

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розробка моделі рівня віброакустичних коливань в зоні дії шнекового
електромеханічного перетворювача на сипку речовину
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи КІТПВм-21-1

Нерсеян Д.А.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Грицюк В. Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

(підпис)

2022 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
 Кафедра _____ КІТАМ _____
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
 Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва _____
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ _____

(підпис)

« _____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Нерсеяну Даніілу Акоповичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розробка моделі рівня віброакустичних коливань в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину

Затверджена наказом по університету від _____ 07.11.2022 №1464 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 14.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи _____ Потужність 25 кВт, синхронна частота обертання 750 об/хв., номінальна напруга живлення 380 В.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____ Аналіз технічного завдання; Вступ; Огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин; Визначення актуальності питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів; Математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача; Побудова моделі та аналіз результатів моделювання електромагнітних та віброакустичних процесів шнекового електромеханічного перетворювача; Небезпечні та шкідливі виробничі чинники при експлуатації шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 13 сторінок формату А4

6. Консультанти розділів роботи

| Найменування розділу | Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу | |
|----------------------|---|---|------|
| | | підпис | дата |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|----|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз технічного завдання, вступ | 23.05.22 | виконав |
| 2 | Огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин | 12.09.22 | виконав |
| 3 | Визначення актуальності питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів | 26.09.22 | виконав |
| 4 | Математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача | 24.10.22 | виконав |
| 5 | Побудова моделі та аналіз результатів моделювання електромагнітних та віброакустичних процесів шнекового електромеханічного перетворювача | 14.11.22 | виконав |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки | 02.12.22 | виконав |
| 7 | Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk | 09.12.22 | виконав |
| 8 | Подання роботи на рецензію | 12.12.22 | виконав |
| 9 | Подання роботи на підпис зав. кафедри | 13.12.22 | виконав |
| 10 | Подання роботи до ЕК | 14.12.22 | виконав |

Дата видачі завдання 20.05.2022 р.

Студент _____
(підпис)

Нерсеян Д.А.

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Грицюк В.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 82 с., 23 рис., 2 дод., 35 джерел.

ФЕРОМАГНІТНИЙ РОТОР, ВІБРОАКУСТИЧНІ ПРОЦЕСИ, НАГРІВ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, СИПКИ РЕЧОВИНИ.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та віброакустичні процеси шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин.

Предмет дослідження – електромагнітні характеристики та віброакустичні коливання в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин за результатами дослідження рівня віброакустичних коливань.

Методи дослідження – визначення електромагнітного моменту та рівня віброакустичних коливань за результатами рішення польових задач методом тензора магнітного натягу, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- виконано огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин;
- розглянуто актуальність питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів;
- наведено математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину;
- побудовано модель та виконано аналіз результатів моделювання

електромагнітних та віброакустичних процесів шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин;

– розглянуто небезпечні та шкідливі виробничі чинники при експлуатації шнекового електромеханічного перетворювача.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані на міжнародній конференції.

ABSTRACT

Explanatory note: 82 pp., 23 figs., 2 app., 35 sources.

FEROMAGNETIC ROTOR, VIBRO-ACOUSTIC PROCESSES, HEATING, ELECTROMECHANICAL CONVERTER, DISPERSED SUBSTANCES.

The research object is the electromagnetic and vibroacoustic processes of an auger electromechanical converter for automation of the processing of dispersed materials.

The research subject is electromagnetic characteristics and vibroacoustic oscillations in the work area of the auger electromechanical converter into a dispersed substance.

The qualification work goal is the auger electromechanical converter development for the processing of dispersed solids automation based on the study results of the vibroacoustic oscillations level.

Research methods – the electromagnetic moment and the level of vibroacoustic oscillations determination based on the results of solving field problems using the magnetic tension tensor method, a finite element method for solving nonlinear differential equations for partial derivatives.

To achieve the goal, the following tasks were solved:

- a review of technologies for drying, mixing, dispersing and transporting dispersed solids was made;
- the relevance of the issue of the operation modelling of auger electromechanical converters is considered;
- a mathematical description of electromagnetic and vibroacoustic processes in the work area of the auger electromechanical converter on a dispersed substance is given;

– a model was built and the results analysis of electromagnetic and vibroacoustic processes modelling of the auger electromechanical converter for processing of dispersed solids automation was carried out;

– dangerous and harmful production factors during the operation of the auger electromechanical converter are considered.

The qualification work results were tested at an international conference.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Перелік скорочень | 10 |
| Вступ..... | 11 |
| 1 Технології сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин | 13 |
| 1.1 Актуальність питання сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин..... | 13 |
| 1.2 Огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин | 17 |
| 1.3 Висновки до 1 розділу | 48 |
| 2 Математичне моделювання електромагнітних та віброакустичних процесів.. | 49 |
| 2.1 Актуальність питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів..... | 49 |
| 2.2 Математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину | 50 |
| 2.3 Висновки до 2 розділу | 55 |
| 3 Аналіз результатів моделювання роботи електромеханічного перетворювача | 56 |
| 3.1 Результати обчислень | 56 |
| 3.2 Аналіз обчислення процесів та характеристик..... | 58 |
| 3.3 Небезпечні та шкідливі виробничі чинники при експлуатації шнекового електромеханічного перетворювача | 65 |
| 3.4 Заходи з охорони праці..... | 65 |
| 3.5 Висновки до 3 розділу | 66 |

| | |
|--|----|
| Висновки | 68 |
| Перелік джерел посилання | 69 |
| Додаток А Програма розрахунку..... | 74 |
| Додаток Б Демонстраційний матеріал | 82 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕМП – електромеханічний перетворювач;

ЕП – електромагнітне поле;

ЕРС – електрорушійні сили;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

МФР – масивний феромагнітний ротор.

ПР – порожистий ротор;

ВСТУП

Проблема створення енергозберігаючих і екологічно чистих технологій переробки сировини в різних галузях промисловості і сільському господарстві стала особливо гострою у зв'язку із зростанням цін на енергоносії і недоцільністю експлуатації енергоємних комплексів старого зразка.

Технологічні ланцюги, пов'язані з отриманням, переробкою, транспортуванням, синтезом сипких речовин знайшли широке застосування у багатьох галузях промислового і народного господарства. Існує безліч галузей промисловості, що включають технологічні цикли, де використовуються функції нагрівання, диспергування, перемішування і транспортування дисперсних речовин. Вказані вище операції виконуються за допомогою вітчизняних та іноземних електротехнічних комплексів, які в своїй більшості мають невисокий ККД, займають значні виробничі площі, потребують великої кількості одиниць устаткування та мають тривалі терміни окупності. Оскільки світова економічна криза змінила співвідношення національної валюти до закордонних, а вартість імпортованого обладнання виросла в 1,5-2 рази, виникає потреба у розвитку та виробництві національних електротехнічних комплексів і систем, для впровадження на території України та зарубіжжя.

На сьогодні основними критеріями конкурентоспроможності сучасних електромеханічних систем є: низька собівартість при виробництві та експлуатації, швидкодія в часі, універсальність у застосуванні, надійність та економічність системи з високим коефіцієнтом корисної дії.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та віброакустичні процеси шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин.

Предмет дослідження – електромагнітні характеристики та віброакустичні коливання в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин за результатами дослідження рівня віброакустичних коливань.

Методи дослідження – визначення електромагнітного моменту та рівня віброакустичних коливань за результатами рішення польових задач методом тензора магнітного натягу, кінцево-елементний метод розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин;

- розглянути актуальність питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів;

- навести математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину;

- побудувати модель та виконати аналіз результатів моделювання електромагнітних та віброакустичних процесів шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин.

- розглянути небезпечні та шкідливі виробничі чинники при експлуатації шнекового електромеханічного перетворювача.

Роботу виконано згідно [1–3]. Результати дослідження опубліковані у [4].

1 ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ, ЗМІШУВАННЯ, ДИСПЕРГУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКИХ РЕЧОВИН

1.1 Актуальність питання сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин

Актуальною народногосподарською проблемою в Україні є сушка великих масопотоків вологих сипких (дисперсних) матеріалів – зерна, деревної тирси, стружки, техногенних відходів, піску, дрібного щебеню, силикагелю тощо. Для її вирішення необхідні промислові енергоефективні установки і технології безперервної або циклічної сушки. Створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів (ПЕМП) і технологій на їх основі базується на ідеї поєднання в одному електромеханічному пристрої одночасно нагрівальних, транспортуючих, змішуючих (турбулентноформуєчих) функцій, інтеграції теплової енергії і напрям останньої в зону переробки сировини. Істотними перевагами технологій на основі ПЕМП є не тільки високе значення ККД, значні скорочення виробничої площі, кількості одиниць устаткування і термінів його окупності, але й виконання нових специфічних функцій технологічного призначення, зокрема, вплив на властивості дисперсних речовин, що переробляються.

Дисперсна система – це система, яка створена з двох або більшого числа фаз (тіл), які практично не змішуються і не реагують один з одним хімічно. У типовому випадку двофазної системи перше з речовин (дисперсна фаза) дрібно розподілено в другому (дисперсійне середовище). Якщо фаз кілька, їх можна відокремити один від одного фізичним способом (центрифугувати, сепарувати і т.д.). Найбільш поширеними грубодисперсними системами є системи «тверде тіло – газ» (наприклад, пісок).

По фізичній суті сушка є складним дифузійним процесом. Його швидкість визначається швидкістю дифузії вологи з глибинних частин

матеріалу до поверхні, а потім в навколишнє середовище. Видалення вологи при сушці включає не тільки перенесення матеріалу, але і перенесення тепла, таким чином є теплообмінним і масообмінним процесами.

Вологу можна видаляти і механічним способом: віджимання, центрифугування, відстоювання. Проте, цими способами волога видаляється частково, ретельніше видалення вологи здійснюється шляхом теплової сушки: випаровування вологи, видалення пари.

Підвищення ефективності сушильного устаткування є комплексним завданням, що включає забезпечення високої якості продукції, зниження витрат матеріалів, теплової та електричної енергії, зменшення капітальних і поточних витрат, забезпечення безпеки життєдіяльності персоналу і охорони навколишнього середовища.

Обробка сипких речовин полягає у виконання операцій в такій послідовності: нагрівання - перемішування - транспортування. Цикл операцій описаних вище може бути як закінчений технологічний процес обробки, так і проміжна ланка в переробці продукції.

Оскільки більше 90 % вугілля, що переробляється, збагачується мокрими способами, вологість відвантаженого вугілля є одним з найважливіших показників якості поряд з зольністю, вмістом сірки, теплотою згорання. Зниження вологості пов'язано з зменшенням об'ємів перевозок залізничним транспортом баласту у вигляді надлишкової вологи, запобіганням змерзання вугілля у вагонах у зимовий період, а відповідно, зниженням зверх нормативних їх простоїв під вивантаженням, покращенням техніко-економічних показників виробництва коксу та підвищенням ефективності роботи теплових електростанцій та промислових котельних. У зв'язку з подальшим розвитком механізації здобування вугілля, що обумовлює зростання виходу дрібних класів, об'єми переробки вугілля флотацією зростають, тому питання зневоднення та сушіння вугільних концентратів є дуже актуальним.

Виходячи з вимог до якості та умов перевезення в зимовий та літній періоди року межа оптимальної вологості для зневодненого вугілля складає 6-

8% при початковій вологості шихти 18-20 %, а для побутового палива – 20 %, при початковій вологості 56-58 %. Основна кількість вологи, що залишається в продуктах збагачення після механічного зневоднення, зосереджено в флотаційному (до 45 %) та дрібному концентраті (до 35 %). Дрібні класи вугілля і шламів зневоднюються до конденційної вологості механічними способами (фільтрація та центрифугування) або термічною сушкою.

Дрібний концентрат зневоднюється на грохотах і остаточно у фільтруючих центрифугах; флотаційний концентрат – на спадкових центрифугах; шлам – на грохотах, а далі разом з дрібним концентратом в фільтруючих центрифугах. Після механічного зневоднення продукти мають достатньо високий вміст вологи: крупний концентрат – 6-9 %; дрібний – 8-13%; флотаційний концентрат – 23-29%. Такі якісні показники не відповідають існуючим вимогам по вологості. У зв'язку з цим необхідним є додаткове зневоднення шляхом термічної сушки. Для цього в технологічних схемах збагачувальних фабрик застосовуються барабанні сушарки, труби-сушарки, сушарки киплячого шару, парові трубчаті сушарки, термоаерокласифікатори. Після систем пиловловлювання з сушильних установок разом з випареною вологою в атмосферу викидаються і продукти спалювання палива (відпрацьований теплоносій). Для формування теплоносія на збагачувальних фабриках використовуються різні види палива (мазут, дизельне та моторне пальне, газ та ін.) з вмістом токсогенів і агресивних до металу сполучень.

Щорічно фабриками викидається у повітряний басейн біля 100 млрд. м³ відпрацьованих газів з загальним вмістом 3,5 тис. тон сіркового ангідриду та 40 тис. тон вугільного пилу. Сушильні установки вуглезбагачувальних і брикетних фабрик не тільки забруднюють атмосферу, але й пов'язані зі збитками втрат вугілля у вигляді пилу. Крім того, процеси термічної сушки (особливо високо вологого кам'яного вугілля з високим виходом летучих речовин) постають потенційно небезпечними у відношенні вибухів і спалахів.

Сьогодні широко використовується сушильна машина, де сушильним агентом є гаряче повітря або продукти горіння мінерального палива. Процес

видалення зайвої вологи з сипучого матеріалу пов'язаний із контактом між гарячим термічним агентом (повітрям) та сировиною, яка розміщується, наприклад на полицях. Недоліками даного методу сушіння є: низька продуктивність і енергоефективність; достатньо велика витрата палива (до 2 кг палива на 1 кг випаровування вологи з сировини через великі теплові втрати при висиханні); сушка відбувається у контакті з продуктами згоряння, що призводить до забруднення продукту канцерогенами; деградація навколишнього середовища; ризик пожежі за рахунок пилу та сміття у камерах згоряння палива; необхідність постійного очищення полиць від залишків та сміття; нерівномірне висихання сільськогосподарської продукції; обмеження ринку збуту, якщо регіон не має викопного палива та, як наслідок, транспортні витрати та втрати продукції при транспортуванні.

З метою усунування джерел забруднення навколишнього середовища та запобігання вибухонебезпечних ситуацій необхідна розробка нових технологій сушіння, при яких повинні виконуватись наступні вимоги:

- отримання зневоднених продуктів з необхідними показниками по вологості;
- забезпечення мінімальних енергетичних і капітальних витрат;
- вибухо- та пожежобезпечність;
- екологічна чистота;
- повна автоматизація ведення процесу.

Усі новітні розробки з конвективною сушкою, як найбільш поширеної на вуглезбагачувальних фабриках і контактної сушки на брикетних, засновані на підвищенні температури або швидкості сушильного агента відносно матеріалу, що просушується. Але на сьогодні рівень підвищення температури і відносної швидкості сушильного агента досягли своєї межі, пов'язаної з значним пилоутворенням, перегрівом і вибухонебезпечністю пилу, що утворюється.

1.2 Огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин

Останнім часом в розвинутих вугледобувних країнах інтенсивно ведуться роботи з пошуку та розробки нетрадиційних методів сушки, які відповідають викладеним вище вимогам навіть за рахунок здороження самого процесу.

Відомі нетрадиційні методи сушки умовно поділяються на механічні, електричні, електрофізичні та комбіновані.

Механічні методи сушки. Відомий спосіб сушки вугілля з застосуванням інертних ущільнених вологопоглиначів. Незважаючи на високу ефективність видалення вологи, безпеку і екологічну чистоту процесу сушки дрібних класів вугілля, ця технологія не знайшла промислового застосування у зв'язку з труднощами регенерації інертного вологопоглинача.

Вакуумний (сублімаційний) метод знайшов широке застосування у харчовій та фармацевтичній галузях за стерильності та чистоти процесу. Застосування цього методу у інших галузях промисловості навряд чи обґрунтовано, оскільки процес потребує складної техніки і пов'язаний з високими експлуатаційними витратами.

Використання перегрітої або насиченої пари. Незважаючи на всі свої переваги в частині економічності процесу, підвищення якості вугілля після видалення вологи в автоклавах та ін., цей метод не може бути альтернативним існуючим конвективному і кондуктивному способам сушки вугілля та продуктів збагачення на фабриках за його циклічності та неможливості сушки дрібних (менше 10-13 мкм) класів. Більш доцільним є використання перегрітої пари у якості інертного теплоносія в сушарках «киплячого» шару з замкненим контуром.

Використання ультразвукової енергії для сушки та нагріву вугілля. Дослідженнями встановлено [5], що при ультразвуковій обробці вугілля з інтенсивністю 165 дБ та частотою поля 20 кГц в частках розміром від 2 мкм до 400 мкм досягається практично повне видалення вологи. Температура розігріву

вугілля при цьому знаходиться в діапазоні 65-300 °С у випадку здійснення процесу сушіння на металевому жолобі. Разом з тим встановлено, що використання цього методу обмежується вмістом вологи вугілля в початкових умовах, який не повинен перевищувати 10 %.

