов'язане з діамагнетизмом, зазвичай невелике. Тому атоми діамагнітного матеріалу не мають магнітного моменту за відсутності зовнішнього магнітного поля [31].

У разі розміщення кератинової сировини в магнітному полі в електронній оболонці кожного з його атомів за законом електромагнітної індукції виникають індукційні струми. Ці індуктивні струми створюють індуктивний магнітний момент, протилежний зовнішньому магнітному полю.

Магнітну сприйнятливості кератину можна оцінити на прикладі однієї з електронних орбіт його атома. Для оцінки брали електрон із зарядом e і масою m_e . Електрон рухається зі швидкістю v по коловій орбіті з радіусом r . Орбітальний кутовий момент L цього електрона лежить в якійсь площині і спрямований під кутом θ до деякої осі z . У разі створення магнітного поля з індукцією B , спрямованою вздовж осі z , на атом, перпендикулярний до площини, зображеної на рис. 2.11, починає діяти механічний момент:

$$N = \mu_L \times B \quad (2.2)$$

де μ_L – орбітальний магнітний момент, $A \cdot m^2$.

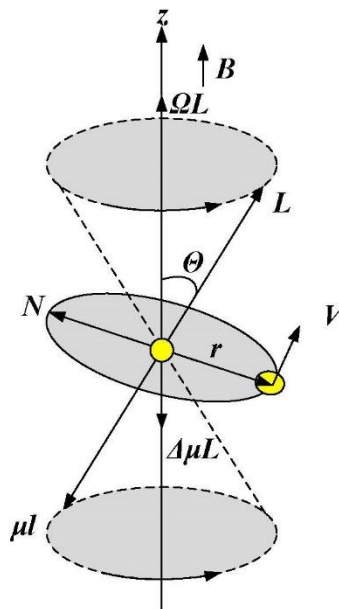


Рис. 2.11. Прецесія орбіти електрона в магнітному полі

Рівняння руху атома матиме вигляд:

$$\frac{dL}{dt} = \mu_L \times B \quad (2.3)$$

Тоді прецесію електронної орбіти з кутовою частотою, спрямованою вздовж магнітного поля, визначають з рівняння:

$$\Omega_L = \frac{\mu_L B}{L} \quad (2.4)$$

Оскільки:

$$L = m_e v r \quad (2.5)$$

$$\mu_L = \frac{1}{2} e v r \quad (2.6)$$

Тоді:

$$\Omega_L = \frac{e}{2m_e} B \quad (2.7)$$

Ця частота називається прецесією Лармора.

Прецесія електронної орбіти призводить до додаткового обертання електрона навколо поля B . Прецесія накладається на його орбітальний рух. Цей додатковий рух еквівалентний струму Δi в площині, перпендикулярній до вектору B :

$$\Delta i = -\frac{e\Omega_L}{2\pi} = -\frac{e^2}{4\pi m_e} B \quad (2.8)$$

Цей струм створює магнітний момент:

$$\Delta\mu_L = \Delta i \cdot S = -\frac{e^2 S}{4\pi m_e} B = -\frac{\mu_0 e^2 S}{4\pi m_e} H \quad (2.9)$$

де S – площа, описувана електроном в результаті прецесії навколо поля B .

Якщо розглянути сферично-симетричний розподіл заряду електрона, то:

$$S = \frac{2}{3} \pi \langle r^2 \rangle \quad (2.10)$$

де $\langle r^2 \rangle$ – середня квадратична відстань електрона від ядра.

$$\Delta\mu_L = -\frac{\mu_0 e^2 \langle r^2 \rangle}{6m_e} H \quad (2.11)$$

Створення цього моменту призводить до намагнічування речовини в напрямку, протилежному полю. Магнітний момент атома з Z кількістю електронів можна визначити з рівняння:

$$\mu_a = -\frac{\mu_0 e^2 H}{6m_e} \sum_{i=1}^Z \langle r_i^2 \rangle \quad (2.12)$$

Суму можна замінити виразом $Z \langle a^2 \rangle$, де $\langle a^2 \rangle$ – середній квадрат відстані електронів від ядра, тоді:

$$\mu_{am} = -\frac{\mu_0 e^2 \langle a^2 \rangle Z}{6m_e} H \quad (2.13)$$

Помноживши отриманий вираз на кількість атомів n в одиниці об'єму, можна визначити намагніченість M :

$$M = n\mu_{am} = -\frac{\mu_0 e^2 \langle a^2 \rangle nZ}{6m_e} H \quad (2.14)$$

Тоді магнітна сприйнятливість:

$$\chi = \frac{M}{H} = -\frac{\mu_0 e^2 \langle a^2 \rangle nZ}{6m_e} \quad (2.15)$$

Розрахунок здійснено згідно методу, запропонованого в роботі [57], шляхом аналізу координат та амінокислотного складу PDB файлу молекулярної структури курячого пір'я. Результати розрахунку наведено в табл. 2.1.

Табл. 2.1. Магнітна сприйнятливість амінокислот курячого пір'я

Амінокислота	Розрахована магнітна сприйнятливість
MET	$-95,37 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
SER	$-59,92 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
CYS	$-73,91 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
TYR	$-114,07 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
ASP	$-69,67 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
LEU	$-87,28 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
PRO	$-75,46 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
THR	$-71,84 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
ILE	$-87,28 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
ARG	$-122,74 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
GLN	$-85,26 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
ALA	$-51,82 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
ASP	$-69,67 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
GLU	$-81,49 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
ASN	$-72,93 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
VAL	$-75,46 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$
PHE	$-108,47 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{моль}$

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.

Отже, можна знайти аналогію в процесах гідротермального гідролізу під впливом магнітного поля і процесах в супрамолекулярних системах на основі макроциклічних сполук, що мають у своєму складі електрохімічно активні будівельні блоки, здатні до оборотних редокс-переходів у близькій області потенціалів. Під молекулярними механізмами розуміють ансамбль дискретного числа молекулярних компонентів, що виконують рухи, подібні до механічних, в результаті відповідних зовнішніх впливів [58]. На цей час таких механізмів відомо досить багато. Зовнішній вплив, що може бути термічний, зміна рН, електронне перенесення. Електронне перенесення, у свою чергу, може бути фотоіндукованим, в результаті хімічної редокс-реакції та електрохімічним.

2.4. Розробка способу виробництва кормового білкового борошна з перопухової сировини під впливом магнітного поля

В основу розробки поставлена задача підвищення ефективності технологічного процесу, стійкості реакції гідролізу, поліпшенні якості білкової добавки і підвищенні засвоюваності готового продукту, зниження енергетичних витрат.

За органолептичними, фізико-хімічними та бактеріологічними показниками кормове борошно з гідролізованого пера повинно задовольняти вимоги [96-103], наведені нижче в табл. 2.2.

Табл. 2.2. Показники кормового борошна з гідролізованого пера

Показник	Характеристика та норми
Зовнішній вигляд	Продукт сипучий, без щільних, не розсипаних при натисканні грудок або гранул діаметром не більше 12,7 мм, довжиною не більше двох діаметрів
Крихкість	Не більше 15 %
Запах	Специфічний, не гнилий, не затхлий
Масова частка металомангнітних домішок розміром до 2 мм	Не більше 1 мг/кг борошна

Мінеральних домішок, не розчинних в соляній кислоті, %	Не більше 2
Масова частка вологи, %	Не більше 9
Масова частка протеїну, %	Не менше 75
Масова частка жиру, %	Не більше 4
Масова частка золи, %	Не більше 8
Масова частка клітковини, %	Не більше 4
Наявність патогенних мікроорганізмів	Не допускається
Загальна токсичність	Не допускається

Примітка. Норми за хімічними показниками кормового борошна (протеїну, жиру, клітковині, мінеральних домішок) наведені з урахуванням граничного вмісту вологи.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини, що включає подавання перо-пухової сировини в завантажувальний пристрій шнекової установки, зниження вологості сировини до 35-45 %, ущільнення в робочій зоні шнеків до створення сировинного ущільнення (пробки) за рахунок зменшення прохідного перетину шнекової установки і забезпечення тиску від 1 МПа до 20 МПа, подавання сировини в другу робочу частину шнеків, де її розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків шнеків, перемішують і подрібнюють при температурі 180-260 °С до отримання подрібненої маси, вакуумний вплив через кожні 10-60 с для отримання продукту з вологістю 8-12 %, згідно запропонованого рішення, неподрібнена перо-пухова сировина з вихідною вологістю 60-80 % безперервно подається на транспортер, на якому піддається впливу електромагнітних полів з протилежним відносно осі транспортера напрямком для видалення металевих домішок, після чого за допомогою стрічкового вакуум-фільтра, вихід якого розташовано безпосередньо у завантажувальному пристрої шнекової установки, здійснюється видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи (35-45 %), необхідної для гідролізу, у першій робочій зоні шнекової установки одночасно з ущільненням здійснюють нагрів до температури 60 °С, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,025 Тл, деаерацію за допомогою камери вакуумування з двома ділянками вздовж робочої

зони шнекової установки, на одній з яких здійснюється всмоктування парамагнітного кисню, а на другій ділянці камери вакуумування – інших газів, у другій робочій зоні шнекової установки здійснюють вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,065 Тл і чотиристороннє підведення теплової енергії до шару перо-пухової сировини протягом 110 секунд [21].

Спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини ілюструється кресленням, де на рис. 2.12 представлена конструктивна схема технологічної лінії для переробки пухо-пір'яної сировини у білковий концентрат [21].

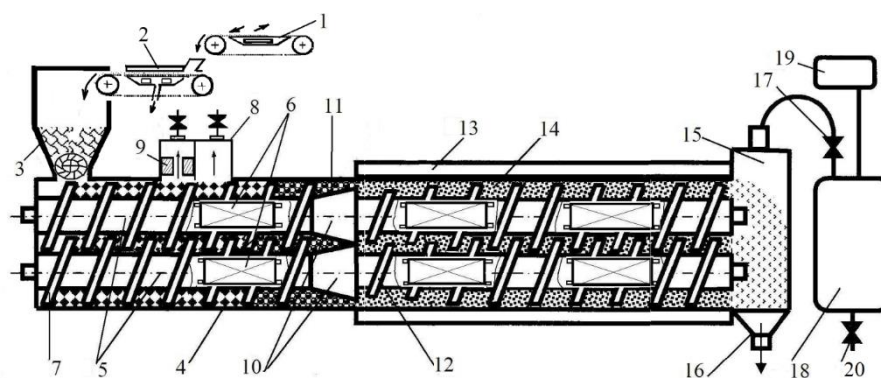


Рис. 2.12. Конструктивна схема технологічної лінії для переробки пухо-пір'яної сировини у білковий концентрат

Спосіб здійснюється наступним чином. Неподрібнена перо-пухова сировина з вихідною вологістю 60-80 % безперервно подається на транспортер 1, на якому піддається впливу електромагнітних полів з протилежним відносно осі транспортера напрямком для видалення металевих домішок, що підвищує надійність і безперервність роботи шнекової установки, після чого за допомогою стрічкового вакуум-фільтра 2, вихід якого розташовано безпосередньо у завантажувальному пристрої 3 шнекової установки, здійснюється видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи (35-45 %), необхідної для гідролізу. Під дією вакууму вода проходить через фільтрувальну тканину і отвори в стрічці у вакуумну камеру [21].

Далі сировину подають у робочу зону шнекової установки, в корпусі 4 якої розташовані ротори-шнеки 5. У внутрішній порожнині роторів-шнеків 5 розміщені

індуктори обертового магнітного поля 6, що підключені до джерела змінного струму і збуджують вихрові струми в роторах-шнеках з гвинтовою навивкою 7, за рахунок яких останні нагріваються. При взаємодії обертових магнітних полів і вихрових струмів створюються результуючі електромагнітні моменти, що обертають ротори-шнеки 5 і, відповідно, 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 [21].

У першій робочій зоні шнекової установки одночасно здійснюють її ущільнення в 8-10 разів, нагрів при тиску 0,5-5,0 МПа до температури 60 °С, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією 0,025 Тл і менше для гальмування процесу випаровування вологи. Одночасно у першій робочій зоні шнекової установки здійснюють деаерацію за допомогою камери вакуумування 8 з двома ділянками вздовж каналу робочої зони шнекової установки, на одній з яких розташована зона з постійними магнітами 9, що створюють високу магнітну напруженість для всмоктування парамагнітного кисню, а друга ділянка камери вакуумування, яка розташована напроти контактуючих з сировиною поверхнях шнека з магнітною індукцією 0,025 Тл і індукторів обертового магнітного поля – для 80 % інших газів, об'ємна магнітна сприйнятливості яких на два порядки нижча, ніж у кисню. При цьому на другій ділянці вакуумування усі діамагнітні гази відштовхуються від контактуючих з сировиною намагнічених областей роторів-шнеків 5. У першій робочій зоні шнекової установки максимально прибирають 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 першої робочої зони за допомогою конусів 10 відбувається подальше ущільнення сировини до утворення пробки 11 між корпусом 4 та конусами 10 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 робочу зону шнекової установки здійснюють вплив на сировину градієнтного магнітного поля частотою 1 –

50 Гц з індукцією 0,065 Тл і нагрів до температури 180-260 °С з чотиристороннім підведенням теплової енергії до шару перо-пухової сировини. При цьому її розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків 12 роторів-шнеків, переміщують і подрібнюють до отримання подрібненої маси, схожої на тісто з включеннями окремих волокон. За наявності підведення теплової енергії як збоку обігрівного пристрою 13, так і збоку роторів-шнеків 5 з витками 12, значно підвищується швидкість нагрівання сировини 14, рівномірність її температурного поля. Крім того, значно підвищується енергоефективність процесу виробництва білкового борошна за рахунок використання дисипативної складової електромеханічної частини установки [21].

Водна компонента перо-пухової сировини при транспортуванні в каналі робочої зони шнекової установки піддається впливу напруженості електромагнітного поля. Кратність магнітної обробки води значно збільшує рН водної компоненти, при цьому спостерігаються кілька процесів [21]:

- зміщення електромагнітним полем рівноваги між структурними гідратованими іонами і компонентами води;
- збільшення центрів кристалізації солей, розчинених в заданому обсязі води, на мікрровключеннях 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 [21].

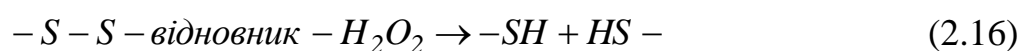
Формування парамагнітного композиту Fe_3O_4/C на першій стадії термічної обробки вологої кератинової сировини створює далі умови більшого ущільнення і тиску у тонкому шарі за рахунок зовнішнього магнітного поля ротора-шнека, що веде до більш інтенсивного процесу гідролізу кератинової сировини [21].

За хімічним складом кератинова сировина є природним концентратом білка, однак у натуральному стані пір'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 α -кератину в β -кератин, який має β -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 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 [21].

Повсюдна поширеність аеробних спороутворюючих бактерій роду *Bacillus* пов'язана з їх здатністю зберігати високу терморезистентність і життєздатність в різних екстремальних умовах. Бацили широко поширені в воді і характеризуються високою ферментативною активністю, що може зумовити істотне регулювання і трансформування біоматеріалів. Перо-пухова сировина з лінії убою послідовно проходить операції очищення від залишків крові промиванням гарячою водою і транспортування. При цьому створюються умови для інкубації бактерій роду *Bacillus*

subtilis RM-01 і продукції β-кератинази при твердофазній ферментації з використанням курячого пера як субстрату. Магнітні наночастки Fe_3O_4 разом з β-кератиназою створюють каталітичну композицію, яка додатково впливає на прискорення процесу розщеплювання кератинового субстрату до продуктів з доданою харчовою цінністю [21].

Крім того, при дії на дисульфід відновника, а саме пероксиду водню, який утворюється при впливі магнітного поля на воду у суміші пір'я, ковалентні зв'язки розриваються [21]:



На виході шнеків розміщено герметичну ємність 15 для прийому обробленої сировини, де після закриття вузла вивантажування готового продукту 16, сировину піддають обробці вакуумними імпульсами шляхом швидкого з'єднання за допомогою швидкодіючого клапану 17 та ресивера 18, в якому попередньо був створений вакуум за допомогою вакуумного насоса 19. 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 18 змонтований кран 20 для зливу рідини, яка в ньому накопичилася [21].

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 [21].

Для кожної з операцій необхідна швидкість обертання і температура зовнішніх поверхонь роторів-шнеків встановлюється шляхом зміни глибини проникнення обертового магнітного поля у масив роторів та співвідношень електромагнітних моментів, які регулюється зміною частоти і напруги джерела живлення. Для максимального збереження амінокислот і якості жиру тривалість високотемпературної обробки в шнековій установці встановлена не вище 110 с [21].

За органолептичними, фізико-хімічними та бактеріологічними показниками кормова мука з гідролізованого пера має такі показники: масова частка вологи – 8,5 %; масова частка клітковини – 3,7 %; масова частка протеїну – не менше 85 %; масова частка жиру – 4 %. Не виявлена наявність патогенних мікроорганізмів та загальна токсичність. Перетравлюваність кормового білкового борошна з перо-пухової сировини *in vitro* – 85 % [21].

Висновки до другого розділу

1. Здійснено дослідження фізико-хімічних властивостей побічного продукту птахівництва – курячого пір'я. Виявлено термічні властивості. Шляхом реалізації термогравіметричного аналізу оцінено теплову стабільність сировини. В залежності від температури встановлено три стадії теплового впливу: 25-230 °C – втрата 13 % загальної маси; 230-280 °C – втрата маси до 46 %; 380-550 °C – втрата маси 81-84 %.

2. Здійснено диференціально-скануючу калориметрію. Виявлено дві стадії перерозподілу теплоти: поступовий перерозподіл за температури 45-140 °C і різкий за температури 230-550 °C.

3. Досліджено електричні властивості курячого пір'я. Виявлено структуру властиву ізоляційним матеріалам. Встановлено залежність електричних властивостей від наявності в структурі курячого пір'я повітряних кишень та значення вологості. Оцінено діелектричну проникність матеріалу – 1,7. Досліджено електричний опір курячого пір'я двохелектродним методом. В середньому опір пір'я становить $2,76 \cdot 10^{11}$ Ом.

4. Здійснено моделювання молекулярної динаміки структурного білку курячого пір'я в програмних середовищах VMD, QwikMD та NAMD. Досліджено

амінокислотну послідовність сировини. Оцінено адекватність моделі, вплив температури на молекулярну структуру курячого пір'я. Побудовано тривимірну візуальну модель структурного білку курячого пір'я.

5. Досліджено вплив магнітного поля на молекулярну структуру курячого пір'я. Виявлено властивості притаманні діамагнетикам. Оцінено магнітну сприйнятливості амінокислот з послідовності в структурі курячого пір'я.

6. Розроблено спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини під впливом магнітного поля. Технічне рішення запропонованого способу забезпечує підвищення ефективності технологічного процесу, зниження енергетичних витрат, стійкість реакції гідролізу, поліпшення якості білкової добавки і підвищення засвоюваності готового продукту, запобігання вторинній агрегації білків, зберігання лабільних амінокислот.

РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ, ТЕПЛОВИХ І ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ДВОШНЕКОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ГІДРОЛІЗЕРА

Ефективне використання енергетичних ресурсів – важливе завдання сучасності. Розробка енергозберігаючих технологій безпосередньо пов'язана з підвищенням ККД окремих елементів системи, інтегруванням функціональних особливостей системи в одному пристрої та використанням дисипативної енергії. Оскільки підвищення ККД, за умови досягнення певного рівня оптимізації системи, досягається шляхом розробки нових активних та ізоляційних матеріалів, то методи його підвищення обмежені. Для технологічних систем, що об'єднують в собі процеси переміщення, нагріву та перемішування матеріалів найбільш ефективним варто вважати метод використання дисипативної енергії [59]. За умов згаданого раніше інтегрування функціональних особливостей системи в одному пристрої та використання дисипативної енергії, стає можливим заощадження ресурсів, що за традиційних схем перетворення і використання енергії витрачалися, розсіювалися у вигляді тепла в навколишнє середовище. В межах методу використання дисипативної енергії розроблено двошнековий електромеханічний гідролізер для переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля. Двошнековий електромеханічний гідролізер – це технічний пристрій з поліфункціональними властивостями, здатний одночасно нагрівати, диспергувати, транспортувати, перемішувати та піддавати впливу магнітним полем в одному пристрої. Основним робочим елементом двошнекового електромеханічного гідролізера є феромагнітний ротор (рис. 3.1). Феромагнітний ротор одночасно працює як ротор індукційного двигуна, нагрівач, робочий елемент та захисна оболонка [60].

Електромагнітна система для одного шнекового електромеханічного гідролізера складається з статорів, жорстко закріплених на нерухомому валу, і спільного зовнішнього феромагнітного ротора. Під час проходження струму по

обмоткам статорів створюються електромагнітні моменти, що приводять в рух феромагнітний ротор [60].

В зв'язку з складністю конструкції двошнекового електромеханічного гідролізера, доцільно володіти знанням про його характеристики на попередньому етапі проектування. Розробка комп'ютерної моделі на основі чисельних методів дозволяє отримати необхідну інформацію [60].

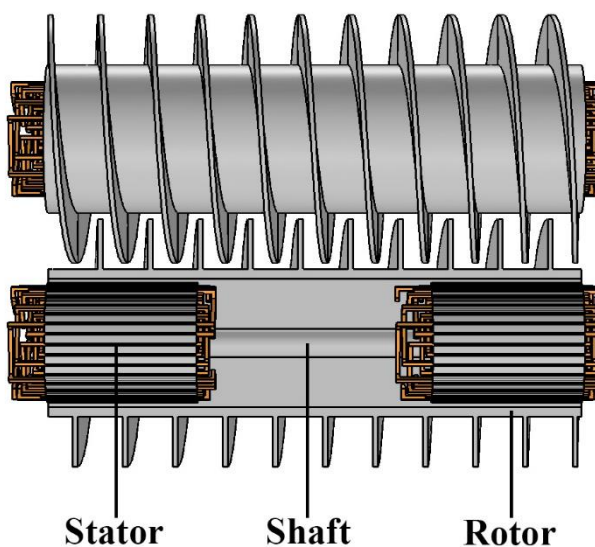


Рис. 3.1. Електромагнітна система двошнекового електромеханічного гідролізера

Для визначення ефекту впливу магнітного поля на кератиновий матеріал доцільно оцінити значення магнітної індукції в пристрої. В зв'язку з необхідною точністю, особливістю конструкції і затрат часу на проектування, моделювання виконано в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Зважаючи на ідентичність електромагнітних, електромеханічних, теплових і вібраційних процесів, які відбуваються в електромагнітних системах окремих шнеків, моделювання здійснено для одного з них. Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла [61]. Формулювання векторного потенціалу виконано згідно наступних рівнянь [62]:

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

де H – вектор напруженості магнітного поля, А/м; J – вектор щільності струму, А/м² [62].

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

де B – вектор щільності магнітного поля, Тл; A – векторний магнітний потенціал, Вб/м [62].

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

де E – вектор напруженості електричного поля, В/м [62].

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

де σ – електропровідність, См [62].

Формулювання скалярного потенціалу виконано згідно рівняння [62]:

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

На зовнішній межі з магнітним скалярним потенціалом, нормальна складова щільності магнітного потоку прирівнюється до нуля [62]:

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

Намагніченість феромагнітного ротора задана як В-Н крива і визначається з рівняння [62]:

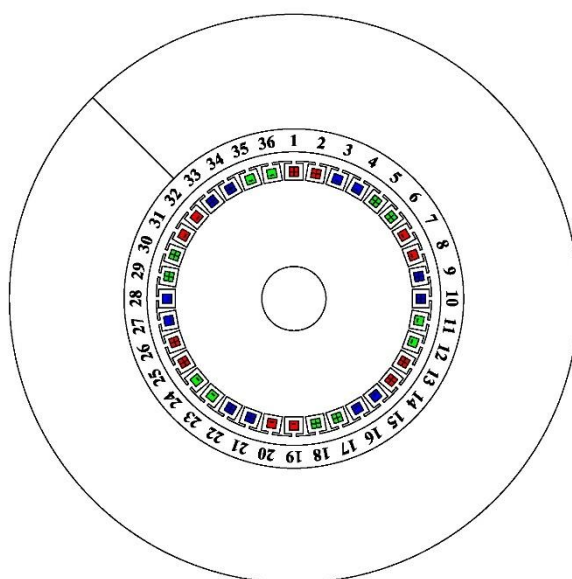
$$B = f(|H|) \frac{H}{|H|} \quad (3.7)$$

В якості джерела струму в моделі використовуються багатовиткові обмотки статора, рис. 3.2. Обмотки забезпечують зовнішню щільність струму в напрямку провідників згідно рівняння [62]:

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

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 [62].

Моделювання здійснено для геометрії феромагнітного ротора, представленої на рис. 3.3. Кінцево-елементну сітку моделі було створено в програмному середовищі Comsol Multiphysics як сітку під контролем програмної фізики. Особливу увагу було приділено повітряному проміжку на межі розподілу частини статора та ротора електромеханічного пристрою [62]. Статистика сітки наведена в табл. 3.1.



AAbbCCaaBBccAAbbCCaaBBccAAbbCCaaBBcc

Рис. 3.2. Схема обмотки статора

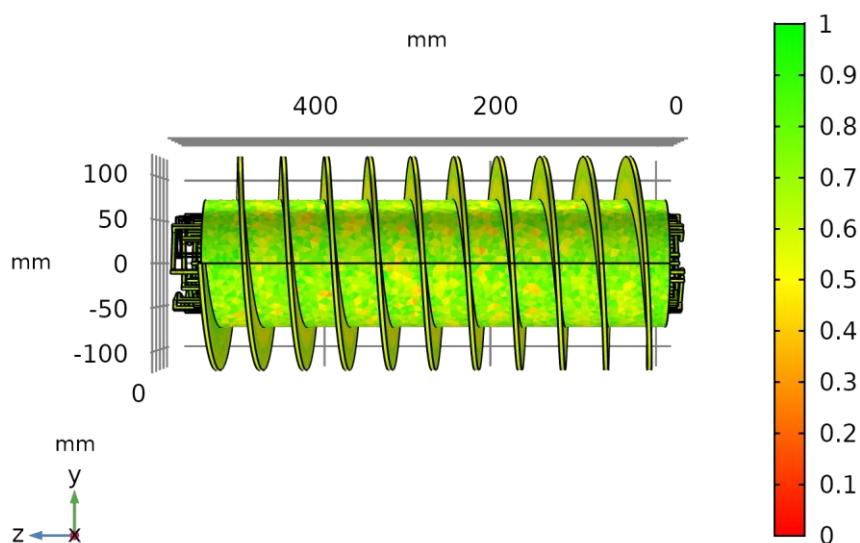


Рис. 3.3. Кінцево-елементна сітка феромагнітного ротора двошнекового електромагнітного гідролізера

Табл. 3.1. Кінцево-елементна сітка феромагнітного ротора двошнекового електромагнітного гідролізера

Параметри сітки	Значення
Mesh vertices	241325
Tetrahedra	1444151
Triangles	277074
Edge elements	49887
Vertex elements	2759
Number of elements	1444151
Minimum element quality	0,0307
Average element quality	0,613
Element volume ratio	2,027E-6
Mesh volume	1,251E8 mm ³

Кінцево-елементне моделювання було здійснено для моделі з параметрами наведеними в табл. 3.2.

Табл. 3.2. Параметри одного статора феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера

Обрані параметри	
Струм обмотки статора	10,5 А
Час моделювання	Діапазон(0, 0.1, 1) с
Частота	50 Гц

Матеріалами моделі були обрані: Soft iron (without losses) в якості матеріалу статорів; Iron в якості матеріалу нерухомого 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, крива намагнічування сталі Ст3 представлена на рис. 3.4 [62].

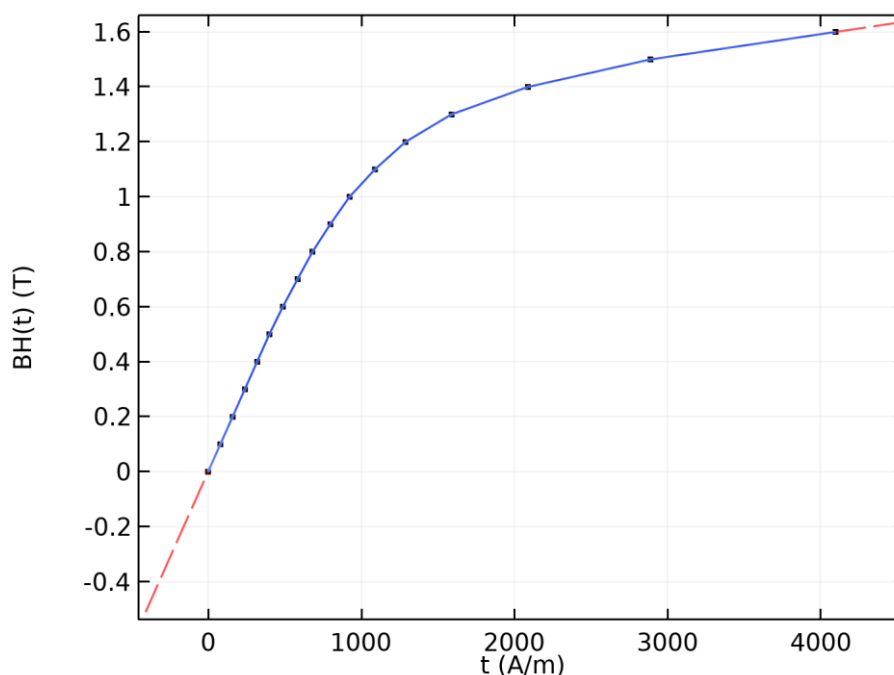


Рис. 3.4. В-Н крива намагнічування сталі Ст3

Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла. Розподіл магнітної індукції на поверхні феромагнітного ротора представлений на рис. 3.5, 3.6. Помітно, що дискретне розташування статорів по осевій 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 Тл, а в проміжках між статорами –

0,15 Тл. По колу циліндричної поверхні ротора утворені 6 широких зон з рівнем магнітної індукції 0,6 Тл і 6 вузьких зон з рівнем 0,1 Тл, які чергуються одна з одною [62].

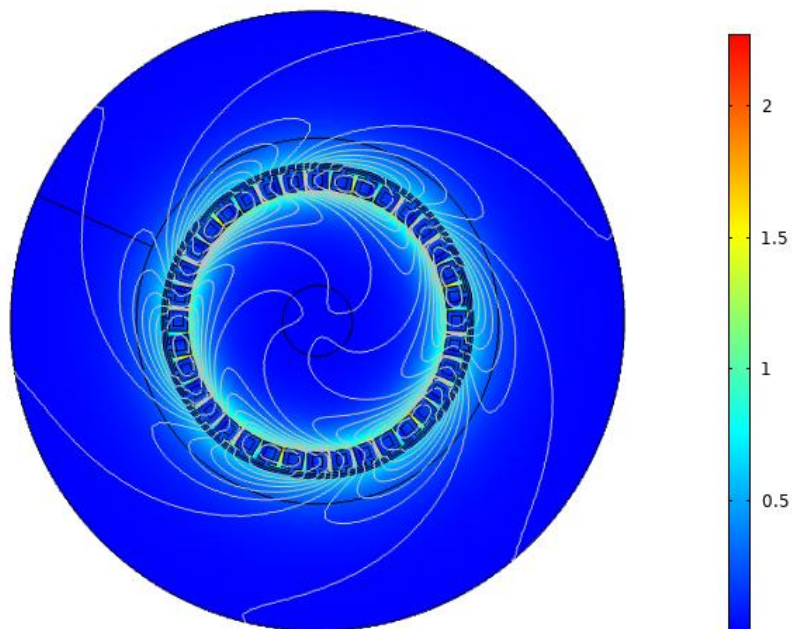


Рис. 3.5. Зображення розподілу магнітної індукції для поперечного січення геометрії гідролізера, Тл

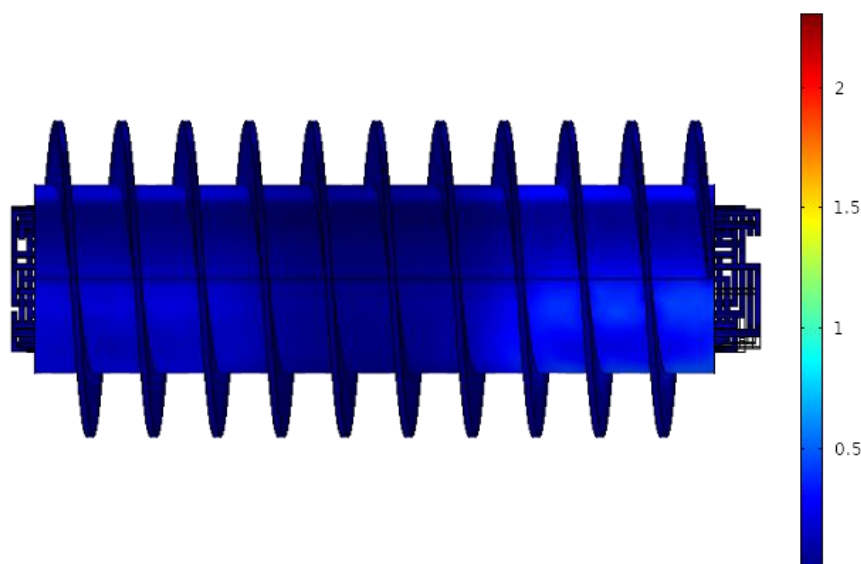


Рис. 3.6. Тривимірне зображення розподілу магнітної індукції на поверхні феромагнітного ротора, Тл

На рис. 3.7, 3.8 представлені криві магнітної індукції, які побудовані для тривимірної моделі феромагнітного ротора у напрямку шнекової навивки за діаметру валу шнека 144 мм. Діапазони 0-1100 мм та 2500-4000 мм для кривої побудованої на поверхні ротора та 0-2000 мм, 4500-7000 мм – для кривої побудованій безпосередньо по верхній грані навивки за діаметру навивки 244 мм і відповідають шляху безпосередньо над статорами. Екстремуми на графіках у напрямку навивки шнеку відповідають зонам дії шести полюсів і відповідної модуляції зубцевими гармоніками [62].

