

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРТЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.313.33:621.318.122

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНГЕАТЕ

Каплун В.В.

(підпис) (ПІБ)

“ ” 2023 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій

Окушко О.В.

(підпис) (ПІБ)

“ ” 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: Поліфункціональний електромеханічний перетворювач для установок
піролізної переробки рослинної біомаси у біовугілля

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма – Магістр

(назва)

Магістерська програма – Науково-технічні засади електромеханічного перетворення
енергії

(назва)

Орієнтація освітньої програми – Освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Керівник магістерської роботи

Д-р техн. наук, проф.

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Заблудський М.М.

Виконав

(підпис) (ПІБ студента)

Лунгул І.П.

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРТЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

канд. техн. наук, доц. Окушко О.В.

“ ” 2022 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Лунгулу Ігору Петровичу

Спеціальність

141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма

Магістр

Магістерська програма

Науково-технічні засади електромеханічного перетворення енергії

Орієнтація освітньої програми

Освітньо-наукова

Тема магістерської роботи **Поліфункціональний електромеханічний перетворювач для установок піролізної переробки рослинної біомаси у біовугілля**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ ” 20 р.

№ _____

Термін подання завершеної роботи на кафедру

Вихідні дані до магістерської роботи –

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурної та прикладної бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання для конверсії рослинної біомаси у біовугілля

2. Синергійний ефект використання електротехнології в піролізному процесі виробництва біовугілля.

3. Розробка конструктивно – технологічної схеми поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

4. Дослідження електромагнітних і теплових процесів в активних зонах поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

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

Дата видачі завдання “ ” 2022р.

Керівник магістерської роботи

Заблудський М.М.

Завдання прийняв до виконання

Лунгул І.П.

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи: робота вміщує вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел (54 найменувань). Повний обсяг роботи складає 80 сторінок.

Актуальність теми. Використання рослинної біомаси, зважаючи її наявний потенціал, як відновлювального джерела енергії є особливо актуальним, оскільки в майбутньому рослинна біомаса буде відігравати значну роль в формуванні паливно-енергетичного балансу країни. Підвищення ефективності деструктивної енерготехнологічної конверсії біомаси у біовугілля - важливий науковий напрямок досліджень. Останнім часом гідровугілля привертає велику увагу завдяки своїм потенційним функціям: 1) підвищення виходу енергетичного метану через платформу анаеробного зброджування (AD), 2) забезпечення поживними речовинами для водоростей або рослин, 3) видалення забруднюючих речовин зі стічних вод як абсорбентів. Тому вирішення завдань, які пов'язані з розробкою і удосконаленням технологій і техніки для конверсії рослинної біомаси, направлених на підвищення ефективності використання її енергії є актуальним і вимагає додаткових досліджень.

Мета досліджень – підвищення ефективності деструктивної енерготехнологічної конверсії біомаси у біовугілля та гідровугілля за рахунок використання поліфункціонального електромеханічного перетворювача

Об'єкт дослідження – енергетичні процеси деструктивної енерготехнологічної переробки рослинної біомаси та піролізу дигестата.

Предмет дослідження – електромагнітні процеси в електромеханічній системі камери сухої перегонки з виконавчим органом на основі поліфункціонального електромеханічного перетворювача з впливом осцилюючого магнітного поля.

Методи дослідження – теоретичні та експериментальні дослідження, що базуються на фундаментальних положеннях теорій електричних машин, термодинаміки нерівноважних процесів.

Для досягнення мети та здійснення завдань було використано такі методи:

- теоретичні – аналіз, синтез, узагальнення, систематизація, порівняння для розкриття сутності та визначення базових понять досліджуваної проблеми, структурування, моделювання для розробки моделі;

- емпіричні – спостереження, порівняння, вимірювання, розрахунок, метод проб і помилок;

- кількісної обробки даних – визначення середніх значень, розрахунок заданих параметрів.

Організація та експериментальна база дослідження.

Біомаса розглядається одночасно у двох аспектах:

- сировина для генерації електричної і теплової енергії, яка необхідна для роботи ліній електротехнологічного комплексу;

- сировина для переробки у біовугілля та гідровугілля.