Електрофізичні методи нагріву та сушки. До електрофізичних методів віднесено інфрачервоний нагрів і сушка. Процеси інфрачервоної сушки відрізняються тривалістю і малою продуктивністю.

Електричні методи сушки. До цих методів віднесено: діелектричну сушку струмами високої частоти; високочастотну сушку полем високої частоти. Особливістю цих методів є зневоднення часток вологого матеріалу практично без підвищення температури при високій швидкості і можливості автоматизації процесу.

Електровибухові методи сушки засновані на використанні методів електрогідрогазодинаміки сильно точних розрядів в різних середовищах, належать до багатофункціональних наукоємних технологій. З їх допомогою вдається вирішувати безліч завдань в процесі створення енергоресурсозберігаючих технологій для агропромислового комплексу, зокрема створювати принципово новий вид сушильних агрегатів.

Енергоспоживання електровибуховими модулями незначне. При встановленій потужності одного модуля від 20 Вт до 100 Вт та кількості модулів біля 10 витрати електроенергії порівнянні з енерговитратами компресора, а також нагрівальних елементів. Залежно від продуктивності і призначення сушильного агрегату його загальна встановлена потужність коливається від 1 кВт до 5 кВт, що дозволяє вважати новий технологічний процес сушки енергозберігаючим і конкурентоздатним по відношенню до відомих методів сушки сипких матеріалів.

До недоліків можна віднести те, що виникають технологічні складнощі при сушінні високоадгезійних матеріалів, наприклад, при їх високій вологості, наявності на поверхні частинок клейких речовин. Це приводить до необхідності використання полірованих поверхонь в жолобі і періодичного очищення

стислим повітрям жолоба від частинок, що прилипли до поверхонь. Є також обмеження на сушку матеріалів з високим ступенем агломерації частинок підвищеної вологості, що приводить до утворення грудок з частинок висушеного матеріалу.

Електровибухова сушка забезпечує можливість збільшення продуктивності сушки матеріалів при сумісному застосуванні простих, щодо дешевих і екологічно чистих паралельно працюючих модульних сушильних агрегатів на невеликих виробничих площах. Нова технологія може стати однією з найбільш оптимальних для малооб'ємної сушки сипких матеріалів в щадному температурному режимі для збереження в них живильних речовин і забезпечення екологічної чистоти матеріалів [6].

Провести точне техніко-економічне порівняння традиційних і нетрадиційних методів сушки практично неможливо за відсутності даних в умовах промислової експлуатації, різниці конструкцій сушарок, технологічних режимів та організаційних методів ведення процесу сушки. Наприклад, за даними результатів досліджень сушки на металевій стрічці в полі з сантиметровим діапазоном хвиль при втратах 1 кВт·г електроенергії випаровується від 1,1 кг до 2,2 кг води з вугілля класу 0-6 мм, а при сушінні струмами високої частоти 16 МГц витрати електроенергії на видалення 1 кг вологи з вугілля складають від 1 кВт·г до 3 кВт·г. При традиційних методах сушки вугілля в барабанних сушарках, трубах-сушарках загальні витрати енергії у перерахунках на 1 кг випареної вологи складають 1 кВт·г. Тобто прямі витрати енергії при сушінні традиційними методами і струмами високої частоти вищі. Якщо порівняти капітальні витрати на споруди корпусів сушарки, а також шкоду навколишньому середовищу та вибухонебезпечність сучасної техніки і технології сушки за допомогою пари та димових газів, то очевидні переваги нової екологічно чистої і безпечної технології сушки.

Разом з тим усі розглянуті методи мають значні витрати енергії на одиницю випаруваної вологи, значну кількість одиниць обладнання і високі початкові інвестиційні витрати.

Як відомо, сушіння є одним з основних способів консервування рослинної харчової сировини. Тому вдосконалення його способів є актуальним завданням, що стоїть перед виробниками харчової галузі. Вдосконалення способів сушіння ведеться в основному в трьох напрямках:

- підвищення якості готового продукту (збереження в максимальному ступені поживних і біологічно активних речовин, отримання продукту з високими органолептичними, реологічними та іншими показниками);
- зниження енерговитрат;
- підвищення продуктивності апаратів.

Відомі різні способи сушіння харчових рослинних продуктів, але в переважній більшості випадків використовують конвективний спосіб. Якщо необхідно висушити дисперсний продукт, розмір частинок якого знаходиться в діапазоні 1-70 мм (залежно від властивостей частинок), то найбільш ефективним способом є сушіння у псевдорозрідженому шарі.

За конструктивною ознакою всі вживані сушарки з киплячим шаром поділяються на дві великі групи: одно- і багатокамерні. Однокамерні сушарки є найбільш поширеним типом промислових сушарок. Спрощено однокамерна сушарка з киплячим шаром є коробом прямокутного або круглого перетину, в нижню частину якого вбудована перфорована решітка. На решітку зверху подається дисперсний матеріал, знизу вона продувається нагрітим повітрям, при певній швидкості якого продукт переходить в киплячий стан.

Разом з очевидними перевагами сушіння в таких апаратах має ряд недоліків:

- внаслідок хаотичного руху частинок і перемішування їх по всьому об'єму шару час перебування окремих частинок в шарі різко відрізняється від середнього часу, внаслідок того разом з обробленими частинами з апарату виходять і свіжі, а частина обробленого матеріалу тривалий час циркулює в шарі; тому для досягнення необхідного ступеня обробки доводиться збільшувати середній час перебування частинок, що у свою чергу знижує продуктивність апарату;

- інтенсивне перемішування частинок по всьому шару приводить до вирівнювання різних його властивостей, зниженню температурних і концентраційних напорів, що також викликає зниження швидкості процесів;
- значний середній час перебування та інтенсивний рух частинок приводить до подрібнення матеріалу і посиленого пилу;
- відкладення продукту на газорозподільній решітці при сушінні схильних до злипання продуктів.

Існують установки для сушіння піску, які проводяться на базі сушильного барабана продуктивністю від 5 тонн на годину до 20 тонн на годину. Такі установки забезпечують автоматичну підтримку постійної заданої температури в будь-якій з точок барабана. Ця здатність даної техніки закладена в конструкції сушильної установки. На практиці це означає, що температура на вході в сушильний барабан рівна температурі в розвантажувальній частині барабана, а матеріал, підігрітий в передній частині, не міняє своєї температури по всій довжині основного барабана. Температуру можна задавати будь-яку від 80 °С до 300 °С. Якщо ж врахувати, що час знаходження матеріалу в барабані також регулюється, то очевидно, що створюються ідеальні умови, наприклад, для виробництва гіпсу з відходів виробництва лимонної кислоти.

Висушуваний матеріал рухається і в протитечію газам, що відходять. При цьому нахил сушильної установки міняється на зворотний. Основний барабан висушує і підігріває матеріал, а розширена частина доводить температуру матеріалу до потрібної величини. Ця властивість може використовуватися в металургійній промисловості, в дорожньо-будівельному виробництві при нагріві щебне-пісочної суміші до потрібної температури для приготування асфальту.

Істотним чинником у виробництві сухого піску є термін його зберігання після приготування. Як відомо, сухим пісок вважається при вологості від 0 до 0,5 відсотка.

Також не секрет, що всі сипкі матеріали, зокрема сухі будівельні суміші, вбирають вологу з повітря. Звідси витікає, що висушений до вологості 0,5

відсотка пісок довго зберігатися не може. Термін його зберігання не перевищує двох місяців. А термін зберігання сухого піску, приготованого на такому устаткуванні з вологістю 0,1 відсотка, перевищує 1 рік. Це стосується і терміну зберігання сухих будівельних сумішей, приготовлених на такому піску.

Виробництво сухих будівельних сумішей є, як відомо, створенням матеріалів, що відповідають сучасному рівню будівельної індустрії. Разом з поліпшенням якості терпких матеріалів і наповнювачів велику роль для створення сухої будівельної суміші з явно направленими властивостями по міцності, вологостійкості, морозостійкості, атмосферостійкості, теплопровідності грають мінеральні добавки. Це, як правило, дорогі матеріали імпортного і вітчизняного виробництва. Цілеспрямоване застосування добавок додає сухій суміші задані властивості.

Володіючи великими можливостями по зміні якості сухих сумішей, самі мікродобавки мають один істотний недолік. Добавки розкладаються при температурі від 45 °С до 60 °С. Як правило, пісок з сушильних установок поступає з температурою 100-120 °С. Такий пісок, що знаходиться в силосах через свою низьку теплопровідність, може достигати від 3 днів до 10 днів залежно від кліматичних умов. Виникає необхідність охолодження піску перед приготуванням сухої суміші.

Вологу в сирому піску можна умовно розділити на поверхневу, таку, що знаходиться на поверхні кристала, і внутрішню, таку, що знаходиться в нерівностях, западинах, поглибленнях піщинок. Інтенсивність випаровування поверхневої вологи набагато вища, ніж внутрішньої. Іншими словами, енергетичні витрати на випаровування поверхневої вологи нижчі, практично вона випаровується ще до нагріву піску до 100 °С.

Для випаровування вологи, що залишилася, потрібно обов'язково нагрівати пісок вище 100 °С або значно збільшити час знаходження піску в барабані, що знижує продуктивність і економічність технологічної лінії. У разі включення в лінію охолоджувача барабанного типу можна відмовитися від досушування внутрішньої вологи в сушильному барабані, доручивши це

охолоджувачу, і одночасно вирішити проблему охолодження піску. Волога, що залишилася в гарячому піску, а це приблизно 5-9 кілограмів на тону піску, позитивно позначиться на інтенсивності охолодження піску, а теплова енергія піску буде використана на випаровування вологи, що залишилася.

У результаті отримуємо комплексне і економічне вирішення приготування класифікованого сухого піску для сухих сумішей.

На сьогодні практично не використовуються органічні відходи промислового і сільськогосподарського виробництва. Щорічно в Україні створюється біля 40 млн. т. відходів деревини. Якщо їх задіяти, то можна скоротити закупівлю природного газу на 15-30 млрд. м³ на рік. Ефективність більшої частини вітчизняних сушарок, що використовуються для виробництва паливних гранул (пелет), рідинного біопалива з використанням тріски та різних рослин, складає лише 25-35 %.

На підприємствах лісопромислового комплексу України деревні відходи, що утворюються, не знаходять належного застосування і в більшості випадків вивозяться на звалища, що вимагає значних витрат на транспортування відходів і зміст звалищ. При цьому забруднюється навколишнє середовище.

Існують різні технології утилізації відходів переробки деревини, основними з них є:

- виробництво паливних гранул (пелет) з деревних відходів;
- брикетування тирси;
- створення композитних матеріалів на основі полівінілхлоридного пластика і деревної тирси;
- отримання біопалива (піроліз).

Для виробництва гранул (пелет) використовується набір устаткування, необхідний для виконання наступних технологічних операцій: попередня сушка, дроблення (для отримання дрібнодисперсних частинок рівного розміру), остаточна сушка (для досягнення рівномірної вологості), пресування, упаковка.

Брикетування відходів деревообробних виробництв (рис. 1.1) дозволяє отримати джерело енергії без забруднення навколишнього середовища, а

відходи від їх спалювання – прекрасне «енергетичне» джерело для життя і зростання рослин, що оточують нас. Отримані брикети можна спалювати так само, як і звичайні дрова, вони не вимагають дорогих печей з шнековою подачею, попереднім прогріванням і наддувом, необхідними для спалювання тирси в первозданному вигляді. Брикети з деревних відходів по рівню зольності (0,9-1,5 %) перевершують вугілля (7-25 %), брикети з деревної кори (1-3 %), а по кількості теплоти при згоранні 1 м³ всього 1,5 ГДж, що менше ніж у брикетів з бурого вугілля – 19,5 ГДж [7].



Рисунок 1.1 – Гранулювання біомаси

Слід відзначити, що навіть невелике виробництво, оснащене системою внутрішньоцехової аспірації і брикетером, зможе легко покрити свої потреби в теплі для обігріву виробничих приміщень і сушильних камер. При цьому зменшаться експлуатаційні витрати, а значить, зросте прибуток.

Створення композитних матеріалів на основі полівінілхлоридного пластика і деревної тирси – цікава технологія виробництва продукції тієї, що користується високим попитом. ПВХ – матеріал доступний і широко

поширений. Методами екструзії, литва і гарячого пресування з нього виготовляють масу корисних речей: труби, пакети, пляшки і зачую харчову і нехарчову тару. А якщо змішати його з подрібненою тирсою (деревною мукою) можна отримувати широкий спектр профільованих виробів: плінтус, вагонка, елементи меблів і т.д.

Частка витрат пально-мастильних матеріалів, що росте, в собівартості сільгосппродукції, ініціює дослідження і розробку технологій і технічних засобів для отримання палива з рослинної сировини. Серед сучасних технологій енергетичного використання рослинної біомаси термохімічна конверсія (піроліз) є найбільш універсальною. Вона дозволяє отримувати якісне, екологічно безпечне, тверде, рідке і газоподібне паливо з практично будь-якої сировини, що містить органічні компоненти. Для здійснення процесу піролізу необхідне зниження вологості сировини, наприклад, тирси до 5-6 %. Від рівня вологості сировини, що поступає в реактор, залежить енергоємність процесу. Якщо процес сушки біомаси включений в технологічну схему піролізної установки, то необхідне забезпечення узгодження режимів сушки і піролізу [8].

На сьогоднішній день існують технології для ультразвукової сушки деревних відходів, модифікації властивостей деревини і отримання сировини для хімічної і парфумерної промисловості в єдиному технологічному процесі.

Існуючі технології засновані на зміні агрегатного стану води (випаровуванні) і відрізняються способами нагріву деревини, випаровування рідини, підведенням необхідної для цієї мети енергії і способами відведення газу, що міститься в сушильній камері.

При використанні ультразвукової технології, яка заснована на зміні фізичної природи механізму видалення рідини, що міститься в деревині, і спричиняє за собою різке (у декілька разів) зниження питомого енергоспоживання технологічного устаткування, таким чином зникає необхідність витрати енергії на нагрів теплоносіїв, деревини, елементів конструкції сушильної камери та ін.

Сушка відходів деревини відомими на сьогоднішній день способами (термоконвекційним, вакуумним, СВЧ-струмами, аеродинамічним) вимагає високих енерговитрат – 200-250 кВт·г на м³. Традиційним способам властиві низька продуктивність, енергоємність, а також наявність екологічних проблем. Це викид в атмосферу або "деревної" вологи, що містить органічні кислоти, луги, скипидар, метанол і т.п., або продуктів згорання палива при нагріві теплоносія, необхідного для обігріву сушильної камери, або небезпека витoku фреону системи охолодження для конденсаційних сушильних камер.

Сучасні тенденції вдосконалення сушильного устаткування мають еволюційний характер і не можуть принциповим чином усунути ці недоліки. Можливо лише поліпшення характеристик устаткування, що діє, на одиниці або десятки відсотків. Причина в тому, що незмінним залишається фізичний принцип сушки – випаровування вологи, що міститься в деревині. В цьому випадку можна говорити про збільшення коефіцієнта корисної дії всього сушильного комплексу за рахунок конструкції сушильної камери, використання нових теплоізоляційних матеріалів, оптимізації режимів сушки.

Унікальні властивості деревини як природного полімеру, що має складну капілярну структуру, дозволяють створити технологію сушки пиломатеріалів без зміни агрегатного стану вологи, що міститься в ній. При сушці ультразвуком волога, що міститься в деревині, видалається у вигляді рідини. Це у декілька разів знижує питомі енерговитрати і збільшує продуктивність на 50-70 %.

За досліджень (дія УЗ на властивості деревини) відмічене наступне:

- низьке вологопоглинання після сушки;
- підвищення продуктивності устаткування, різке зменшення його габаритів, ваги і споживаної потужності;
- екологічних показників (відсутність викидів шкідливих речовин в атмосферу і легкий збір виділеної пиломатеріалів рідини);
- можливість створення суміщеної виробничої лінії сушки і, як наслідок, підвищення економічних показників процесу сушки.

Виведення вологи, що міститься в деревині, у вигляді рідини може скласти самостійний комерційний інтерес у відношенні отримання сировини для хімічної і парфумерної промисловості. В даний час збагачена корисними речовинами і мікроелементами волога, що міститься в деревині, витягується випаровуванням подальшою конденсацією. Це обумовлює високе енергоспоживання і низьку продуктивність процесу, а також неминуче до часткової втрати цінних речовин і мікроелементів (відомо, що при будь-якому фазовому переході відбувається очищення, що складає основу багатьох методів чистих матеріалів) [9].

Існує конденсаційний спосіб сушки деревних відходів. За принципом дії відноситься до замкнутого циклу, тобто сушильний агент здійснює циркуляцію по камері без викиду в атмосферу і, відповідно, без підживлення свіжим повітрям. Повітря, насичене вологою, відібраною від деревини, омиває холодну поверхню і охолоджується до температури нижче за точку роси. Частина вологи, що міститься в повітрі, конденсується, а теплота, виділена при цьому, використовується для підігріву сушильного агента. Як охолоджувач використовується фреон.

Теоретично конденсаційний сушильний цикл з холодильником, що грає роль теплового насоса, характеризується нульовою витратою тепла на випаровування вологи. Затрати електроенергії тут йдуть на прогрівання матеріалу і тепловтрати, а також на привод компресора і вентиляторів. Для компенсації тепловтрат агрегат забезпечується додатковим калорифером із зовнішнім електроживленням.