Графічне представлення розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера представлено на рис. 3.9. Для кількісної оцінки, середні та максимальні значення магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера наведено в табл. 3.3 [62].

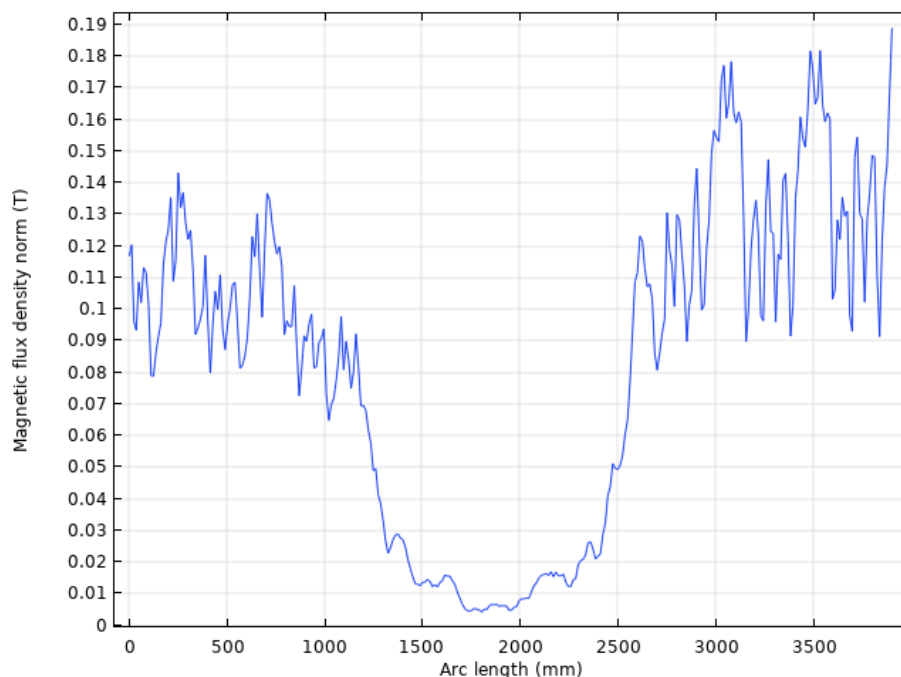


Рис. 3.7. Графік розподілу магнітної індукції на поверхні ротора, Тл

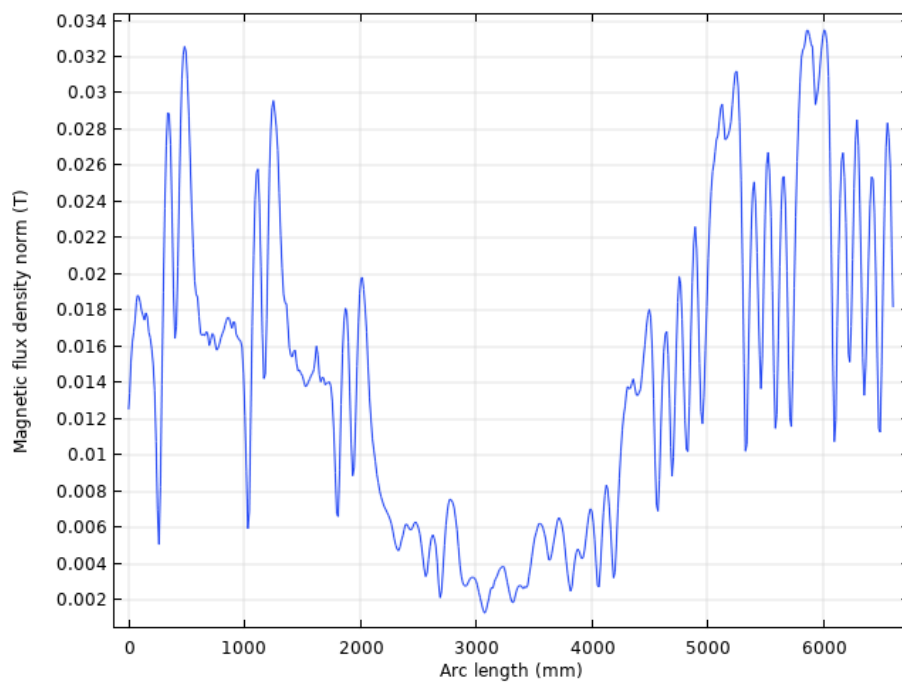


Рис. 3.8. Графік розподілу магнітної індукції по верхній грані лопаток ротора,
Тл

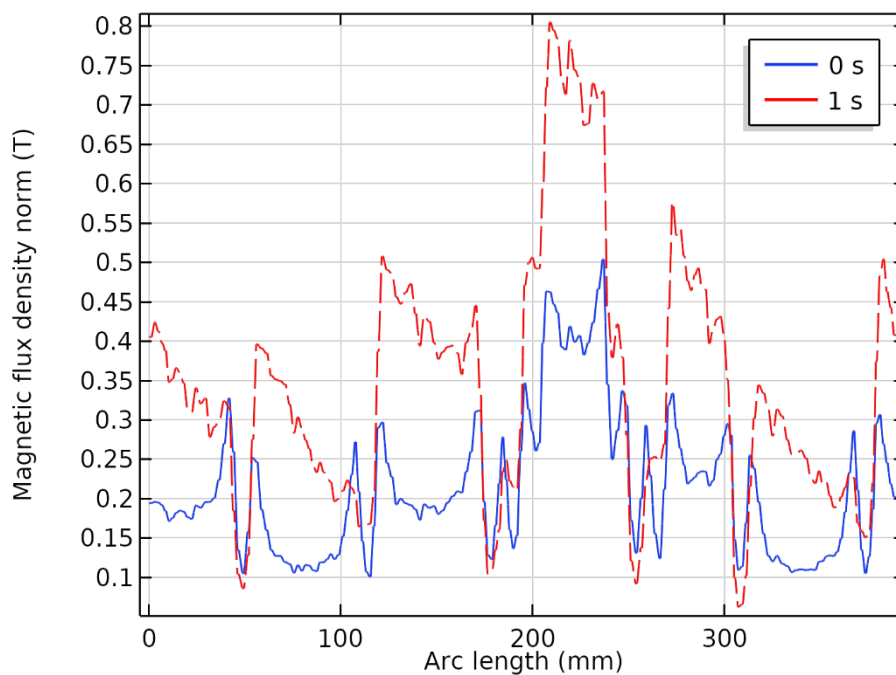


Рис. 3.9. Графічне представлення магнітної індукції в повітряному проміжку
електромеханічного гідролізера, Тл

Табл. 3.3. Середні та максимальні значення магнітної індукції в повітряному проміжку електромеханічного гідролізера

Час, с	Середнє значення, Тл	Максимальне значення, Тл
0	0,216174	0,46575
0,1	0,347887	0,794864
0,2	0,348252	0,796307
0,3	0,348275	0,796473
0,4	0,348284	0,796515
0,5	0,348277	0,796508
0,6	0,348277	0,796515
0,7	0,348278	0,79652
0,8	0,348277	0,79652
0,9	0,348285	0,796534
1	0,348285	0,796536

Розподіл щільності струму та магнітного векторного потенціалу представлені на рис. 3.10, 3.11. 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} . 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 [62].

Графіки щільності струму представлені на рис. 3.12, 3.13. З рисунків помітно, що максимальне значення щільності струму на поверхні феромагнітного ротора становить $1,5 \cdot 10^6$ А/м², мінімальне $0,1 \cdot 10^6$ А/м², для верхньої грані шнекової навивки феромагнітного ротора ці значення становлять $2,1 \cdot 10^5$ А/м² та $0,6 \cdot 10^5$ А/м² відповідно. Ці значення відмінні на кінцевих ділянках ротора, де переважає поперечна складова вихрових струмів, а також для ділянок входу магнітного поля в феромагнітний ротор, де вихрові струми мають переважно аксіальний напрямок [63].

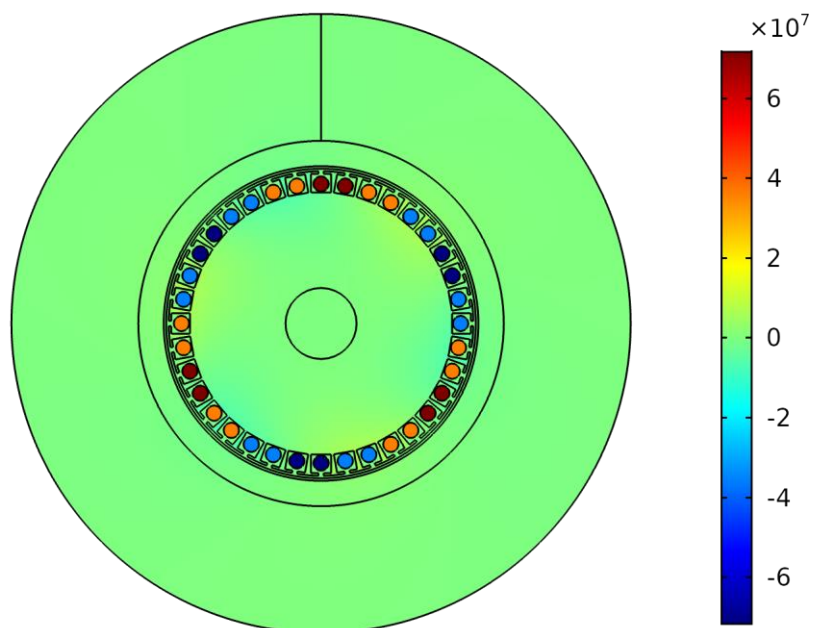


Рис. 3.10. Зображення щільності струму для поперечного січення геометрії,
 A/m^2

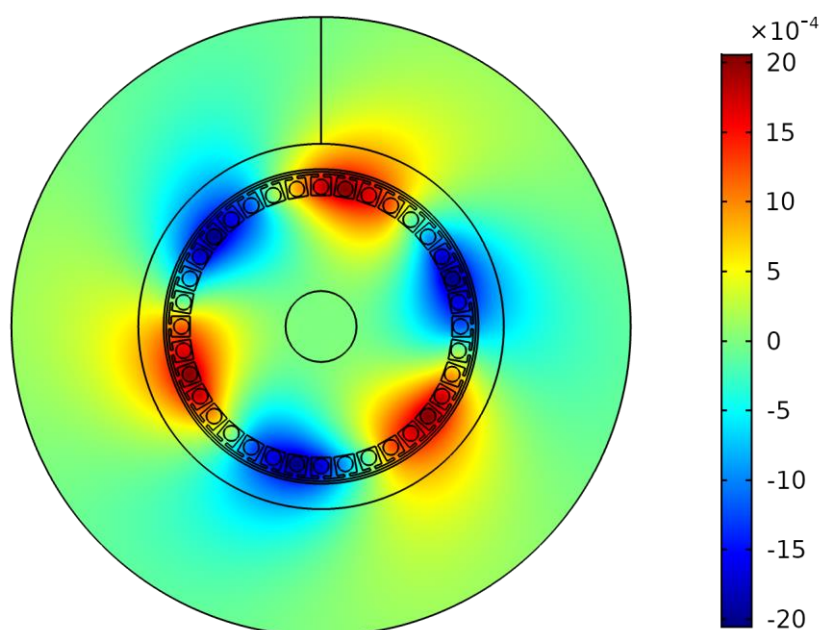


Рис. 3.11. Зображення магнітного векторного потенціалу для поперечного
січення геометрії, $Вб/м$

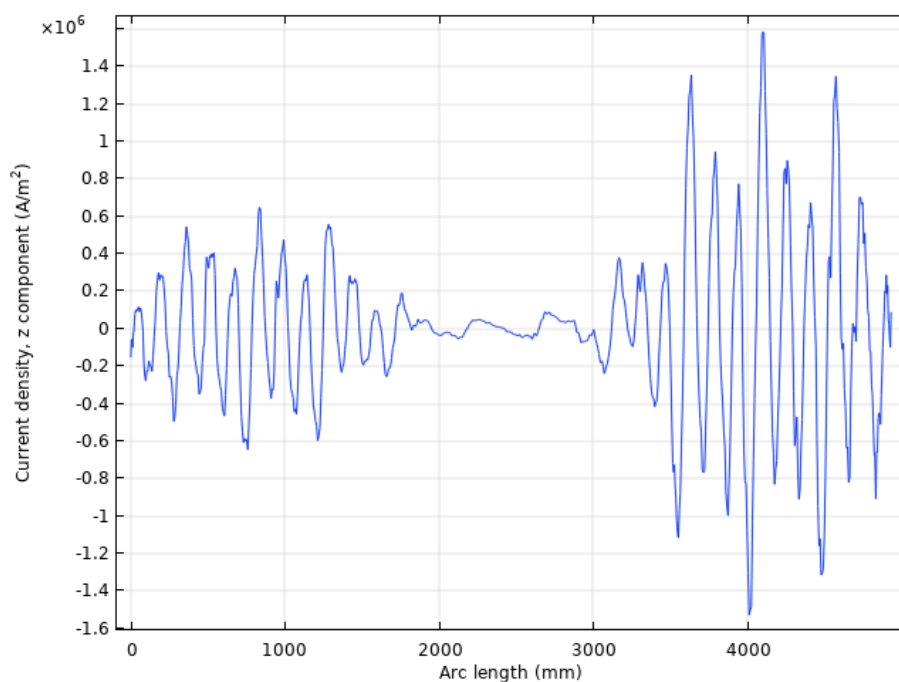


Рис. 3.12. Графік щільності струму побудований на поверхні феромагнітного ротора, А/м²

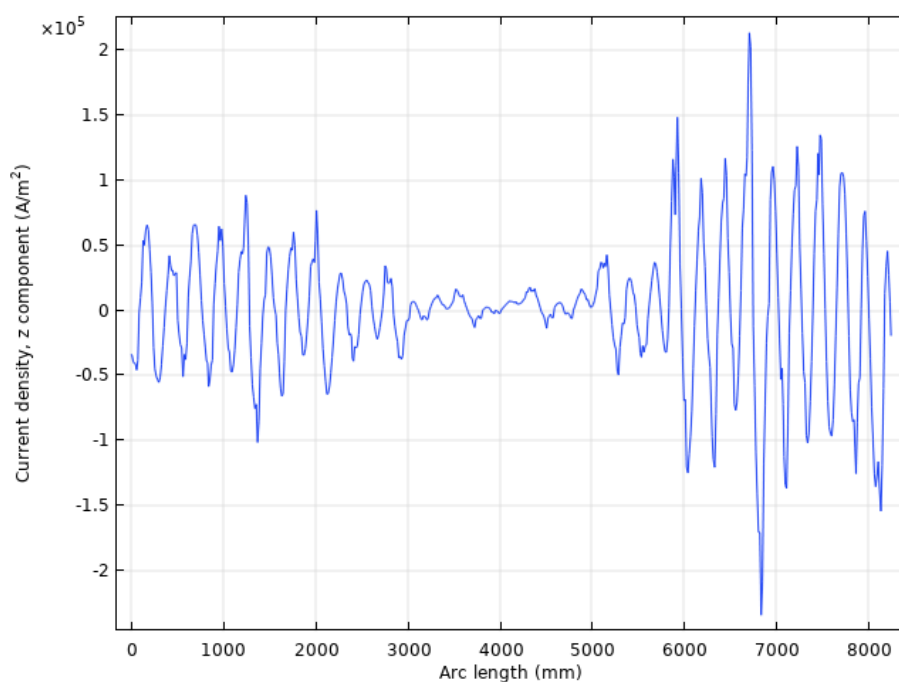


Рис. 3.13. Графік щільності струму побудований на верхній грані шнекової навивки феромагнітного ротора, А/м²

3.2. Моделювання електромеханічних процесів

Електромеханічні характеристики робочого елемента двошнекового електромеханічного гідролізера – феромагнітного ротора, що запропонований даним

дисертаційним дослідженням, визначаються шляхом побудови математичної моделі згідно методу скінченних елементів, доповненою рівняннями електромагнітної задачі (рівняння 3.1-3.8).

Електромагнітний момент обчислюється шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензору напруженості Максвелла [62]:

$$F = \int_{\partial\Omega} nT dS \quad (3.9)$$

де F – сила як граничний інтеграл тензору напруженості, Н; T – тензор електромагнітного поля; n – вектор нормалі до площини S [62].

$$\tau = \int_{\partial\Omega} (r - r_0) \times (nT) dS \quad (3.10)$$

де τ – обертовий момент, Н·м; r_0 – точка на осі обертання [62].

$$\tau_{ax} = \frac{r_{ax}}{|r_{ax}|} \cdot \tau \quad (3.11)$$

де τ_{ax} – обертовий момент відповідно до осі, Н·м; r_{ax} – точка на осі [62].

Тензор напруженості Максвелла використовується для оцінки сил нормальної та тангенціальної складової тензору напруженості за наступними рівняннями [62]:

$$\sigma_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \quad (3.12)$$

де σ_r – нормальна складова електромагнітного зусилля, Н/м²; B_n – нормальна складова щільності магнітного потоку, Тл; B_t – тангенціальна складова щільності магнітного потоку, Тл [62].

$$\sigma_t = \frac{1}{\mu_0} (B_n \cdot B_t) \quad (3.13)$$

де σ_t – тангенціальна складова електромагнітного зусилля, Н/м² [62].

Електромагнітний момент оцінений шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензору напруженості, зображено на рис. 3.14, 3.15. Графічне

представлення електромагнітного тензору напруженості виконано шляхом побудови кривої на поперечному січені феромагнітного ротора в аксіальному напрямку [62].

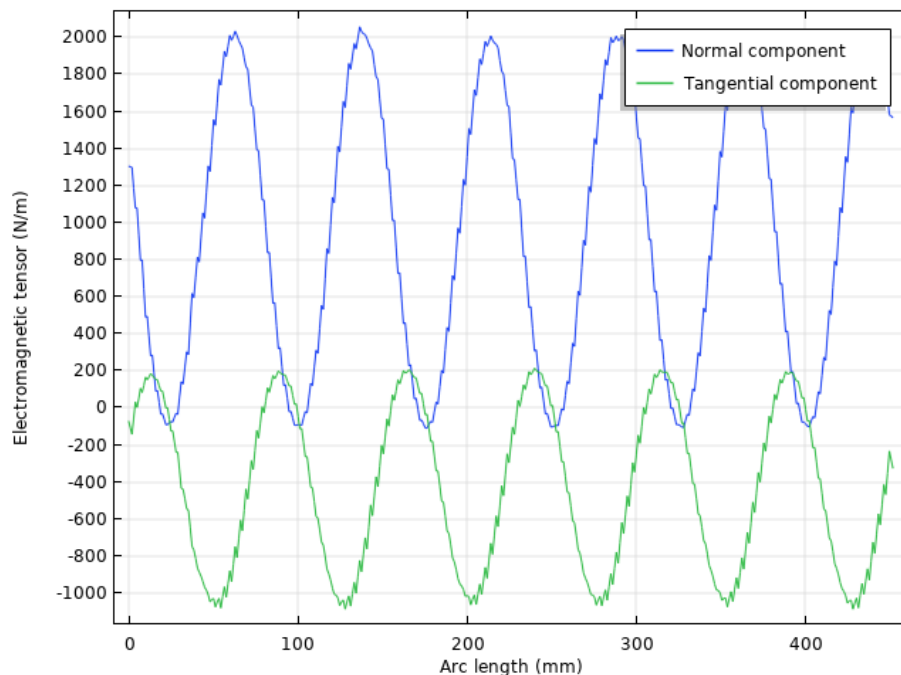


Рис. 3.14. Електромагнітний тензор напруженості на поверхні феромагнітного ротора, Н/м

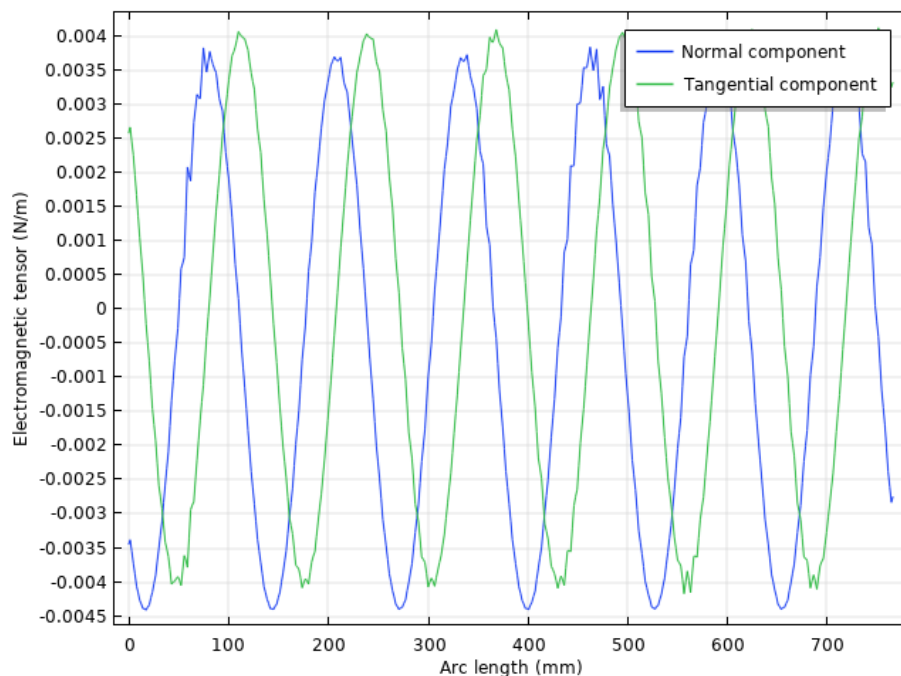


Рис. 3.15. Електромагнітний тензор напруженості на верхній грані лопаток ротора, Н/м

Графічну залежність обертового моменту від кутової швидкості феромагнітного ротора зображено на рис. 3.16. Графік побудований шляхом параметричного аналізу за умови однакового напрямку обертового магнітного поля статорів і має характерну для двигунів з масивним ротором залежність обертового моменту від кутової швидкості ротора-шнека [62].

На рис. 3.17 зображено залежність обертового моменту як функції від часу. За результатами математичного моделювання встановлено, що за малих значень кутової швидкості підтримується задовільне значення електромагнітного моменту, що забезпечує можливість підтримання ефективного технологічного процесу за прийнятої геометрії та параметрів електромагнітної системи двошнекового електромеханічного гідролізера [62].

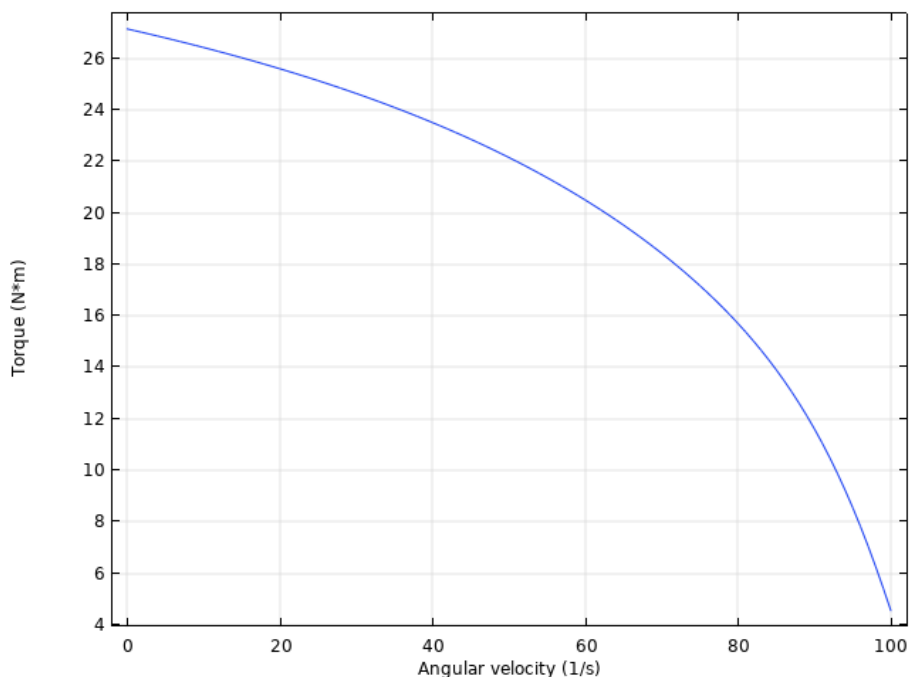


Рис. 3.16. Графік залежності обертового моменту від кутової швидкості феромагнітного ротора, Н·м

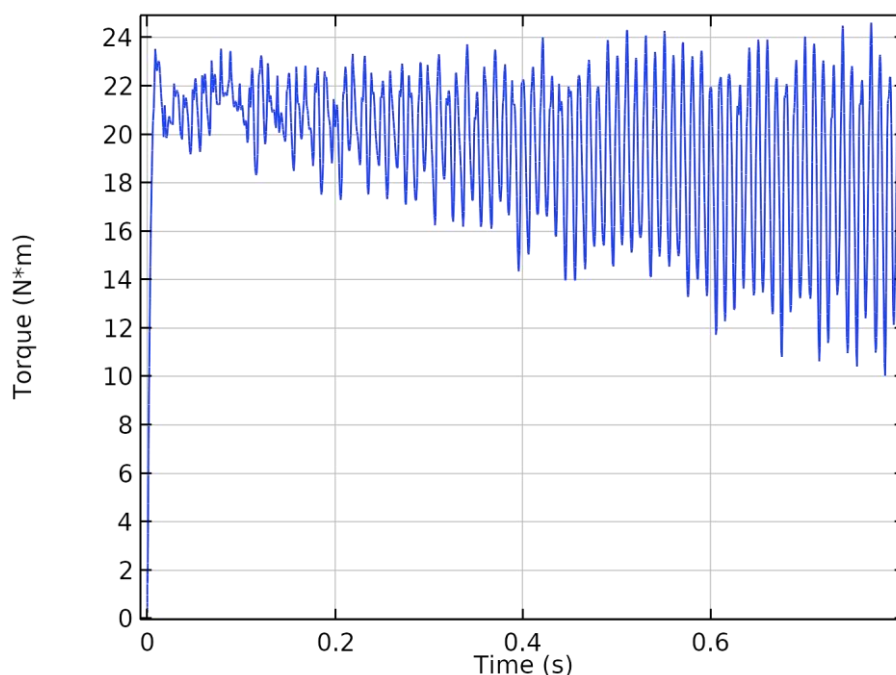


Рис. 3.17. Графік обертового моменту як функції від часу, для феромагнітного ротора з шнековою навивкою, Н·м

3.3. Моделювання вібраційних процесів

Метою математичного дослідження є аналіз вібраційних процесів, що виникають в робочому елементі двошнекового електромеханічного гідролізера за нормальних режимів роботи. Для досягнення мети було розроблено математичну модель феромагнітного ротора, проведено аналіз сил, що виникають в пристрої та сформовано рекомендації щодо доцільності застосування двошнекового електромеханічного гідролізера для переробки побічних продуктів птахівництва.

Процеси вібрації описуються рівняннями динаміки тіл і доповнюють рівняння фізик магнітних полів та рухомих машин (рівняння 3.1-3.13) [64].

Фізика динаміки тіл описується згідно наступних рівнянь [65]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot (FS)^T + F_v \quad (3.14)$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м³; $\frac{\partial u}{\partial t}$ – швидкість відносно центру обертання,

рад/с; u – зміщення відносно центр обертання, рад; F – вектор сили, Н; F_v – сила на

одиницю об'єму, Н/м³; I – тензор напруженості Коши; S – другий тензор напруження Піоли-Кірхгофа; T – тензор напруження Біота [65].

Властивості пружних матеріалів визначаються за наступними рівняннями [65]:

$$S = S_{ad} + J_i F_{inel}^{-1} (C : \varepsilon_{el}) F_{inel}^{-T} \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{1}{2} (F_{el}^T F_{el} - I) \quad (3.16)$$

$$F_{el} = F F_{inel}^{-1} \quad (3.17)$$

$$S_{ad} = S_0 + S_{ext} + S_q \quad (3.18)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u + (\nabla u)^T \nabla u] \quad (3.19)$$

$$C = C(E, v) \quad (3.20)$$

де J_i – внутрішня змінна не пружного об'єму; F_{inel} – кінцевий тензор, описує відображення матеріального фрейму на проміжний; C – тензор деформації Коші-Гріна; ε_{el} – пружний тензор правих деформацій Гріна-Лагранжа; F_{el} – тензор пружних правих деформацій Коши-Гріна; S_0 – тензор початкового напруження; S_{ext} – тензор зовнішніх напружень; S_q – тензор додаткових напружень, пропорційний швидкості пружної деформації матеріалу; ε – лінійна деформація [65].

Початкові значення поля зміщення і поля швидкості визначаються за рівняннями [65]:

$$u_0 = (-r + \hat{\Omega}(\hat{\Omega} \cdot r))(1 - \cos \varphi) + (\hat{\Omega} \times r) \sin \varphi + u \quad (3.21)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_0 = (\omega \times (r + u_0 - u)) + \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.22)$$

$$r = (X - X_c) \quad (3.23)$$

де u_0 – початкове зміщення, рад; r – відстань до центру координат, м; $\hat{\Omega}$ – вісь обертання; φ – кут обертання; ω – кутова швидкість, с⁻¹; X_c – центр обертання; X – матеріальні координати будь-якої точки жорсткої області [65].

Фізика жорстких тіл описується наступними рівняннями [65]:

$$m \frac{d^2}{dt^2} u + \sum F_I = \sum F_{ext} \quad (3.24)$$

$$RIR^T \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{d\phi}{dt} \times \left(RIR^T \frac{d\phi}{dt} \right) + \sum M_I = \sum M_{ext} \quad (3.25)$$

$$m = \int \rho dV \quad (3.26)$$

$$I = \int \left((X_d \cdot X_d) E_3 - X_d \cdot X_d^T \right) \rho dV \quad (3.27)$$

$$X_d = X - X_M \quad (3.28)$$

$$X_M = \frac{\int \rho X dV}{m} \quad (3.29)$$

$$R \rightarrow R(a, b, c, d) \quad (3.30)$$

$$\{a, b\}_0^T = \left\{ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \hat{\Omega} \right\}^T \quad (3.31)$$

$$\left(\frac{\partial \{a, b\}^T}{\partial t} \right)_0 = \frac{I}{2} \left(\{0, \omega\}^T \otimes \{a, b\}_0^T \right) \quad (3.32)$$

де m – маса інерційних властивостей матеріалу, кг/м²; F_I – тензор інерційної сили; R – матриця обертання; M_I – тензор інерційного моменту; M_{ext} – тензор зовнішнього моменту; E_3 – одинична матриця; X_m – центр мас; \otimes – кватерніонне множення [65].