При вирішенні поставлених завдань проводились як теоретичні, так і експериментальні дослідження. Теоретичні дослідження електромагнітних,

процесів базуються на фундаментальних положеннях теорій електричних машин, теорії коливань, теорії автоматизованого управління. Динамічні режими досліджуються в пакеті MATLAB Simulink.

Теоретичне значення дослідження:

Встановлені основні закономірності електромагнітних процесів в електромеханічній системі піролізної установки для виробництва біовугілля та синтез-газу. За допомогою запропонованих математичних моделей для двомодульної асинхронної машини із загальним порожнистим масивним ротором встановлено особливості розподілу магнітного поля та механічні характеристики поліфункціонального електромеханічного перетворювача.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПО СТВОРЕННЮ ЕНЕРГООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА БІОВУГІЛЛЯ.....	10
1.1 Технології переробки біомаси для виробництва біовугілля.....	10
1.2 Застосування електричних машин в технологічних процесах з важкими температурними навантаженнями.....	13
1.3 Проблеми моделювання асинхронних машин з загальним зовнішнім масивним ротором.....	14
1.4 Особливості використання та проблеми виробництва гідровугілля....	15
РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПІРОЛІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНВЕРСІЇ БІОМАСИ.....	19
2.1 Енерготехнологічний комплекс з синергічним ефектом в піролізному процесі виробництва біовугілля та синтез-газу.....	19
РОЗДІЛ 3 ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ У СКЛАДІ БІОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ.....	36
РОЗДІЛ 4 ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.....	47
4.1 Особливості проєктування поліфункціональних електромеханічних перетворювачів для режимів високотемпературного навантаження.....	47
4.2 Моделювання поліфункціональних електромеханічних перетворювачів.....	51
РОЗДІЛ 5.....	61
ОХОРОНА ПРАЦІ.....	61
5.1 Шум та вібрації.....	61
5.2 Електробезпека.....	62
5.3. Пожежна безпека.....	64
5.4. Виробниче освітлення.....	66
5.5 Заходи щодо захисту працівників від травмування.....	66

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

НУБІ! ПІЯНІ
Україні

ВІСНОВКИ
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

73
73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕНУБІП України
ЕТК – енерготехнологічний комплекс

АД – асинхронний двигун

ЕМС – електромеханічна система

ЕНУБІП України
ККД – коефіцієнт корисної дії

ММ – математична модель

МР – масивний ротор

МРС – магніторушійна сила

ЕНУБІП України
ПФР – порожнистий феромагнітний ротор

ПЕМП – поліфункціональний електромеханічний перетворювач

РНОС – робоче навантажувально-охолоджувальне середовище

ЕРС – електрорушійна сила

ЕМП – електромагнітні поля

ЕНУБІП України
ГТК – гідротермальна карбонізація

ЕНУБІП України

ЕНУБІП України

ЕНУБІП України

ВСТУП

Використання рослинної біомаси, зважаючи її наявний потенціал, як відновлювального джерела енергії є особливо актуальним, оскільки в майбутньому рослинна біомаса буде відігравати значну роль в формуванні паливно-енергетичного балансу країни. Біомаса сьогодні є четвертим за величиною енергоносієм у світі – до 14% у світі споживання первинної енергії. Сценарій сталого розвитку вказує на те, що частка біопалива в глобальному масштабі в країнах, що розвиваються, може досягати 35% первинної енергії постачання. Одним з розповсюджених методів переробки рослинної біомаси є газифікація, зокрема метод використання деревних гранул в газифікаторах безперервної дії, в якому попередньо нагріте від вихлопних газів повітря використовується у якості окислювача. Аналіз технологій термохімічної конверсії низькосортних і дрібнофракційних видів рослинної біомаси також показав, що на даний час найбільш перспективним є енерготехнологічні методи. Енерготехнологічний метод конверсії рослинної біомаси є комплексний метод використання її енергетичного потенціалу, оскільки поряд з горючим газом є можливість виробництва іншого цінного продукту (наприклад, біовуглець), що є більш рентабельним ніж пресування, газифікація чи спалювання. Крім того, неможливо ефективно вести процес конверсії орієнтуючись тільки на один продукт, тобто біогаз. Тому вирішення завдань, які пов'язані з розробкою і удосконаленням технологій і техніки для конверсії рослинної біомаси, направлених на підвищення ефективності використання її енергії є актуальним і вимагає додаткових досліджень. Розумною альтернативою традиційним комплексам, що складаються з окремо сформованих одиниць устаткування, стають теплоелектромеханічні комплекси на базі поліфункціональних електромеханічних перетворювачів (ПЕМП) технологічного призначення, що передбачають нове використання дисипативної енергії, структурну, функціональну і теплову інтеграцію. Загальний ККД ПЕМП доволі високий,