За даними зарубіжних фірм енергоспоживання конденсаційних сушарок складає 0,25-0,5 кВт·г. на 1 літр випарованої вологи залежно від вологості матеріалу, збільшуючись при її зниженні. Це приблизно в два рази менше витрати енергії в звичайних збірно-металевих камерах періодичної дії.

Із-за властивостей фреону, який використовується як хладагент, в конденсаційних сушильних камерах застосовуються низькотемпературні режими сушки не вище 45 °С. При підвищенні температури сушильного агента

більш 45 °С ККД таких сушарок знижується. Тому продуктивність їх мала, оскільки тривалість процесу в 2-3 рази більша, ніж в камерних сушарках. Ці сушарки слід використовувати в тих випадках, коли електроенергія є найбільш дешевою в порівнянні зі всіма іншими теплоносіями.

Враховуючи, що цей спосіб дає скорочення енерговитрат, перспективою є розробка нових конденсаційних сушильних камер з холодильними установками на хладагенті, що дозволяє застосовувати нормальні режими сушки.

На сьогоднішній день вітчизняних конденсаційних сушарок поки немає.

Використання енергії струму високої частот (СВЧ) є одним з методів по інтенсифікації процесу сушки деревини. При цьому мають місце наступні процеси. В результаті швидкого підвищення температури усередині деревини, що характерний для СВЧ-нагріву, підвищується тиск водяної пари, тобто з'являється надмірний тиск пари усередині деревини по відношенню до тиску середовища. Градієнт надмірного тиску різко інтенсифікує процес сушки, оскільки перенесення пари відбувається як шляхом молекулярної дифузії, так і шляхом фільтрації через пори і капіляри деревини.

Основні переваги застосування СВЧ-енергії для сушіння деревини такі:

- високий ступінь поглинання деревиною енергії електромагнітного поля СВЧ (за рахунок того, що деревина – вологий матеріал);
- можливість із швидкістю світла підвести і виділити в одиниці об'єму деревини потужність, не доступну жодному з традиційних способів підведення енергії;
- здійснення безконтактного виборчого нагріву і отримання необхідного розподілу температур в деревині, зокрема в режимі саморегульованого нагріву;
- практично 100 % ККД перетворення СВЧ-енергії в теплову, таку, що виділяється в матеріалі, що нагрівається, низькі втрати енергії в трактах, що підводять, і робочих камерах;
- можливість миттєвого включення і виключення теплової дії, що забезпечує режим теплової безінерційності і високу точність регулювання нагріву.

За останніх 10-15 років з розвитком техніки генерування струмів СВЧ багато підприємств намагалися створити СВЧ-устаткування для сушки деревини, які повною мірою забезпечували б якісну і швидкісну сушку, проте очікуваного ефекту не отримали, в основному через великі втрати електроенергії та вартість устаткування. Не дало результату і комбінування конвективної сушки зі СВЧ-сушкою деревини. СВЧ-енергія застосовувалася для інтенсифікації конвективної сушки, проте при цьому відбувалися взаємовиключні процеси. СВЧ-сушка деревини відбувається в основному при температурах усередині деревини зверх 100 °С. А конвективна – при температурах 60-80 °С. Виходить, що деревина одночасно нагрівалася дорогою СВЧ-енергією і охолоджувалася могутнім потоком сушильного агента, що приводило до збільшення витрат на сушку деревини [10].

Запас деревини в лісах України оцінюється в 1,8 млрд. м³, середньорічний приріст запасу деревної біомаси – 4,5 м³ на 1 га. В цілому по країні приріст складає близько 40,0 млн. м³ на рік. За прогнозом Єврокомісії у 2020 році ЄС з відновлювальних джерел вироблятиме близько 18 % теплової енергії від загального обсягу виробництва. З них близько 75 % – з біомаси, а решта – з геотермальної енергії та сонячної енергії.

Водночас в Україні спостерігається масштабний розвиток птахівництва, що потребує створення технологій і обладнання для утилізації відходів з переробкою їх у високоякісні добрива. Сучасні технології переробки розвиваються за двома напрямками: анаеробне збродження відходів з отриманням біогазу та побічного продукту (шламу); термічна обробка відходів і подальше використання в агропромисловому комплексі у вигляді водного розчину. Кожна з цих технологій потребує певну кількість одиниць обладнання і пов'язана зі значними витратами енергії [11].

В Україні існує об'єктивна необхідність розвитку розподіленої енергетики з використанням місцевих енергетичних ресурсів. Це обумовлено наявністю великих територій з нерозвиненою енергетичною інфраструктурою, доступністю і рівномірністю розподілу місцевих ресурсів, економічної та інвестиційної привабливістю, високим науковим і технологічним потенціалом.

Для створення сучасної і технологічно передової розподіленої енергетики необхідно розробити і затвердити на державному рівні наступну програму дій:

– оптимізація структури енерготехнологічних комплексів для конкретних регіонів з урахуванням їх особливостей;

– створення машинобудівної бази для випуску елементів нових сучасних технологій: аллотермічних газифікаторів, пелетизерів, торрефікаторів, міні-ТЕЦ, котельних агрегатів з пелетними топками.

Для розподіленої енергетики перспективно створення енерготехнологічних комплексів, в яких об'єднані і взаємопов'язані нові енергетичні технології. Функціональна схема такого комплексу показана на рис. 1.2. Для економічно розвинених держав екструзійні технології стали пріоритетним напрямом розвитку харчової та кормової промисловості. Серед термопластичних полімерів усього світу, майже 50 % обробляється за допомогою екструдерів. Сучасне екструзійне обладнання передбачає використання впливу на матеріал механічної та теплової енергії. Джерелом механічної енергії служить електричний двигун, який в екструзійних установках розташований поза межами робочої зони, що потребує нагріву. Крім того, з огляду на значно більшу швидкість обертання валу електричного двигуна відносно швидкостей обертання шнека, до складу екструзійного устаткування входить редуктор.

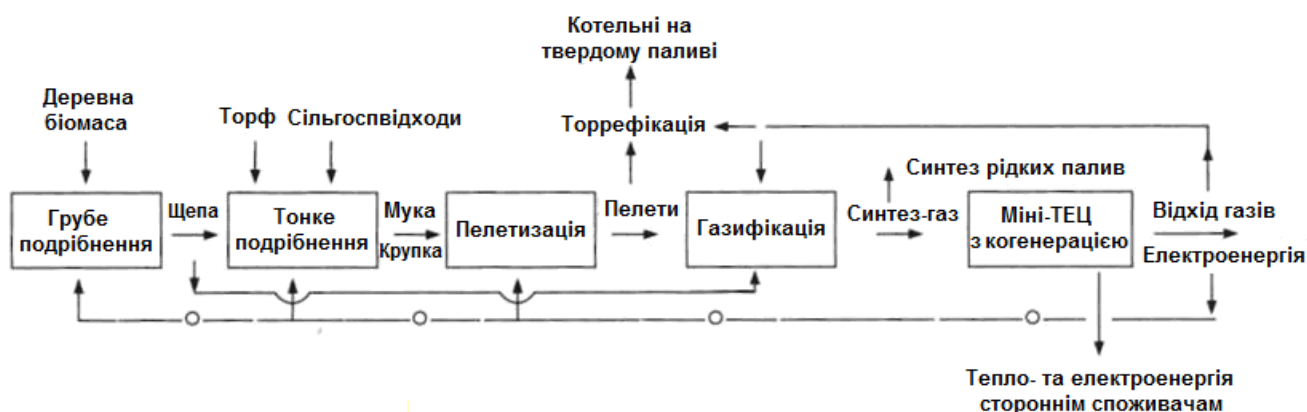


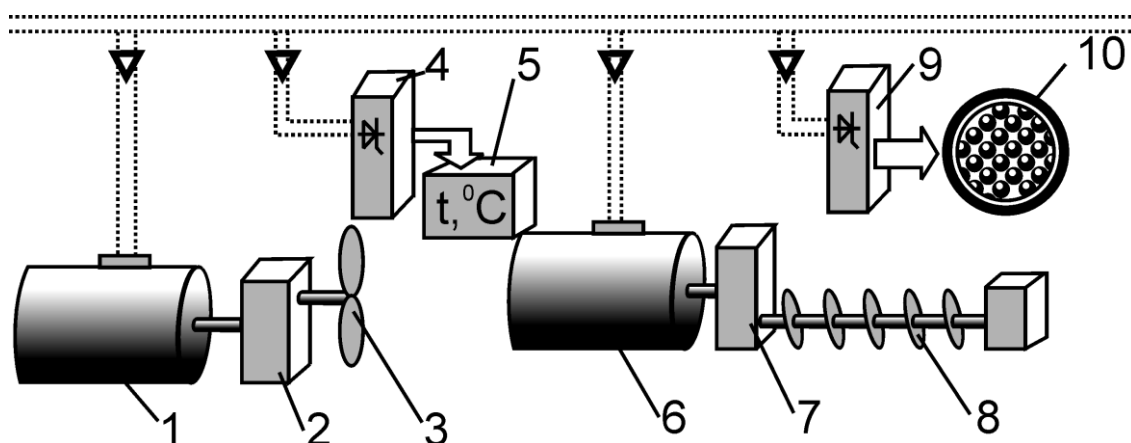
Рисунок 1.2 – Функціональна схема енерготехнологічного комплексу

Існуюча схема перетворення енергії передбачає марне розсіювання теплової енергії двигуна і механічної передачі в навколишнє середовище. В середньому тільки ККД системи електроприводу становить 72...85%, а втрати в механічній передачі від двигуна до виконавчого механізму дорівнюють 7...10%. Оскільки ККД окремих елементів формують загальний ККД системи, втрати вже на першому етапі перетворення енергії неприпустимі.

Для технологічних систем, об'єднуючих процеси транспортування, нагріву, перемішування матеріалів, найбільш перспективним слід вважати другий напрям. В цьому випадку стає можливим заощадження ресурсів за рахунок об'єднання окремих елементів устаткування в одному корпусі і, що дуже важливе, використання дисипативної енергії вказаних елементів, яка раніше при традиційній схемі перетворення і використання енергії марно розсіювалася в навколишнє середовище (рис. 1.3).

Характерні ознаки такої схеми [12]:

- потоки енергії мають свої окремі канали руху;
- одиниці і групи електроустаткування дискретно розташовані, об'єднуючись лише за логікою послідовності технологічних операцій;
- просторова надмірність і розімкнена область втрат енергії при перетворенні.



1, 6 – електродвигуни; 2, 7 – редуктори; 3, 8 – виконавчі механізми перемішування і транспортування; 4, 9 – напівпровідникові перетворювачі; 5 – нагрівачі;
10 – середовище магнітної обробки

Рисунок 1.3 – Існуюча схема перетворення і використання енергії

Основними елементами технологічної схеми є системи електроприводів, ККД яких можна оцінити відповідно до виразу

$$\eta_{\text{ЭП}} = \eta_c \cdot \eta_k \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot \eta_d \cdot \eta_m^n \cdot \eta_p \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (1.1)$$

де η_c – ККД мережі, що визначається втратами потужності в кабелі, що підводить енергію;

η_k – ККД комутуючої апаратури;

$\eta_{\text{пр}}$ – ККД перетворювача, призначеного для регулювання частоти обертання і управління режимами роботи двигуна;

η_d – ККД електродвигуна;

η_m^n – ККД сполучної муфти (n – число таких муфт в системі);

η_p – ККД редуктора, ремінної, ланцюгової або іншої передачі;

$\eta_{\text{мех}}$ – ККД виконавчого механізму.

Одним з основних шляхів підвищення техніко-економічних показників електроприводу є створення суміщених в одному корпусі двигунів-насосів, двигунів-мішалок, двигунів-шнеків. Це перспективний клас електромеханічних систем, що призначені для безпосереднього здійснення технологічних процесів і відрізняються посиленою концентрацією функціональних і енергетичних властивостей. Область існування породжуючих структур і потужність безлічі потенційно можливих конструктивних варіантів таких систем значно перевершують відповідні показники для електричних машин традиційного виконання. Але на відміну від останніх, електромеханічні перетворювачі знаходяться ще на початковій стадії свого розвитку.

Створення ефективних технологічних систем, які об'єднують процеси механічної обробки, розігріву і транспортування стає можливим в першу чергу за рахунок об'єднання окремих елементів обладнання в одному корпусі, використання дводвигунової системи зі спільним ротором-валом і дисипативної складової енергії цих елементів, а також застосування принципу

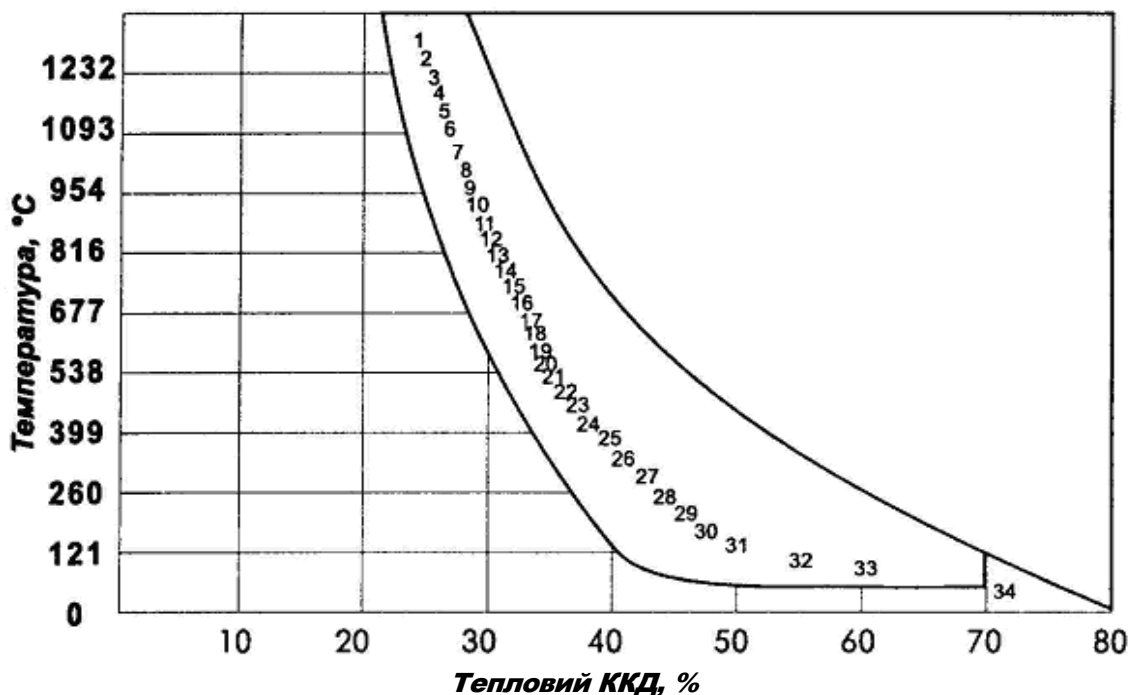
безредукторного забезпечення низької частоти обертання й кратного посилення обертового моменту. В роботах [13-16] розглянуто двостаторні обертально-лінійні перетворювачі і представлено аналітичний підхід з використанням еквівалентної схеми заміщення АД з масивним ротором, а також розрахунки з використанням кінцево-елементної моделі. У якості спільного ротора для двох окремих статорів такого перетворювача, як правило виступає порожнистий феромагнітний елемент циліндричної форми. Двигуни подібних конструкцій виконують обертовий та ліній рух одночасно і мають модульну структуру, що може включати в себе будь-яку кількість модулів із загальною трифазною обмоткою [17]. У роботі [18] обґрунтовано можливість підвищення енергоефективності АД на основі їх конструктивно-структурних перетворень і застосування нетрадиційних виконань в об'єктах спеціального призначення і промислових механізмах, зокрема за рахунок функціонального суміщення і використання зовнішнього ротору. В даний час моделювання асинхронних машин зі спільним валом проводиться без взаємної ув'язки процесів в окремих машинах. Використовуються стандартні, але не взаємопов'язані схеми заміщення окремих машин, що призводить при розрахунковому визначенні електромеханічних процесів в динамічних режимах роботи до суттєвих помилок. Особливо це стосується асинхронних машин із спільним ротором, який є одночасно виконавчим механізмом. Тому розробка методик дослідження і розрахунку асинхронних машин зі спільним валом з урахуванням пов'язаності електричних схем заміщення обох машин і обліку зміни їх параметрів зі зміною динамічних і температурних режимів їх роботи є актуальною науково-технічною задачею.

Відомі електричні комплекси на базі ПЕМП технологічного призначення, які передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну і теплову інтеграцію. Відтак, з урахуванням «корисних» втрат електромагнітної системи, ККД електромеханічних перетворювачів технологічного призначення збільшується до 98-99 % [19, 20].