Вібраційний аналіз виконано за умов, що статор, ротор та вал вважаються жорсткими [65].

Електромагнітний момент розраховується як для ротора, так і для статора. Оскільки ротор здатний вільно обертатись навколо своєї осі, він розпочинає прискорюватись долаючи інерційний опір. Розбіжності між статором та ротором викликають результуючі електромагнітні сили. Оскільки ці сили коливального характеру, вони викликають вібрацію [65].

На рис. 3.19 зображено електромагнітні сили як функція від часу, що являються вібраціями в поперечному та осьовому напрямках відносно ротора. Частотний спектр електромагнітних сил зображено на рис. 3.18. З результатів моделювання зрозуміло,

що частота цих сил знаходиться в діапазоні 90-120 Гц, що майже в двічі перевищує електричну частоту [65].

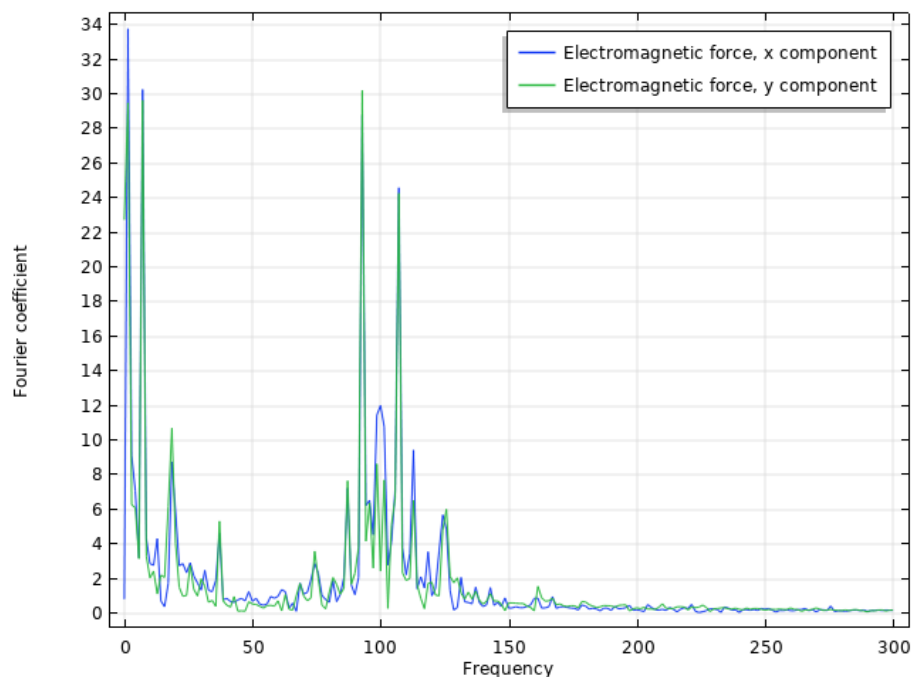


Рис. 3.18. Частотний спектр електромагнітних сил в феромагнітному роторі

Під впливом вібрації в кератинових матеріалах відбуваються перетворення, властивості яких залежать від інтенсивності вібрації. При амплітудних значеннях прискорень, що не перевищують прискорення вільного падіння, кератинові матеріали переходять у стан псевдозрідження [40]. Цей стан призводить до рівномірного розподілу тепла між частинами матеріалу переробки, що покращує енергоефективність та продуктивність системи в цілому [65].

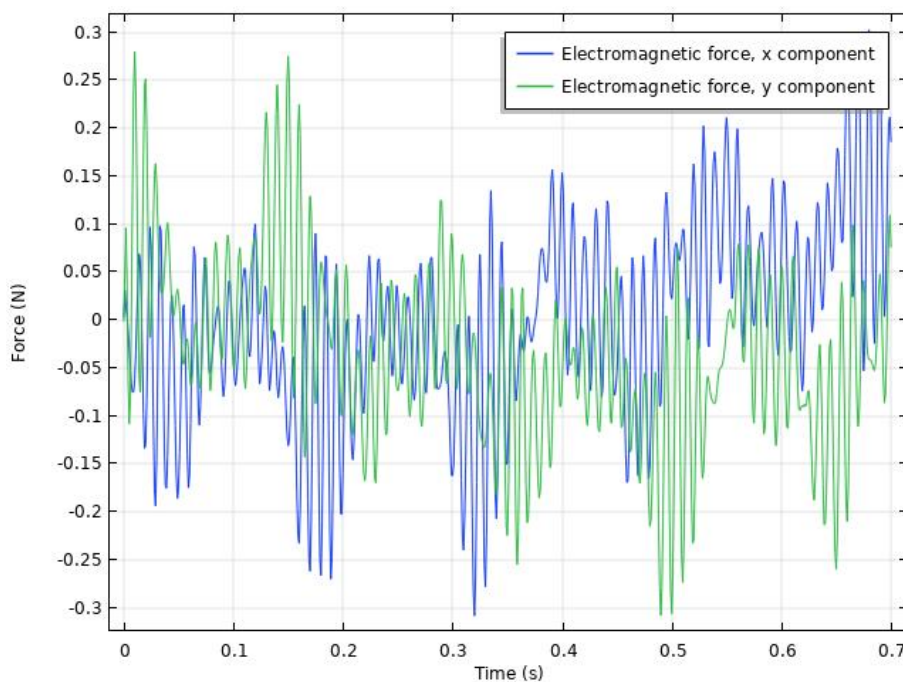


Рис. 3.19. Електромагнітні сили в феромагнітному роторі, що діють в поперечному та осьовому напрямках

3.4. Моделювання теплових процесів

Розробка двошнекового електромеханічного гідролізера, запропонованого в роботі потребує детального аналізу параметрів теплообміну. Математичну модель поліфункціонального електромеханічного перетворювача з феромагнітним ротором, враховуючи повне використання дисипативної енергії, структурну, функціональну та теплову інтеграцію запропоновано в роботі [66]. Дослідження теплового нагріву пристрою в середовищі сипучого матеріалу з використанням програмного забезпечення MATLAB Simulink виконано шляхом побудови еквівалентної теплової схеми. Отримано графічні залежності температури нагріву поліфункціонального електромеханічного перетворювача в залежності від часу. Не зважаючи на те, що результати моделювання з високою точністю відповідають замірам температури нагріву виконаним експериментально, модель не розкриває повну картину температурного поля, а лише деяке середнє значення температури для окремих елементів пристрою. В зв'язку з складністю конструкції феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера доцільно володіти повною картиною його характеристик на попередньому етапі проектування. Таким чином, метою

дослідження є розробка математичної моделі феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера для проведення аналізу теплових процесів, що виникають в процесі його роботи [63].

Моделювання нагріву феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера реалізовано шляхом використання фізики магнітних полів (рівняння 3.1-3.8), теплопередачі в твердих тілах та мультифізичного зв'язку – електромагнітний нагрів у частотно-перехідній області дослідження [67]. Рівняння теплообміну відповідає диференціальній формі закону Фур'є, яка може містити такі розширення, як джерело тепла [63]:

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = d_z Q + q_0 + d_z Q_{ted} \quad (3.33)$$

де d_z – товщина домену в неплюському напрямку, м; ρ – щільність, кг/м³; C_p – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К); T – температура, К; t – час, с; u – вектор швидкості, м/с; q – теплопровідний потік, Вт/м²; Q – джерело тепла, Вт/м³; q_0 – внутрішній тепловий потік, Вт/м²; Q_{ted} – термопружне демпфування, Вт/м³ [63].

$$q = -d_z k \nabla T \quad (3.34)$$

де k – теплопровідність, Вт/(м·К) [63].

Теплоізоляція на зовнішній межі моделі визначається з рівняння [63]:

$$-n \cdot q = 0 \quad (3.35)$$

де n – показник заломлення [63].

Тепловий потік з поверхні феромагнітного ротора та його лопатей визначається за рівняння [63]:

$$-n \cdot q = d_z q_0 \quad (3.36)$$

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \quad (3.37)$$

де h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{ext} – зовнішня температура, К [63].

Випромінювання від поверхні моделі до навколишнього середовища визначається з рівняння [63]:

$$-n \cdot q = d_z \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad (3.38)$$

де ε – випромінювальна здатність поверхні; σ – постійна Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T_{amb} – температура зовнішнього середовища, К [63].

Мультифізична зв'язка електромагнітного нагріву реалізована згідно наступних виразів [63]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (3.39)$$

де Q_e – електромагнітне джерело тепла, Вт/м³ [63].

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (3.40)$$

де Q_{rh} – резистивні втрати, Вт/м²; Q_{ml} – магнітні втрати, Вт/м² [63].

$$Q_{rh} = \frac{I}{2} Re(J \cdot E^*) \quad (3.41)$$

$$Q_{ml} = \frac{I}{2} Re(i \omega B \cdot H^*) \quad (3.42)$$

де 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 [63].

Просторове зображення об'ємної щільності електричних втрат феромагнітного ротора представлено на рис. 3.20. 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 [63].

Результати моделювання теплової задачі, представлені на рис. 3.21, 3.22. Моделювання було виконано за умови, що обидва статори феромагнітного ротора працюють в двигунному режимі – обертове магнітне поле статорів рухається в одному і тому ж напрямі [63].

З рис. 3.21, 3.22 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 [63].

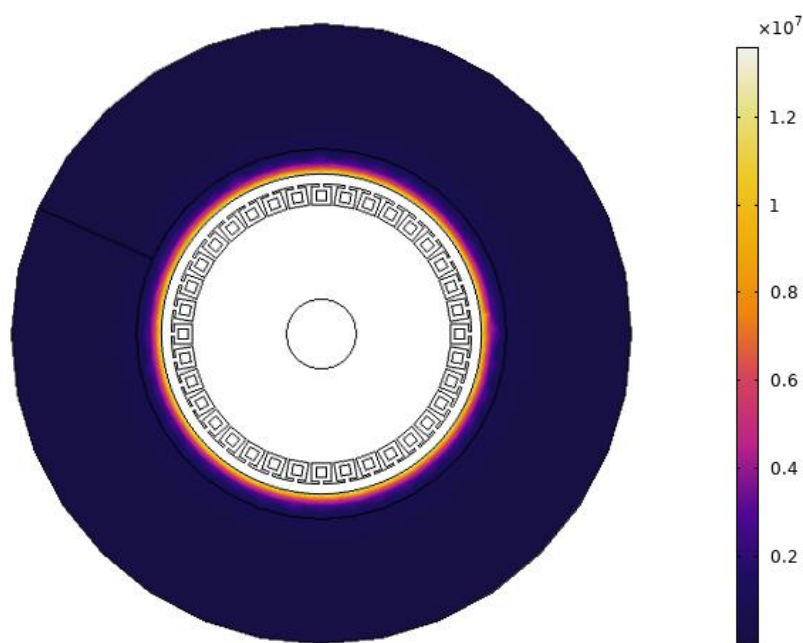


Рис. 3.20. Просторове зображення об'ємної щільності електричних втрат,
Вт/м³

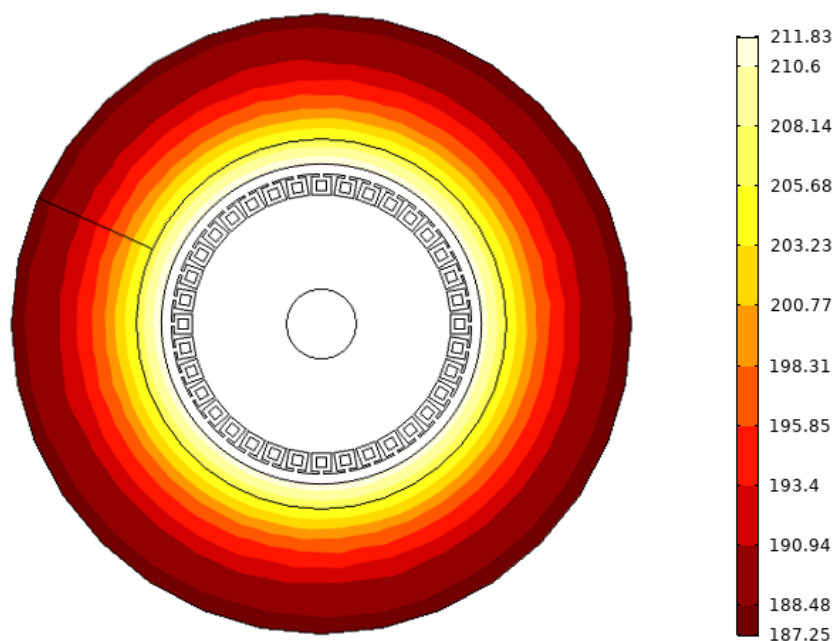


Рис. 3.21. Просторове зображення температури феромагнітного ротора, °C

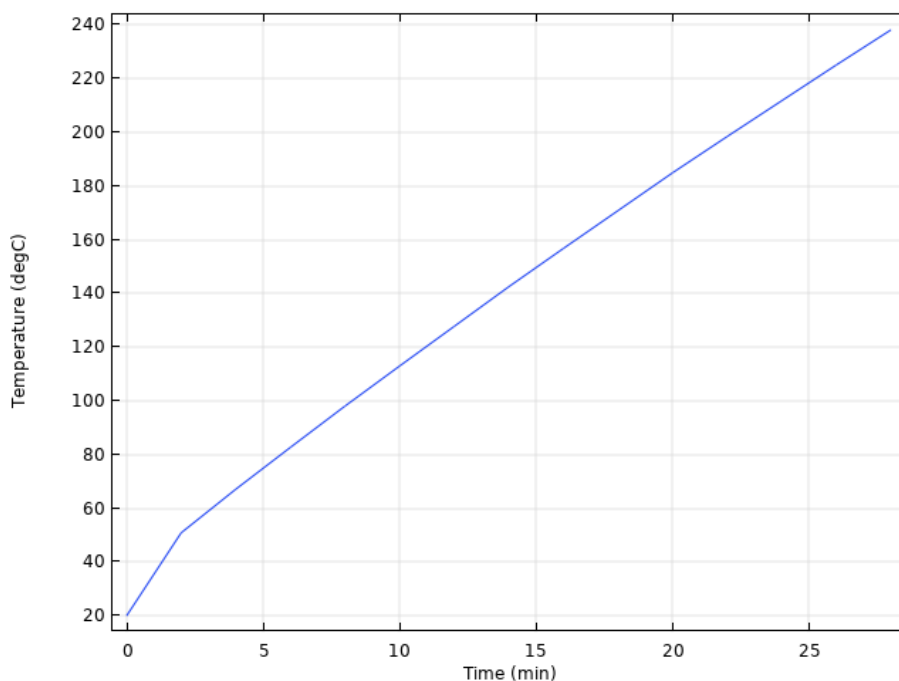


Рис. 3.22. Графік температури феромагнітного ротора за час його роботи – 30

хв

З рис. 3.22 помітно, що феромагнітний ротор нагріється до температури необхідної для проведення гідротермічного гідролізу за 25 хв. Подальший нагрів можна регулювати вмиканням одного з статорів в гальмівному режимі роботи – обертове магнітне поле статора в гальмівному режимі рухається у напрямку

протилежному до магнітного поля статора в двигунному режимі роботи та використанням додаткового охолодження [63].

3.5. Дослідження двошнекового електромеханічного гідролізера із застосуванням ферроколоїдної нанорідини

За умов досягнення оптимізації системи, підвищення ефективності досягається шляхом розробки нових активних та ізоляційних матеріалів. Нанорідина є таким матеріалом. Нанорідина – суспензія наночасток, дисперсного середовища та стабілізатора. В залежності від типу наночасток суспензія володіє супер-, фери- або феромагнітними властивостями. Завдяки своїм властивостям нанорідина займає вагоме місце в різних сферах науки та техніки. Можливим варіантом практичного застосування нанорідини – вдосконалення обертової електричної машини шляхом наповнення рідиною проміжку між статором та ротором [68]. Призначення цієї рідини – зменшення магнітного опору в проміжку. Таким чином досягається підвищення ефективності машини [59].

Існує декілька публікацій присвячених прогресу дослідження електричних машин з нанорідинним наповненням [68-60]. Ці публікації охоплюють основні аспекти теоретичних та експериментальних досліджень, однак питання застосування нанорідини у складних електромеханічних системах все ще потребують вивчення [59].

В цьому дослідженні був використаний кінцево-елементний метод математичного дослідження для оцінки достовірності розрахункових характеристик, що важливо для цієї машини з нанорідиною в зазорі, рис. 3.23 [59].

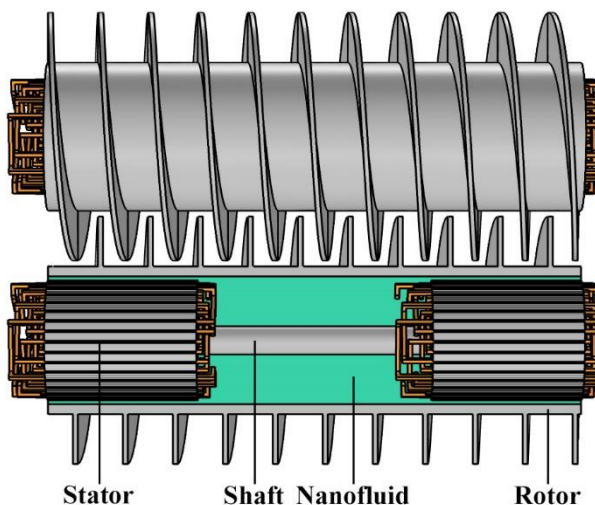


Рис. 3.23. Конструкція двошнекового електромеханічного гідролізера з нанорідинним наповненням

Аналіз електромагнітних полів та теплового нагріву реалізовано базуючись на рівняннях 3.1-3.8, 3.33-3.42.

Фізика рідини описується наступними рівняннями [71]:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F + (\rho - \rho_{ref})g \quad (3.43)$$

де p – тиск, Па; I – одинична матриця; K – невизначений множник Лагранжа; F – вектор об'ємної сили, Н/м³; ρ_{ref} – залежність щільності від температури; g – прискорення вільного падіння, м/с [59].

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (3.44)$$

$$K = \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (3.45)$$

де μ – динамічна в'язкість, Н·с/м² [59].

Граничні умови потоку рідини, нерухомої, рухомої і в обмежені стінами описуються рівнянням [59]:

$$u = u_{tr} \quad (3.46)$$

де u_{tr} – поступальна швидкість, м/с [59].

Рівняння руху рідини має наступний вигляд [59]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right), \quad (3.47)$$

$$\phi = \text{phils}$$

де ϕ – функція рівню рідини; γ – параметр повторної ініціалізації, м/с; ε_{ls} – керуючий параметр товщини, м [59].

Гранична умова рівня рідини визначається з рівняння [59]:

$$n \cdot \left(\varepsilon_{ls} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) = 0 \quad (3.48)$$

де n – вектор нормальний до границі рівню рідини [59].

Щільність являється функцією рівня і визначається [59]:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\phi \quad (3.49)$$

Тоді, динамічна в'язкість визначається з рівняння [59]:

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\phi \quad (3.50)$$

На рис. 3.24 представлено тривимірне зображення щільності розподілення магнітного поля на поверхні феромагнітного ротора. Для наглядності модель ротора у верхній частині зображення виконана з класичним повітряним проміжком, у нижній – з нанорідинним наповненням [59].

Очевидно, що за однакового значення струму статора, щільність магнітного поля в феромагнітному роторі з новим виконанням зазору більша – 0,17 Тл на поверхні ротора, 0,07 Тл на верхній грані лопаток ротора. Для звичайного виконання феромагнітного ротора ці значення становлять: 0,15 Тл на поверхні ротора, 0,045 Тл на верхній грані лопаток ротора [59].

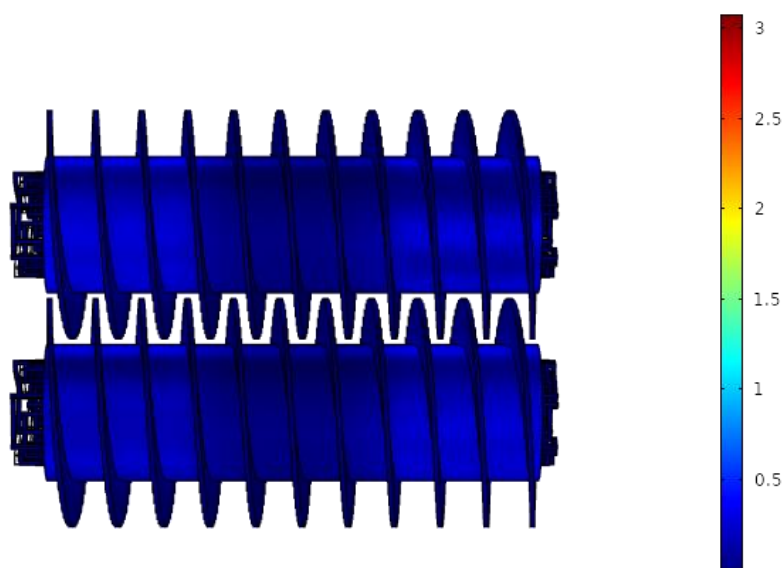


Рис. 3.24. Зображення щільності розподілення магнітного поля (Тл) на поверхні феромагнітного ротора

Результати моделювання теплової задачі представлені на рис. 3.25. У випадку протікання струму від джерела до статорів, жорстко закріплених на нерухомому валу феромагнітного ротора, в останньому обертове електромагнітне поле збуджує вихрові струми та нагріває його. При цьому відбувається акумуляція тепла в нанорідині, що розміщена у проміжку між феромагнітним ротором та його електромагнітною системою. Згідно результатів моделювання максимальна температура феромагнітного ротора з нанорідинним наповненням за час роботи 10 хв становить 175,26 °С, феромагнітного ротора звичайної конструкції 170,22 °С [59].

Графічна залежність обертового моменту від кутової швидкості феромагнітного ротора зображено на рис. 3.26. Графік побудований шляхом параметричного аналізу за умови однакового напрямку обертового магнітного поля статорів і має характерну для двигунів з масивним ротором залежність обертового моменту від кутової швидкості ротора-шнека [59].

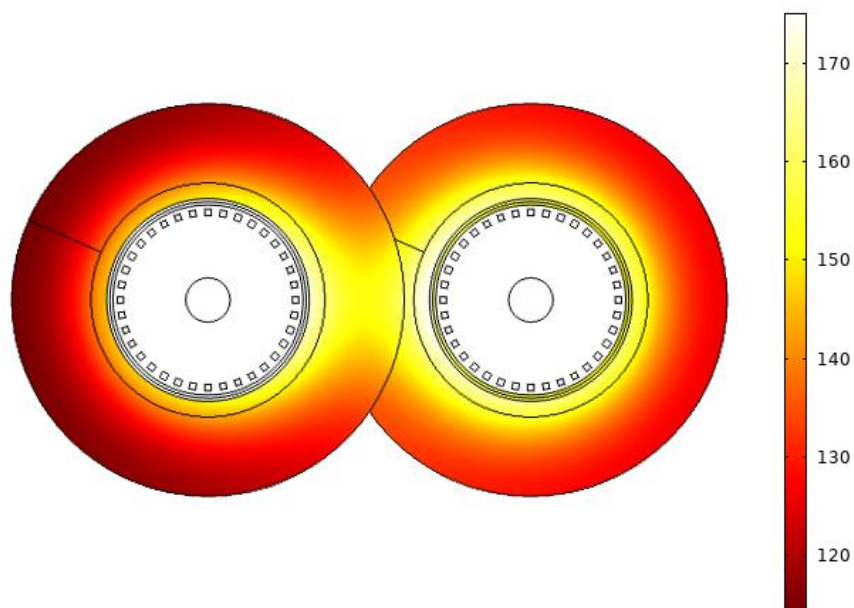


Рис. 3.25. Нагрів ($^{\circ}\text{C}$) феромагнітних роторів двошнекового електромеханічного гідролізера за умов нанорідинного заповнення ротора в правій частині зображення

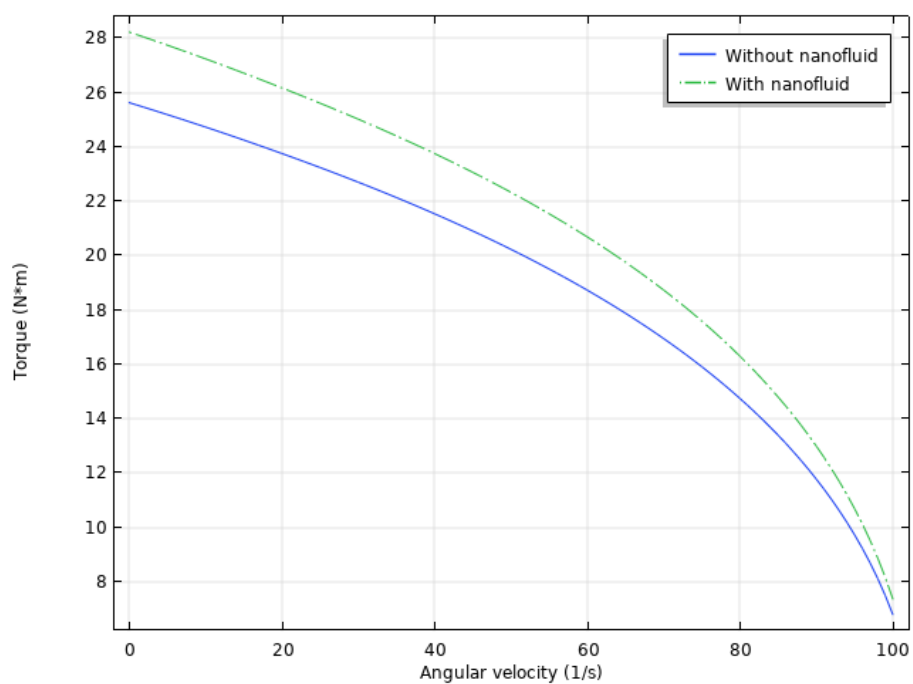


Рис. 3.26. Графік залежності обертового моменту від кутової швидкості феромагнітного ротора

Застосування нанорідини дозволяє підвищити обертовий момент приблизно на 8-10 % за рахунок зменшення магнітного опору повітряного проміжку, що відповідає результатам досліджень наведених в [68-70].

Застосування нанорідини вимагає чисельних досліджень її властивостей. Серед останніх публікацій відомо багато робіт присвячених дослідженню нанорідини. В роботі [72] проведено усесторонній огляд аспектів стабільності нанорідини на усіх етапах виготовлення та практичного застосування. Особливу увагу було приділено стабільності нанорідини в залежності від впливу температури, тиску та магнітного поля. Дослідження характеристик термомагнітної конвекції нанорідини на основі оксиду металу виконано в роботі [73]. В публікації виконано чисельне дослідження тепловиділення в залежності від напруженості магнітного поля, описано поля температури і швидкості термомагнітної конвекції, розраховано і зіставлений конвективний тепловий потік. Математичну модель, що описує магнітостатичні властивості ферроколоїдів та діелектричні властивості полярних рідин розроблено в роботі [74]. Модель заснована на співвідношенні між намагніченістю та парною кореляційною функцією просторово однорідної системи дипольних частин. В роботі отримані вирази для початкової магнітної сприйнятливості ферроколоїдів, визначено діелектричну проникність полярної рідини та намагніченість нанорідини. Дослідження магнітної сприйнятливості, кривої намагнічування та мікроструктури нанорідини в різних концентраційних та дипольних діапазонах моментів частинок за допомогою моделювання молекулярної динаміки виконано в роботі [75]. Встановлено, що утворення кластерів посилює намагніченість у слабких полях і, таким чином, призводить до більшої початкової сприйнятливості. Аналіз електричних машин з нанорідиною в зазорі виконано в роботах [68-70, 76]. Розподіл щільності магнітного потоку в середині електричних машин обчислено чисельним методом скінченних елементів. Ефективність електромагнітної сили та коефіцієнту потужності проаналізовано за допомогою двовимірного аналізу за методом кінцевих елементів. Хоча в роботах [68-70, 76] всесторонньо розглянуто застосування нанорідини в електричних машинах, враховано ефект тертя нанорідини, однак

магнітні властивості нанорідини залишились не розкритими, тому існує необхідність в розробці математичної моделі магнітних властивостей нанорідни [77].

В даному дослідженні моделювання кластерів нанорідини, визначення впливу диполь-дипольної взаємодії на криву намагнічування виконано з використанням методів молекулярної динаміки відповідно до робіт [74, 75, 78, 79]. Для моделювання прийнято, що всі наночастинки мають однаковий діаметр та дипольний момент. Точковий дипольний момент розміщений у центрі наночастинки і є постійним за величиною та напрямком відповідно до системи координат наночастинки, тоді [77]:

$$u_{DD}(\rho_{ij}, \mu_i, \mu_j) = \gamma \left(\frac{\mu_i \cdot \mu_i}{r_{ij}^3} - 3 \frac{(\mu_i \cdot \rho_{ij}) \cdot (\mu_j \cdot \rho_{ij})}{r_{ij}^5} \right) \quad (3.51)$$

$$\gamma = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad (3.52)$$

де u_{DD} – потенціал магнітної взаємодії між окремими частинками – диполь-дипольний потенціал взаємодії; μ_i, μ_j – дипольні моменти взаємодіючих частинок, Кл·м; r_{ij} – радіус-вектор між центрами частинок i та j ; γ – дипольярний префактор; μ_0 – вакуумна проникність, Гн/м [77].

Стерична взаємодія описується відштовхуючим потенціалом Уікса-Чандлера-Андерсена, що являється потенціалом Леннарда-Джонса з радіусом зрізу за мінімального значення потенціалу [77]:

$$u_{sr}^{WCA}(r_{ij}) = \begin{cases} 4\varepsilon_{ij} \left[\left(\frac{\sigma_p}{r_{ij}} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_p}{r_{ij}} \right)^6 \right] + \varepsilon_{ij}, & r_{ij} < r_{cut} \\ 0, & r_{ij} \geq r_{cut} \end{cases} \quad (3.53)$$

$$r_{cut} = 2^{\frac{1}{6}} \cdot \sigma_p \quad (3.54)$$

де r_{cut} – радіус зрізу за мінімального значення потенціалу, нм; ε_{ij} – потенціал безперервний на радіусі зрізу В·м/Кл; r_{ij} – відстань між центрами двох взаємодіючих частинок, нм; σ_p – діаметр частинки, нм [77].

Потенціал взаємодії описується наступним рівнянням [77]:

$$u(r_{ij}, \mu_i, \mu_j) = u_{sr}(r_{ij}) + u_{DD}(r_{ij}, \mu_i, \mu_j) \quad (3.55)$$

де u – потенціал взаємодії; u_{sr} – відштовхуючий потенціал [77].

Силу дипольної взаємодії між двома частинками визначають за допомогою параметру дипольного зв'язку, що являється відношенням мінімальної енергії двох частинок в конфігурації «голова-хвіст» до їх теплової енергії [77]:

$$\lambda = \frac{\mu_0 \mu^2}{4\pi\sigma_p^3 k_B T} \quad (3.56)$$

де λ – дипольна взаємодія; μ – величина магнітного моменту, А·м²; $k_B T$ – тепла енергія [77].

Під впливом зовнішнього магнітного поля відбувається взаємодія частинок з полями [77]:

$$U_z = -\mu \cdot H \quad (3.57)$$

де H – вектор напруженості магнітного поля, А/м [77].

Відношення мінімуму Земановської енергії на частинку до теплової енергії називається параметром Ланжевена [77]:

$$\alpha = \frac{\mu_0 \mu H}{k_B T} \quad (3.58)$$

де α – параметр Ланжевена [77];

Намагнічення нанорідини в напрямку магнітного поля визначається за наступними рівняннями [77]:

$$M = \frac{\sum_i \mu_i^H}{V} \quad (3.59)$$

де M – намагнічення, А/м; V – об'єм, м³ [77].