що забезпечує ефективну реалізацію принципів енергоресурсозбереження на підприємствах агропромислового та паливно-енергетичного комплексів.

Зміст поставлених завдань:

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурної та прикладної бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання для конверсії біомаси у біовугілля.

2. Формування і аналіз синергійного ефекту використання електротехнології в піролізному процесі виробництва біовугілля.

3. Дослідження електромагнітних процесів в робочих зонах електромеханічної системи піролізної установки.

Мета досліджень – підвищення ефективності деструктивної енерготехнологічної конверсії біомаси у біовугілля та гідровугілля за рахунок використання поліфункціонального електромеханічного перетворювача

Об'єкт дослідження – енергетичні процеси деструктивної енерготехнологічної переробки рослинної біомаси та піролізу дигестага.

Предмет дослідження – електромагнітні процеси в електромеханічній системі камери сухої перегонки з виконавчим органом на основі поліфункціонального електромеханічного перетворювача з впливом осцилюючого магнітного поля.

Основні положення кваліфікаційної магістерської роботи доповідались на 76-й науково-практичній конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м.Київ, НУБіП України [55].

РОЗДІЛ АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПО СТВОРЕННЮ ЕНЕРГООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА БІОВУГЛІЦЯ

НУБІП України

1.1 Технології переробки біомаси для виробництва біовуглецю

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.

Відома технологія термохімічної конверсії [1] дрібно фракційної рослинної біомаси з високою вологістю, що включає подавання подрібненої біомаси при допомозі завантажувальних пристроїв і шнека в камеру сухої перегонки, яка нагрівається до температури 350-500 °С теплоносієм, що утворюється при спалюванні додаткового палива в технологічній топці. При

даній температурі біомаса нагрівається до температури термічного розкладу на леткі (конденсовані і неконденсовані) та тверді (біовуглець і мінеральні) продукти. Отримані продукти піролізу через перехідний патрубок надходять

у камеру прокалювання, де проходять через затиснутий, рухомий і розжарений (800-850 °С) шар біовуглецю зони відновлення, яка утворюється в місці розриву витка шнека довжиною 1,2-1,5 його діаметра. При цьому, при проходженні продуктів сухої перегонки, через зону відновлення смоли та інші високомолекулярні сполуки розкладаються, а CO, CO₂ і H₂O приймають

участь у реакціях відновлення з отримання горючих газів CO та H₂. Крім цього тверді мілкодисперсні частки біовуглецю і мінеральних сполук затримуються у шарі біовуглецю відновлювальної зони. Після зони відновлення біовуглець надходить у другу відновлювальну зону, також утворену у камері прокалювання в місці розриву витка шнека довжиною 1,2-1,5 його діаметра,

куди назустріч руху біовуглецю, через патрубок подачі додаткового дуття подають наприклад водяну пару. Водяна пара по ходу охолоджує біовуглець і

НУБІП України

перегривається, а в зоні відновлення реагує з біовуглецем з отриманням додаткового водню.