Найбільш поширені процеси в хімічній, харчовій, фармацевтичній промисловості, агропромислового комплексу – сушильні, тому що вони є завершальними стадіями технологічних схем і багато в чому визначають якість готової продукції, енерго- і матеріаломісткість виробництва. Сушарки, що використовуються на вітчизняних підприємствах (барабанні, стрічкові, шарові) при високому енергоспоживанні не забезпечують необхідної продуктивності і якості готового продукту. У даний час у промисловості при сушінні дисперсних матеріалів з незначним дифузійним опором руху вологи в якості одного з найбільш ефективних засобів інтенсифікації процесу широко застосовуються високоінтенсивні апарати з активними гідродинамічними режимами, зокрема, апарати з закрученими потоками теплоносія і розвиненою турбулентною структурою потоку, робочий об'єм яких дозволяє уникнути створення інертних зон навколо частинок матеріалу.

У технологічному процесі може використовуватись різноманітне обладнання для реалізації конкретних функцій, ефективність яких [21] в залежності від рівня температур змінюється від 10 % до 70 % (рис. 1.4).

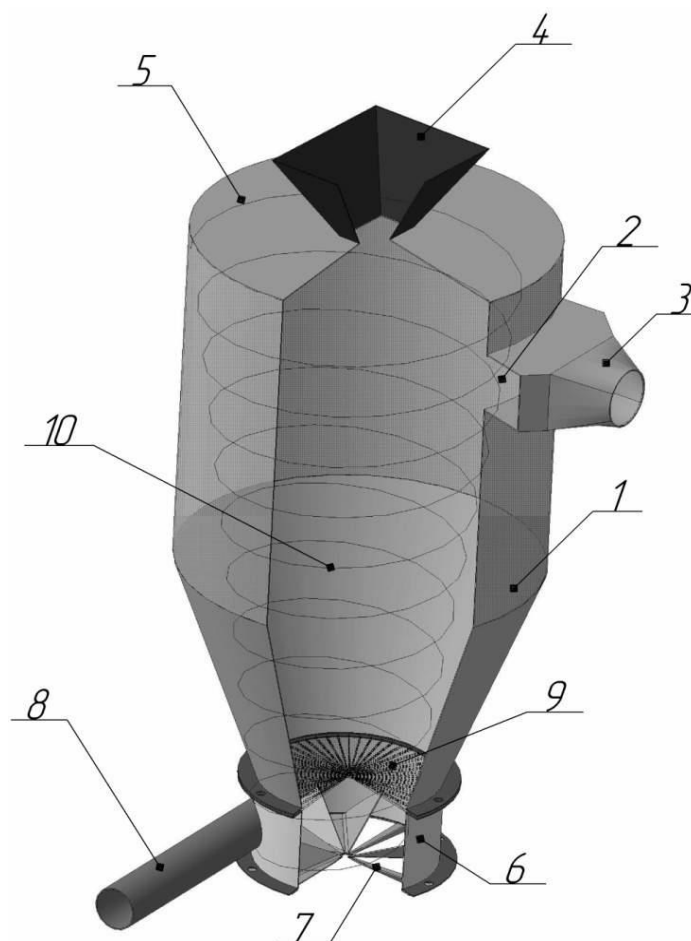
Це, у порівнянні з основним (електричним, механічним і т. інш.), фактично другий вид втрат енергії. ККД багатьох технологічних процесів можна підвищити за рахунок застосування спеціальних методів і засобів: використання дисипативної складової обладнання; закручення потоку теплоносія; рециркуляція енергії відпрацьованого агента. Розглянемо деякі технології і обладнання більш конкретно.



1-6 – різноманітні печі для нагріву і плавлення металу; 7 – печі для спалювання сміття;
 8-21 – цементация, нормалізація, отжиг, нафтохімічний синтез; 22 -25 – термічна обробка цементного клінкера, лудіння, обробка розчину алюмінія і магнія; 26-31 – гаряче сушіння, вулканізація гуми, торрефікація біомаси; 32 – виробництво хімічних продуктів;
 33 – підігрівання води; 34 – побутові прилади

Рисунок 1.4 – Теплові ККД для різних технологічних процесів

Технологічний процес в апаратах з регульованим закрученим потоком теплоносія (рис. 1.5) відбувається з одночасною сепарацією твердих частинок на стінку сушильної камери в результаті впливу відцентрових сил, що дозволяє одночасно знизити винесення дисперсного матеріалу і підвищити швидкість обтікання частинок, що призводить до збільшення швидкості проведення технологічного процесу в порівнянні з іншими пристроями [21, 22].



1 – сушильна камера; 2 – вивідне вікно; 3, 4, 6, 8 – патрубки; 5 – кришка;
7 – завихрювач; 9 - решітка; 10 – траєкторії закручених потоків

Рисунок 1.5 – Сушарка з регульованим закрученим потоком теплоносія

На рис. 1.6 зображена сушарка для сипучих матеріалів, яка містить металевий барабан 7, встановлений з можливістю обертання на двох підшипниках ковзання 2, закріплених на нерухомих кришках 3 у бічних отворах барабана 7, на внутрішній циліндричній поверхні якого виконані два зустрічно похилих ряди ребер 4 [23]. Вихід НВЧ-генератора 5 з'єднаний із системою 6 волноводно-щілинних випромінювачів. Система 6 має чвертьхвильові відбивачі 7 і введена в порожнину барабана 7 через нерухома кришку 3 одного з бічних отворів барабану 7. Через іншу нерухома кришку 3 введені канал підведення нагрітого калорифером 9 повітря і канал 10 відводу вологого повітря, в іншому кінці якого встановлений вентилятор 77. На кінці каналу 8 встановлений перфорований екран 12. Бічні кришки 3 встановлені на

опори 13. Привід обертання 14 пов'язаний з барабаном 7 через ланцюгову передачу 75. Опори 13 жорстко закріплені до станини 16. Підшипники ковзання 2 набиті графітовою змазкою, яка зменшує тертя в підшипниках 2 і одночасно перешкоджає випромінюванню СВЧ енергії з порожнини барабана 7. Для завантаження і вивантаження сипучого матеріалу по центру довжини барабана 7 виконаний отвір з герметичною кришкою 18.

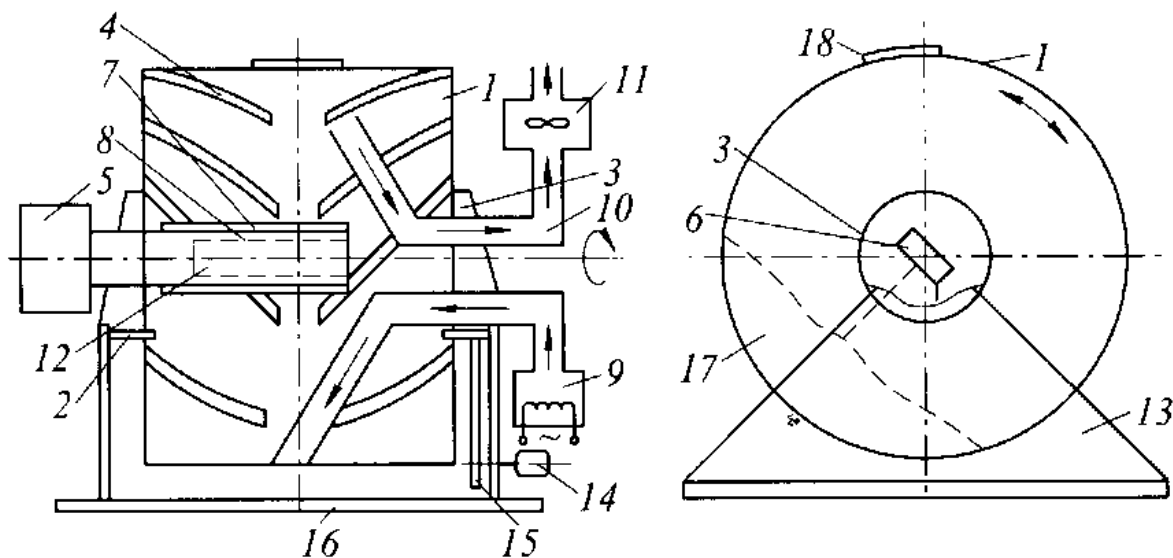


Рисунок 1.6. – Сушарка для сипучих матеріалів

Сушарка працює наступним чином. Через відкриту кришку 18 завантажують сипучий матеріал, наприклад зерно, потім герметично закривають кришку 18. Включають привід обертання 14 (частота обертання від 3 об/хв до 10 об/хв.), СВЧ-генератор 5, калорифер 9 і вентилятор. Так як барабан 7 обертається повільно, а сипучий матеріал (зерно) відносно важкий, то він не розпорошується по всьому об'єму барабану 7, а тільки повертається на кут сипучості приблизно 45° , отже повернута на той же кут система 6 волноводно-щілинних резонансних випромінювачів, забезпечена чвертьволновим відбивачем 7, який випромінює СВЧ-енергію перпендикулярно шару сипучого матеріалу. За рахунок ребер 4 відбувається перемішування сипучого матеріалу для більш рівномірного його прогріву СВЧ-енергією. Випаровувана з сипучого матеріалу волога нагрівається гарячим повітрям, що

надходить по каналу 8 через перфорований екран 12, який служить для більш рівномірного розподілу вентиляційних потоків, і відводиться через канал 10 за допомогою вентилятора. Після закінчення процесу сушіння металевий барабан 7 повертають отвором вниз і відкривають кришку 18 для вивантаження висушеної партії сипучого матеріалу.

На рис. 1.7 представлений двошнековий апарат А1-ПДС. Корпус апарату з ребрами 10 на опорах 16 встановлений під кутом $8...11^\circ$ до горизонту [24]. У верхній частині апарату встановлені приймальний бункер 2 для завантаження бурякової стружки і шнеки 8 для видалення жому з апарату. Кращому видаленню жому сприяють також лопаті 14. У середині апарату стружка переміщується двома лопатевими валами 5, які приводяться в обертання від електродвигунів 1 і 9. Витки валів з опорами 7 складаються з окремих лопатей, розташованих по гвинтовій лінії. Вали паралельні один одному, і лопаті одного вала заходять в міжлопасний простір іншого. Це запобігає можливості обертання бурякової стружки по довжині апарату. Для цієї ж мети встановлені контроласті 15, ущільнювачі 13 і перегородки 4 на нижній частині кришок 3.

Видаляють жом з апарату у верхній його частині шнеками 8 в лоток 18. Вони змонтовані під прямим кутом до транспортуючих шнеків і обертаються у протилежних напрямках по відношенню один до одного. Маса сікостружкової суміші в апараті підігрівається за допомогою камер 17 з ізоляцією 11 і 12, встановлених по всій довжині в нижній частині корпусу апарату. Принцип дії дифузійного апарату полягає в наступному: стружка з приймального бункера 2 переміщується шнеками уздовж апарату до лопатей 6 та 14, які передають її у вигляді жому на шнеки 8. Екстрагуюча рідина надходить у кінцеву частину апарату, переміщуючись протилежно стружці, насичується цукром і у вигляді дифузійного соку через сито 19 видаляється з апарату через штуцер 20.

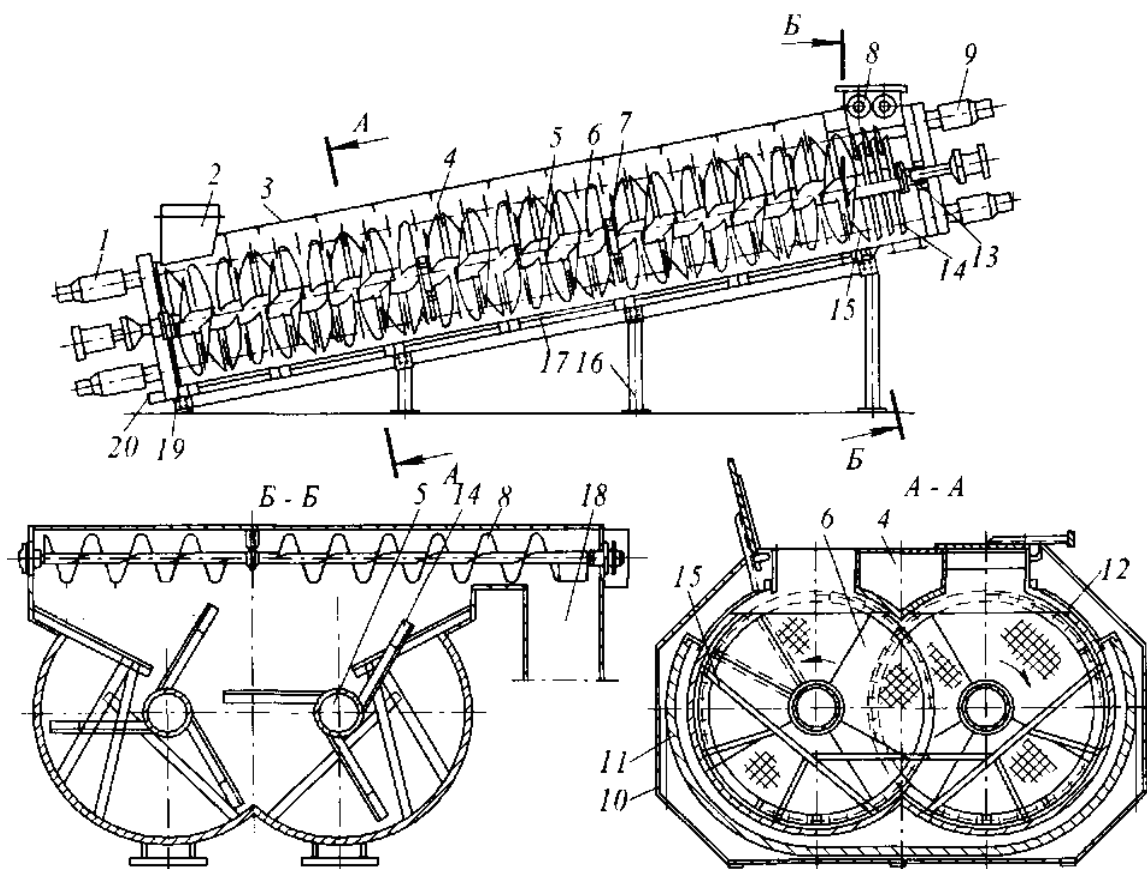


Рисунок 1.7 – Двошнековий апарат А1-ПДС

Дифузійний апарат для цукробурякового виробництва призначений для прискорення процесу екстрагування за рахунок рівномірного розподілу стружки по перетину апарату [24]. На рис. 1.8 зображено поздовжній розріз апарату. Дифузійний апарат для цукробурякового виробництва включає в себе похилий коритоподібний корпус, забезпечений завантажувальним бункером 2, обігрівальною сорочкою 3 і технологічними патрубками 4...7 відповідно для подачі екстрагента, відведення дифузійного соку, подачі пари у трубовал і подачі пари в обігрівальну сорочку, встановлені в ньому два шнека 8 і 9 з можливістю обертання назустріч один одному, кожен з яких складається з валу 10, встановлених по довжині стійок 11 і прикріплених до них стрічок 12, що утворюють витки 13, розвантажувальний пристрій 14 і привід 15. На робочій поверхні кожного витка 13 укріплені перпендикулярно до неї по спіралі Архімеда напрямні ребра 16, при цьому останні на кожному витку 13

розташовані проти його заходу. Бурякову стружку подають до завантажувального бункера 2 і двома паралельними шнеками 8 і 9 транспортують у верхню частину дифузійного апарату. назустріч стружці рухається екстрагент, що надходить по патрубку 4 у верхню частину апарату. Сік на виробництво відводиться через патрубок 5, розташований у нижній частині апарату. Жом вивантажується пристроєм 14. Підігрів сікостружкової суміші здійснюється через порожнисті трубчасті вали 10, порожнисті стійки 11 і порожнисті витки шнека 13, внутрішні простори яких поєднуються між собою і утворюють обертову гріючу поверхню всередині апарату. Нагрівальну пару в порожнисті вали 10 подають через патрубок 6, а в обігрівальні сорочки 3 – через патрубки 7. При обертанні шнеків 8 і 9 в існуючих апаратах стружка накопичується в середній частині корпусу. Це явище погіршує гідродинаміку руху екстрагента в апараті, що призводить до підвищених втрат цукру в жомі. Напрямні ребра 16 в процесі обертання шнеків відводять накопичені в середній частині апарату стружку і рівномірно розподіляють її по всьому об'єму апарату. Це створює хороші гідродинамічні умови руху екстрагента, що забезпечують інтенсивне висолоджування стружки та зниження втрат цукру в жомі [24].