Наночастинки з розбіжним дипольним моментом представлені аналітичним рішенням [77]:

$$M = M_{sat} \cdot L(\alpha) \quad (3.60)$$

$$L(\alpha) = \coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha} \quad (3.61)$$

$$\alpha = \frac{\mu_0 \mu^p}{k_B T} H = \frac{\mu^p}{k_B T} B$$

де M_{sat} – намагніченість насиченням, А/м; $L(\alpha)$ – функція Ланжевена; B – щільність магнітного потоку, Тл [77].

Оскільки всі дипольні моменти прийняті рівними [77]:

$$M_{sat} = \frac{N_{part} \cdot \mu^p}{V} \quad (3.62)$$

де N_{part} – кількість частинок [77].

Для кращої збіжності введемо безрозмірне намагнічування [77]:

$$M^* = \frac{M}{M_{sat}} = \frac{\sum_i \mu_i^H}{N_{part} \cdot \mu^p} \quad (3.63)$$

Тоді, аналітичним рішенням для розбіжних дипольних моментів є функція Ланжевена. Для взаємодіючих дипольних моментів доступні лише наближення для кривої намагніченості [77].

Намагніченість паралельної площини моношару визначається з рівняння [77]:

$$M_{||}^{q2D} = M_{sat} L(\alpha) \left(1 + \mu_0 \frac{1}{8} M_{sat} \frac{dL(\alpha)}{dB} \right) \quad (3.64)$$

Намагніченість перпендикулярної площини моношару визначається з рівняння [77]:

$$M_{\perp}^{q2D} = M_{sat} L(\alpha) \left(1 - \mu_0 \frac{1}{4} M_{sat} \frac{dL(\alpha)}{dB} \right) \quad (3.65)$$

Тоді диполь-дипольна взаємодія апроксимується як невелике збурення [77]:

$$\frac{dL(\alpha)}{dB} = \left(\frac{1}{\alpha^2} - \frac{1}{\sinh^2(\alpha)} \right) \cdot \frac{\mu^p}{k_B T} \quad (3.66)$$

Результати моделювання представлені для умовної нанорідини. Прийнято діаметр наночастинок, становить $\sigma_p = 20$ нм. Доля площі моношару становить $\varphi = 0.236$, параметр дипольної взаємодії $\lambda = 4$. Моделювання виконано для 1000 наночастинок протягом 100 циклів за прийнятих параметрів $\alpha = 1-10$, $kT = 1$. Візуальне представлення розсіювання наночастинок представлено на рис. 3.27 [77].

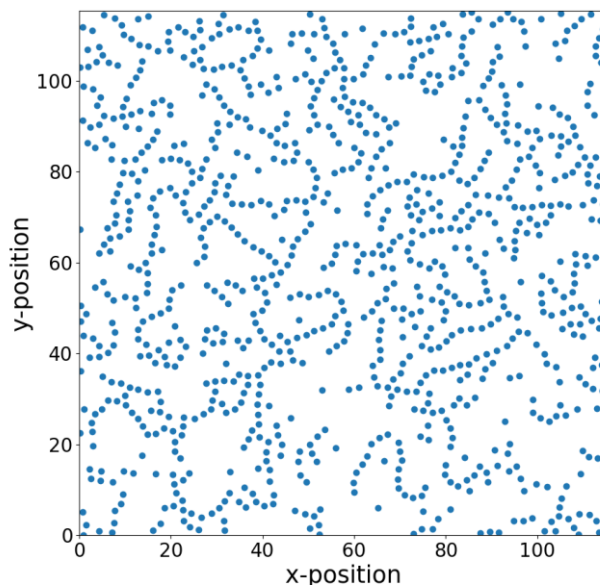


Рис. 3.27. Візуальне представлення розсіювання наночастинок нанорідини

З рис. 3.27 помітно кільцевидні та ланцюгові об'єднання наночастинок – кластери. Аналізуючи систему наночастинок можна передбачити розмір кластера та розподіл наночастинок в ньому. Гістограма мономерів у кластері представлена на рис. 3.28. Гістограма дозволяє оцінити експоненціальне зменшення кількості наночастинок вздовж розміру кластера [77].

Вплив однорідного зовнішнього магнітного поля на нанорідину представлено на рис. 3.29. З рисунку помітно, що під впливом магнітного поля кластери наночастинок в основному володіють ланцюговою формою, зорієнтовані у напрямку дії магнітного поля [77].

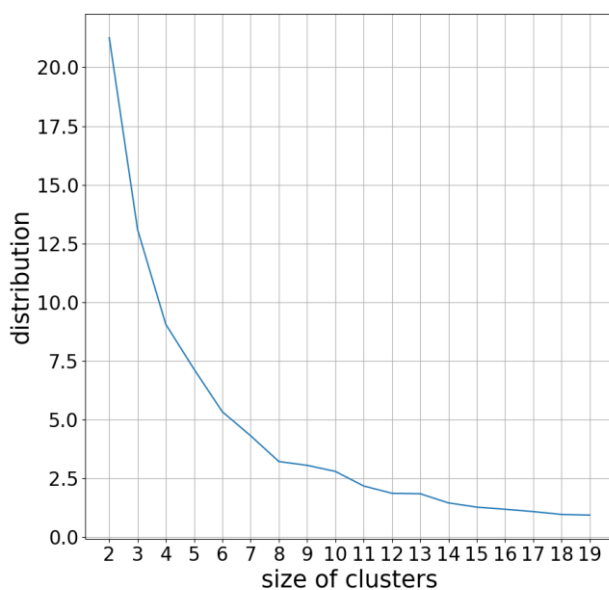


Рис. 3.28. Гістограма мономерів в кластері

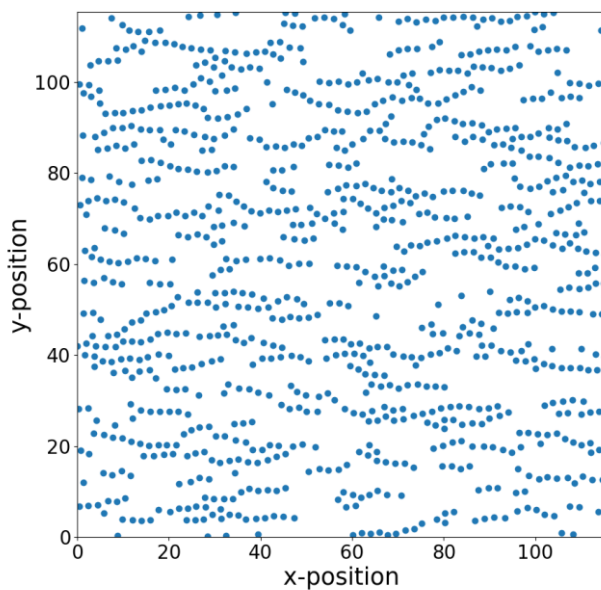


Рис. 3.29. Візуальне представлення розсіювання наночастинок нанорідини під дією однорідного зовнішнього магнітного поля

На рис. 3.30 представлено криві намагнічування нанорідини побудовані відповідно до методу запропонованого в роботі [79]. Криві намагнічування побудовані для паралельного та перпендикулярного напрямку дії сили однорідного зовнішнього магнітного поля. З рисунку помітно, що зображення кривих

намагнічування відрізняється від функції Ланжевена, що відповідає результатам представленим в роботі [79].

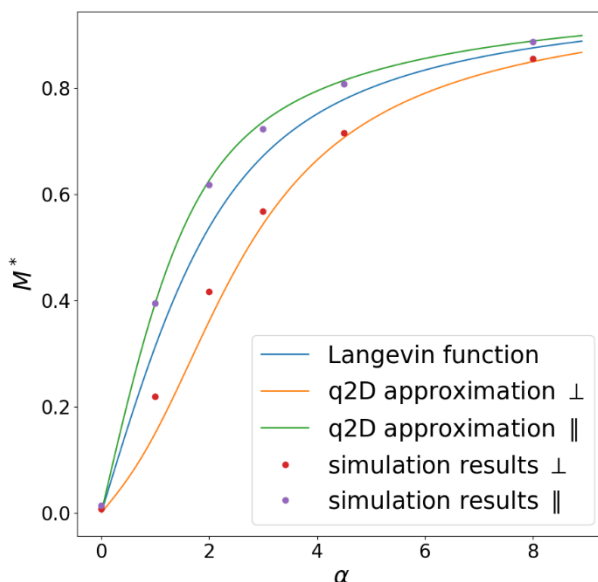


Рис. 3.30. Криві намагнічування нанорідини для паралельного та перпендикулярного напрямку дії сили постійного, зовнішнього магнітного поля

Аналізуючи існуючі публікації [73, 80] та результати моделювання молекулярної динаміки, розроблено кінцево-елементну модель нанорідини. Модель представляє собою розрахунок межі розподілу нанорідини в двофазному середовищі (нанорідина, повітря) в середовищі циліндричної форми. В якості основних параметрів нанорідини прийнято наступне: електропровідність нанорідини $\sigma = 25000$ См/м, відносна діелектрична проникність $\varepsilon = 0.6$, густина $\rho = 1221$ кг/м³, динамічна в'язкість $\mu_f = 0.00727$ Па·с, сила магнітного поля становить 10 Тл. Просторове зображення межі розподілу нанорідини в двофазному середовищі та напрямку дії магнітного векторного потенціалу представлено на рис. 3.31 [77].

Зображення являє собою передбачення орієнтації нанорідни у напрямку дії магнітного поля за час моделювання 1,5 с. Магнітуда швидкості слідування нанорідини у напрямку магнітного поля за час моделювання 1,5 с представлена на рис. 3.32 [77].

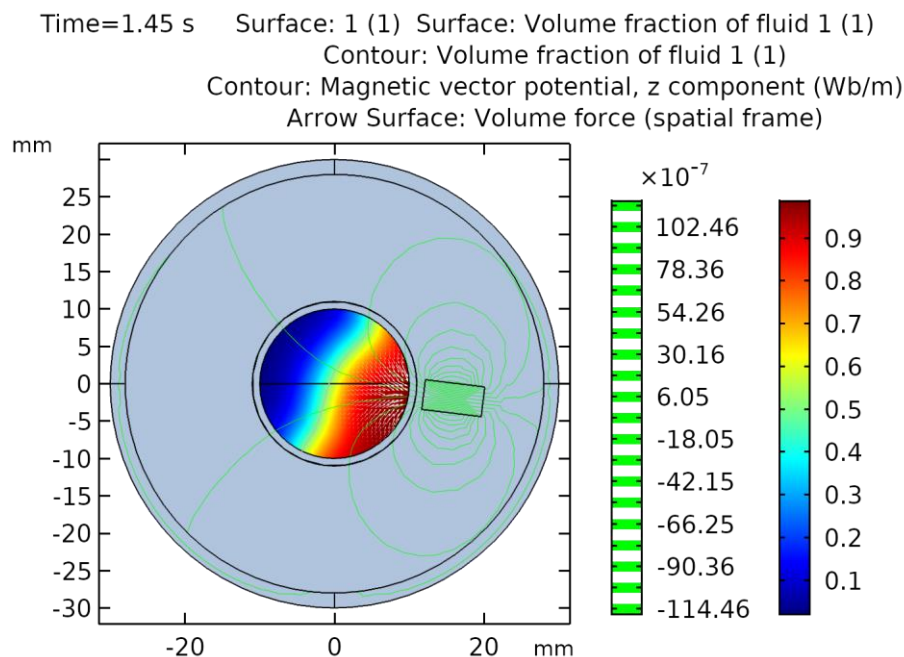


Рис. 3.31. Просторове зображення межі розподілу нанорідини в двофазному середовищі та напрямку дії магнітного векторного потенціалу (Вб/м)

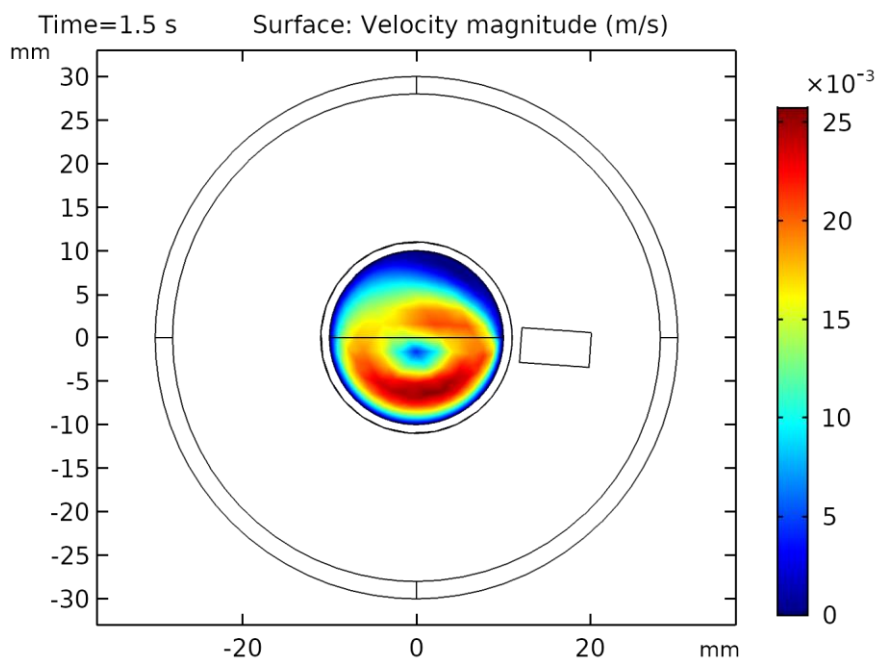


Рис. 3.32. Просторове зображення магнітуди швидкості слідування (м/с) нанорідини у напрямку магнітного поля

В порівнянні з існуючими методами моделювання [73, 80] магнітних властивостей нанорідини, модель запропонована в роботі покриває кінцево-елементний метод та метод молекулярної динаміки. Модель розроблена у формі

зручній для інтеграції в кінцево-елементну модель електричної машини, здатна перерости в програмний додаток для аналізу інших типів нанорідини [77].

Висновки до третього розділу

1. Вперше на основі застосування розробленої математичної тривимірної моделі двошнекового електромеханічного гідролізера отримано розподіл магнітної індукції, щільності струму і магнітного векторного потенціалу на поверхні феромагнітного ротора та верхньої грані шнекової навивки.

2. Удосконалено математичну модель вібраційних процесів феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера шляхом об'ємного інтегрування геометрії феромагнітного ротора, введенню аналізу електромагнітного тензору напруженості, виявленню амплітуд і частоти вібраційних сил у поперечному та осьовому напрямках, визначенню об'ємної щільності електричних втрат.

3. Досліджено електромеханічні характеристики двошнекового електромеханічного гідролізера. Шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензору напруження отримано графічні залежності електромагнітного моменту феромагнітного ротора в залежності від кутової швидкості та часу.

4. Досліджено вібраційні процеси що мають місце в технологічному процесі за нормального режиму роботи двошнекового електромеханічного гідролізера. Визначено характер вібраційних сил в осьовому та поперечному напрямку відносно ротора, спектр частоти коливань.

5. Досліджено теплові процеси що виникають в феромагнітному роторі двошнекового електромеханічного гідролізера. Визначено величину об'ємних електричних втрат. Побудовано просторове зображення ізотермічних контурів температури феромагнітного ротора. Визначено температуру роботи феромагнітного ротора та час необхідний для її досягнення.

6. Розроблено комплексну математичну модель електромагнітних і теплових процесів, динаміки руху кластерів нанорідини для двошнекового електромеханічного гідролізера з застосуванням нанорідини у порожнині феромагнітного ротора, що дає змогу формувати умови підвищення енергетичних показників системи завдяки

акумуляції теплоти та зменшенню магнітного опору. Комплексна математична модель електромагнітних і теплових процесів може бути запроваджена в дослідженнях інших типів електричних машин.

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ГІДРОЛІЗНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ПТАХІВНИЦТВА ПІД ВПЛИВОМ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

4.1. Формування структури і характеристик електротехнічного комплексу

В основу даного дисертаційного дослідження поставлена задача підвищення ефективності технологічного процесу, надійності роботи установки і стійкості реакції гідролізу, поліпшення якості білкової добавки і підвищення засвоюваності готового продукту, зниження енергетичних витрат шнекової установки. Технічні рішення запропонованого електротехнологічного комплексу викладені в [81]. Конструктивна схема електротехнологічного комплексу показана на рис. 4.1, 4.2.

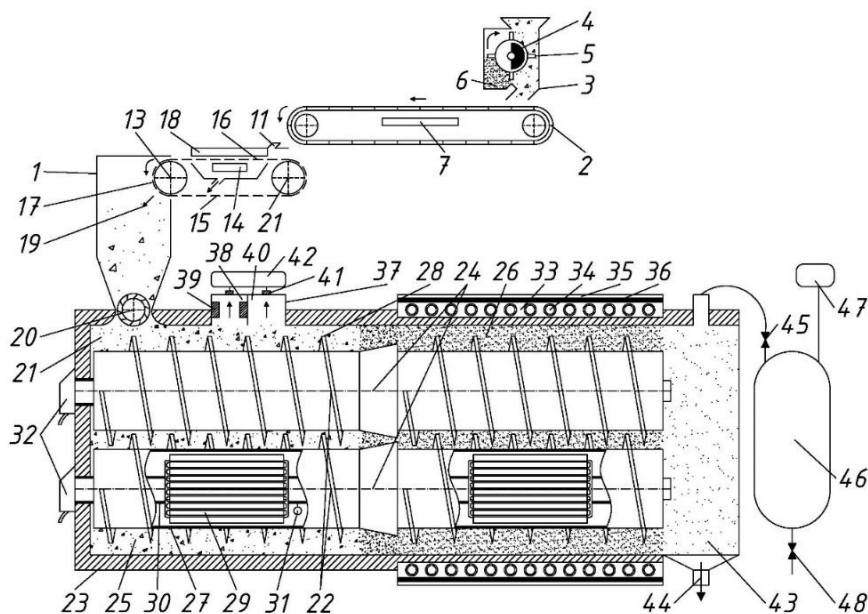


Рис. 4.1. Конструктивна схема електротехнологічного комплексу

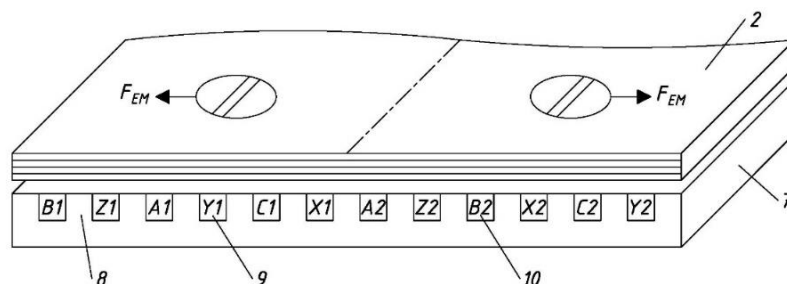


Рис. 4.2. Аксонометрична проекція розташування електродинамічного сепаратора на стрічковому транспортері та схема укладання котушок окремих фаз обмоток

Електротехнологічний комплекс складається з завантажувального пристрою 1, який містить стрічковий транспортер 2 з встановленим на ньому магнітним сепаратором 3, до якого входить нерухома магнітна система 4, обертовий немагнітний барабан 5 і контейнер для феромагнітних частинок 6 з електродинамічним сепаратором 7, що містить магнітопровід 8 з котушками обмоток фаз 9, 10, відповідно, для створення лівобіжучого і правобіжучого магнітного поля, стрічковий вакуум-фільтр 11, що складається з приводного 12 і натяжного 13 барабанів, вакуумної камери 14, перфорованої гумовотканинної стрічки 15 з завантажувальною 16 і вивантажувальною ділянками 17, бортів 18 і шкребка 19, при цьому вивантажувальна ділянка перфорованої гумовотканинної стрічки 17 і шкребок 19 розташовані безпосередньо у порожнині бункера-живильника 20. Робоча зона шнекової установки 21 виконана з двох поздовжньо з'єднаних шнеків 22, які розташовані в корпусі 23, зі змонтованими в їх центральній частині конусами 24, що поділяють робочу зону шнекової установки 21 відповідно на ущільнюючу і реакційну порожнини 25, 26, шнеки 22 складаються з валу 27 у вигляді феромагнітної труби, на зовнішній поверхні якої жорстко закріплені витки 28, а у внутрішній порожнині валу

27 розташовані циліндричні індуктори обертового магнітного поля 29, що нерухомо закріплені на осі 30 у вигляді труби, і давач вимірювання швидкості обертання шнеку 31, при цьому осі жорстко закріплені на корпусі шнекової установки, а на кінцях осей 30 збоку бункера-живильника 20 прикріплені коробки 32 підключення кабелів електроживлення і ланцюгів контролю, зовні корпусу 23 реакційної порожнини 26 робочої частини установки встановлено обігрівальний пристрій 33, який виконано у вигляді індуктора 34 з жаростійкого, нагрівального кабелю, поверх якого встановлений електромагнітний екран 35 у вигляді суцільного кожуха з листового матеріалу з малим питомим опором і теплоізоляція 36. В корпус 23 шнекової установки на ділянці ущільнюючої порожнини 25 робочої частини 21 шнекової установки встановлено камеру деаерації пухо-пір'яної сировини 37 з двома входами вздовж каналу робочої частини шнекової установки, в порожнині першого входу 38 розташовані постійні магніти 39, другий вхід 40 камери деаерації 37 розташований напроти індукторів обертового магнітного поля 29, а виходи камери деаерації 41 з'єднані з пристроєм вакуумування і відведення газоповітряної суміші 42. На виході шнеків 22 розміщено технологічну герметичну ємність 43 для прийому обробленої сировини, вузол вивантажування готового продукту 44, ємність 43 за допомогою трубопроводу з швидкодіючим клапаном 45 з'єднана з ресивером 46, сполученим з вакуумним насосом 47. У нижній точці ресивера 46 змонтований кран 48 для зливу рідини, що накопичилася в ресивері [81].

Електротехнологічний комплекс працює наступним чином. Неподрібнена пухо-пір'яна сировина з вихідною вологістю 60-80 % безперервно подається до завантажувального пристрою 1, а саме на стрічковий транспортер 2 з встановленим на ньому магнітним сепаратором 3, де сировина рухається по поверхні обертового немагнітного барабана 5, при цьому феромагнітні частинки затримуються на його поверхні за рахунок магнітного тяжіння, що створюється нерухомою магнітною системою 4. Очищення магнітного сепаратора здійснюється при поворотах немагнітного барабана 5. Зміна індукції магнітного поля призводить до того, що феромагнітні частинки, які були притягнуті до поверхні немагнітного барабана 5, при переході у зону, де магнітне поле не діє, падають вниз під дією ваги у контейнер для

ферромагнітних частинок 6. Оскільки до складу пухо-пір'яної сировини випадково можуть потрапляти частинки кольорових та немагнітних металів, далі по ходу стрічкового транспортера 2 здійснюється електродинамічна сепарація за допомогою електродинамічного сепаратора 7, який розміщено під верхньою гілкою стрічкового транспортера. При підключенні до джерела змінного струму електродинамічний сепаратор 7 створює біжучі електромагнітні поля з протилежним напрямком відносно осі стрічки транспортера (рис. 4.2), які збуджують вихрові струми у металевих частинках сировини. При цьому на останні діють електромагнітні зусилля, які забезпечують вихід металевих часток з потоку пухо-пір'яної сировини в обидва боки від осі стрічки транспортера 2, що підвищує надійність і безперервність роботи шнекової установки. Для створення лівобіжучого і правобіжучого магнітного поля, використовується трифазна обмотка електродинамічного сепаратора з схемою укладання котушок окремих фаз обмотки, яка показано на рис. 4.2. Далі пухо-пір'яна сировина з стрічкового транспортеру 2 перевантажується на стрічковий вакуум-фільтр 11, за допомогою якого здійснюється видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи (35-45 %), необхідної для гідролізу. Під дією вакууму вода і частина повітря проходить через отвори перфорованої гумовотканинної стрічки 15 у вакуумну камеру 14, яка розташовується між приводним 12 і натяжним 13 барабанами по всій довжині під верхньою гілкою стрічки. Вакуум-камера 14 з'єднана патрубками з колектором для відведення вологи в ресивер. Пухо-пір'яна сировина знімається шкребком 19 при огинанні стрічкою натяжного барабана 13. Вивантажувальна ділянка перфорованої гумовотканинної стрічки 17 і шкребок 19 розташовані безпосередньо у порожнині бункера-живильника 20 і забезпечують його заповнення [81].

Далі сировину подають у робочу частину 21 шнекової установки, в корпусі 23 якої розташовані поздовжньо з'єднані шнеки 22. При підключенні до джерела змінного струму циліндричні індуктори обертового магнітного поля 29 збуджують вихрові струми у ферромагнітних валах 27, за рахунок яких останні нагріваються. При взаємодії обертових магнітних полів і вихрових струмів створюються результуючі електромагнітні моменти, що обертають вали 27 з витками 28 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 феромагнітних валів 27 [81].

В ущільнюючій порожнині 25 робочої частини 21 шнекової установки здійснюють ущільнення пухо-пір'яної сировини в 8-10 разів, нагрів при тиску 0,5-5,0 МПа до температури 60 °С, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,025 Тл для гальмування процесу випаровування вологи [81].

Одночасно в ущільнюючій порожнині 25 робочої частини 21 шнекової установки здійснюють деаерацію пухо-пір'яної сировини за допомогою камери деаерації 37 з двома входами вздовж каналу робочої зони шнекової установки, в порожнині першого входу 38 розташовані постійні магніти 39, що створюють високу магнітну напруженість для всмоктування парамагнітного кисню, а другий вхід 40 камери деаерації 37 розташований напроти індукторів обертового магнітного поля 29, що створюють в контактуючих з сировиною поверхнях шнека 22 магнітну індукцію 0,025 Тл – 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 22. Таким чином, в ущільнюючій порожнині 25 робочої зони шнекової установки максимально прибираються порожнечі з пухо-пір'яної суміші, в якій 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 41, які з'єднані з пристроєм вакуумування і відведення газоповітряної суміші 42 [81].

В кінці ущільнюючої порожнини 25 робочої частини 21 шнекової установки за допомогою конусів 24 відбувається подальше ущільнення сировини до утворення пробки між корпусом 23 та конусами 24 при тиску від 1 МПа до 20 МПа. Висока міцність ущільнення сировини, гарантує надійний захист персоналу від випадкового викиду із зони гідролізу [81].

Після переходу ущільненої сировини в реакційну порожнину 26 робочої частини 21 шнекової установки здійснюють вплив на сировину градієнтного

магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією 0,065 Тл і нагрів до температури 180-260 °С з чотиристороннім підведенням теплової енергії до шару пухо-пір'яної сировини збоку гріючих поверхонь таких сполучень елементів конструкції: корпус 23, витки 28 шнеків, вал 27 шнека, або витки 28 двох поздовжньо з'єднаних шнеків, вали 27 шнеків. При цьому пухо-пір'яну сировину розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків 28 шнеків 22, перемішують і подрібнюють до отримання подрібненої маси, схожої на тісто з включеннями окремих волокон [81].

Індуктор 34 обігрівального пристрою 33 виконано з жаростійкого, нагрівального кабелю з магnezіальною ізоляцією. Металевий корпус 23 є одночасно приймачем енергії магнітного поля, генератором теплоти і служить несучою конструкцією. Змінний магнітний потік, створюваний індуктором 34, наводить в корпусі 23 вихрові струми, які додатково нагрівають його. В індукторі за рахунок електричних втрат виділяється 80-85 % всієї теплової енергії, у корпусі за рахунок вихрових струмів – 15-20 %. Це формує інтенсивний тепловий потік в бік сировини, що обробляється в реакційній порожнині 26 робочої частини 21 шнекової установки. 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 35 у вигляді суцільного кожуха з листового матеріалу з малим питомим опором; втрати в такому екрані невеликі [81].

За наявності підведення теплової енергії як збоку обігрівного пристрою 33 через корпус 23, так і з боку шнеків 22 з витками 28, 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, що контролюється за допомогою датчиків вимірювання швидкості обертання шнеку 31, і температура зовнішніх поверхонь шнеків 22 встановлюється шляхом зміни глибини проникнення обертового магнітного поля у масив феромагнітних валів 27 та співвідношень електромагнітних моментів, які регулюються зміною частоти і напруги джерела живлення індукторів обертового магнітного поля 29 за допомогою системи управління. Для максимального збереження амінокислот і якості жиру тривалість високотемпературної обробки в шнековій установці встановлена не вище 110 секунд [81].

На виході шнеків 22 розміщено технологічну герметичну ємність 43 для прийому обробленої сировини, де після закриття вузла вивантажування готового продукту 44, сировину піддають обробці вакуумними імпульсами шляхом швидкого з'єднання за допомогою швидкодіючого клапану 45 з ресивером 46, в якому попередньо був створений вакуум вакуумним насосом 47. 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 [81].

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 [81].

Технічні рішення розробки забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, надійності роботи установки і стійкості реакції гідролізу, поліпшення якості білкової добавки і підвищення засвоюваності готового продукту, зниження енергетичних витрат шнекової установки [81].

4.2. Обґрунтування вибору системи керування електромеханічною системою електротехнологічного комплексу

Оскільки двошнековий електромеханічний гідролізер відноситься до пристроїв, що об'єднують декілька технологічних процесів, для його роботи необхідно забезпечити ефективне керування електромагнітним моментом та швидкістю обертання феромагнітного ротора. Одержання необхідних параметрів швидкості та моменту обертання можливе за умов керування спільною роботою двох статорів феромагнітного ротора, один з яких працює в руховому режимі, інший у генераторному режимі гальмування противмиканням. Однак з ростом жорсткості результуючої характеристики помітно знижується перевантажувальна здатність агрегату, тому існує необхідність в розробці іншого більш ефективного методу керування [82].

Методи керування електричними машинами змінного струму – класичне, складне завдання. У сфері високоефективних методів контролю швидкості і моменту найбільшого поширення набули два методи – полеорієнтоване керування та пряме керування моментом [83-85]. В більшості випадків цих методів достатньо для задоволення більшості промислових потреб, однак внаслідок стрімкого розвитку цифрових технологій все більше досліджень проводиться в області нелінійного керування [86]. Серед останніх публікацій відомо багато робіт присвячених різним методам керування електричними машинами. Керування асинхронним двигуном за методом непрямого полеорієнтованого керування з врахуванням впливу збурень опору ротора виконано в роботах [83, 87]. В роботах наведено загальні рекомендації для проектування системи керування, вказано критерії стабільності та мінімально необхідні фазові умови для регулювання обертового моменту, представлено результати експериментального дослідження типового асинхронного двигуна. В роботі [88] представлено метод прогнозованого керування струмом з орієнтацією за полем, що розроблений для трирівневого інвертору з фіксованою нейтральною точкою для керування трифазним асинхронним двигуном. В методі було застосовано алгоритм оптимального вектору перемикавання, реалізовано контур керування

напругою статора, струмом статора і швидкістю ротора двигуна. Результати моделювання володіють незначною похибкою в розрахунках потоку ротора та струму статора. Безсенсорне пряме керування моментом асинхронного двигуна, що живиться від семирівневого інвертора з використанням нейронних мереж і контролера нечіткої логіки представлено в роботі [89], нечіткий ПІ-регулятор використовується для керування швидкістю ротора, а штучна нейронна мережа для перемикання напруги статора. Метод запропонований в роботі дозволяє керувати обертовим моментом, зменшити гармонічні викривлення струму статора, покращити динамічні характеристики та надійність системи. Метод керування робочим циклом, для зменшення пульсації обертового моменту і магнітного потоку за прямого керування обертовим моментом представлено в роботі [90]. Розроблено новий алгоритм точного вибору активної напруги, визначено оптимальну тривалість вмикання і одночасного керування магнітним потоком статора та електричним обертовим моментом. За результатами дослідження, представлений метод володіє нижчими пульсаціями обертового моменту і магнітного потоку в порівнянні з традиційним прямим керуванням моментом та моделлю прогнозованого керування за струмом. В роботі [91] розроблено модель прогнозованого обертового моменту і магнітного потоку на основі збурень. Методика пригнічення збурень вдосконалена для забезпечення сумісності з теорією скінченних множин, збурення передбачено для всіх можливих станів перемикання. За результатами досліджень, даний метод покращує стійкість відгуку обертового моменту і струму, значно підвищує стійкість системи до опору статора та ротора в порівнянні з традиційними методами керування [82].