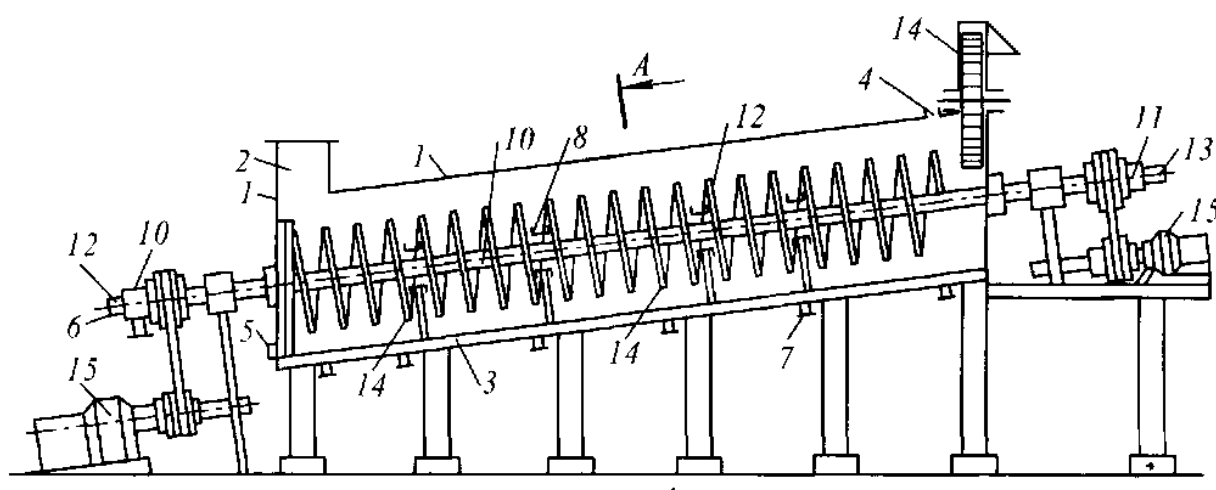


Рисунок 1.8 – Дифузійний апарат для цукробурякового виробництва

Пристрій для вакуумного концентрування рідини в безперервному потоці, призначений для вакуумного концентрування емульсій термолабільних

речовин, наприклад, молока, чайного або кавунового екстракту, соків, рослинних олій і природних вуглеводнів.

На рис. 1.9 зображено пропонований пристрій з дуговими випромінювачами. Пристрій для вакуумного концентрування рідин в безперервному потоці містить горизонтально розташований циліндричний корпус 1 з вхідним 2 і вихідним 3 патрубками для продукту і патрубком 4 відводу пари, горизонтальний приводний вал 5 із закріпленими на ньому дисками 6, виконаними з однаковим діаметром і товщиною, що збільшується до осі приводного валу 5, і встановленими ними з утворенням ламаної поверхні, С-подібні перегородки 7, установлені в нижній частині корпусу 1 між дисками 6, і нагрівач, виконаний у вигляді одного або декількох джерел 8 інфрачервоного випромінювання. Диски 6 утворюють поверхню, що гарантує рівномірну освітленість при даній конфігурації і розміщенні джерел 8 інфрачервоного випромінювання. При виконанні джерел 8 інфрачервоного випромінювання лінійними і паралельними осі валу 5 диски 6 утворюють поверхню, що також гарантує рівномірну освітленість. При виконанні джерела 8 інфрачервоного випромінювання у вигляді частини співвісної валу 5 циліндричної поверхні диски 6 утворюють рівномірно освітлену поверхню. Зовнішня кромка дисків 6 виконана загостреною з кутом при вершині не менш 10° .

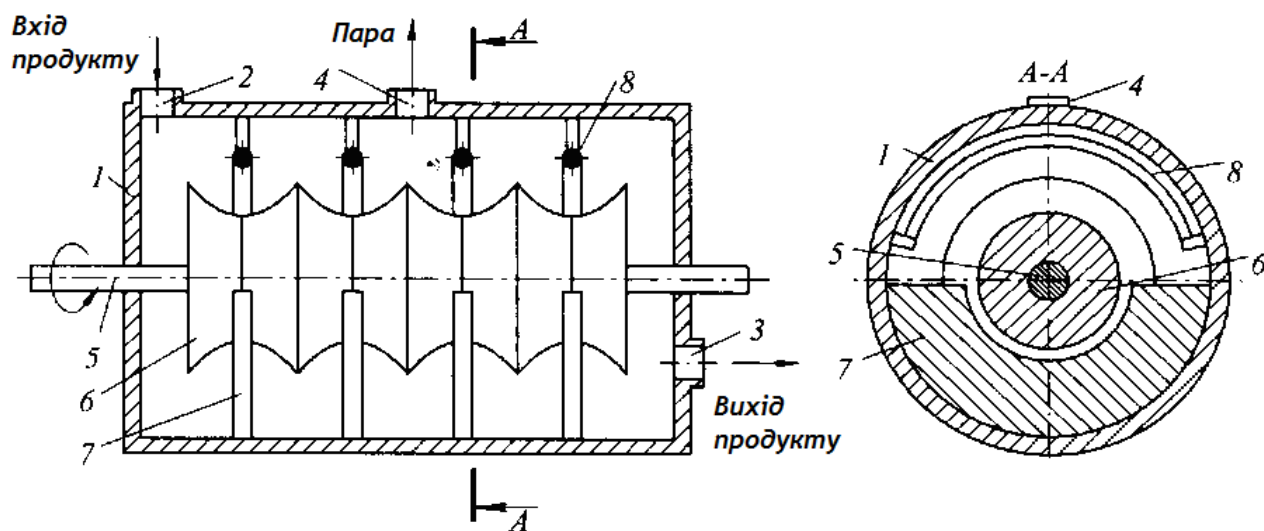


Рисунок 1.9 – Пристрій для вакуумного концентрування рідин

Концентрована рідина, наприклад молоко, подається до корпусу 1 по патрубку 2, де вона переміщається по каналу, утвореному дисками 6 і С-подібним перегородками 7. При обертанні дисків 6 приводним валом 5 за рахунок змочування поверхонь дисків 6 концентрована рідина у вигляді тонкої плівки на їх поверхні надходить у верхню частину корпусу 1. На частині траєкторії переміщення плівки рідина піддається впливу джерел інфрачервоного випромінювання 8, що призводить до нагрівання рідини у тонкій плівці до температури кипіння найлегшої фракції, наприклад води, і її випаровуванню. Виконання дисків 6 з утворенням поверхні в залежності від форми виконання джерел 8 інфрачервоного випромінювання забезпечує рівномірну освітленість цієї поверхні, відповідно, рівномірний нагрів рідини в плівці і рівномірне випаровування по всій площі плівки фракції, що виключають першочергове випаровування рідини на будь-якій ділянці і утворення золи локального перегріву після повного випаровування відігнаної фракції, що особливо важливо при концентруванні термолабільних речовин, таких як молоко, локальний перегрів якого може призвести до коагуляції білка і втрати поживних властивостей; екстракти чаю і кави, локальний перегрів яких призводить до втрати смакоароматичних речовин і зниження органолептичних показників та біологічної цінності; вина, локальний перегрів якого призводить до втрати міцності, смакоароматичних і біологічно активних речовин, спотворення кольоровості і зниженню їх споживчих якостей; рослинні і природні масла, локальний перегрів яких призводить до окислення і погіршення якості, суміші природних вуглеводнів, локальний перегрів яких може привести до самозаймання.

У роботі [25] досліджується індукційна установка для непрямого нагріву рідини в обертовому магнітному полі, яке створюється трифазною індукційною системою. Індукційна система складається з двох індукторів, виконаних у формі статора асинхронної машини. Потік рідини проходить через внутрішню порожнину феромагнітного циліндру, розташованого у розточці індукційної системи, при цьому феромагнітний циліндр закріплений у підшипниках

кочення. На внутрішній поверхні порожнистого циліндра під певним кутом до осі циліндра закріплені лопаті, які забезпечують перемішування рідини при обертанні труби. Обертальний момент створюється електромагнітним полем індуктора. При цьому частина енергії індуктора витрачається на нагрів, а інша частина – на обертання циліндра і перемішування рідини. Наявність двох індукційних котушок з автономними джерелами живлення дозволяє регулювати співвідношення між потужністю, що йде на нагрів і потужністю, що йде на перемішування рідини. Такий спосіб перетворення енергії дозволяє значно прискорити процес нагрівання рідини. У той же час це значно ускладнює моделювання процесу і розрахунок конструкції нагрівальної системи. Для розробки запропонованої конструкції нагрівача, розрахунку та вибору оптимальної схеми трифазної обмотки індуктора необхідно вирішити ряд завдань, пов'язаних із дослідженням електромагнітних, гідравлічних і теплових полів системи, створенням на цій основі алгоритму і методики розрахунку конструктивних і режимних параметрів індукційної нагрівальної установки.

Агрегати з киплячим і віброкиплячими шарами використовують для сушки різних дрібнозернистих продуктів, всередині яких на одній або декількох ступінчастих решітках продукт висушується в «киплячому» або «віброкиплячому» станах [24]. Для забезпечення рівномірного кипіння частинок продукту агент сушіння подається на решітку рівномірно і з відповідною швидкістю розподіляється по всій площі. Сушка у віброкиплячому шарі характеризується високою інтенсивністю, але пов'язана з підвищеною витратою електроенергії. За гідродинамічною ознакою агрегати з киплячим шаром можуть мати прямокутну або циліндричну форми, конічної форми з фонтануючим або вихровим шарами, а також з локальним фонтануванням. За способом теплопідводу конструкції агрегатів можна розділити на агрегати з підведенням теплоти тільки з псевдоожигуючим агентом, з перегрітим розпалюваним розчином та кондуктивно – через теплообмінник в шарі.

Сушарки РЗ-ОСС застосовують для сушіння молочного цукру; сушарки А1-КВР-12 – для сушки круп і хлібопекарських дріжджів; сушарки А1-ОГК – для сушіння казеїну; установки А1-ФМУ – для сушки меланжу. Сушарка РЗ-ОСС (рис. 1.10) складається з сушильної камери 6, віброколонки для підсушування продуктів 7, зони інтенсивної сушки 5, зони охолодження 4. Продукт завантажується живильником 8, вивантажується через випускний пристрій у нижній частині охолоджувача. Повітря засмоктується вентилятором 2 через фільтр 1 з атмосфери, нагнітається в калорифері 3 і відводиться через скруббер 9. Вологий продукт живильником подається до віброколонки 7, потім попадає у зону сушіння 5 і далі у зону охолодження 4.

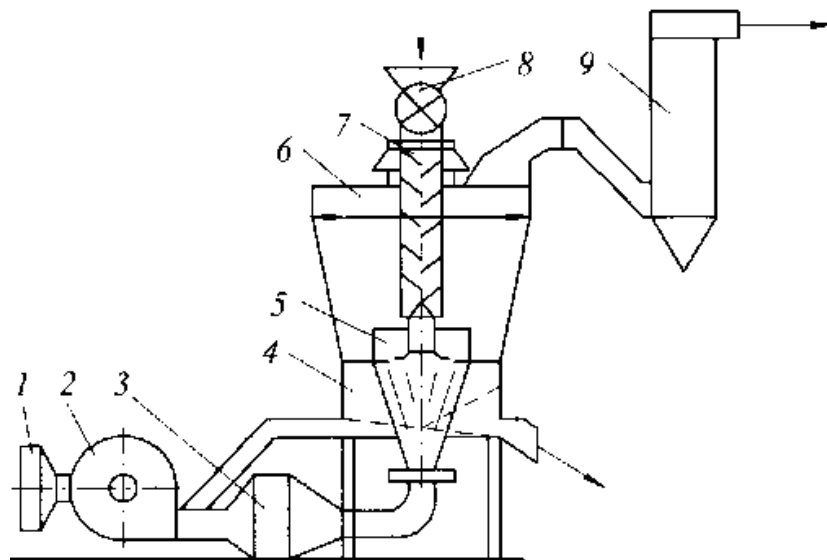


Рисунок 1.10 – Сушильна установка для сушіння молочного цукру РЗ-ОСС

Усі харчові продукти – діелектрики, що мають високу діелектричну проникність і низьку електропровідність. Тому харчові середовища можуть піддаватися діелектричному нагріванню, пов'язаному з дипольною поляризацією. Ефекти поляризації у змінних високочастотних електромагнітних полях пов'язані з витратою енергії поля, оскільки безперервна зміна напрямку поляризації супроводжується виділенням теплової енергії у речовині. Діелектричний нагрів харчових середовищ і їх зневоднення найбільш ефективні у СВЧ-діапазоні електромагнітних хвиль довжиною 0,3...0,003 м. Для промислового застосування мікрохвильової сушки харчових

продуктів дозволено використання СВЧ-діапазону хвиль з частотами 915 ± 25 і 2450 ± 50 МГц. Причому для різних харчових матеріалів глибина проникнення електромагнітної хвилі залежить від її частоти, діелектричної проникності і тангенсу кута магнітних втрат.

Мікрохвильова сушарка (шнекового типу) (рис. 1.11) призначена для сушки сипучих продуктів (зерно, крупи та ін.). Установка складається з корпусу 6, всередині якого розміщений шнек 7, що приводиться до обертання від приводу 8. Над шнеком 7 розміщені магнітрони 5, що забезпечують мікрохвильовий вплив на рухомий продукт і складаються з повітропроводу магнітрона 2 і зовнішнього повітропроводу 3. На виході корпусу 6 розміщений вентилятор 4, що продуває рухомий шар продукту, що висушується. На вході встановлено завантажувальну камеру 1 та блок керування.

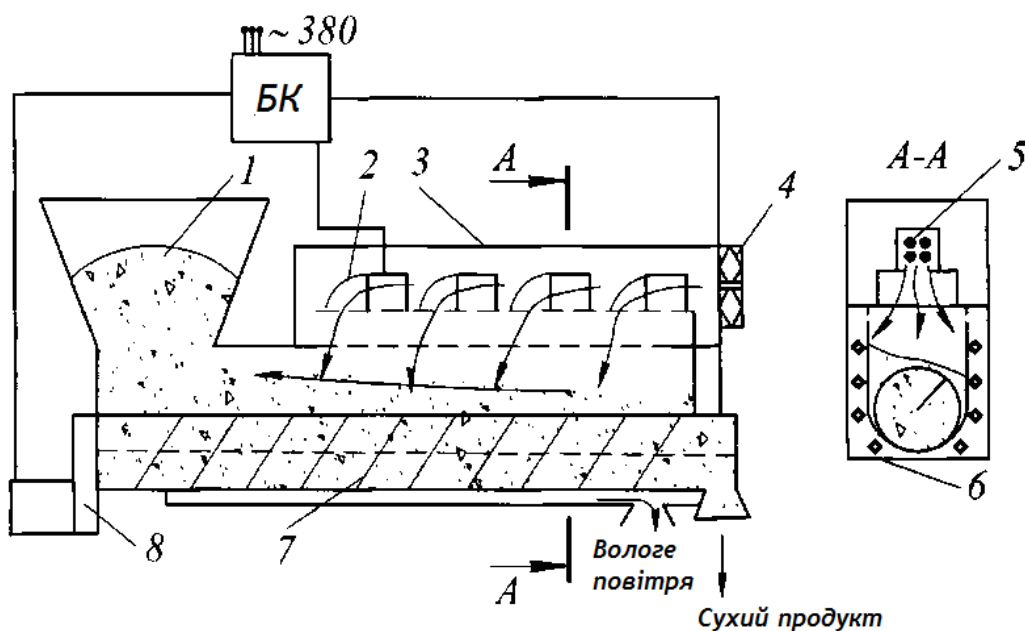
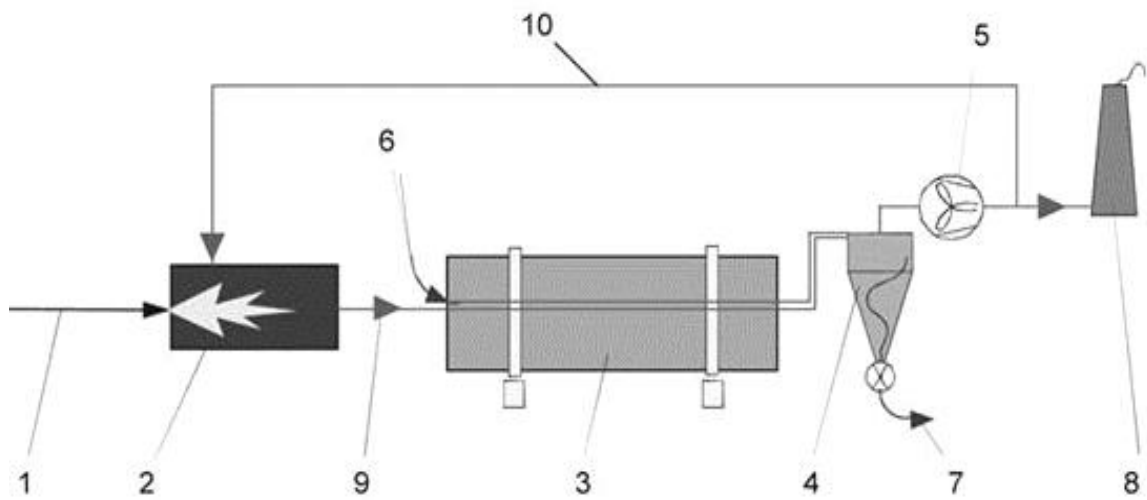


Рисунок 1.11 – Мікрохвильова сушарка шнекового типу

Відомий спосіб формування теплоносія за рахунок теплогенератора індукційного типу [26]. На рис. 1.12 показана структура такого електричного комплексу для сушіння сипучих матеріалів на базі індукційного типу теплогенератора.



1 - паливо; 2 - теплогенеруюча установка; 3 - барабан; 4 - циклон; 5 - вентилятор;
 6 - подача вологого матеріалу; 7 - затвор шлюзу; 8 – труба викидів теплоносія;
 9 - теплоносій; 10 - теплоносій для повторного використання

Рисунок 1.12 – Структурна схема електричного комплексу
 для сушіння сипучих матеріалів

Для отримання гарячого носія використовується електрична система з індукційним методом передачі енергії для термічної обробки сипучих матеріалів.

Промисловістю випускаються вібраційні конвективні сушарки, конструкція якої наведена на рис. 1.13.

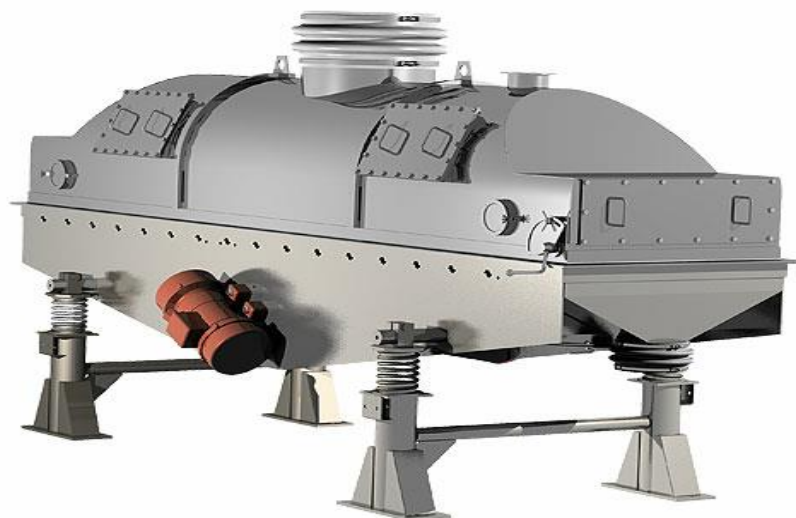


Рисунок 1.13 – Вібраційна конвективна сушарка

Еволюція сушильної техніки проходить стрімко. У даний час створені нові, перспективні види сушильного обладнання, але при їх випробуванні виявляються факти, пояснити які з позицій традиційних підходів стає важко. Виникаючі при описі процесу сушіння проблеми пояснюються тим, що автори, прихильники феноменологічного підходу, розглядають сушку як якийсь один процес з постійними коефіцієнтами переносу і формують моделі з цих припущень.

Процеси сушіння у харчових технологіях тривалі і енергоємні [27]. Видалення одиниці маси вологи з продукту вимагає витрат енергії в 2-4 рази більше, ніж фізично необхідна енергія для її пароутворення. Про інші (не пов'язані з обов'язковим повним перетворенням у пару вологи продукту) принципи зневоднення відомості вкрай обмежені. З цього випливають проблеми: техніка зневоднення розвивається стрімкіше, ніж теоретичні обґрунтування нових принципів видалення вологи; процеси видалення вологи з матеріалу часто не відповідають поняттю «сушка», рушійні сили цих процесів не відповідають дифузійним принципам; часто, зневоднення – це комплекс пов'язаних протікаючих процесів, що вимагає коректного врахування дійсних механізмів переносу вологи; фактор енергії – як інструмент управління кінетикою процесу зневоднення. Очевидні науково-технічні протиріччя між зростаючими вимогами до якості продукту, енергоємністю його виробництва і технікою сушки. З одного боку, для інтенсифікації процесів тепломасопереносу потрібно збільшувати швидкість (тобто витрати) сушильного агента. З іншого боку, чим більше витрата теплоносія, тим більше втрачається теплової енергії з викидами установки. Звісно ж, що вихід для вирішення позначеного протиріччя пов'язаний зі зміною принципів підведення енергії до продукту. Нова технічна ідея, яка захищається в роботі [27], ґрунтується на двох положеннях. По перше, слід зняти з повітря завдання теплоносія, а залишити тільки завдання дифузійного середовища, середовища, яке забезпечує ефективний «прийом» вологи з продукту. По-друге, організувати адресне, об'ємне підведення енергії до продукту. Реалізація першого положення дозволить істотно скоротити

втрати теплоти з відпрацьованим повітрям, а другого – серйозно скоротити час процесу.

Переваги пропонованої установки вихрового типу з активним гідродинамічним режимом для СВЧ-сушіння полягають у наступному:

- комбінований конвективно-високочастотний спосіб підведення теплоти дозволяє інтенсифікувати процес сушіння дисперсних продуктів з високим дифузійним опором, підвищити продуктивність установки і ефективність використання габаритних розмірів вихрової сушільної камери;
- значне зниження енерговитрат на процес сушіння у порівнянні з підведенням теплоти тільки за рахунок конвективного нагріву;
- підвищення якості готового продукту внаслідок рівномірного висушування за рахунок ефекту самовирівнювання вологості.

1.3 Висновки до 1 розділу

Усі новітні розробки з конвективною сушкою, як найбільш поширеної на вуглезбагачувальних фабриках і контактної сушки на брикетних, засновані на підвищенні температури або швидкості сушильного агента відносно матеріалу, що просушується. Але на сьогодні рівень підвищення температури і відносної швидкості сушильного агента досягли своєї межі, пов'язаної з значним пилоутворенням, перегрівом і вибухонебезпечністю пилу, що утворюється.

Разом з тим усі розглянуті методи мають значні витрати енергії на одиницю випаруваної вологи, значну кількість одиниць обладнання і високі початкові інвестиційні витрати. Отже, одним з основних напрямків інтенсифікації процесів тепло- і масообміну є вдосконалення гідродинамічної обстановки в апаратах. Способи сушки, засновані на техніці зваженого шару, отримують в даний час все більше поширення у промисловості [27].

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ВІБРОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Шнековий електромеханічний перетворювач – технічний пристрій з поліфункціональними властивостями, здатний одночасно нагрівати, диспергувати, транспортувати, змішувати і впливати магнітним полем в одному пристрої. Основним робочим елементом шнекового електромеханічного перетворювача є феромагнітний ротор, який одночасно виконує роль ротора асинхронного двигуна, нагрівача, робочого елемента та захисної оболонки. Важливим технічним параметром, що характеризує працездатність електромеханічного пристрою, є вібрація. Варто відзначити, що віброакустичні коливання позитивно впливають на процес перемішування сипких матеріалів. Вплив вібрації на процес перемішування значною мірою залежить від сили та частоти коливань, тому виникає необхідність дослідження цих характеристик.

2.1 Актуальність питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів

Серед останніх публікацій відомо багато робіт присвячених шнековим електромеханічним перетворювачам [28-35]. Аналіз цих робіт дозволяє отримати знання про існуючі методи моделювання режимів роботи електромеханічних систем. Дослідження динаміки твердих тіл у шнекових електромеханічних перетворювачах досліджувалось у роботах [28, 29]. У публікаціях розраховано розподіл часу обробки твердих матеріалів та проаналізовано ступінь зворотного руху відносно прямого руху пристрою. Визначено, як параметри швидкості руху впливають на якість технологічного процесу.

Перспективна технологія осушення та переробки вологих відходів під впливом вібрації розглянута в [30]. У публікації проаналізовано процес

коливань гвинтового електромеханічного перетворювача разом із розміщеними в ньому матеріалами, побудовано схему заміщення пристрою, визначено диференціальні рівняння коливань системи та отримано їх аналітичне рішення чисельним методом.

Дослідження впливу вібрації на процес перемішування сипучих матеріалів проводилось у публікаціях [31-35]. У роботах представлені теоретичні траєкторії обробки матеріалу, що підтверджує інтенсифікацію процесу перемішування.

У публікаціях [28-35] всебічно розглядаються шнекові електромеханічні перетворювачі, але через особливості конструкцій основна увага приділяється робочим елементам – шнекам та недостатньо врахованим процесам, що відбуваються в різних приводах.

2.2 Математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину

Математичне моделювання робочого елемента електромеханічного перетворювача виконано в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Модель поєднує в собі аналіз електромагнітного поля та моделювання динаміки тіла. Аналіз електромагнітного поля проводили за рівняннями Максвелла. Формулювання векторного потенціалу виконується за такими рівняннями:

$$\nabla \times H = J , \quad (2.1)$$

де H – вектор напруженості магнітного поля, А/м;

J – вектор густини струму, А/м².

$$B = \nabla \times A , \quad (2.2)$$

де B – вектор густини магнітного потоку, Тл; A – вектор магнітного потенціалу, Вб/м.

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t}, \quad (2.3)$$

де E – вектор напруженості електричного поля, В/м;

$$J = \sigma E, \quad (2.4)$$

де σ – питома електропровідність, См/м;

Формулювання скалярного потенціалу виконується за рівнянням:

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (2.5)$$

На зовнішній межі з магнітним скалярним потенціалом нормальна складова густини магнітного потоку дорівнює нулю:

$$n \cdot B = 0, \quad (2.6)$$

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

$$B = f(|H|) \frac{H}{|H|}. \quad (2.7)$$

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

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A} e_{coil}, \quad (2.8)$$

де N – кількість витків в обмотці;

A – загальний переріз, проща області обмотки, м²;

I_{coil} – струм, А;

e_{coil} – векторна змінна, для візуалізації напрямку обмотки.

Електромагнітний момент розраховується шляхом об'ємного інтегрування електромагнітного тензора Максвелла:

$$F = \int_{\partial\Omega} dnTdS, \quad (2.9)$$

де F – сила як граничний інтеграл тензора напружень, H ; T – тензор електромагнітного поля; n – вектор нормалі до площі S .

$$\tau = \int_{\partial\Omega} d(r - r_0) \cdot (nT)dS, \quad (2.10)$$

де τ – крутний момент, Нм;

r_0 – точка на осі обертання.

$$\tau_{ax} = \frac{r_{ax}}{|r_{ax}|} \cdot \tau, \quad (2.11)$$

де τ_{ax} – крутний момент відносно осі обертання, Нм;

r_{ax} – точка на осі обертання.

Фізику динаміки тіла описують за такими рівняннями:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot (FS)^T + F_v, \quad (2.12)$$

$$F = I + \nabla u, \quad (2.13)$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м³;

$\frac{\partial u}{\partial t}$ – швидкість відносно центру обертання, рад/с;

u – зсув відносно центру обертання;

F – вектор сили, Н;

F_v – сила на одиницю об'єму, Н/м³;

I – тензор напружень Коші;

S – другий тензор напружень Піола-Кірхгофа;

T – тензор напруження Біоту.

Властивості пружних матеріалів визначаються такими рівняннями:

$$S = S_{ad} + J_i F_{inel}^{-1} (C : \varepsilon_{el}) F_{inel}^{-T}, \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{1}{2} (F_{el}^T F_{el} - I), \quad (2.15)$$

$$F_{el} = F F_{inel}^{-1}, \quad (2.16)$$

$$S_{ad} = S_0 + S_{ext} + S_q, \quad (2.17)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u + (\nabla u)^T \nabla u], \quad (2.18)$$

$$C = C(E, \nu), \quad (2.19)$$

де J_i – внутрішня змінна непружного об'єму;

F_{inel} – скінченний тензор описує відображення матеріального кадру на проміжній;

C – тензор деформації Коші-Гріна;

ε_{el} – тензор пружності правих деформацій Гріна-Лагранжа;

F_{el} – тензор пружних правих деформацій Коші-Гріна;

S_0 – тензор початкових напружень;

S_{ext} – тензор зовнішнього напруження;

S_q – тензор додаткового напруження, пропорційний швидкості пружної деформації матеріалу;

ε – лінійна деформація.

Початкові значення поля зміщення та поля швидкості визначаються рівняннями:

$$u_0 = \left(-r + \hat{\Omega}(\hat{\Omega} \cdot r) \right) (1 - \cos \varphi) + (\hat{\Omega} \times r) \sin \varphi + u, \quad (2.20)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)_0 = (\omega \times (r + u_0 - u)) + \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2.21)$$

$$r = (X - X_c), \quad (2.22)$$

де u_0 – початкове зміщення;

r – відстань до центра координат;

$\hat{\Omega}$ – ось обертання;

φ – кут обертання;

ω – кутова швидкість;

X_c – центр обертання;

X – матеріальні координати будь-якої точки твердої зони.

Фізика твердих тіл описується такими рівняннями:

$$m \frac{d^2}{dt^2} u + \sum F_I = \sum F_{ext}, \quad (2.23)$$

$$RIR^T \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{d\phi}{dt} \times \left(RIR^T \frac{d\phi}{dt} \right) + \sum M_I = \sum M_{ext}, \quad (2.24)$$

$$m = \int \rho dV, \quad (2.25)$$

$$I = \int \left((X_d \cdot X_d) E_3 - X_d \cdot X_d^T \right) \rho dV, \quad (2.26)$$

$$X_d = X - X_M, \quad (2.27)$$

$$X_M = \frac{\int \rho X dV}{m}, \quad (2.28)$$

$$R \rightarrow R(a, b, c, d), \quad (2.29)$$

$$\{a, b\}_0^T = \left\{ \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \hat{\Omega} \right\}^T, \quad (2.30)$$

$$\left(\frac{\partial \{a, b\}^T}{\partial t} \right)_0 = \frac{I}{2} \left(\{0, \omega\}^T \otimes \{a, b\}_0^T \right), \quad (2.31)$$

де m – маса інерційних властивостей, кг/м²;

F_I – тензор сили інерції;

R – матриця обертання;

M_I – тензор моменту інерції;

M_{ext} – тензор зовнішнього моменту;

E_3 – одинична матриця;

X_m – центр мас;

\otimes – множення кватеріона.

2.3 Висновки до 2 розділу

У другому розділі для проведення математичного моделювання процесів, які протікають в шнековому електромеханічному перетворювачі було розроблено математичну модель з урахуванням конструктивних особливостей феромагнітного ротора.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1 Результати обчислень

Модель розв'язується шляхом обчислення Solver Configurations (конфігурації вирішувача) – схеми для обчислення рішення.

Простіше кажучи, конфігурація вирішувача складається з одного або кількох Solution nodes (вузлів рішення), і кожен вузол рішення складається з послідовності підвузлів, що визначають спосіб обчислення рішення.

Як правило, така конфігурація вирішувача містить інформацію про те, який фізичний інтерфейс і геометрію використовувати, які змінні розв'язувати і які вирішувачі використовувати для виконання типу дослідження.

Розв'язати модель також можливо шляхом обчислення дослідження; це визначає послідовність конфігурацій вирішувача і, в деяких випадках, послідовність конфігурацій завдання.

Елемент Results (результати) в Comsol Multiphysics дерева моделі містить інструменти для подальшої обробки і аналізу результатів від моделювання, включаючи візуалізацію, анімацію, аналіз даних і звіти.

Головний вузол Results (результати) містить усі вузли, які створюються для таких цілей. Вікно Settings (налаштування) містить такі розділи: Update of Plots (оновлення графіків) та Save Data in the Model (збереження даних у моделі).

За замовчуванням усі графіки оновлюються автоматично, коли, наприклад, перераховується рішення, активується вузол графіка або змінюється таблиця кольорів для графіка. Є можливість зберегти дані графіка в моделі. Елемент Results (результати) групує інструменти в категорії.

Розподіл магнітного поля чи індукції є дуже важливим чинником під час проектування електричних машин і являється ключовим параметром для

дослідження, а найбільшу цікавість для досліджень представляє просторовий розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі камери.

За результатами обчислень були створені графічні, часові та просторові інтерпретації фізичних явищ, що відбуваються в активній зоні побудованої моделі. Візуальні результати продемонстровано на рис. 3.1 – 3.2.