Методи [87-91] побудовані на основі складних алгоритмів нейронних мереж та нечіткої логіки і здатні ефективно керувати параметрами електричних машин. Однак, в той же час, їм притаманні такі недоліки: висока складність алгоритмів; значна кількість контрольованих параметрів; високе розрахункове навантаження та необхідність наявності повноцінної моделі системи [92, 93]. Двошнековий електромеханічний гідролізер – нова електрична машина і більшість його параметрів та характеристик все ще потребують детального дослідження. З існуючих на сьогоднішній день досліджень, відома повна картина магнітного поля

ферромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера [62], тому для його керування доцільно використовувати метод полеорієнтованого керування [82].

У випадку орієнтації з низькою швидкістю і для керування положенням з використанням датчика потоку, що оснований на інтеграції якій властива тенденція дрейфу, може бути не прийнятним для складних електромеханічних систем. Популярною альтернативою є непряме керування з орієнтацією на поле без вимірювання потоку в повітряному зазорі [94]. За таких умов обертовий момент може регулюватись q компонентою струму статора i_{qs}^e і ковзанням $\omega_e - \omega_r$. Потік ротора можна регулювати d компонентою струму статора i_{ds}^e . Задаючи деяке бажане значення магнітного потоку ротора λ_r^* , бажане значення d компоненти струму статора i_{ds}^{e*} може бути отримане з рівняння [82]:

$$\lambda_{dr}^* = \frac{r_r' L_m}{r_r' + L_r p} i_{ds}^{e*} \quad (4.1)$$

де λ_{dr}^* – бажане значення d компоненти магнітного потоку ротора, Вб; r_r' – опір ротора, Ом; L_m – взаємодукація обмоток статора, Тл; p – кількість полюсів [82].

Для бажаного значення обертового моменту T_{em}^* при певному значенні потоку ротора, бажане значення q компоненти струму статора i_{qs}^e описується рівнянням [82]:

$$T_{em}^* = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r'} \lambda_{dr}^{e*} i_{qs}^{e*} \quad (4.2)$$

де P – потужність, Вт; L_r' – перехідна індуктивність ротора, Тл [82].

Оскільки за певної орієнтації $i_{dr}^{e'}$ дорівнює нулю, а $\lambda_{dr}^{e'} = L_m i_{ds}^e$, тоді ковзання описується рівнянням [82]:

$$\omega_2^* = \omega_e - \omega_r = \frac{r_r' i_{qs}^{e*}}{L_r' i_{ds}^{e*}} \quad (4.3)$$

де ω_2^* – бажана кутова швидкість ротора, рад/с; ω_e – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с; ω_r – кутова швидкість обертання ротора, рад/с [82];

Вищевказана умова виконує розрахунок рівнянь напруги ротора, якість розв’язку цих рівнянь залежить від точності обраних параметрів. Оскільки значення індуктивності намагнічування та опору ротора постійно змінюються, для забезпечення вірної орієнтації застосовуються методи адаптації. Орієнтація поля – це сума кута повороту ротора θ_2 , інтегрованого по ковзанню, від датчика положення ротора θ_r . У випадку якщо відомі ортогональні значення датчика положення $\cos \theta_r$ і $\sin \theta_r$, значення $\cos p$ і $\sin p$ можуть бути згенеровані згідно наступних рівнянь [82]:

$$\cos p = \cos(\theta_r + \theta_2) = \cos \theta_r \cos \theta_2 - \sin \theta_r \sin \theta_2 \quad (4.4)$$

$$\sin p = \sin(\theta_r + \theta_2) = \sin \theta_r \cos \theta_2 + \cos \theta_r \sin \theta_2 \quad (4.5)$$

Відповідні керуючі команди регуляторів магнітного потоку і обертового моменту являються деякими значеннями команд i_{qs}^{e*} та i_{ds}^{e*} в орієнтованій на поле системі відліку координат ротора. Тому перетворення qd в abc слідує перетворенням qde в qds та qds в збалансований abc [82]:

$$i_{qs}^{s*} = i_{qs}^{e*} \cos p + i_{ds}^{e*} \sin p \quad (4.6)$$

$$i_{ds}^{s*} = -i_{qs}^{e*} \sin p + i_{ds}^{e*} \cos p \quad (4.7)$$

Орієнтований на поле струм статора qs визначається з перетворення виміряного значення струму abc в qd і значення p згідно наступних рівнянь [82]:

$$i_{qs}^e = i_{qs}^s \cos p - i_{ds}^s \sin p \quad (4.8)$$

$$i_{ds}^e = i_{qs}^s \sin p + i_{ds}^s \cos p \quad (4.9)$$

Бажана швидкість обертання ротора, менша ніж номінальна з визначеною номінальною напругою живлення описується рівняннями [82]:

$$(v_{qs}^e - jv_{ds}^e) = (r_s + j\omega_e L_s') (i_{qs}^e - ji_{ds}^e) + (E_{qs}' - jE_{ds}') \quad (4.10)$$

$$T_0' = \frac{x_{lr}' + x_m}{\omega_e r_r'} \quad (4.11)$$

де v_{qs}^e, v_{ds}^e – q та d компонента напруги, В; r_s – опір статора, Ом; L_s' – перехідна індуктивність статора, Тл; E_{qs}', E_{ds}' – q та d компонента напруги намагнічування, В; x_{lr}' – опір витікання ротора, Ом; x_m – опір намагнічування статора, Ом [82].

MATLAB & Simulink модель непрямого керування з орієнтацією на поле виконано для одного електромагнітного модуля, який складається з одного статора і відповідної ділянки феромагнітного ротора. Схема заміщення електромагнітного модуля двошнекового електромеханічного гідролізера в довільній системі відліку представлена на рис. 4.3-4.5 [82].

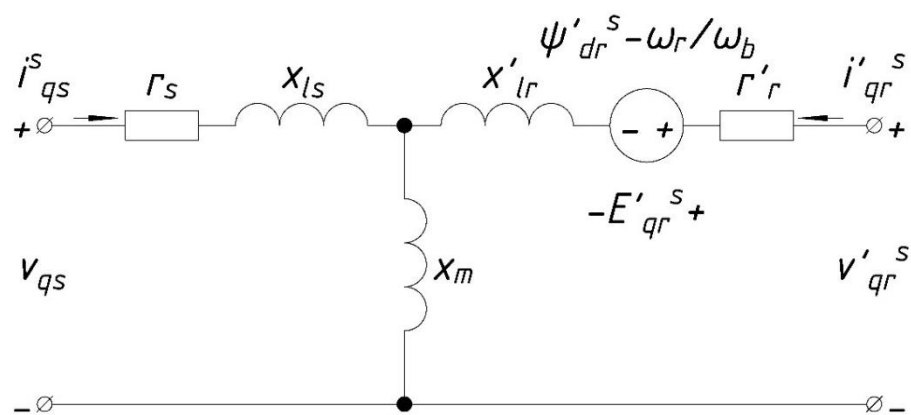


Рис. 4.3. Схема заміщення електромагнітного модуля двошнекового електромеханічного гідролізера в системі відліку q-axis

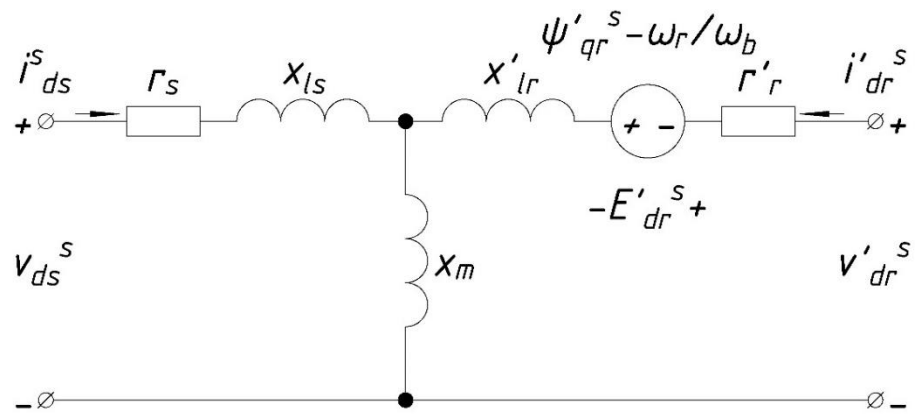


Рис. 4.4. Схема заміщення електромагнітного модуля двошнекового електромеханічного гідролізера в системі відліку d-axis

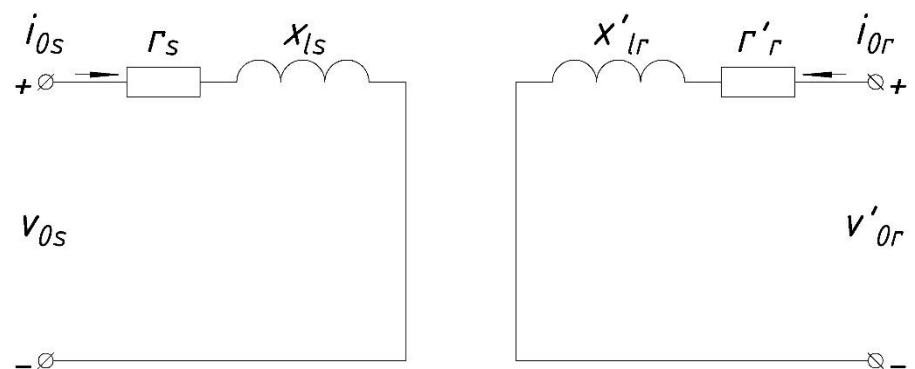


Рис. 4.5. Схема заміщення електромагнітного модуля двошнекового електромеханічного гідролізера в системі відліку zero-sequence

На рис. 4.6 зображено загальну SIMULINK модель непрямого керування з орієнтацією на поле. Для зменшення тривалості розрахунку моделі в роботі не враховуються перехідні процеси що виникають в ШИМ-перетворювачі під час регулювання, враховуються лише основні складові вихідних напруг [82].

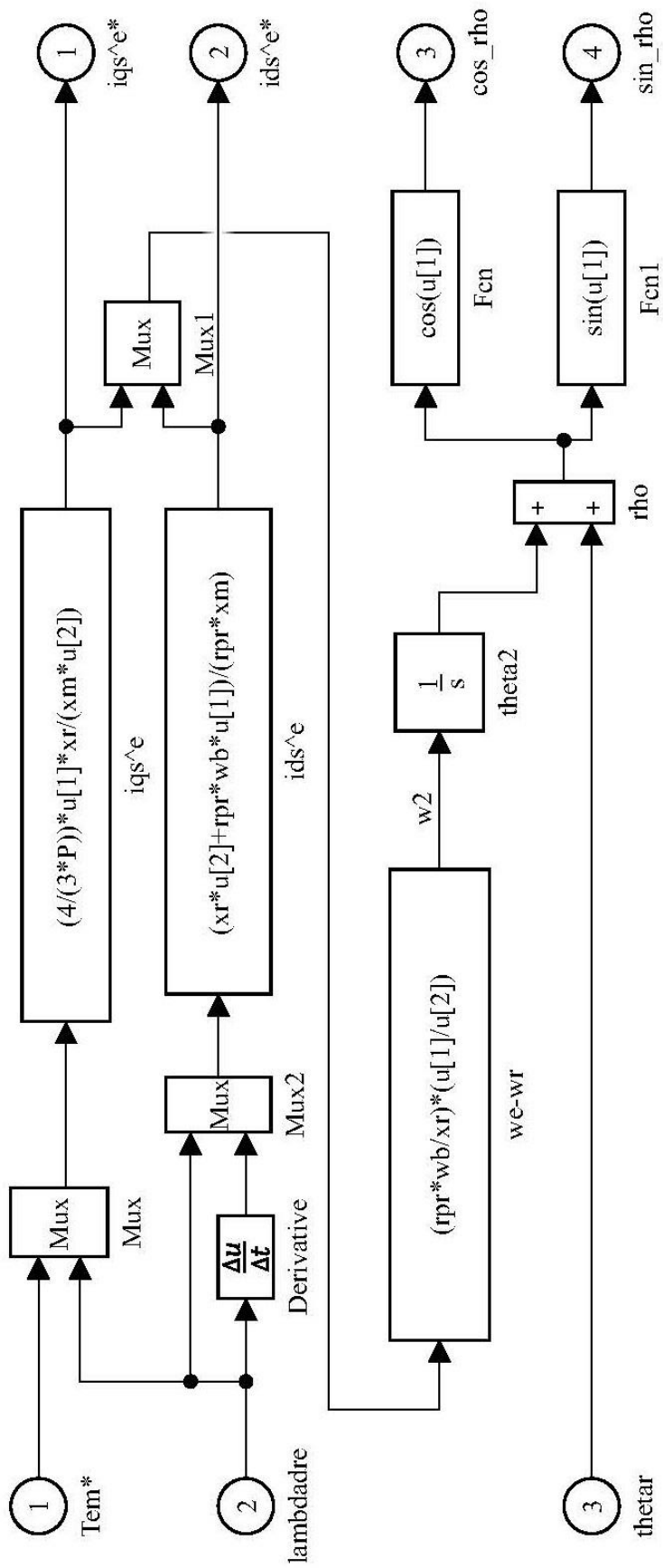


Рис. 4.7. Реалізація блоку непрямого керування з орієнтацією на поле

На рис. 4.7 представлено реалізацію блоку непрямого керування з орієнтацією на поле. В середині блоку відбувається розрахунок значень i_{ds}^* , i_{qs}^* , ω_2^* , кут p – сума кута повороту ротора θ_2 та кута інтегрованого по ковзанню від датчика повороту ротора θ_r . Генерація опорних струмів abc відбувається в середині блоку `qde2abc` (рис. 4.6) [82].

Під час моделювання було реалізовано два види керування. Перший – ступінчата зміна обертового моменту за бажаного, фіксованого значення кутової швидкості обертання (рис. 4.8-4.11) [82].

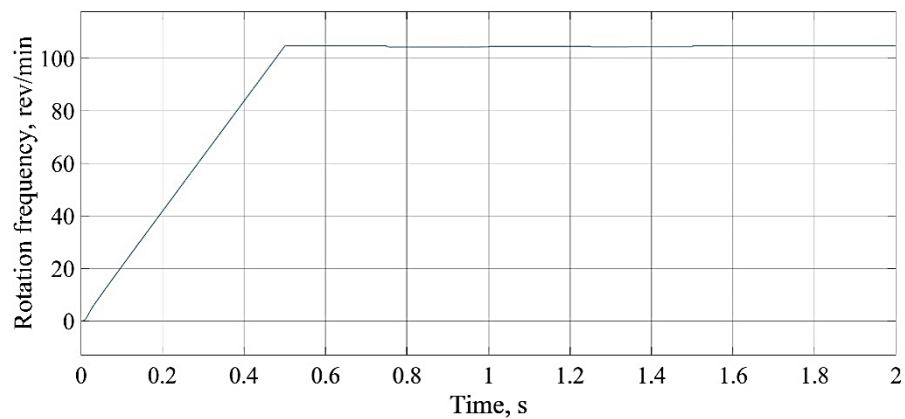


Рис. 4.8. Кутова швидкість обертання під час запуску та навантаження, об/хв

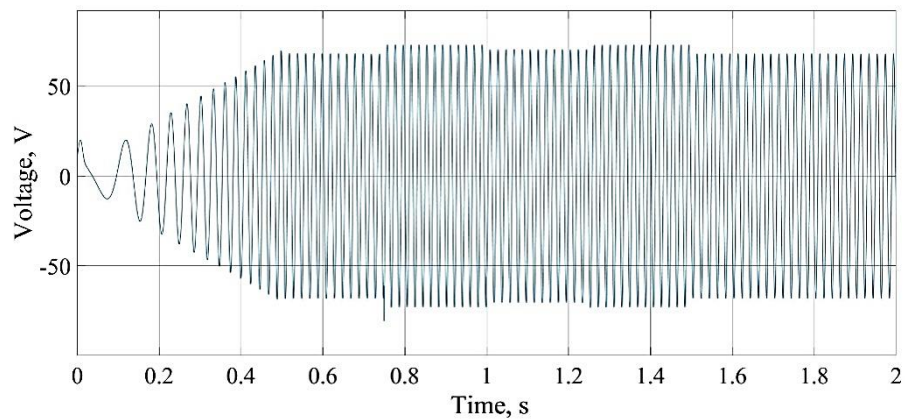


Рис. 4.9. Напряга під час запуску та навантаження, В

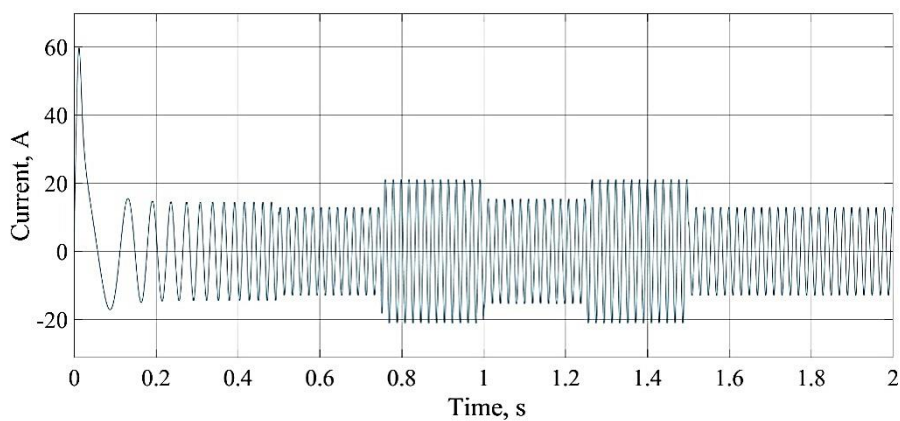


Рис. 4.10. Струм під час запуску та навантаження, А

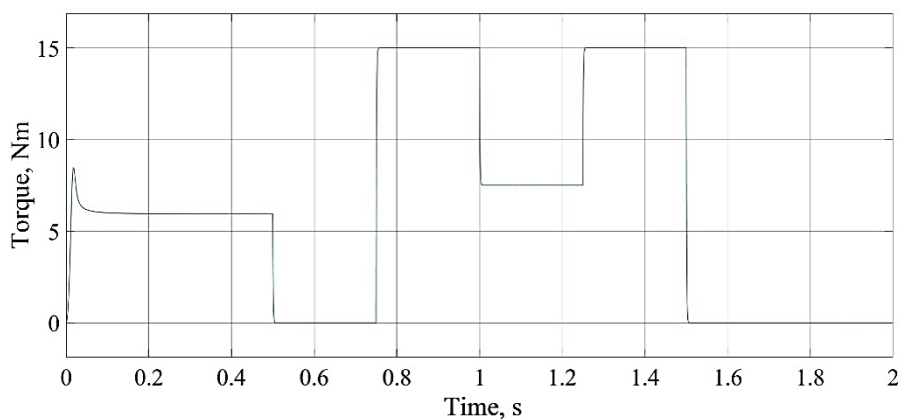


Рис. 4.11. Обертовий момент під час запуску та навантаження, Н · м

Другий вид керування – циклічна зміна кутової швидкості обертання (рис. 4.12-4.15) [82].

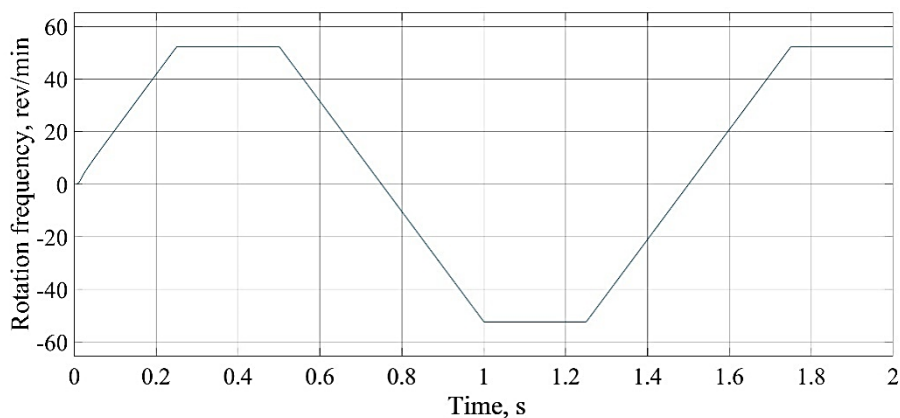


Рис. 4.12. Зміна кутової швидкості під час холостого ходу, об/хв

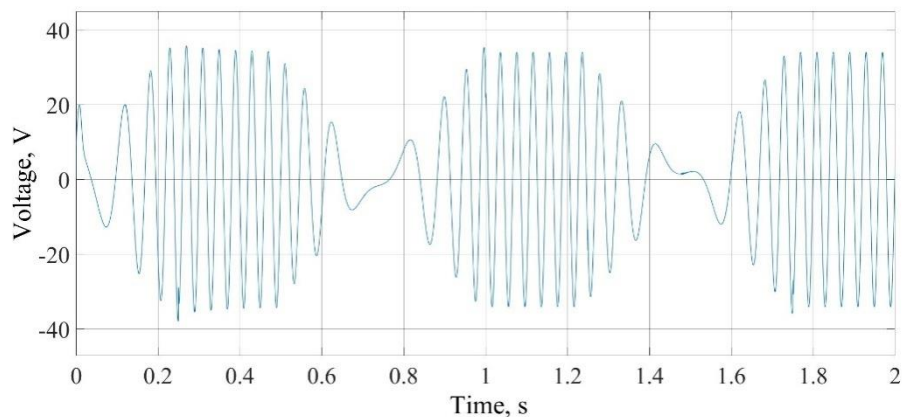


Рис. 4.13. Напруга під час зміни кутової швидкості на холостому ході, В

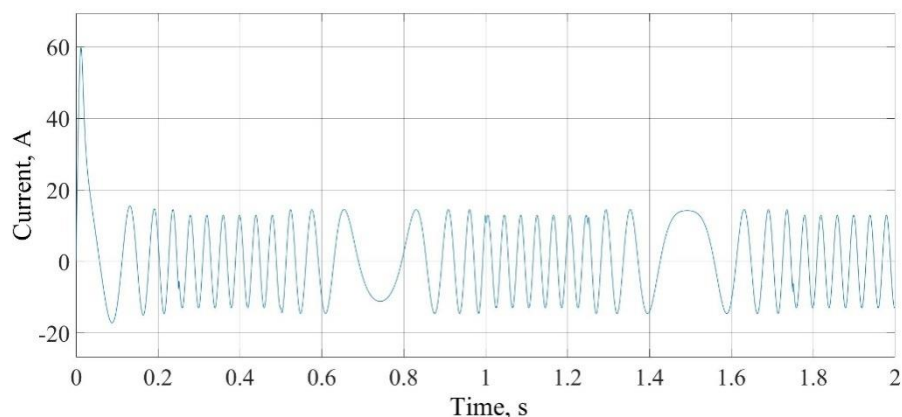


Рис. 4.14. Струм під час зміни кутової швидкості на холостому ході, А

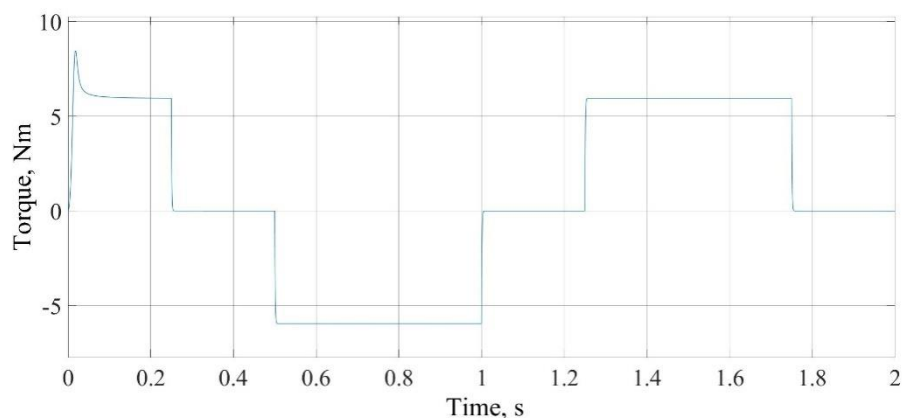


Рис. 4.15. Обертний момент під час зміни кутової швидкості на холостому ході, Н·м

Оскільки двошнековий електромеханічний гідролізер відноситься до пристроїв, що об'єднують декілька технологічних процесів, існує необхідність в підтриманні точних параметрів технологічного процесу. Результати моделювання отримані за таких умов: час моделювання від 0 до 2 с з кроком в 0,5 с; фіксоване значення кутової

швидкості при ступінчастій зміні обертового моменту дорівнює номінальному значенню; часовий масив зміни обертового моменту становить [0 0,5 0,75 1 1,25 1,5] с; часовий масив циклічної зміни кутової швидкості становить [0 0,25 0,5 1 1,25 1,7] с. З результатів моделювання помітно доцільність застосування методу непрямого керування з орієнтацією на поле в двошнековому електромеханічному гідролізері [82].

В порівнянні з розглянутими методами керування [87-91] непряме керування з орієнтацією на поле більш просте в проектуванні та реалізації, дозволяє досягнути бажаних характеристик та відкриває подальші можливості для дослідження двошнекового електромеханічного гідролізера [82].

Опираючись на теоретичні дослідження, розроблені технічні рішення обладнання та технологію переробки кератин-вмістної сировини і результати досліджень фізико-хімічних властивостей сировини, було здійснено проектування двох макетних зразків, що здатні задовільнити умови технологічного процесу і необхідні для здійснення практичних досліджень [82].

4.3. Розробка, виготовлення та випробування макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера з зовнішнім нагрівом і впливом електромагнітного поля

4.3.1. Складові компоненти макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

Тривимірною моделлю макетного зразку представлено на рис. 4.16. Складові компоненти макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера представлено на рис. 4.17. Макетний зразок складається з конструкції для встановлення електроприводу 1, блоку завантаження сировини 2, шнеку 3, деаератора для видалення повітря 4, зовнішньої оболонки робочого середовища 5, блоку нагріву та впливу магнітним полем 6, блоку вивантажування сировини 7, металево-профільної конструкції 8. До обладнання макетного зразку входить електропривод та вакуум-насос з ресивером, які не відображені на даній схемі. Креслення металево-

профільної конструкції, блоків завантаження і вивантаження, шнека, блока нагріву та впливу магнітним полем наведені у додатку А.

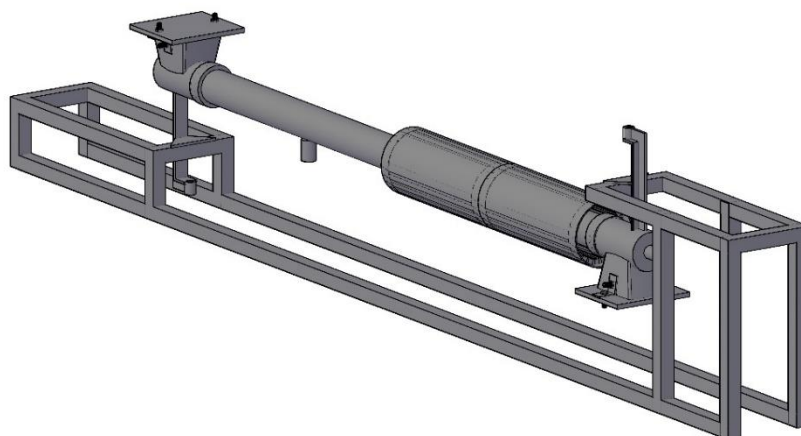


Рис. 4.16. Тривимірна модель макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

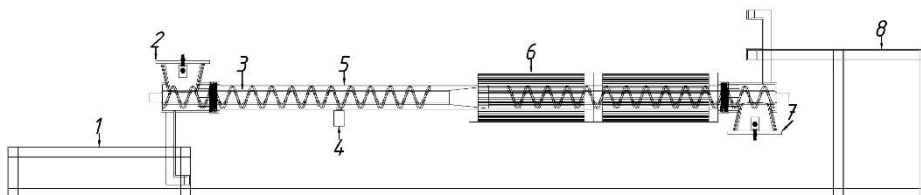


Рис. 4.17. Складові компоненти макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

Зовнішню оболонку робочої камери виконано з труби алюмінієвої зовнішнім діаметром $\varnothing 50$ мм з товщиною стінки 2 мм.

Макетний зразок шнекового електромеханічного гідролізера з зовнішнім нагрівом і впливом електромагнітного поля представлений на рис. 4.18.



Рис. 4.18. Макетний зразок шнекового електромеханічного гідролізера з приладами вимірювання параметрів

4.3.2. Методика випробувань макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера

В даному гідролізері, завантажена пір'яна сировина проходить дві зони впливу. В першій робочій зоні шнеку, пір'я попередньо нагрівається до 60 °С та піддається впливу магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією 0,025 Тл. Сировина в першій робочій зоні ущільнюється до утворення сировинного ущільнення (пробки) за рахунок зменшення прохідного перерізу шнеку, рис. 4.19. За тиску ущільнення 1-20 МПа, сировина подається в другу робочу зону, де її розпушують зменшеною в діаметрі частиною витків шнеку, переміщують за температури 180-260 °С, піддають впливу магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією 0,065 Тл протягом часу 110 с та здійснюють вакуумний вплив кожні 10-60 с [95].



Рис. 4.19. Шнек електромеханічного гідролізера

Основні вимірювальні прилади, що застосовані під час досліджень [95]:

- динамометр аналоговий пружинний універсальний НК-300, призначений для вимірювання зусиль розтягу і стиску, клас точності 0,5 % (додаток Б, рис. Б.1) [95];

- Tenmars TM-191 Magnetic Field Meter, призначений для вимірювання електромагнітних полів наднизької частоти від 30 Гц до 300 Гц. Одиницями вимірювання магнітного поля є Тесла (Тл) або Гаус (Гс) (додаток Б, рис. Б.1) [95];

- Tenmars TM-190 Multi Field EMF Meter, компактний пристрій для вимірювання електромагнітного, електричного полів та потужність радіочастот. Вимірює високочастотні електромагнітні поля в діапазоні частот від 50 МГц до 3,5 ГГц і низькочастотні електричні та магнітні поля у частоті 50-60 Гц (додаток Б, рис. Б.1) [95].

Попередній нагрів сировини до 60 °С у першій робочій зоні здійснюється за допомогою саморегульованого нагрівного кабелю SRF 30-2CR з потужністю 30 Вт/м та довжиною в 1 м. Саморегульований нагрівний кабель працює за принципом позитивного температурного коефіцієнту (додаток Б, рис. Б.5) [95].

Основний нагрів сировини до температури 180-260 °С здійснюється за допомогою нагрівного пристрою ЕНКм 52x200, 1,2 кВт, 230 В – кільцевий міканітовий з температурою нагріву до 350 °С (рис. 4.20). Додаткові технічні параметри наведені у додатку Б, рис. Б.6, рис. Б.7 [95].



Рис. 4.20. Електронагрівач кільцевий міканітовий ЕНКм 52x200, 1,2 кВт, 230 В

Контроль і регулювання температури в зонах ущільнення сировини у межах діапазону 180-260 °С здійснюється за допомогою цифрового термостату TENSE DT-36E з термопарою типу J (додаток Б, рис. Б.8) [95].

Вплив магнітним полем здійснюється за допомогою двох однофазних статорів з пусковими конденсаторами потужністю 720 Вт кожен – БЦПЕ 0,5-40У, рис. 4.21. Додаткові технічні параметри наведені у додатку Б, рис. Б.3 [95].

Вимірювання температури виконані за допомогою інфрачервоного, оптичного пірометра VENETECH GM533A з характеристиками: діапазон вимірювання -50-530 °С, показник візування 12:1, коефіцієнт теплового випромінювання 0,1-1, спектр 5-14 мкм (додаток Б, рис. Б.9) [95].

Дослідження теплових властивостей шнекового електромеханічного гідролізера було здійснено в закритому приміщенні з температурою зовнішнього середовища в 24 °С. Вимірювання температури здійснювалось інфрачервоним,

оптичним пірометром BENETECH GM533A на відстані 0,5 м від об'єкту дослідження. Джерела тепла вмикались в мережу по чергово, перед наступним вимірюванням проводилась витримка часом для охолодження об'єкту дослідження до температури навколишнього середовища [95].



Рис. 4.21. Однофазні статори БЦПЕ 0,5-40У, 720 Вт

Макетний зразок шнекового електромеханічного гідролізера приводився в рух за допомогою трифазного асинхронного двигуна АОЛ2-11-4: 50 Гц, 0,6 кВт, $\cos \varphi = 0.76$, 380 В, 1,7 А, 1350 об/хв. Керування двигуном здійснювалось за допомогою частотного перетворювача ATV320U07N4С (додаток Б, рис. Б.15).

4.3.3. Результати визначення теплових характеристик макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера

Результати дослідження представлені на рис. 4.22-4.24. Усі об'єкти дослідження вмикались в мережу напругою 220 В, вимірювання виконувались протягом часу в 15 хв. З результатів дослідження помітно, що зростання температури має лінійний характер. Електронагрівач кільцевий міканітовий ЕНКм 52x200, 1,2 кВт, 230 В, досягнув температури технологічного процесу за час в 2 хв, після чого температури підтримувалась на встановленій верхній межі в 250 °С за допомогою цифрового термостата TENSE DT-36E [95].

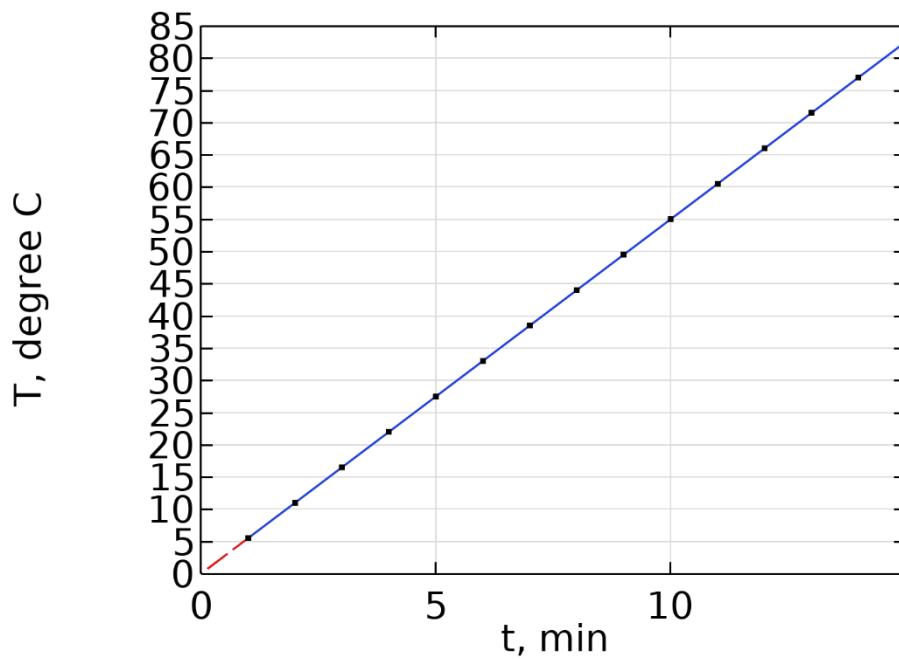


Рис. 4.22. Залежність температури нагріву кабелю SRF 30-2CR від часу

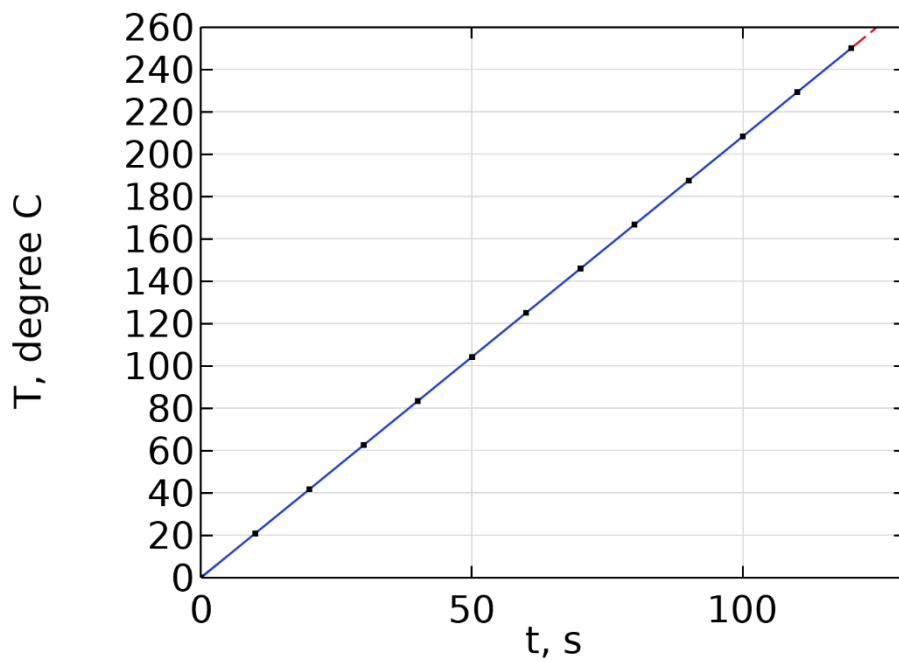


Рис. 4.23. Залежність температури нагріву ЕНКм 52x200, 1,2 кВт, 230 В від часу

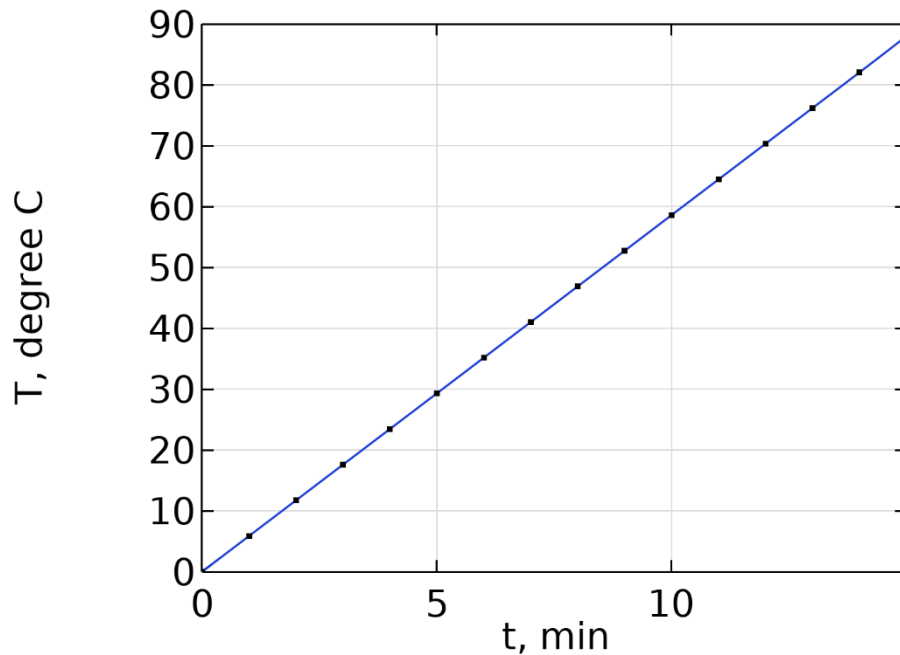


Рис. 4.24. Залежність температури нагріву БЦПЕ 0,5-40У, 720 Вт від часу

За результатами дослідження можна стверджувати, що шнековий електромеханічний гідролізер здатний дотримуватись необхідних теплових властивостей, необхідних для здійснення гідротермічного гідролізу побічних продуктів птахівництва [95].

4.3.4. Моделювання електромагнітних і теплових процесів макетного зразка шнекового електромеханічного гідролізера

Для детального розуміння повної картини температурного та магнітного полів в макетному зразку шнекового електромеханічного гідролізера, було здійснено моделювання методом скінченних елементів в програмному середовищі Comsol Multiphysics відповідно до рівнянь (3.1-3.8), (3.33-3.42).

Кінцево-елементна сітка була створена як сітка під контролем фізики (рис. 4.25). Параметри сітки наведені в табл. 4.1.

Моделювання виконано за умов, що основні компоненти шнекового електромеханічного гідролізера: нагрівний кабель SRF 30-2CR, кільцевий міканітовий ЕНКм 52x200 та однофазні статори БЦПЕ 0,5-40У працюють за номінального навантаження без додаткового регулювання. Результати моделювання представлені на рис. 4.26-4.31.

Табл. 4.1. Параметри кінцево-елементної сітки

Параметри сітки	Значення
Mesh vertices	523509
Tetrahedra	3007747
Prisms	36784
Hexahedra	3072
Triangles	453692
Quads	4288
Edge elements	47708
Vertex elements	1622
Number of elements	3047603
Minimum element quality	0.07147
Average element quality	0.6584
Element volume ratio	1.464E-6
Mesh volume	4.986E7 mm ³

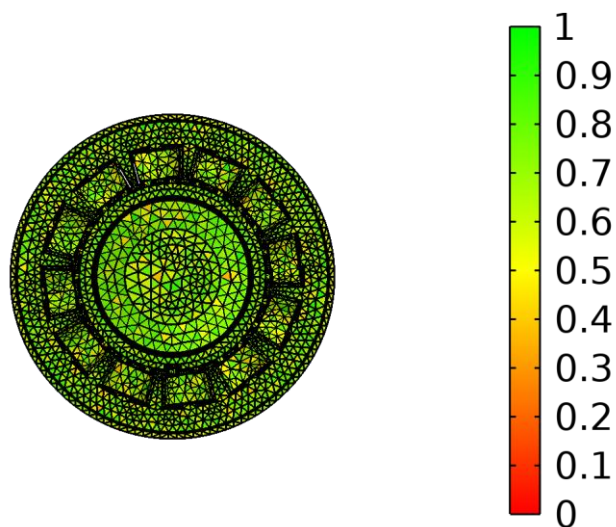


Рис. 4.25. Кінцево-елемента сітка макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

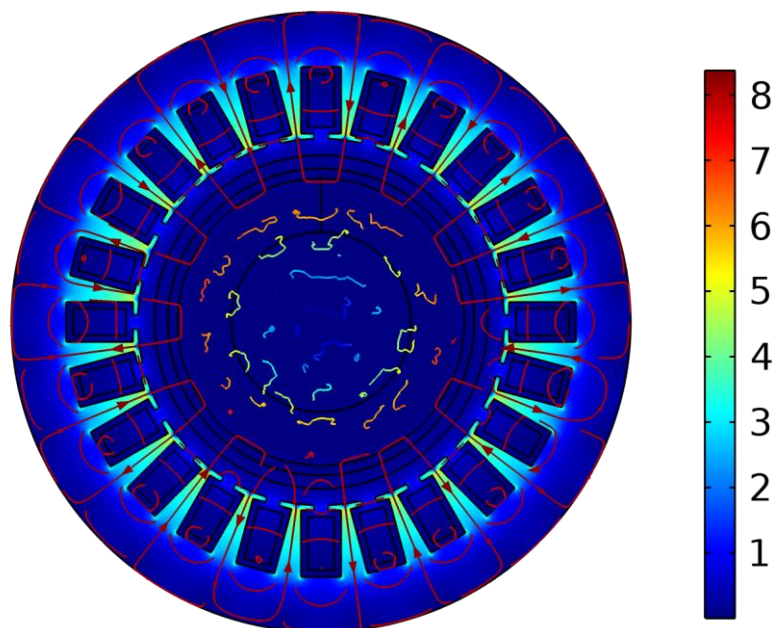


Рис. 4.26. Просторове зображення розподілу магнітної індукції для поперечного січення геометрії макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, Тл

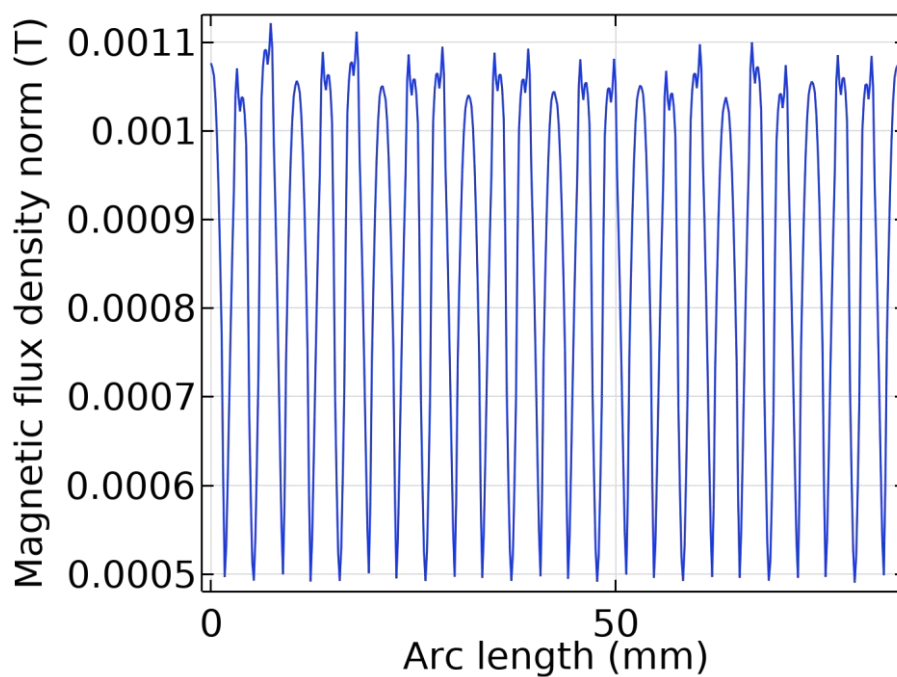


Рис. 4.27. Графік розподілу магнітної індукції на поверхні шнеку макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, Тл

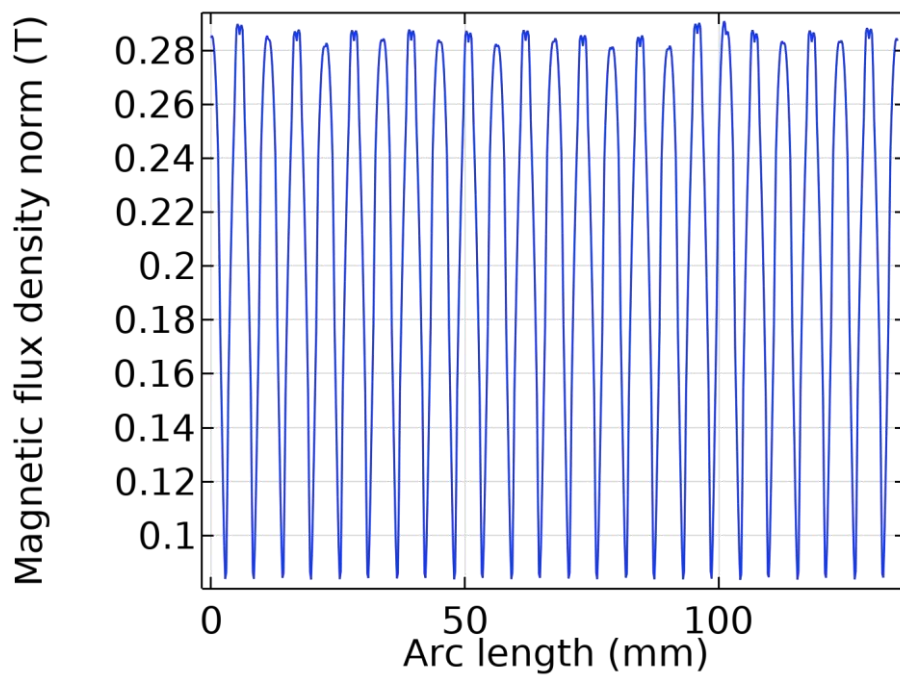


Рис. 4.28. Графік розподілу магнітної індукції по верхній грані лопаток шнеку макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, Тл

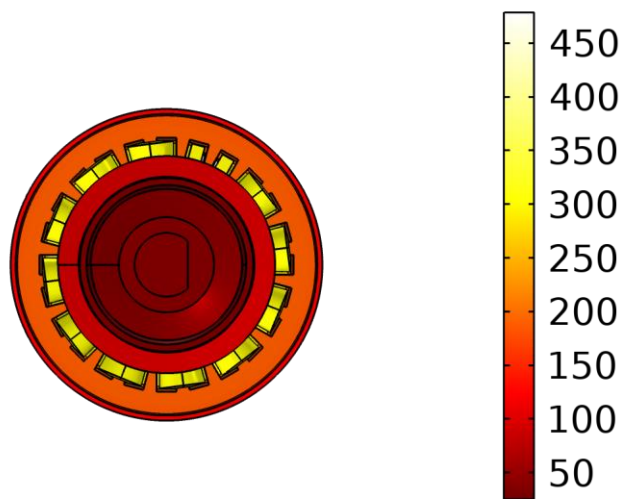


Рис. 4.29. Тривимірне зображення нагріву макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, вигляд з переду, °С

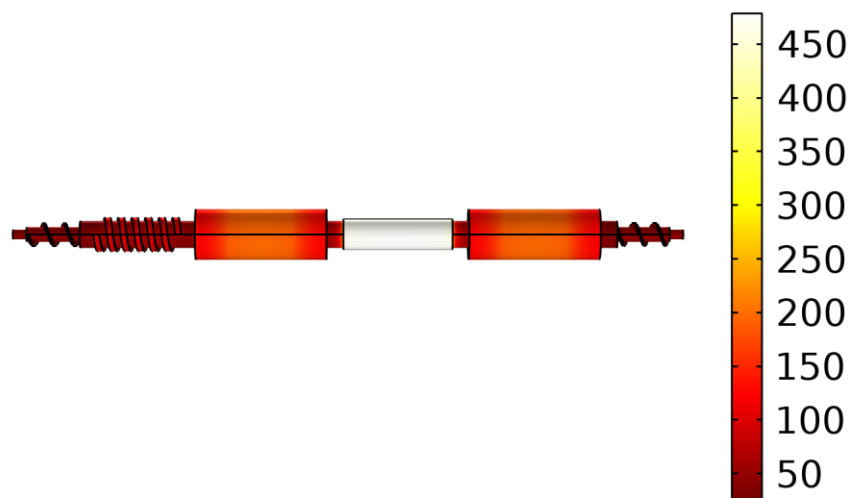


Рис. 4.30. Тривимірне зображення нагріву макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, вигляд з боку, °С

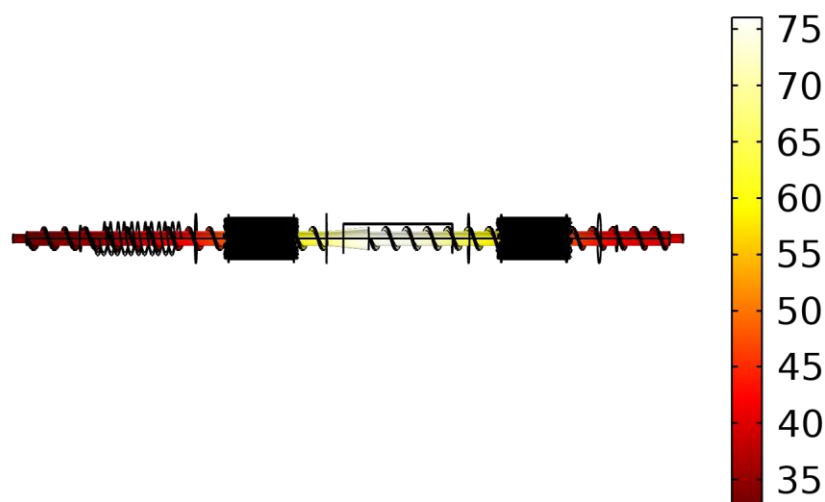


Рис. 4.31. Тривимірне зображення нагріву шнеку макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, °С

З рис. 4.26-4.28 помітно, що результати дослідження близькі до отриманих під час дослідження електромагнітної системи шнекового електромеханічного гідролізера (рис. 3.5-3.9). Можна стверджувати, що отримані характеристики

магнітного поля достатні для здійснення дослідження впливу магнітного поля на сировину переробки – курячого пір'я.

Результати математичного дослідження теплових характеристик відповідають даним, які отримані під час емпіричних досліджень макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера (рис. 4.22-4.24), тому дану математичну модель можна вважати адекватною. З рис. 4.31 помітно вплив індукційного нагріву на шнек макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, що за одночасної дії з іншим нагрівним обладнанням створює умови усестороннього нагріву сировини переробки – курячого пір'я в середовищі переробки.

4.3.5. Реалізація гідротермічного гідролізу пухо-пір'яної сировини з використанням макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

Базуючись на емпіричних дослідженнях та результатах математичного моделювання макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера здійснено дослідження процесу з переробки курячого пір'я згідно методу гідротермічного гідролізу.

Попередньо робочі зони макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера прогрівались протягом 20 хв. Для цього саморегульований нагрівний кабель SRF 30-2CR був ввімкнений безпосередньо в мережу 220 В, однофазні статори БЦПЕ 0,5-40У були ввімкнені в мережу 220 В з використанням конденсаторів СВВ60-G 25 мкФ. Електронагрівач кільцевий міканітовий ЕНКм 52x200 був ввімкнений в мережу 220 В з використанням цифрового термостата TENSE DT-36Е, Максимальне значення температури встановлено на рівні 220 °С, контроль температури здійснено термопарою J типу. По завершенню попереднього нагріву, подрібнене куряче пір'я (рис. 4.32) невеликими, розпушеними порціями, об'ємом 163400 мм³ (6,25 г) подавалось до блоку завантаження сировини, до повного заповнення першої робочої зони. Шляхом дослідження переміщення курячого пір'я в робочій зоні макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера з використанням труби з борисилікатного скла в якості зовнішньої оболонки робочої зони було встановлено, що пір'я проходить шлях від блоку завантаження сировини до ущільнюючого

циліндру за 300 обертів. Об'єм першої робочої зони становить 158300 мм³. Повне заповнення першої робочої зони пір'яною сировиною за рахунок її ущільнення механічним рухом шнеку та власною масою відбувається за завантаження 12 невеликих порцій розпушеного пір'я, 75 г. Ущільнена пір'яна сировина під дією тиску 1-20 МПа переходить у другу робочу зону, де розпушується і продовжує просуватись до блоку вивантажування сировини та піддається дії вакуумних імпульсів кожні 60 с за допомогою вакуумного насосу Leeto xz-1a (Додаток Б, рис. Б.11). Для монтажу вакуумного насосу застосовано шланг заправний HS-115 R-134 HongSen, колектор 1 вентильний HS-466NAH, шланг універсальний для заправки фреону, кран Універсал СТ-33 (Додаток Б, рис. Б.10).



Рис. 4.32. Вихідна сировина – подрібнене куряче пір'я

Як результат переробки було отримано сипуче, гідролізоване пір'яне борошно коричневого кольору, що володіє специфічним запахом, рис. 4.33.



Рис. 4.33. Гідролізоване пир'яне борошно

Використовуючи макетний зразок шнекового електромеханічного гідролізера з габаритами та характеристиками описаними в даній роботі, на виготовлення 8500 мм³ (642 г) гідролізованого пир'яного борошна було затрачено 1,17 кВт·год.

Гідролізоване пир'яне борошно було досліджено на вміст протеїну, жиру, клітковини та золи згідно існуючих стандартів [96-102]. Результати досліджень представлені в табл. 4.2 (Додаток Д).

Табл. 4.2. Результати досліджень зразків пир'яного борошна, підданих випробуванням

Показник	Результати, г/кг	
	В сухій речовині корму	В кормі натуральної вологості
Волога	115	
Суша 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

Характеристика й норми показників якості кормового борошна, відповідно до державного стандарту ДСТУ 8039:2015 наведені в табл. 4.3 [103].

Табл. 4.3. Характеристика й норми показників якості кормового борошна

Показники	Борошно кормове	
	з гідролізованого пера	
	Сорт	
	I	II
1	2	3
Зовнішній вигляд	Суха розсипчаста маса без щільних грудок	
Запах	Специфічний, але не гнильний і не затхлий	
Крупність помолу:		
Масова частка (МЧ) залишку часток у ситі з діаметром отворів 3 мм, %	5	5
Залишок часток на ситі з діаметром отворів 5 мм	Не допускається	
МЧ сторонніх домішок:		
- металомагнітних у вигляді часток до 20 мм, мг на 1 кг борошна	150	200
- металомагнітних у вигляді часток з гострими краями	Не допускається	
- піску, скла й ін.	Не допускається	
МЧ білку, %, не менш	75	58
МЧ, %, не більше:		
- вологи	9	10
- жиру	4	7
- золи	8	20
- безазотистих речовин і клітковини	4	5
Наявність патогенних мікроорганізмів	Не допускається	

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

На сьогодні в Україні існують термохімічні технології для гідролізу пір'яної сировини та виготовлення пташиного пір'яного борошна в вакуум-горизонтальних котлах Лапса різних модифікацій з використанням різних хімічних реагентів, таких як: аміак, кальцинована сода, питна сода, сечовина та їдкий натрій [104]. Найбільш ефективним вважається гідроліз пір'яної сировини в вакуум-горизонтальних котлах, або в сталевому реакторі типу 0110-5,0-4-CA10 з використанням їдкого натрію (NaOH) як хімічного каталізатора [104]. За цієї технології у готовому сухому

кормовому продукті вміст сирого протеїну становить не менше 70%, у тому числі 35% водорозчинних білків, 28% пептидів і 7% вільних амінокислот [104]. Використовуючи технологію запропоновану даним дисертаційним дослідженням, можна виготовити сухий кормовий продукт з вищими показниками якості.

4.4. Розробка, виготовлення та випробування макетного зразку активної частини двошнекового електромеханічного гідролізера з внутрішнім розташуванням індукторів електромагнітного поля

Проектування активної частини шнекового електромеханічного гідролізера здійснено в програмному середовищі AutoCAD та COMSOL Multiphysics. Конструкція електромагнітної системи макетного зразку електромеханічного гідролізера представлена на рис. 4.34.

Зовнішній рухомий феромагнітний ротор-шнек виконаний з сталі Ст. 3 шляхом зварювання труби та витків шнека. Електромагнітна система електромеханічного гідролізера складається з загального феромагнітного ротора та двох статорів, виготовлених з фазного ротора асинхронного двигуна МТФ 011-6. Вали фазного ротора об'єднані жорсткою муфтою. Рухома та електромагнітна частини з'єднані сталевими муфтами по краям ротора з вкладеними бронзовими підшипниками.

В якості індукторів феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера застосовано фазний ротор кранового двигуна МТФ 011-6 з такими характеристиками: трифазний, 50 Гц, 1,4 кВт; статор 380/220 В, 5,2/9,0 А; ротор 118 В, 9,0 А, 950 об/хв.

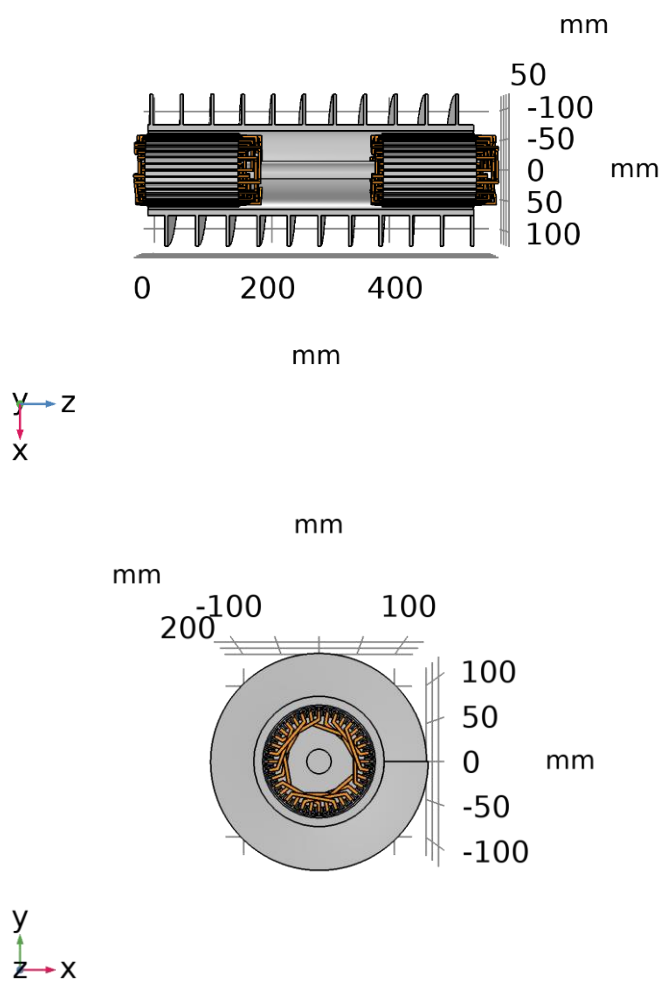


Рис. 4.34. Конструкція електромагнітної системи

Основні результати моделювання порівнювали з даними, які були отримані при дослідженні експериментального зразка шнека електромеханічного гідролізера, рис. 4.35.

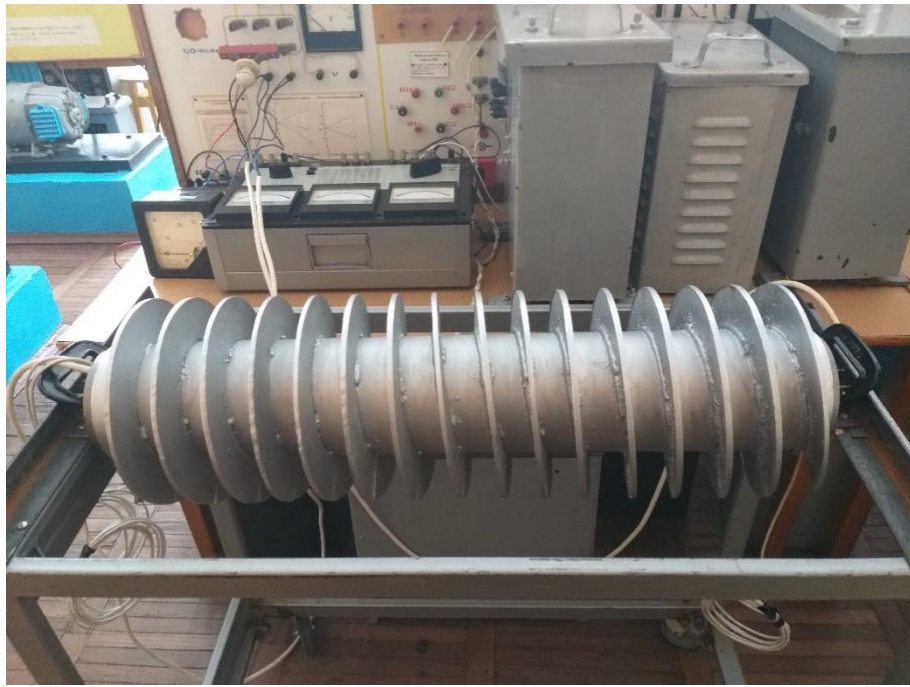


Рис. 4.35. Експериментальний зразок шнека електромеханічного гідролізатора

Обертний момент під час досліду короткого замикання вимірювали динамометром НК-300 (точність - 0,5 %). Під час вимірювання ротор був загальмований в такому кутовому положенні, при якому пусковий момент мінімальний. Початковий пусковий обертний момент короткого замикання, відповідний номінальній напрузі, визначався за формулою [62]:

$$M_{SCN} = \left(\frac{I_{SCN}}{I_{SC}} \right)^2 M_{SC} \quad (4.12)$$

де M_{SC} – обертний момент, виміряний за найвищої напруги досліду короткого замикання, Н·м; I_{SCN} , I_{SC} – струми статора, виміряні відповідно при номінальній напрузі та найвищій напрузі випробування короткого замикання, А [62].

Рівні індукцій до 200 мкТл низькочастотного магнітного поля в діапазоні від 30 до 300 Гц вимірювалися MagneticFeldMeterTM-191. Вимірювання індукцій до 1500 мТл проводилися аналізатором змінних магнітних полів PCE-MFM 4000 зі стандартним датчиком. Середні відхилення між результатами моделювання (розділ 3) та експериментом становили: для пускового моменту не більше 2 Н·м; для магнітної індукції на поверхні ротора не більше 0,013 Тл; для магнітної індукції по

верхній грані лопаток ротора не більше 3 мТл. Отже, математичні моделі електромеханічного гідролізатора з внутрішнім розташуванням індукторів електромагнітного поля можна вважати адекватними [62].