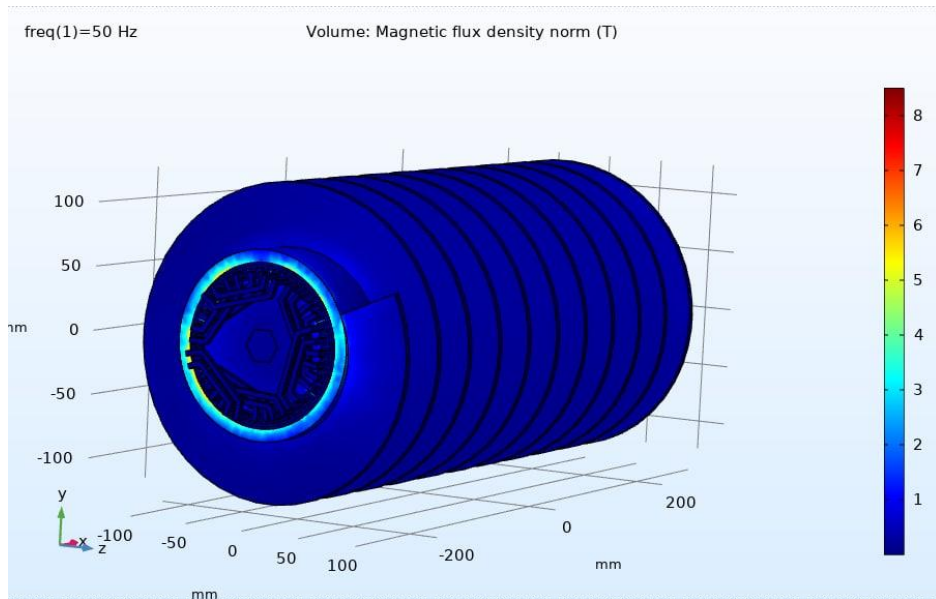


Рисунок 3.1 – Густина магнітного потоку

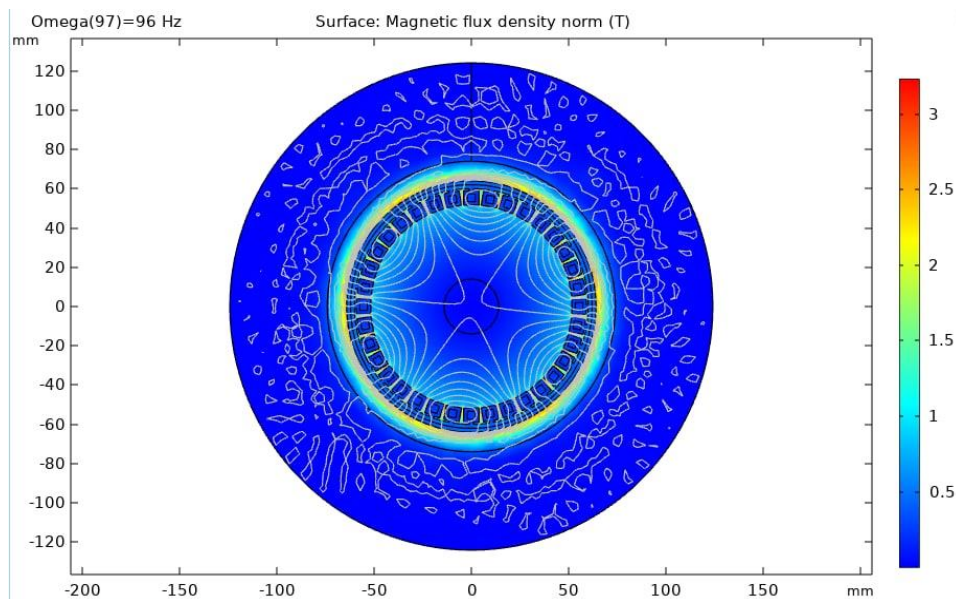


Рисунок 3.2 – Електромагнітне поле шнекового електромеханічного перетворювача

3.2 Аналіз обчислення процесів та характеристик

Основним робочим елементом електромеханічного перетворювача є феромагнітний ротор. Феромагнітний ротор одночасно виконує роль ротора асинхронного двигуна, нагрівача, робочого елемента та захисної оболонки. Одним з робочих параметрів феромагнітного ротора є вібрація. Вібрація – важливий технічний параметр, що характеризує справність електромеханічного пристрою. Варто відзначити, що вібрація позитивно впливає на процес змішування сипучих матеріалів. Вплив вібрації на процес перемішування значною мірою залежить від сили та частоти вібрації, тому виникає необхідність вивчення цих характеристик.

Робочий елемент електромеханічного шнекового перетворювача – феромагнітний ротор, приводиться в рух електромагнітною силою, створюваною статорами, жорстко закріпленими на нерухомому валу ротора, тому виникає потреба у всебічному дослідженні вібраційних параметрів всієї системи. На рис. 3.3, 3.4 представлений графік залежності електромагнітного моменту від часу для моделі з урахуванням та без урахування геометрії гвинтової обмотки ротора. Електромагнітний момент розраховується шляхом тривимірного інтегрування тензора напружень Максвелла за геометрією моделі феромагнітного ротора з урахуванням впливу навантаження, заданого як ступінчаста функція. Функція навантаження працює протягом 0,8 с часу моделювання і створює обертальну гальмівну силу $t(1/s)$, Н·м.

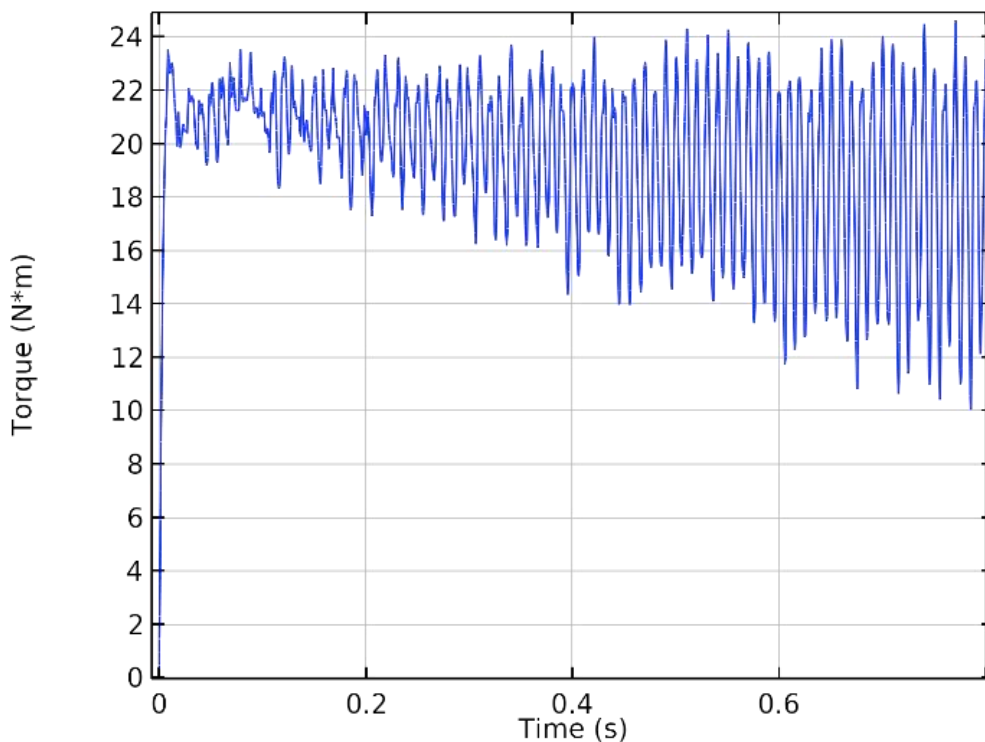


Рисунок 3.3 – Графік залежності електромагнітного моменту від часу для феромагнітного ротора з гвинтовою обмоткою

На рис. 3.3, 3.4 помітно, що у разі використання одного статора електромагнітної системи спостерігається відсутність динамічної рівноваги, що супроводжується ударними, крутними електромагнітними моментами.

На рис. 3.4 показані електромагнітні сили як функція часу, які є коливаннями в поперечному і осьовому напрямках відносно ротора. У моделі динаміки тіла статор, ротор і вал вважаються жорсткими. Електромагнітний момент розраховується як для ротора, так і для статора. Оскільки ротор може вільно обертатися навколо своєї осі, він починає прискорюватися, долаючи інерційний опір. Відмінності між статором і ротором викликані виниклими електромагнітними силами. Оскільки ці джерела за своєю природою коливаються, вони викликають вібрацію.

Частотний спектр електромагнітних сил показаний на рис. 3.4. З результатів моделювання видно, що частота цих сил знаходиться в діапазоні 90-120 Гц, що майже вдвічі перевищує електричну частоту.

Величина швидкості на поверхні феромагнітного ротора, безпосередньо над статором, показана на рис. 3.5. Під впливом вібрації в матеріалах відбуваються перетворення, властивості яких залежать від інтенсивності вібрації. При амплітудних значеннях прискорень, які не перевищують прискорення вільного падіння, матеріали переходять у стан псевдозрідження. Ця умова призводить до рівномірного розподілу тепла між частинами переробленого матеріалу, що покращує енергоефективність та продуктивність системи в цілому.

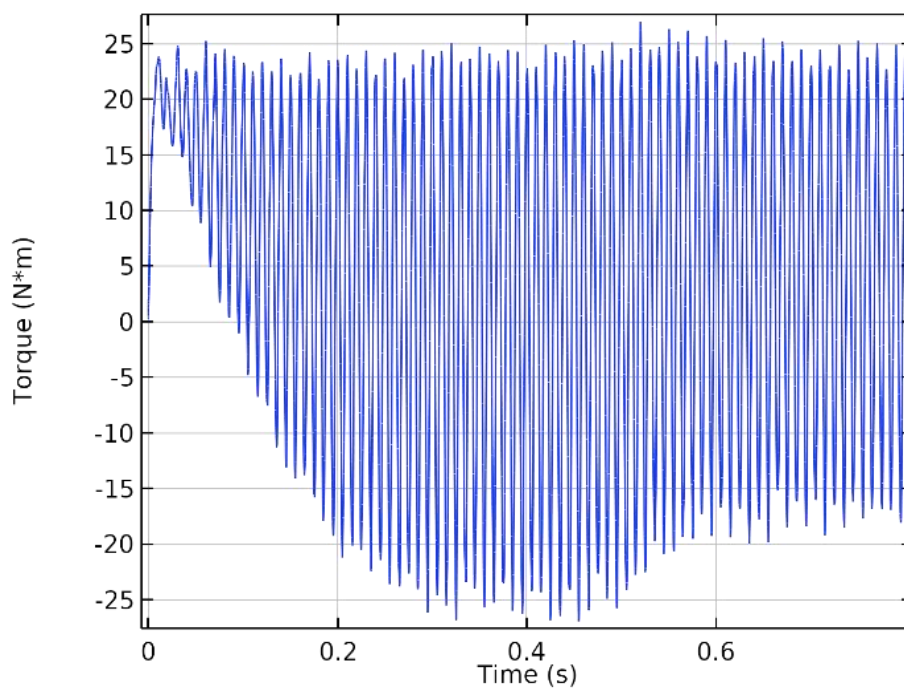


Рисунок 3.4 – Графік залежності електромагнітного моменту від часу для феромагнітного ротора без гвинтової обмотки

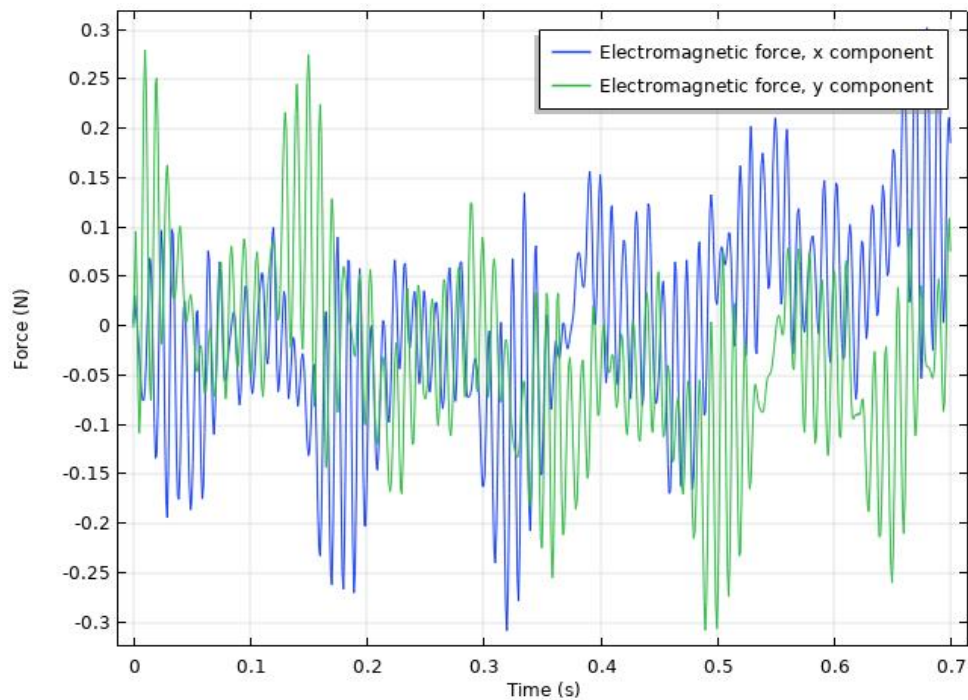


Рисунок 3.5 – Електромагнітні сили в феромагнітному роторі, що діють у поперечному та осьовому напрямках

У порівнянні з існуючими методами моделювання коливань у гвинтових механізмах, запропонована в роботі модель враховує електромагнітну проблему, яка є важливою складовою у виникненні вібрацій у механізмі. У роботі враховано особливості геометрії феромагнітного ротора, що вносить істотні зміни в зображення електромагнітного моменту машини.

Для попереднього визначення рівня віброакустичних коливань в серцевині переробки сировини виділено обмежену ділянку, межами якої є сусідні лопасті шнека та корпуси ротора, рис. 3.5.

Модель побудована в програмному середовищі COMSOL Multiphysics в модулі Pressure Acoustics. Джерела вібраційних коливань встановлювали на зовнішніх межах роторів у вигляді падаючих плоских звукових хвиль з частотою 120 Гц, показана на рис. 3.6. Для нього на розрахунковій моделі на верхній і нижній межі вибирається гранична умова випромінювання – плоска хвиля. На бічних кордонах вибирається гранична умова «Тиск» з відповідним значенням тиску $P = 15$ МПа. Візуальні результати величини швидкості на

поверхні феромагнітного ротора продемонстровано на рис. 3.7. На рис. 3.8 представлена розрахована площа зони обробки матеріалу на мікрорівні.

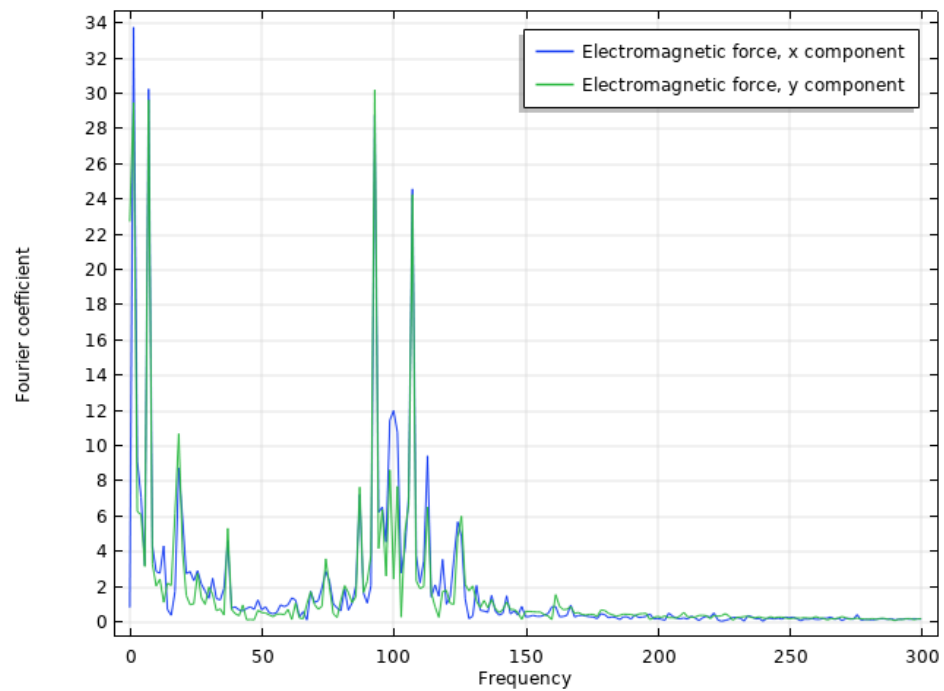


Рисунок 3.6 – Частотний спектр електромагнітних сил у феромагнітному роторі

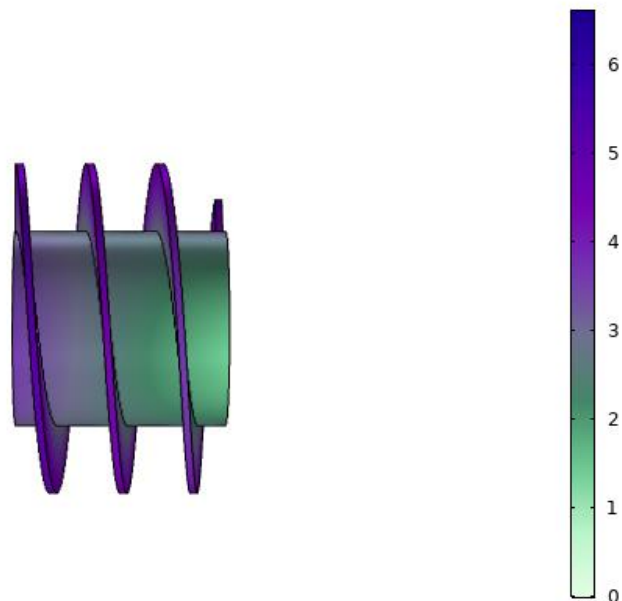


Рисунок 3.7 – Величина швидкості на поверхні феромагнітного ротора

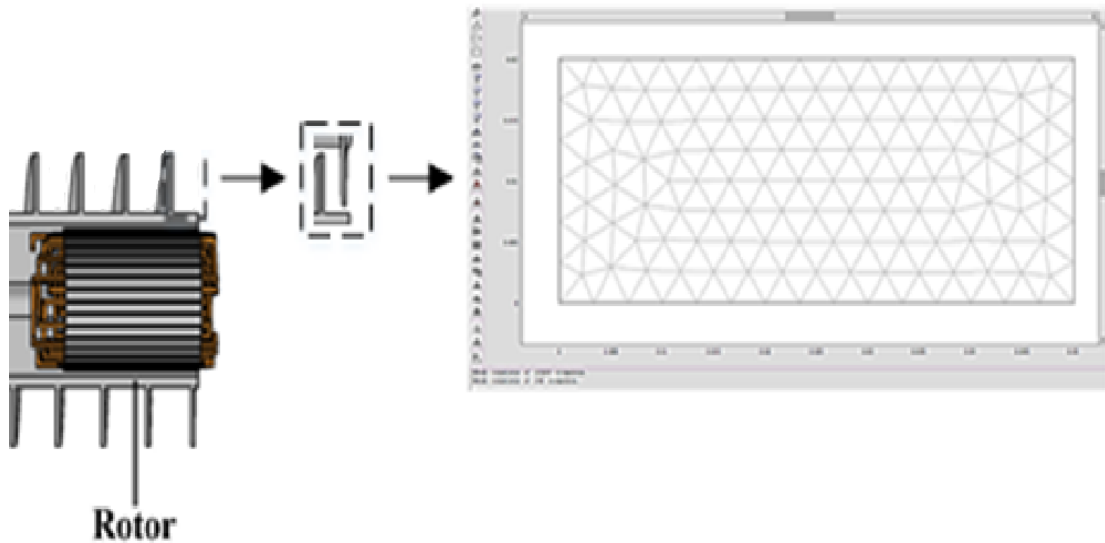


Рисунок 3.8 – Розрахована площа зони обробки матеріалу на мікрорівні

В результаті моделювання на рис. 3.9, 3.10 отримано попередній розподіл градієнта тиску та інтенсивності поширення хвилі, що вказує на коливальні коливання в зоні переробки сировини.