4.5. Рекомендації щодо реалізації енергоефективної електротехнології та обладнання для переробки побічних продуктів птахівництва в промислових масштабах

Аналізуючи результати досліджень доцільно виділити деякі особливості та рекомендації з переробки побічних продуктів птахівництва:

1. Пір'яну сировину доцільно подавати рівномірними розпушеними порціями, оскільки надмірне завантаження сировиною викликає утворення значного ущільнення (пробки) на витках шнеку та ускладнює переміщення до ущільнюючого циліндру та переходу у другу робочу зону, існує імовірність виникнення пустот в першій робочій зоні.

2. Робочу оболонку шнекового електромеханічного гідролізера необхідно обирати враховуючи коефіцієнт тертя матеріалу з якого вона виготовлена. Внаслідок опору від тертя погіршується процес переміщення сировини, що впливає на якість переробки в цілому.

3. Зазор між робочою оболонкою та витками шнеку, ущільнюючим циліндром повинен бути не значним та залежить від габаритів шнекового електромеханічного гідролізера. За наявності великого зазору, переміщення пухо-пир'яної сировини буде ускладнене.

4. За вказаних габаритів та описаної конструкції макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера в даній роботі, для ефективного переміщення сировини, швидкість обертання шнеку повинна не перевищувати 3 об/с. За високої швидкості обертання шнеку, легка пухо-пир'яна сировина накопичується між витками шнеку і обертається на місці без переміщення.

5. Ущільнюючий циліндр доцільно обладнати витком для покращення прохідності сировини.

6. Використання двошнекового електромеханічного гідролізера значно підвищить продуктивність переробки.

7. Необхідно дотримуватись точних параметрів температури та тиску, оскільки мінімальне перевищення цих параметрів призводить до полімеризації сировини у другій робочій зоні.

8. Конструкція гідролізера повинна бути розбірною, оскільки залишки сировини під впливом температури прилипають до поверхонь шнеку та зовнішньої оболонки і через певний термін експлуатації потребують очищення.

Висновки до четвертого розділу

1. Сформовано структуру і характеристики, описано технічні рішення та розроблено конструктивну схему електротехнологічного комплексу.

2. Здійснено проектування та розробку макетних зразків феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера та шнекового електромеханічного гідролізера.

3. Побудовано математичну модель непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером за умов ступінчатої зміни обертового моменту за бажаного, фіксованого значення кутової швидкості обертання та циклічної зміни кутової швидкості обертання. Отримано графічні залежності параметрів відповідно до режимів роботи.

4. Проведено експериментальні дослідження макетних зразків електромеханічного гідролізера. Досліджено електромагнітні та електромеханічні процеси. Проведено математичні та експериментальні дослідження макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера, досліджено електромагнітні та теплові характеристики системи. Проведено дослідження з переробки курячого пір'я, отримано вихідну сировину – гідролізоване пір'яне борошно. Сформовано рекомендації з проектування шнекового електромеханічного гідролізера.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу, розробки електротехнологічного комплексу для гідролісної переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля, що дає змогу сформулювати такі висновки:

1. За результатами дослідження встановлено три стадії теплового впливу на побічний продукт птахівництва – куряче пір'я: 25-230 °С – втрата 13 % загальної маси, 230-280 °С – втрата маси до 46 %, 380-550 °С – втрата маси 81-84 %. Дві стадії температурної стабільності в діапазоні температур 30-550 °С з поступовим перерозподілом за температури 45-140 °С і різким за температури 230-550 °С. Досліджено електричні властивості курячого пір'я: середнє значення діелектричної проникності – 1,7 та середнє значення електричного опору – $2,76 \cdot 10^{11}$ Ом. Виявлено амінокислотну послідовність, досліджено швидкість перерозподілу температури по молекулярній структурі курячого пір'я – 0,4 нс. Сформовано механізм впливу магнітного поля на молекулярну структуру курячого пір'я, визначено магнітну сприйнятливність амінокислот з послідовності в сировині. Доведено доцільність розробки електротехнологічного комплексу, виявлено необхідні параметри для здійснення ефективного технологічного процесу гідролізу: температура – 180-260 °С, тиск – 1-20 МПа.

2. Здійснено математичне моделювання робочого органу електротехнологічного комплексу для переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля (двошнекового електромеханічного гідролізера) – феромагнітного ротора. Доведено енергоефективність запропонованої конструкції. Аналізуючи результати магнітної задачі, виявлено 6 широких зон з рівнем магнітної індукції 0,6 Тл і 6 вузьких зон з рівнем 0,1 Тл, які чергуються одна з одною по колу циліндричної поверхні феромагнітного ротора. Встановлено середнє – 0,34 Тл та максимальне – 0,78 Тл значення магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора. Отримано максимальне значення щільності струму на поверхні феромагнітного ротора – $1,5 \cdot 10^6$ А/м², мінімальне – $0,1 \cdot 10^6$ А/м², для верхньої грані шнекової навивки феромагнітного ротора ці значення становлять $2,1 \cdot$

10^5 A/m^2 та $0,6 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$. Шляхом об'ємного інтегрування геометрії феромагнітного ротора проведено аналіз електромагнітного тензору напруженості, встановлено електромагнітний обертовий момент $26 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та частоту обертання феромагнітного ротора 200 об/хв . Виявлено вібраційні сили у поперечному та осьовому напрямках, частота цих сил знаходиться в діапазоні $90\text{-}120 \text{ Гц}$. Визначено об'ємну щільність електричних втрат $6232,5 \text{ Вт/м}$, температуру нагріву феромагнітного ротора – $187,25\text{-}211,83 \text{ }^\circ\text{C}$, нагрів оцінено шляхом аналізу результатів за час моделювання 25 хв . Виявлено ефекти електромагнітного, вібраційного та теплового впливу, що покращують ефект процесу гідротермічного гідролізу. Досліджено шляхи підвищення ККД системи шляхом застосування нанорідини в повітряному проміжку робочого органу електротехнологічного комплексу для гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва (двошнековий електромеханічний гідролізер) – феромагнітного ротора. Розроблено математичну модель дослідження магнітних властивостей нанорідини.

3. Сформовано структуру і характеристики електротехнологічного комплексу, описано технічні рішення представлено конструктивну схему. Здійснено проектування робочого органу електротехнологічного комплексу для гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля (двошнековий електромеханічний гідролізер) – феромагнітного ротора, розроблено проект шнекового електромеханічного гідролізера, для здійснення практичних дослідів з переробки сировини. Розроблено систему непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером за умов ступінчатої зміни обертового моменту за бажаного, фіксованого значення кутової швидкості обертання та циклічної зміни кутової швидкості обертання. Отримано графічні залежності параметрів відповідно до режимів роботи. Побудовано макетний зразок робочого органу електротехнологічного комплексу для гідролізної переробки побічних продуктів птахівництва (двошнековий електромеханічний гідролізер) – феромагнітного ротора. Проведено практичні дослідження, Середні відхилення між моделюванням та експериментом становили: для пускового моменту не більше $2 \text{ Н} \cdot \text{м}$; для магнітної індукції на поверхні ротора не більше $0,013 \text{ Тл}$; для магнітної індукції

по верхній грані лопаток ротора не більше 3 мТл. Доведено адекватність математичних досліджень. Розроблено макетний зразок шнекового електромеханічного гідролізера. Проведено математичні та експериментальні дослідження, досліджено електромагнітні та теплові характеристики системи. Проведено дослідження з переробки курячого пір'я, отримано вихідну сировину – гідролізоване пір'яне борошно. Сформовано рекомендації з проектування шнекового електромеханічного гідролізера.

4. Удосконалено математичну модель вібраційних процесів феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера шляхом об'ємного інтегрування геометрії феромагнітного ротора, введення аналізу електромагнітного тензору напруженості, виявленню амплітуд і частоти вібраційних сил у поперечному та осьовому напрямках, визначенню об'ємної щільності електричних втрат.

5. Вперше на основі застосування розробленої математичної тривимірної моделі двошнекового електромеханічного гідролізера отримано розподіл магнітної індукції, щільності струму і магнітного векторного потенціалу на поверхні феромагнітного ротора та верхньої грані шнекової навивки.

6. Вперше розроблено комплексу математичну модель електромагнітних і теплових процесів, динаміки руху кластерів нанорідини для двошнекового електромеханічного гідролізера з застосуванням нанорідини у порожнині феромагнітного ротора, що дає змогу формувати умови підвищення енергетичних показників системи завдяки акумуляції теплоти та зменшенню магнітного опору.

7. Вперше на основі застосування розробленої схеми заміщення електромагнітного гідролізера для dq компонент струмів і потокозчеплень та відповідної імітації моделі непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером отримано залежності основних електромеханічних параметрів за умов ступінчастої зміни обертового моменту та циклічної зміни кутової швидкості.

8. Розвинуто метод непрямого полеорієнтованого керування для складних електромеханічних систем з формуванням відповідних керуючих команд регуляторів магнітного потоку і обертового моменту, який дозволяє вести непряме керування з

орієнтацією на поле без вимірювання потоку в повітряному зазорі у випадку орієнтації з низькою швидкістю і адаптації до постійної зміни індуктивностей намагнічування та опору роторів двошнекового електромеханічного гідролізера.

9. Запропонована візуальна модель молекулярної структури кератинової сировини для проведення симуляцій молекулярної динаміки під впливом температури, тиску та магнітного поля, що дозволяє формувати додаткові умови впливу на руйнування дисульфідних ковалентних зв'язків та водневих зв'язків в структурі матеріалу.

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. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, T. Mokhothu, “Valorisation of chicken feathers: Characterisation of thermal, mechanical and electrical properties”, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Vol. 9, pp. 27-34, 2018. doi:10.1016/j.scp.2018.05.003
3. 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
4. M. Zhan, R. P. Wool, J. Q. Xiao, “Electrical properties of chicken feather fiber reinforced epoxy composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42(3), pp. 229-233, 2011. doi:10.1016/j.compositesa.2010.11.007
5. T. Luo, S. Hao, X. Chen, J. Wang, Q. Yang, Y. Wang, Y. Weng, H. Wei, J. Zhou, B. Wang, “Development and assessment of kerateine nanoparticles for use as a hemostatic agent”, *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, Vol. 63, pp. 352-358, 2016. doi:10.1016/j.msec.2016.03.007
6. M. Arshad, M. A. Khosa, T. Siddique, A. Ullah, “Modified biopolymers as sorbents for the removal of naphthenic acids from oil sands process affected water (OSPW)”, *Chemosphere*, Vol. 163, pp. 334-341, 2016. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.08.015
7. A. Nurdiawati, B. Nakhshiniey, I. Nuran Zaini, N. Saidov, F. Takahashi, K. Yoshikawa, “Characterization of potential liquid fertilizers obtained by hydrothermal treatment of chicken feathers”, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 37(1), pp. 375-382, 2018. doi:10.1002/ep.12688
8. B. Wang, W. Yang, J. McKittrick, M. A. Meyers, “Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration”, *Progress in Materials Science*, Vol. 76, pp. 229–318, 2016. doi:10.1016/j.pmatsci.2015.06.001

9. A. Chen, W. Donghui, C. S. J. Johnson, “Determination of the Binding Isotherm and Size of the Bovine Serum Albumin-Sodium Dodecyl Sulfate Complex by Diffusion-Ordered 2D NMR”, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol. 99, pp. 828-834, 1995. doi:10.1021/j100002a054
10. Y. Ji, J. Chen, J. Lv, Z. Li, L. Xing, S. Ding, “Extraction of keratin with ionic liquids from poultry feather”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 132, pp. 577-583, 2014. doi:10.1016/j.seppur.2014.05.049
11. I. Sinkiewicz, A. Śliwińska, H. Staroszczyk, I. Kołodziejska, “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
12. I. H. Panasenko, P. I. Lokes, S. V. Aranchiy, “Recommendations from convert feather and downy raw material in protein food”, Poltava, 26 (in Ukrainian)
13. 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
14. I. N. Zaini, S. Novianti, A. Nurdiawati, A. R. Irhamna, M. Aziz, K. Yoshikawa, “Investigation of the physical characteristics of washed hydrochar pellets made from empty fruit bunch”, *Fuel Processing Technology*, Vol. 160, pp. 109-120, 2017. doi:10.1016/j.fuproc.2017.02.020
15. M. M. Mazlan, R. A. Talib, N. F. Mail, F. S. Taip, N. L. Chin, R. Sulaiman, R. Shukri, M. Z. Mohd Nor, “Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss”, *International Journal of Food Properties*, Vol. 22, pp.54–70, 2019. doi:10.1080/10942912.2019.1568458
16. P. Singha, K. Muthukumarappan, “Effects of processing conditions on the system parameters during single screw extrusion of blend containing apple pomace”, *The Journal of Food Process Engineering*, Vol. 40(4), pp. 1-11, 2016. doi:10.1111/jfpe.12513
17. C. Feng, Z. Li, Z. Wang, B. Wang, Z. Wang, “Optimizing torque rheometry parameters for assessing the rheological characteristics and extrusion processability of wood plastic composites”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 32(1), pp. 123–140, 2019. doi:10.1177/0892705717744828

18. 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

19. J. Vanoverschelde, V. Vanoverschelde, “Werkwijze voor het bereiden van een verteerbaar pluimen of haarmeel”, Belgium Patent BE1024444B1, Feb. 27, 2018

20. J. Vanoverschelde, V. Vanoverschelde, “Method for preparing digestible feather or hair meal”, European Patent Office Patent EP3262952A1, Jan. 3, 2018

21. Спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини. Патент 125774, А23К 10/26, заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. - № а202007099, заявл. 02.06.2022, опубл. 01.06.2022, Бюл. № 22. М. М. Заблудський; О. А. Марченко; С. І. Ковальчук; І. П. Радько

22. 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. Є. П. Бармашин; В. В. Лук'янчук; Л. В. Ромушкевич; В. О. Сенатос

23. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, “Valorisation of chicken feathers: recycling and recovery routes. In: di Pula, S. Margherita (Ed.)”, *Proceedings of the 16th International Waste Management and Landfill Symposium, IWWG*, 2017

24. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, D. Chunilall, “Valorisation of chicken feathers: characterisation of physical properties and morphological structure”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 149, pp. 349-365, 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.112

25. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, D. Chunilall, “Valorisation of chicken feathers: characterisation of chemical properties”, *Waste Manag*, Vol. 68, pp. 626–635, 2017. doi:10.1016/j.wasman.2017.06.050

26. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, D. Chunilall, “Valorisation of chicken feathers: Application in paper production”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 164, pp. 1324-1331, 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.034

27. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, “Valorisation of chicken feather barbs: Utilisation in yarn production and technical textile applications”, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Vol. 8, pp. 38-49, 2018. doi:10.1016/j.scp.2018.02.002
28. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, “Valorisation of waste chicken feathers: Optimisation of decontamination and pre-treatment with bleaching agents using response surface methodology”, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Vol. 8, pp. 21-37, 2018. doi:10.1016/j.scp.2018.02.003
29. T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, L. Ndlela, “Optimisation of surfactant decontamination and pre-treatment of waste chicken feathers by using response surface methodology”, *Waste Management*, Vol. 72, pp. 371-388, 2018. doi:10.1016/j.wasman.2017.11.013
30. D. Lubbert, A. Meents, E. Weckert, “Accurate rocking-curve measurements on protein crystals grown in a homogeneous magnetic field of 2.4 T”, *Acta Cryst*, Vol. 60, pp. 987-998, 2004
31. N. I. Wakayama, “Quantitative study of crystallization kinetics of hen egg-white lysozyme using magnetic orientation”, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 191, pp. 199-205, 1998
32. M. Ataka, N. I. Wakayama, “Effects of a magnetic field and magnetization force on protein crystal growth. Why does a magnet improve the quality of some crystals?”, *Acta Crystallogr D Biol Crystallogr*, Vol. 58, pp. 1708-1710, 2002
33. V. I. Lobyshev, “Water is a sensor to weak forces including electromagnetic fields of low intensity”, *Electromagnetic Biology and Medicine*, Vol. 24(3), pp. 449-461, 2005
34. V. Elia, S. Baiano, I. Duro, E. Napoli, M. Niccoli, L. Nonatelli, “Permanent physico-chemical properties of extremely diluted aqueous solutions of homeopathic medicines”, *Homeopathy*, Vol. 93(3), pp. 144-150, 2004
35. F. Campuzano, R. C. Brown, J. D. Martínez, “Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 102, pp. 372-409, 2019. doi:10.1016/j.rser.2018.12.014

36. P. Brassard, S. Godbout, V. Raghavan, “Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: A review”, *Biosystems Engineering*, Vol. 161, pp. 80-92, 2017. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020
37. M. Mushtruk, M. Gudzenko, I. Palamarchuk, V. Vasylyv, N. Slobodyanyuk, A. Kuts, O. Nychyk, O. Salavor, A. Bober, “Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder”, *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, Vol. 14, pp. 937-944, 2020. doi:10.5219/1436
38. 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
39. 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
40. 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
41. 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
42. 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
43. 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

44. 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
45. 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
46. 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
47. E. Menefee, G. Yee, “Thermally-Induced Structural Changes in Wool”, *Textile Research Journal*, Vol. 35(9), 1965. doi:10.1177/004051756503500904
48. P. Milczarek, M. Zielinski, M. L. Garcia, “The mechanism and stability of thermal transitions in hair keratin”, *Colloid and Polymer Science*, Vol. 200, pp. 1106-1115, 1992. doi:10.1007/BF00652875
49. F. J. Wortmann, M. Stapels, R. Elliott, L. Chandra, “The effect of water on the glass transition of human hair”, *Biopolymers*, Vol. 81(5), pp. 371-375, 2006. doi:10.1002/bip.20429
50. A. R. Haly, J. W. Snaith, “The Heat of the Phase Transformation in Wool Keratin Under Various Conditions”, *Textile Research Journal*, Vol. 40(2), pp. 142-146, 1970. doi:10.1177/004051757004000207
51. V. F. Monteiro, A. P. Maciel, E. Longo, “Thermal analysis of caucasian human hair”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 79(2), pp. 289-293, 2005. doi:10.1007/s10973-005-0051-9
52. H. Cheng, X. Zhu, C. Zhu, J. Qian, N. Zhu, L. Zhao, J. Chen, “Hydrolysis technology of biomass waste to produce amino acids in sub-critical water”, *Bioresour. Technology*, Vol. 99(9), pp. 3337–3341, 2008. doi:10.1016/j.biortech.2007.08.024

53. G. Coward-Kelly, V. S. Chang, F. K. Agbogbo, M. T. Holtzapple, “Lime treatment of keratinous materials for the generation of highly digestible animal feed: 1. Chicken feathers”, *Bioresource Technology*, Vol. 97(11), pp. 1337–1343, 2006. doi:10.1016/j.biortech.2005.05.021

54. K. M. Arai, R. Takahashi, Y. Yokote, K. Akahane, “The primary structure of feather keratins from duck (*Anas platyrhynchos*) and pigeon (*Columba livia*)”, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure and Molecular Enzymology*, Vol. 873(1), pp. 6-12, 1986. doi:10.1016/0167-4838(86)90182-2

55. I. J. O'Donnell, A. S. Inglis, “Amino acid sequence of a feather keratin from silver gull (*Larus novae-hollandiae*) and comparison with one from emu (*Dromaius novae-hollandiae*)”, *Aust J Biol Sci.*, Vol. 27(4), pp. 369-382, 1974. doi:10.1071/bi9740369

56. I. J. O'Donnell, “The complete amino acid sequence of a feather keratin from emu (*Dromaius novae-hollandiae*)”, *Aust J Biol Sci.*, Vol. 26(2), pp. 415-435, 1973. doi:10.1071/bi9730415

57. M. Babaei, I. C. Jones, K. Dayal, M. S. Mauter, “Computing the Diamagnetic Susceptibility and Diamagnetic Anisotropy of Membrane Proteins from Structural Subunits”, *Journal of Chemical Theory and Computation*, Vol. 13(6), pp. 2945-2953, 2017. doi:10.1021/acs.jctc.6b01251

58. V. Balzani, M. Gómez-López, J. F. Stoddart, “Molecular Machines”, *Acc. Chem. Res.*, Vol. 31(7), pp. 405-414, 1998. doi:10.1021/ar970340y

59. N. Zablodskiy, S. Kovalchuk, R. Chuenko, O. Romanenko, V. Gritsyuk, “The nanofluids application in a twin-screw electromechanical hydrolyser”, *2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO)*, Montreal, QC, Canada, 2021. doi:10.1109/NANO51122.2021.9514326

60. N. Zablodskiy, S. Kovalchuk, “The main aspects of the technology of processing keratin raw materials under the influence of a magnetic field”, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2020. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250153

61. *AC/DC Module User's Guide*, COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018

62. 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

63. S. Kovalchuk, N. Zablodskiy, A. Zhylytsov, R. Chuenko, V. Gritsyuk, “The numerical analysis of thermal processes in a twin-screw electromechanical hydrolyser for poultry by-products processing”, *Electrotechnic and Computer Systems*, Vol. 34(110), pp. 96-103. doi:10.15276/eltecs.34.110.2021.10

64. *Multibody Dynamics Module User's Guide*, COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018

65. N. Zablodsky, S. Kovalchuk, A. Bereziuk, A. Zhylytsov, V. Gritsyuk, “The Numerical Analysis of Vibration Parameters in the Working Element of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyser for Poultry by-Products Processing”, *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2021. doi:10.1109/MEES52427.2021.9598565

66. Н. Н. Заблодський, В. Е. Плюгин, “Математическое моделирование тепловых процессов в шнековом электромеханическом преобразователе с использованием Matlab/Simulink”, *Вісник НТУ «ХПИ»*, №38(1081), ст. 90-97, 2014

67. *Heat Transfer Module User's Guide*, COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018

68. G. Zeng, Y. Xiang-yu, H. Yin, Y. Pei, S. Zhao, J. Cao, L. Qiu, “Asynchronous Machine With Ferrofluid in Gap: Modeling, Simulation, and Analysis”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 56(1), 2020. doi:10.1109/TMAG.2019.2948614

69. A. Nethe, T. Scholz, H.-D. Stahlmann, M. Filtz, “Ferrofluids in electric motors-a numerical process model”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38(2), 2002. doi:10.1109/20.996301

70. S. Engelmann, A. Nethe, Th. Scholz, H.-D. Stahlmann, “Concept of a new type of electric machines using ferrofluids”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 293(1), pp. 685-689, 2005. doi:10.1016/j.jmmm.2005.02.044

71. *Microfluidics Module User's Guide*, COMSOL Inc., Burlington, MA, USA, 2018

72. S. Chakraborty, P. K. Panigrahi, “Stability of nanofluid: A review”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 174, 2020. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115259
73. M. Lee, Y. J. Kim, “Thermomagnetic Convection of Ferrofluid in an Enclosure Channel with an Internal Magnetic Field”, *Micromachines (Basel)*, Vol. 10(9), 2019. doi:10.3390/mi10090553
74. A. O. Ivanov, O. B. Kuznetsova, “Magnetic properties of dense ferrofluids: an influence of interparticle correlations”, *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, Vol. 64(1), 2001. doi:10.1103/PhysRevE.64.041405
75. Z. Wang, C. Holm, H. W. Müller, “Molecular dynamics study on the equilibrium magnetization properties and structure of ferrofluids”, *Phys. Rev. E Stat. Nonlin. Soft. Matter. Phys.*, Vol. 66, 2002. doi:10.1103/PhysRevE.66.021405
76. I. J. Yang, S. W. Song, D. H. Kim, K. S. Kim, W. H. Kim, “Improvement in Torque Density by Ferrofluid Injection into Magnet Tolerance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor”, *Energies*, Vol. 14(6), 2021. doi:10.3390/en14061736
77. N. Zablodsky, S. Kovalchuk, R. Chuenko, A. Zhylytsov, V. Gritsyuk, “The numerical investigation of magnetic properties of metal-oxide based nanofluid”, *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2021. doi:10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569996
78. F. Weik, R. Weeber, K. Szuttor, K. Breitsprecher, J. Graaf, M. Kuron, J. Landsgesell, H. Menke, D. Sean, C. Holm, “ESPReso 4.0—an extensible software package for simulating soft matter systems”, *The European Physical Journal Special Topics*, Vol. 227(14), pp. 1789-1816, 2019. doi:10.1140/epjst/e2019-800186-9
79. T. Kristóf, I. Szalai, “Magnetic properties in monolayers of a model polydisperse ferrofluid”, *Phys. Rev.*, Vol. 72(4), 2005. doi:10.1103/PhysRevE.72.041105
80. A. Shafee, R. U. Haq, M. Sheikholeslami, J. A. A. Herki, T. K. Nguyen, “An entropy generation analysis for MHD water based Fe₃O₄ ferrofluid through a porous semi annulus cavity via CVFEM”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 108, 2019. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104295
81. Електрична шнекова установка для виготовлення протейінової кормової добавки з пухо-перової сировини. Патент України на корисну модель №147388,

A23K10/26, заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. - № а202007098; заявл. 05.11.2020; опубл. 05.05.2021, Бюл. № 18/2021. М. М. Заблодський; О. А. Марченко; С. І. Ковальчук; І. П. Радько

82. 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

83. S. Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, L. Chang, “A Novel Online Parameter Estimation Method for Indirect Field Oriented Induction Motor Drives”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32(4), pp. 1562-1573, 2017. doi:10.1109/TEC.2017.2699681

84. N. Yan, X. Cao, Z. Deng, “Direct Torque Control for Switched Reluctance Motor to Obtain High Torque–Ampere Ratio”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66(7), pp. 5144-5152, 2019. doi:10.1109/tie.2018.2870355

85. R. H. Kumar, A. Iqbal, N. C. Lenin, “Review of recent advancements of direct torque control in induction motor drives – a decade of progress”, *IET Power Electronics*, Vol. 11(1), pp. 1-15, 2018. doi:10.1049/iet-pel.2017.0252

86. F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodríguez, R. Kennel, “Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Orient-ed Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control”, *Energies*, Vol. 11(1), 2018. doi:10.3390/en11010120

87. L. Amezquita-Brooks, J. U. Liceaga, E. Liceaga-Castro, “Speed and Position Controllers Using Indirect Field-Oriented Control: A Classical Control Approach”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61(4), pp. 1928-1943, 2014. doi:10.1109/tie.2013.2262750

88. V. M. R. Oliveira, S. R. Camargo, L. F. Encarnação, “Field Oriented Predictive Current Control on NPC Driving an Induction Motor” *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Buenos Aires, 2020. doi:10.1109/icit45562.2020.9067236

89. H. Benbouhenni, “Seven-Level Direct Torque Control of Induction Motor Based on Artificial Neural Networks with Regulation Speed Using Fuzzy PI Controller”, *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 14(1), pp. 85-94, 2018. doi:10.22068/ijeee.14.1.85

90. M. R. Nikzad, B. Asaei, S. O. Ahmadi, “Discrete Duty-Cycle-Control Method for Direct Torque Control of Induction Motor Drives With Model Predictive Solution”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33(3), pp. 2317-2329, 2018. doi:10.1109/tpel.2017.2690304
91. M. S. Mousavi, S. A. Davari, V. Nekoukar, C. Garcia, J. Rodriguez, “A Robust Torque and Flux Prediction Model by a Modified Disturbance Rejection Method for Finite-Set Model-Predictive Control of Induction Motor”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36(8), pp. 9322-9333, 2021. doi:10.1109/tpel.2021.3054242
92. C. Ekaputri, A. Syaichu-Rohman, “Model predictive control (MPC) design and implementation using algorithm-3 on board SPARTAN 6 FPGA SP605 evaluation kit”, *2013 3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, Ungasan, 2013. doi:10.1109/ica.2013.6734056
93. L. Wang, “Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®”, *Springer*, London, 2009. doi:10.1007/978-1-84882-331-0
94. H. Abu-Rub, A. Iqbal, J. Guziński, “High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models”, *John Wiley & Sons*, 2012
95. N. Zablodskiy, S. Kovalchuk, “Емпіричне дослідження теплових властивостей шнекового електромеханічного гідролізера для переробки побічних продуктів птахівництва”, *Енергетика і автоматика*, № 4, ст. 5-15, 2022
96. *Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначання вмісту азоту і сирого протеїну*, ДСТУ 7169:2010, липень 2011.
97. *Корми для тварин. Визначання вмісту жиру (ISO 6492:1999, IDT). 3 поправкою*, ДСТУ ISO 6492:2003, липень 2005.
98. *Корми для тварин. Готування проб для дослідження (ISO 6498:1998, IDT)*, ДСТУ ISO 6498:2006, липень 2007.
99. *Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення сирові клітковини*, ДСТУ 8844:2019, вересень 2020.
100. *Корми для тварин. Метод визначання вмісту нейтрально-детергентної клітковини після оброблення амілазою (аНДК) (ISO 16472:2006, IDT)*, ДСТУ ISO 16472:2013, липень 2014.

101. *Корми, комбікорми. Метод визначення кислотно-детергентної клітковини*, ДСТУ 8128:2015, січень 2017.

102. *Корми для тварин. Визначання вмісту сирової золи (ISO 5984:2002, IDT)*, ДСТУ ISO 5984:2004, січень 2006.

103. *Борошно кормове з відходів перероблення птиці. Технічні умови*, ДСТУ 8039:2015, січень 2017.

104. М. В. Гладій, Ю. Ф. Мельник, В. Г. Кебко, Ю. П. Полупан, І. І. Муржа, “Сучасні технології переробки відходів птахівництва і виробництва високопротеїнових кормових добавок: вітчизняний і зарубіжний досвід”, *Розведення і генетика тварин*, № 51, ст. 302-310, 2016.

ДОДАТКИ

Креслення складових компонент макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

Метало-профільна конструкція виготовлена шляхом зварювання труб профільних квадратних 20x20x1,2 мм. Габаритні розміри конструкції вказані на кресленні, рис. А.1

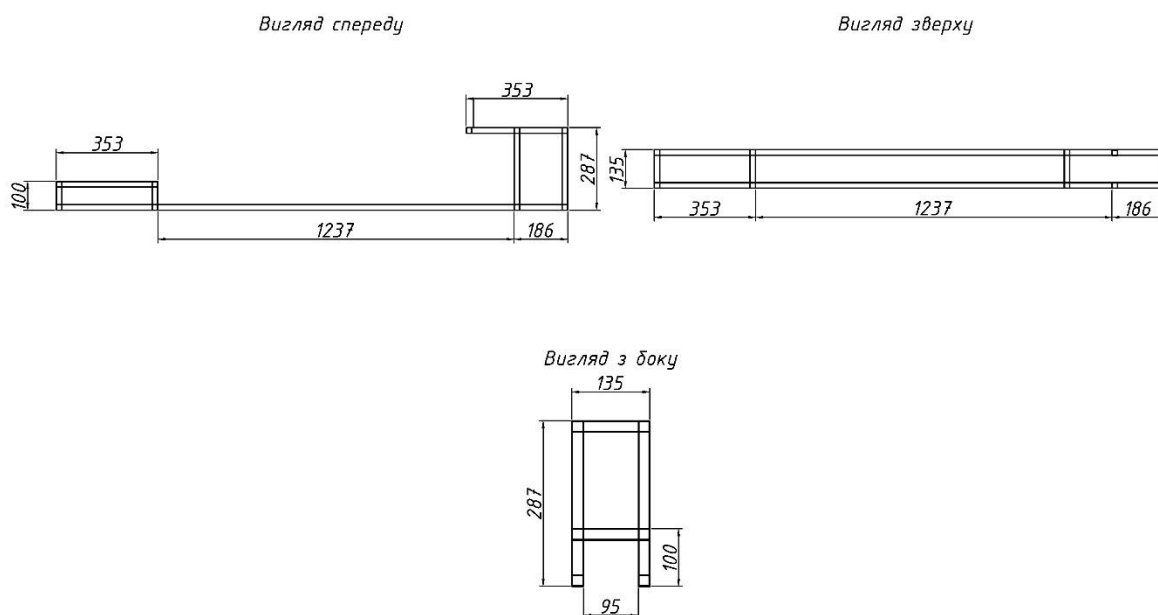


Рис. А.1. Метало-профільна конструкція

Блоки завантажування і вивантажування сировини виготовлено з м'ясорубок побутових ГОСТ 4025-95. Виконано отвори діаметром 5 мм на корпусах м'ясорубок та пластинах герметизації блоків, для кріплень використано кут перфорований 27x27x16 мм 1,8 мм в комплекті з метизами: болт метричний DIN933 5x20 мм, гайка шестигранна М5, шайба с резиноюю прокладкою М5х16 мм. Пластини герметизації блоків виконано з полоси сталеві 100x8 мм. Отвори та зазори заклеєно шнуром керамічним термостійким самоклеючим 20 мм х 3,5 мм. Блок завантажування-вивантажування сировини зображено на рис. А.2.

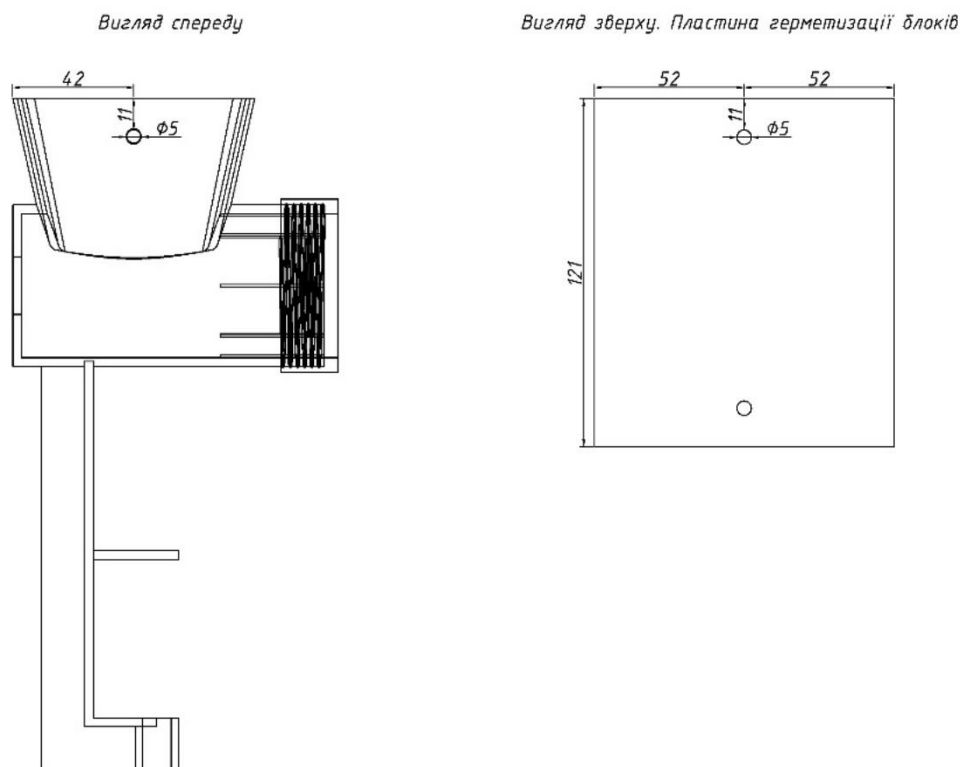


Рис. А.2. Блок завантажування - вивантажування сировини

Шнек виготовлено зі сталюого кругляка $\varnothing 43$ мм шляхом виконання слюсарних робіт та зварювання виготовленого валу з витками шнека. Конструкція шнека представлена на рис. А.3.

В якості блоку нагріву та впливу магнітним полем використано статор заглибного насосу БЦПЕ 0,5-40 (рис. А.4). Обмотку статору перемотано, використовуючи обмотку з високою температурою нагріву. Поверхню зовнішньої оболонки робочого середовища ізолювано термостійким матеріалом.

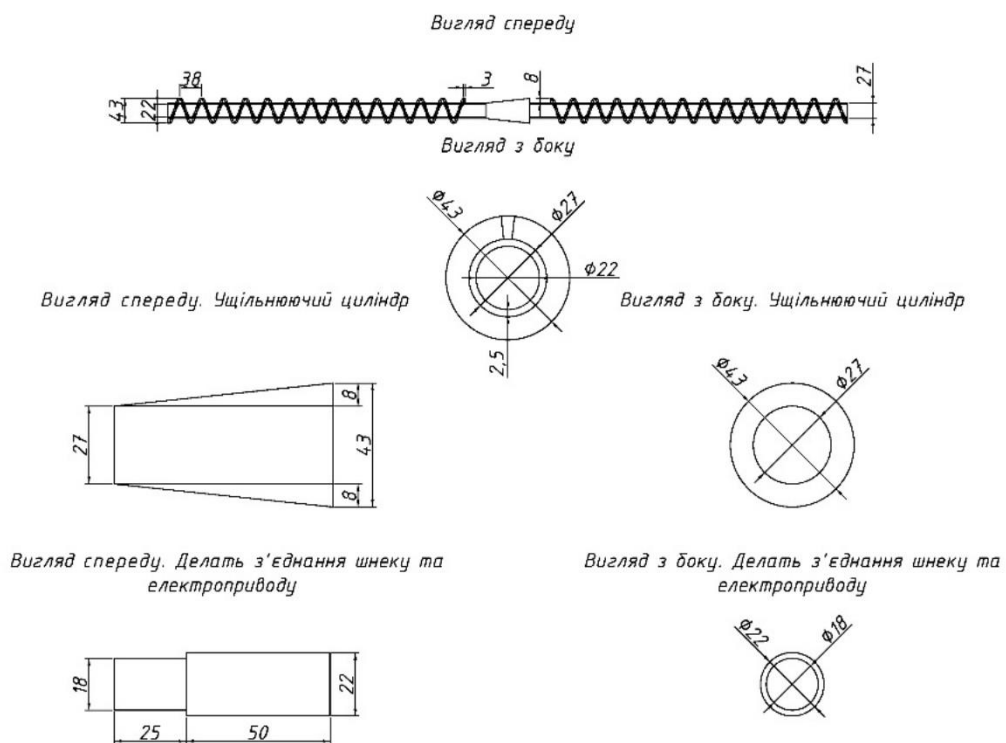


Рис. А.3. Конструкція шнека

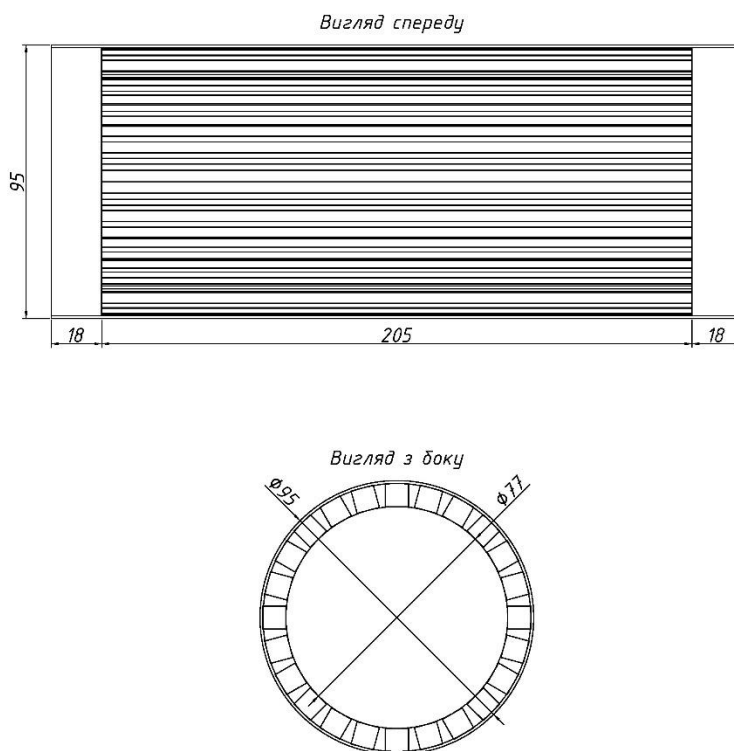


Рис. А.4. Блок нагріву та впливу магнітним полем

Основні характеристики і параметри технічних засобів, що застосовані під час досліджень

Динамометр аналоговий пружинний універсальний НК-300, призначений для вимірювання зусиль розтягу і стиску. Застосовується в машинобудуванні та інших галузях промисловості, клас точності 0,5 % (рис. Б.1).

Tenmars TM-191 Magnetic Field Meter, призначений для вимірювання електромагнітних полів наднизької частоти від 30 Гц до 300 Гц. Одиницями вимірювання магнітного поля є Тесла (Тл) або Гаус (Гс) (рис. Б.1).

Tenmars TM-190 Multi Field EMF Meter, компактний пристрій для вимірювання електромагнітного, електричного полів та потужність радіочастот. Вимірює високочастотні електромагнітні поля в діапазоні частот від 50 МГц до 3,5 ГГц і низькочастотні електричні та магнітні поля у частоті 50-60 Гц (рис. Б.1).



Рис. Б.1. Вимірювальні пристрої НК-300, Tenmars TM-191 Magnetic Field Meter, Tenmars TM-190 Multi Field EMF Meter

Блоки завантаження, вивантаження сировини макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера виконані з м'ясорубки ручної дюралюмінієвої ПААЗ МА-С, висота 260 мм, ширина 105 мм, вага 0,98 кг (рис. Б.2).



Рис. Б.2. М'ясорубка ручна дюралюмінієва ПААЗ МА-С

В якості статорів для макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера обрано статор в корпусі (обмотка двигуна) для насосу Водолій БЦПЭ 0,5-40, висота 238 мм, напруга 220 В, номінальна споживана потужність 720 Вт, частота мережі 50 Гц, споживаний струм 3,3 А, частота обертання 2800 об/хв, режим роботи – тривалий (рис. Б.3).



Рис. Б.3. Статор в корпусі (обмотка двигуна) для насосу Водолій БЦПЭ 0,5-40

В якості зовнішньої оболонки робочої зони макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера використано трубу $d50 \times 50 \times 50 \times 2 \times 1000$ мм алюмінієву. Труба була покрита ізоляційною термозбіжною плівкою TechnoSystems ТС 1,41 5000x100x1,0, виготовлена з поліолефіну, ступінь усадки 1,4, діапазон робочих температур $-45-125$ °С (рис. Б.4).



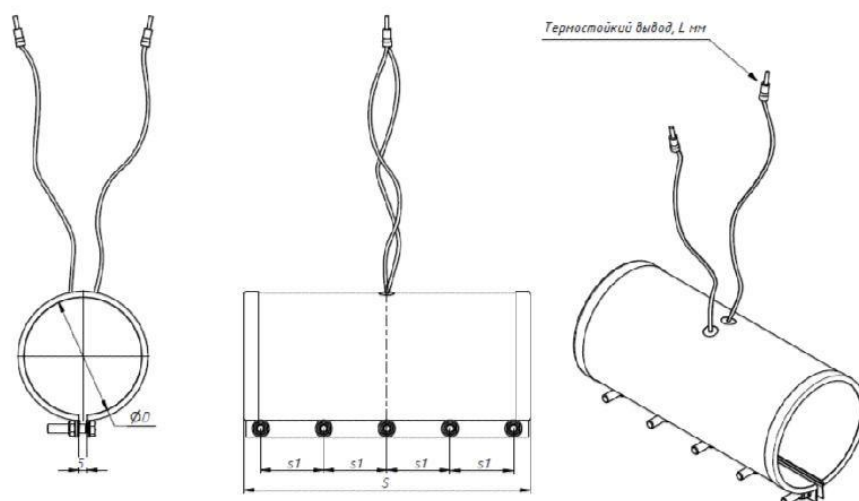
Рис. Б.4. Зовнішня оболонка робочої зони макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

Нагрівний кабель SRF 30-2CR 30 Вт/м (рис. Б.5). Саморегульований нагрівний кабель працює за принципом позитивного температурного коефіцієнту.

ЕНКм 52x200, 1,2 кВт, 230 В – електронагрівач кільцевий міканітовий з температурою нагріву до 350 °С, рис. Б.6, Б.7. Виготовляється з металу з високим опором, намотаним на підставку. Ізоляція в даному типі манжетних електронагрівачів виконана з слюдопластової пластини з високою термоізоляцією.



Рис. Б.5. Саморегульований нагрівний кабель SRF 30-2CR



Диаметр D, мм	Ширина нагревателя S, мм	Расстояние между креплениями	Напряжение, V	Длина вывода L, м	Тип подключения	Мощность, P, кВт	Термопара
52	200	45	230	2	1	1,2	

Рис. Б.6. Конструкція нагрівача ЕНКм 52х200



Рис. Б.7. Електронагрівач кільцевий міканітовий ЕНКм 52x200, 1,2 кВт, 230 В

Цифровий термостат TENSE DT-36E (рис. Б.8). Реле контролю температури з мікропроцесорним керуванням, призначене для підтримання заданого значення температури середовища. Тип термодатчика – термопара J типу. Діапазон вимірювання 0-600 °С, напруга 220 В, габарити 78x36 мм.



Рис. Б.8. Цифровий термостат TENSE DT-36E, 0-600 °С

Пірометр (безконтактний термометр) VENETECH GM533A (рис. Б.9.), діапазон вимірювання $-50-530$ °С, показник візування 12:1, коефіцієнт теплового випромінювання 0,1-1, спектр 5-14 мкм.



Рис. Б.9. Інфрачервоний, оптичний пірометр VENETECH GM533A

Для приєднання вакуумного насосу використані: шланг HS-115 R-134 HongSen, колектор 1 вентильний HS-466NAH, кран Універсал СТ-339, рис. Б.10.



Рис. Б.10. Шланг заправний HS-115 R-134 HongSen, колектор 1 вентильний HS-466NAH, шланг універсальний для заправки фреону, кран Універсал СТ-339

Вакуумний насос Leeto xz-1a одноступеневий 50л/м (рис. Б.11) 1,5 CFM, вакуум 2 Па, 220 В, 50 Гц, потужність 1/4 HP.



Рис. Б.11. Вакуумний насос Leeto xz-1a одноступеневий 50 л/м

Для підключення живлення застосовано кабель ПВС 3х2,5мм². Статори підключенні з використанням конденсаторної коробки, конденсатори СВВ60-Г 25 мкФ, рис. Б.12.



Рис. Б.12. Кабель живлення та конденсаторна коробка статора БЦПЭ 0,5-40У

Шнек макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера виготовлений шляхом слюсарних, токарних та зварювальних робіт з кругляка сталюого, з приварюванням витків до суцільного вала шнека (рис. Б.13, Б.14).



Рис. Б.13. Зварювання валу та витків шнеку макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера



Рис. Б.14. Шнек макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера

Керування електроприводом макетного зразку шнекового електромеханічного гідролізера здійснено частотним перетворювачем ATV320U07N4C (рис. Б.15.): 0,75 кВт; 380-500 В; 2,3 А.



Рис. Б.15. Частотный преобразователь ATV320U07N4C

Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності, створені за тематикою дисертації



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **125774** (13) **C2**
(51) МПК
A23K 10/26 (2016.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2020 07099 (22) Дата подання заявки: 05.11.2020 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 02.06.2022 (41) Публікація відомостей про заяву: 14.04.2021, Бюл.№ 15 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 01.06.2022, Бюл.№ 22</p>	<p>(72) Винахідник(и): Заблодський Микола Миколайович (UA), Марченко Олексій Андрійович (UA), Ковальчук Станіслав Ігорович (UA), Радько Іван Петрович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: Гладій М. В. Інноваційна технологія виробництва високопротеїнових кормових добавок з гідролізованої пір'яної сировини та крові в ТОВ Комплекс Агромарс. / Гладій М. В., Муржа І. І., Кебко В. Г., Полупан Ю. П., Порхун М. Г., Дєдова Л. О., Шеляг І. В. // Розведення і генетика тварин. - 2017.- Випуск 53.- С. 107-115 Гладій М. В. Сучасні технології переробки відходів птахівництва і виробництва високопротеїнових кормових добавок: вітчизняний і зарубіжний досвід. / Гладій М. В., Муржа І. І., Кебко В. Г., Полупан Ю. П., Порхун М. Г., Дєдова Л. О., Шеляг І. В. // Розведення і генетика тварин. - 2016.- Випуск 51.- С. 302-310 RU 2683560 C1, 28.03.2019 RU 2633779 C1, 18.10.2017 EP 3192377 B1, 25.07.2018 CN 102578688 A, 18.07.2012 RU 2684773 C1, 12.04.2019 RU 2413422 C1, 10.03.2011 RU 2279810 C2, 20.07.2006 UA 61868 A, 17.11.2003</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

UA 125774 C2

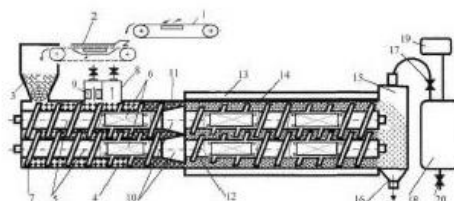
(54) СПОСІБ ВИРОБНИЦТВА КОРМОВОГО БІЛКОВОГО БОРОШНА З ПЕРО-ПУХОВОЇ СИРОВИНИ

(57) Реферат:

Винахід належить до сільського господарства, зокрема до технології виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини, що включає подавання перо-пухової сировини в завантажувальний пристрій шнекової установки, зниження вологості сировини до 35-45 %, ущільнення в робочій зоні шнеків до створення сировинного ущільнення (пробки) за рахунок зменшення прохідного перетину шнекової установки і забезпечення тиску від 1 до 20 МПа, подавання сировини в другу робочу частину шнеків, де її розпушують зменшеною в діаметрі

UA 125774 C2

частиною витків шнеків, перемішують і подрібнюють при температурі 180-260 °С до отримання подрібненої маси, вакуумний вплив через кожні 10-60 с для отримання продукту з вологістю 8-12 %, при якому неподрібнену перо-пухову сировину з вихідною вологістю 60-80 % безперервно подають на транспортер, на якому піддають впливу електромагнітних полів з протилежним відносно осі транспортера напрямком для видалення металевих домішок, після чого за допомогою стрічкового вакуум-фільтра, вихід якого розташовано безпосередньо у завантажувальному пристрої шнекової установки, здійснюють видалення водоповітряної компоненти з сировини до рівня залишкової вологи, необхідної для гідролізу, у першій робочій зоні шнекової установки одночасно з ущільненням здійснюють нагрів до температури 60 °С, вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,025 Т, деаерацію за допомогою камери вакуумування з двома ділянками вздовж робочої зони шнекової установки, на одній з яких здійснюють всмоктування парамагнітного кисню, а на другій ділянці камери вакуумування - всмоктування інших газів, у другій робочій зоні шнекової установки здійснюють вплив градієнтного магнітного поля частотою 1-50 Гц з індукцією до 0,065 Т і чотиристороннє підведення теплової енергії до шару перо-пухової сировини протягом 110 секунд.







УКРАЇНА

(19) UA (11) 147388 (13) U

(51) МПК (2021.01)

A23K 10/00

A23K 10/26 (2016.01)

B03C 1/02 (2006.01)

B03C 1/23 (2006.01)

B03C 3/36 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2020 07097	(72) Винахідник(и): Заблудський Микола Миколайович (UA), Марченко Олексій Андрійович (UA), Ковальчук Станіслав Ігорович (UA), Радько Іван Петрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 05.11.2020	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 06.05.2021	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 05.05.2021, Бюл.№ 18	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ-41, 03041 (UA)

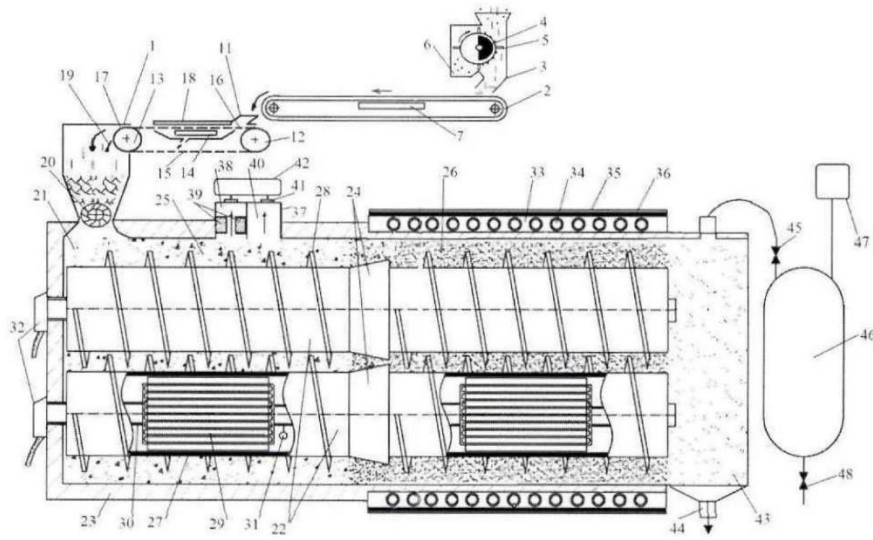
(54) ЕЛЕКТРИЧНА ШНЕКОВА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОТЕЇНОВОЇ КОРМОВОЇ ДОБАВКИ З ПУХО-ПЕРОВОЇ СИРОВИНИ

(57) Реферат:

Електрична шнекова установка для виготовлення протеїнової кормової добавки з пухо-перової сировини, яка містить завантажувальний пристрій, робочу частину шнекової установки, що виконана з двох поздовжньо з'єднаних шнеків, що встановлені в корпусі, із змонтованими в їх центральній ділянці конусами, які розділяють робочу частину шнекової установки на ущільнюючу і реакційну порожнини, за конусами, по ходу переміщення сировини, на початку реакційної порожнини робочої частини шнекової установки витки шнеків виконані меншого розміру, а зовні корпусу реакційної порожнини робочої частини встановлено обігрівальний пристрій, на виході з порожнини шнеків змонтовано технологічну герметичну ємність з вузлом вивантаження готового продукту, яка за допомогою трубопроводу з швидкодіючим клапаном з'єднана з ресивером, сполученим з вакуумним насосом, а у нижній точці ресивера встановлено кран для зливу рідини, що накопичилася в ресивері. Завантажувальний пристрій містить бункер-живильник, стрічковий транспортер з встановленими на ньому магнітним і електродинамічним сепараторами, при цьому магнітний сепаратор розміщується в зоні завантаження стрічкового транспортера, а електродинамічний сепаратор встановлений під верхньою гілкою стрічкового транспортера і створює біжучі електромагнітні поля з протилежним напрямком відносно осі стрічки транспортера, стрічковий вакуум-фільтр.

UA 147388 U

UA 147388 U



Фиг.1

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи та інноваційної діяльності
Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор сільськогосподарських наук, доцент



Вадим КОНДРАТЮК
2023 р.

ПОГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи та розвитку Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор економічних наук, професор, академік НААН

Сергій КВАША
« » 2023 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертації у навчальний процес

Даним актом стверджується, що результати дисертації на тему: «Електротехнологічний комплекс для гідролізої переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля», яка представлена на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», виконаної Ковальчуком Станіславом Ігоровичем, було впроваджено у навчальну програму при викладанні дисципліни «Поліфункціональні електромеханічні перетворювачі технологічного призначення» на кафедрі електротехніки, електромеханіки та електротехнологій при підготовці фахівців ОКР «Магістр» у Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

Директор ННІ Енергетики, автоматичної та енергозбереження, доктор технічних наук, професор

Завідувач кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій, кандидат технічних наук, доцент

Віктор КАПЛУН

Олександр ОКУШКО

Результати досліджень зразків пир'яного борошна, підданих випробуванням



Національний університет біоресурсів і природокористування
України

ФАКУЛЬТЕТ ТВАРИННИЦТВА ТА ВОДНИХ БІОРЕСУРСІВ

КАФЕДРА ГОДІВЛІ ТВАРИН ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОРМІВ

м. Київ, 03041, вул. Генерала Родимцева, 19, тел.: +380445278555

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ № /
6 березня 2023 р.

Дата надходження зразка	27 лютого 2023 р.
Замовник	
ПІБ відповідальної особи від замовника	
Назва підприємства	
Назва корму	Зразок Отченашко

Показник	Результати, г/кг	
	в сухій речовині корму	в кормі натуральної вологості
Волога ¹	115	
Суха речовина ²	885	
Сирий протеїн ³	883,4	781,81
Сирий жир ⁴	4,3	3,81
Сира клітковина ⁵	0,0	0,00
Нейтрально-детергентна клітковина (НДК) ⁶		0,00
Кислотнo-детергентна клітковина (КДК) ⁷		0,00
Безазотисті екстрактивні речовини (БЕР) ⁸	99,8	88,35
Сира зола ⁹	12,5	11,03
Обмінна енергія ВРХ, МДж ⁸	0,0	0,00
Чиста енергія лактації, МДж ⁸	0,0	0,00

¹ - ДСТУ ISO 6498:2006; ² - ДСТУ ISO 6498:2006; ³ - ДСТУ 7169:2010; ⁴ - ДСТУ ISO 6492:2003; ⁵ - ДСТУ 8844:2019; ⁶ - ДСТУ ISO 16472:2013; ⁷ - ДСТУ 8128:2015; ⁸ - показник отримано шляхом математичних розрахунків; ⁹ - ДСТУ ISO 5984:2004.

*Результати досліджень стосуються тільки зразків, підданих випробуванням.
Термін дії результатів: 1 місяць.*

Декан факультету, доцент



Р. Кононенко

Дослідження провів, асистент

Р. Вознюк

Відповідальна особа: Роман Вознюк
+380935177077

IBAN UA038201720313211001202016289, Державної казначейської служби України у м. Києві, Код банку 820172, код ЄДРПОУ 00493706, ІПН 004937026501, Особовий рахунок 18.06.03.07

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

1. Заблодський М. М., **Ковальчук С. І.** Еталонна модель адаптивної системи керування лінійним двигуном. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». 2020. № 3. С. 78–83. *(Здобувачем здійснено розробку та аналіз методу керування лінійним двигуном).*

2. **Kovalchuk S.**, Zablodskiy N., Zhylytsov A., Chuenko R., Gritsyuk V. The numerical analysis of thermal processes in a twin-screw electromechanical hydrolyser for poultry by-products processing. Electrotechnic and Computer System. 2021. Vol. 34 (110). P. 96–103. *(Здобувачем здійснено дослідження теплових процесів, двошнекового електромеханічного гідролізера, розроблено математичну модель, проведено порівняння практичних та математичних досліджень).*

3. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.** Емпіричне дослідження теплових властивостей шнекового електромеханічного гідролізера для переробки побічних продуктів птахівництва. Енергетика і автоматика. 2022. № 4. С. 5–15. *(Здобувачем здійснено обґрунтування методу дослідження, розроблення і виготовлення експериментального зразка та визначення параметрів теплового режиму гідролізера).*

**Стаття у науковому виданні іншої держави,
включеному до міжнародних наукометричних баз даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

4. Zablodskiy M. M., Pliuhin V. E., **Kovalchuk S. I.**, Tietieriev V. O. Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer. Electrical Engineering & Electromechanics. 2022. № 1. P. 3–11. *(Здобувачем здійснено розроблення методу непрямого полеорієнтованого керування двошнековим електромеханічним гідролізером, побудовано математичну модель).*

**Публікації у матеріалах наукових конференцій,
включених до міжнародних наукометричних бази даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

5. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.** The main aspects of the technology of processing keratin raw materials under the influence of a magnetic field. 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020. P. 278–282. *(Здобувачем здійснено дослідження електромагнітних процесів, що мають місце в технологічному процесі двошнекового електромеханічного гідролізера, проведено аналіз впливу магнітного поля на сировину переробки – куряче пір'я).*

6. Zablodskiy N., Chuenko R., Gritsyuk V., **Kovalchuk S.**, Romanenko O. The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer. 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). 2021. P. 130–135. *(Здобувачем здійснено дослідження електромеханічних характеристик, що мають місце в технологічному процесі двошнекового електромеханічного гідролізера, побудовано математичну модель згідно методу скінченних елементів, проведено аналіз результатів математичних та практичних досліджень).*

7. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Chuenko R., Romanenko O., Gritsyuk V. The nanofluids application in a twin-screw electromechanical hydrolyser. 2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO). 2021. P. 108–111. *(Здобувачем здійснено дослідження застосування нанорідини в повітряному проміжку робочого органу двошнекового електромеханічного гідролізера – феромагнітного ротора, розроблено математичну модель згідно методу скінченних елементів).*

8. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Chuenko R., Zhyltsov A., Gritsyuk V. The numerical investigation of magnetic properties of metal-oxide based nanofluid. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. P. 562–566. *(Здобувачем здійснено дослідження магнітних властивостей нанорідини, побудовано математичну модель згідно методів молекулярної динаміки).*

9. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Bereziuk A., Zhyltsov A., Gritsyuk V. The Numerical Analysis of Vibration Parameters in the Working Element of Twin-Screw

Electromechanical Hydrolyser for Poultry by-Products Processing. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2021. P. 1–6. *(Здобувачем здійснено дослідження вібраційних процесів, що мають місце в технологічному процесі двошнекового електромеханічного гідролізера, побудовано математичну модель згідно методу скінченних елементів).*

Патенти України на винахід та корисні моделі

10. Заблодський М. М., Марченко О. А., **Ковальчук С. І.**, Радько І. П. Електрична шнекова установка для виготовлення протеїнової кормової добавки з пухо-перової сировини: патент України на корисну модель № 147388, МПК (2021.01), А23К 10/00, А23К 10/26 (2016.01), В03С 1/02 (2006.01), В03С 1/23 (2006.01), В03С 3/36 (2006.01). Заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № u202007097. Заявлено 05.11.2020. Опубліковано 05.05.2021. Бюл. № 18. *(Здобувачем проведено патентний пошук і здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, розроблено конструктивно-технологічну схему установки).*

11. Заблодський М. М., Марченко О. А., **Ковальчук С. І.**, Радько І. П. Спосіб виробництва кормового білкового борошна з перо-пухової сировини: патент України на винахід № 125774, А23К 10/26. Заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. № a202007099. Заявлено 02.06.2022. Опубліковано 01.06.2022. Бюл. № 22. *(Здобувачем проведено патентний пошук і здійснено порівняльний аналіз існуючих аналогів, обґрунтовано режимні параметри і характеристики запропонованого способу).*

Тези наукових доповідей

12. Заблодський М. М., Наливайко В. А., **Ковальчук С. І.** Основні аспекти технології гідротермічної обробки пухо-пір'яної сировини у тонкому шарі з впливом електромагнітного поля. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: V Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професора Віктора Михайловича Синькова, м. Київ, 19 грудня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. *(Здобувачем сформовано*

основні аспекти технології переробки побічних продуктів птахівництва в двошнековому електромеханічному гідролізері).

13. Заблодський М. М., **Ковальчук С. І.** Електромагнітна біостимуляція пухопір'яної сировини у двошнековому електромеханічному гідролізері. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): IX Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 19–22 травня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 107–108. *(Здобувачем здійснено аналіз впливу магнітного поля на побічні продукти птахівництва під час переробки в двошнековому електромеханічному гідролізері).*

14. Zablodskiy M. M., **Kovalchuk S. I.** Structural characterization, electromagnetic and thermodynamic properties of poultry by-products. Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials (ICEPOM-12): XII International Conference, June 01–05, 2020. P. 288. *(Здобувачем здійснено аналіз результатів дослідження теплових та електричних властивостей курячого пір'я).*

15. Заблодський М. М., Шворов С. А., Клендій П. Б., Андрієвський А. П., **Ковальчук С. І.**, Сподоба М. О. Інноваційна система переробки побічних продуктів птахівництва з впливом електромагнітного поля і автономним енергозабезпеченням. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й Міжнародний конгрес, м. Львів, 23–25 вересня 2020 року: тези доповіді. Львів, 2020. С. 134. *(Здобувачем обґрунтовано застосування двошнекового електромеханічного гідролізера в складі інноваційної системи переробки побічних продуктів птахівництва з автономним енергозабезпеченням).*

16. Zablodskiy N., **Kovalchuk S.**, Chuenko R., Romanenko O., Gritsyuk V. The nanofluids application in a twin-screw electromechanical hydrolyser. 2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO), 28–30 July 2021. Montreal, Canada 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9514326>. *(Здобувачем розроблено математичну модель і встановлено основні закономірності застосування нанорідини в двошнековому електромеханічному гідролізері).*