Аналізуючи наведене на рис. 3.9, 3.10 можна зробити приблизні висновки про загасання хвиль у центральній зоні, що зумовлене взаємним впливом хвиль від кожного з джерел акустичних коливань.

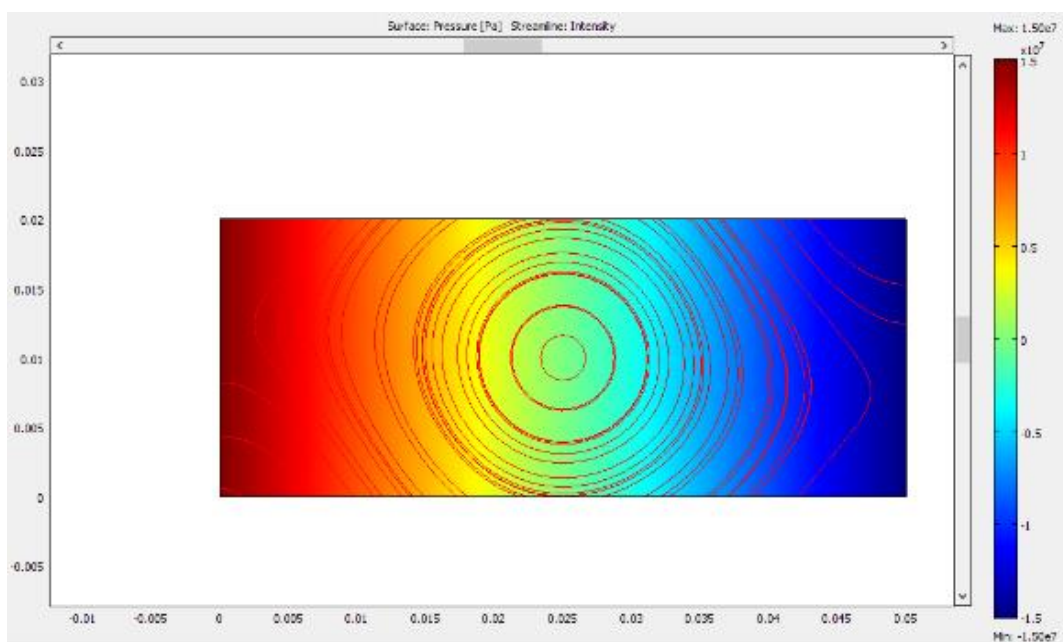


Рисунок 3.9 – Розподіл віброакустичних компонентів

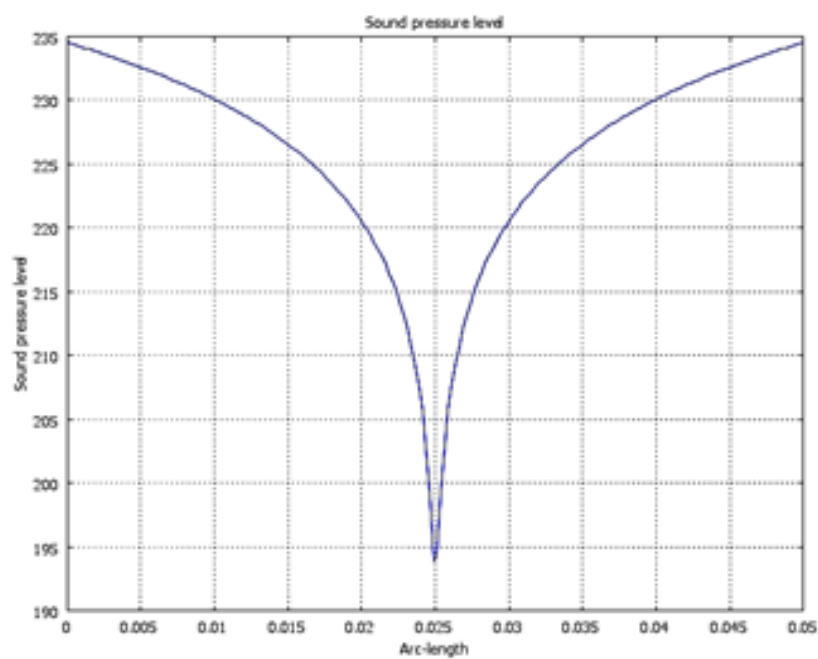


Рисунок 3.10 – Розподіл рівня звукового тиску в центральній зоні по довжині розрахункової зони

3.3 Небезпечні та шкідливі виробничі чинники при експлуатації шнекового електромеханічного перетворювача

Однією зі сфер, де може використовуватися шнековий електромеханічний перетворювач для переробки сипких речовин є вугільна промисловість. У зв'язку із цим, проаналізовано небезпечні та шкідливі чинники, виникнення яких можливе у вугільній промисловості.

Мікрокліматичні умови у відкритих розробках (кар'єрах) визначаються географічним районом і, в основному, відповідають метеорологічним умовам на поверхні. У зимовий час робота може проводитися при низьких температурах до $-30-40$ °С, а у літній період при високих температурах – до $+40$ °С і більше. У підземних виробках може створюватися велика різниця температури в шахтах і зовнішнього повітря. У рудниках глибиною 1000 м і більше спостерігається висока температура повітря і вологість.

На всіх етапах технологічного процесу утворюється пил. Дисперсність пилу дуже висока – порошок розміром до 5 мкм (найбільш небезпечні для організму) складають більше 90 %. Вміст вільного діоксиду кремнію коливається в широких межах від 1 до 73-92 %. Особливо великий вміст вільного діоксиду кремнію при видобутку поліметалічних руд.

На кар'єрах і в шахтах повітря може забруднюватися сумішшю газів, найбільш поширеними з яких є оксид вуглецю і оксиди азоту.

Машини та механізми, які застосовуються для руйнування, навантаження, доставки та переробки гірничорудної сировини, використання енергії стисненого повітря і удару є джерелами високих рівнів вібрації і шуму.

3.4 Заходи з охорони праці

Вибухонебезпека – один з найбільш загрозливих факторів у вугільній промисловості, тому вибухонебезпека шнекового ЕМП забезпечується надійним захистом вибухонебезпечного навколишнього середовища від можливого

проникнення назовні з оболонки і коробки виводів полум'я вибуху при аварійних ситуаціях усередині корпусу.

Ущільнення коробки виводів здійснюється за допомогою гумових прокладок, які необхідні для захисту від проникнення у середину коробки мулу і вологи, що викликають струми витоку, місцеві дуги або іскріння на неізольованих контактних затисках.

Щоб забезпечити надійність обладнання та запобігти аварійним ситуаціям потрібно виконувати планово-запобіжний ремонт та огляд обладнання перед початком роботи. При виконанні перевірок і оглядів електроустаткування необхідно дотримуватися правил безпеки.

Для зниження механічного шуму застосовуються деталі з не шумливих матеріалів, вібропоглинаючі прокладки й еластичні муфти. Зниження аеродинамічного шуму здійснюється за допомогою приєднаних або вбудованих глушителів.

Для запобігання нещасних випадків проводиться інструктаж з охорони праці та пожежної безпеки, а також перевіряється рівень знань обслуговуючого персоналу та робітників.

Безпека ремонтних робіт забезпечується відключенням обладнання від джерел, що мали б привести його в дію. При зупинці на ремонт на пускових пристроях обов'язкове вивішування плаката "Не вмикати, працюють люди!".

3.5 Висновки до 3 розділу

За результатами обчислень були створені графічні, часові та просторові інтерпретації фізичних явищ, що відбуваються в активній зоні побудованої моделі. У порівнянні з існуючими методами моделювання коливань у гвинтових механізмах, запропонована в роботі модель враховує електромагнітну проблему, яка є важливою складовою у виникненні вібрацій у механізмі. У роботі враховано особливості геометрії феромагнітного ротора, що вносить істотні зміни в зображення електромагнітного моменту машини

Розрахунок процесів електромеханічного перетворювача може бути представлений як m-файл, у якому мовою програмування Matlab описуються геометричні параметри моделі, константи, глобальні змінні, параметри середовищ, налаштування вирішувача та багато іншого.

Представлена в додатку А програма необхідна для подальшого завдання вихідних параметрів комп'ютерної моделі та їх швидкої зміни з метою отримання варіацій розрахунку для різноманітних умов чисельного експерименту.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання кваліфікаційної роботи було вирішено наступні завдання:

- виконано огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин;

- розглянуто актуальність питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів;

- наведено математичний опис електромагнітних та віброакустичних процесів в зоні дії шнекового електромеханічного перетворювача на сипку речовину;

- побудовано модель та виконано аналіз результатів моделювання електромагнітних та віброакустичних процесів шнекового електромеханічного перетворювача для автоматизації переробки сипких речовин;

- розглянуто небезпечні та шкідливі виробничі чинники при експлуатації шнекового електромеханічного перетворювача.

Виконано огляд технологій сушіння, змішування, диспергування та транспортування сипких речовин. Розглянуто актуальність питання моделювання роботи шнекових електромеханічних перетворювачів. Визначено параметри вібраційних коливань, що виникають у робочому елементі шнекового електромеханічного перетворювача при переробці сипких речовин під дією магнітного поля шляхом побудови і розрахунку математичної моделі методом кінцевих елементів. Математична модель розроблена з урахуванням конструктивних особливостей феромагнітного ротора. За результатами дослідження отримано залежності електромагнітного моменту феромагнітного ротора від часу, електромагнітних сил у роторі, що діють у поперечному та осьовому напрямках, а також розподіл рівня віброакустичних коливань.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. [Чинний від 2015–06–22]. Вид. офіц. Київ, 2017. 29 с. (Інформація та документація).
2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: / упоряд. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2018. 320 с.
3. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків : ХНУРЕ, 2021. 50 с.
4. Грицюк В., Чугай М., Нерсесян Д. Побудова тривимірної кінцево-елементної моделі автоматизованого комплексу індукційного нагріву металевих деталей. *Виробництво & Мехатронні системи* : матеріали VI Міжнародної конференції. Харків, 2022. С. 31–33.
5. Берник І. М. Наукові основи вдосконалення технології і обладнання ультразвукової обробки дисперсних середовищ. – 2021.
6. Олейніков І. Електровибухова сушка / Олейніков І., Яковлев М. // Харчова промисловість. 2018. – № 12. – С. 48-49.
7. Yi J. et al. Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review // *Drying Technology*. – 2020. – Т. 38. – №. 15. – С. 2039-2054.
8. Пінчевська О. О., Спірочкін А. К. Конвекційне сушіння пиломатеріалів з деревини, що зростає на території України // *The XXII International Scientific and Practical Conference «Multidisciplinary academic*

research, innovation and results», June 07 – 10, 2022, Prague, Czech Republic – 2022. С. 765-767.

9. Шумило К. П., Белянська О. Р., Крюковська О. А. Дослідження енергоекологічного методу переробки промислово-побутових відходів // Вчені записки ТНУ імені ВІ Вернадського. Серія: технічні науки. – 2020. – №. 2. – С. 62-67.

10. Грицюк В.Ю., Невлюдов І.Ш., Заблудський М.М., Субраманиан П. Оцінка вихрових струмів і втрат потужності у роторі шнекового електротепломеханічного перетворювача для адитивного виробництва // Журнал "Техніка та енергетика", Київ, Т. 13, № 2, 2022. – С. 41-49.

11. Szczygieł, M. Rotary-linear induction motor based on the standard 3-phase squirrel cage induction motor-constructional and technological features [Electronic Resource] / M. Szczygieł, K. Kluszczyński // Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika. – 2016. – № 112. – С. 395–406. – Access Mode: http://www.ejournals.eu/sj/index.php/Cz/article/viewFile/5531/pdf_247

12. Amiri, E., Jagiela, M., Dobzhanski, O., & Mendrela, E. (2013, May). Modeling dynamic end effects in rotary armature of rotary-linear induction motor. In Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International (pp. 1088-1091). IEEE.

13. Amiri E., Gottipati P., Mendrela E. A. 3-D space modeling of rotary-linear induction motor with twin-armature // Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference on. – IEEE, 2011. – С. 203-206.

14. Mykola Z., Volodymyr G., Olga T. Calculation of the three-dimensional electromagnetic field distribution in a screw electromechanical converter with external massive rotor // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – С. 547-551.

15. Gyawali T. R., Joshi B. R., Maeda M. K. Mixing Performance of Energy-Saving Gravity Mixer for Powder Materials // ACI Materials Journal. – 2019. – Т. 116. – №. 2. – С. 3-9.

16. Ставінський, А.А. Цільові функції порівняльного аналізу енергетичної ефективності електромагнітних систем асинхронних двигунів із внутрішніми та зовнішніми роторами [Електронний ресурс] / А.А. Ставінський, О.О. Пальчиков // Електротехніка та електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 41–45. – Режим доступу: <http://eie.khpi.edu.ua/article/view/38305>
17. Zablodskiy N. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes [Electronic Resource] / N. Zablodskiy, V. Plyugin, V. Gritsyuk // Russian Electrical Engineering. – (2016). – 87(3). – С. 140–144. – Access Mode: <http://link.springer.com/article/10.3103/S1068371216030123>
18. Kim K.K. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters [Electronic Resource] / K.K. Kim, S.N. Ivanov // Russian Electrical Engineering. – (2009). – 80. – С. 459–465. AccessMode:<https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068371209080094?LI=true>
19. Розробка високоінтенсивної сушарки з регульованим закрученим потоком теплоносія / А.В. Журавльов, А.Ю. Баранов // Вісник ВГУИТ, № 4, 2016. – С.47-49.
20. Антипов, С.Т. Тепло та масообмін при сушінні післяспиртової зернової барди в апараті із закрученим потоком теплоносія [Текст] / С.Т. Антипов, А.В. Журавльов, 2016. – 252 с.
21. Пат. 2152571 РФ, F26 B11/04. Сушарка для сипучих матеріалів / Г.А. Морозов, Н.Г. Воробйов, Є.Г. Воробйова, М.М. Бадретдінов, № 98104204/06; Опубл. 10.07.2015, Бюл. № 7. – 5 с.
22. Машины та апарати харчових виробництв: підручник для вузів: у 3 кн.: Кн. 2. Т.2/С.Т. Антипов [та ін]; под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова, проф. В.Я. Груданова. – Минск: БГАТУ, 2018. – 591 с.
23. Васильєв І.В. Моделювання електромагнітних та теплових полів при непрямому нагріванні рідини у трифазному індукторі / І.В. Васильєв, А.І. Данилушкін, Є.В. Склярів // Міжнародний науковий інститут "Educatio" ІХ, Технічні науки, 2015.– С.71-74.

24. A. Zhiltsov, A. Bereziuk, S. Głowacki / The development of technically energy-efficient electrical complex for drying bulk materials based on induction type heat generator // Skróty referatów i posterów prezentowanych na zorganizowanej z okazji Jubileuszu 40-lecia Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie, Konferencji Naukowej pt. „Inżynieria produkcji rolniczej i leśnej”. Warszawa 8-9 czerwca 2017 roku. – 79-80 p.

25. Антіпов, С.Т. Високоінтенсивні сушильні установки комбінованого типу [Текст] / С.Т. Антіпов, Д.А. Казарцев, А.В. Журавльов, Є.С. Бунін // Інновації у науці та освіті – 2016. – Праці наукової конференції в 2 ч. – КГТУ, 2016. Ч. 1. – С. 379-381.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. L. Mametyev, Y. Drozdenko, O. Lyubimov, “Evaluation of the Technical Condition of Auger Equipment Units by Vibration Inspections”, 8th Russian-Chinese Symposium “Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety”, 2016.

34. O. Lyashuk, M. Sokil, Yu. Vovk, A. Tson, A. Gupka, O. Marunych, “Torsional oscillations of an auger multifunctional conveyor’s screw working body with consideration of the dynamics of a processed medium continuous flow”, *Ukrainian food journal*, Vol. 7(3), pp. 499-510, 2018.

35. Wang F., Ho S. C. M., Song G. Modeling and analysis of an impact-acoustic method for bolt looseness identification // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – T. 133. – C. 106249.