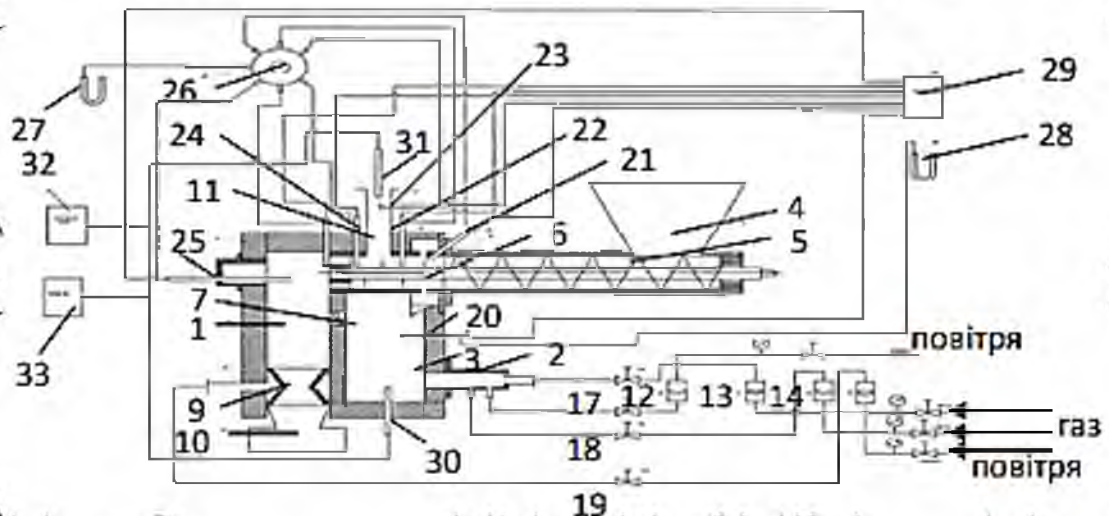


Рис. 1.1. Схема модельної експериментальної установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси: 1-корпус; 2-камера згоряння; 3-технологічна топка; 4-витратний бункер; 5-шнек; 6-реакційна зона; 7-регулююча заслінка; 8-шахта; 9-колюча гратка; 10-бункер біовуглецю; 11-камера допалювання пірсазу; 12-15-ротаметри; 16-19-регулююча арматура; 20-25-точки вимірювання температури і тиску; 26-28-реєстрація тиску; 29-реєстрація температури; 30, 31-точки забору проб газу на аналіз; 32, 33-прилади газового аналізу.

Горючий газ, з двох зон відновлювання, через вхідний газовий патрубок, який розташований між зонами відновлювання, направляють в систему відведення горючого газу, а охолоджений біовуглець, при допомозі розвантажувальних пристроїв накопичується у бункері. Теплоносієм є продукти неповного згоряння піролізного газу отриманого в ході термохімічної конверсії і основна маса (75-80%) її теплоти передається шару біомаси через стінку. Решта теплоносія після теплообмінника і очистки фільтрується протитоком через затиснутий рухомий шар біовуглецю для його охолодження і навуглероджування.

Запропонована також піролізна установка для утилізації міських деревних відходів з одержанням піролізного газу та біовуглецю (рис. 1.2). Крім власне піролізної установки, до її складу входить також: склад деревних відходів (тріски), пневмотранспортна установка тріски і склад біовуглецю.

Згідно проектної документації, установку встановлено в приміщенні біля існуючої котельні, в безпосередній близькості до котлів ДКВР 10/13[1].



Рис.1.2. Енерготехнологічна установка ЕТУ-1 для термохімічної конверсії рослинної біомаси в піролізний газ і біовуглець: 1-бункер; 2-пневматичний живильник; 3-шлюзовий затвор-дозатор; 4-реактор; 5-пальник газовий

Суттєвими недоліками розглянутої технології є низька енергетична ефективність енерготехнологічної переробки біомаси за причин невикористання дисипативної складової енергії електропривода та низький рівень регульованості як термохімічних реакцій піролізу, так і реакцій конверсії палива (відсутність контролю тиску і вмісту кисню) при термохімічній регенерації з використанням вторинних енергоресурсів. Крім того, нерівномірний розподіл температури у шарах біомаси в зоні сухого піролізу призводить до неповного термічного розкладання біомаси на легкі та тверді продукти, її перепалу, що знижує ефективність процесу.

1.2 Застосування електричних машин в технологічних процесах з важкими температурними навантаженнями

Електричні машини (ЕМ) з короткозамкненим ротором - добре відомі компоненти електромеханічних ланцюгів перетворення, головним чином за їх простотою та надійністю. Екологічний контекст підштовхнув виробників до підвищення ефективності ЕМ. Однак у сфері застосування, для яких поняття ефективності може бути не найбільш значущим параметром. Ці програми скоріше шукатимуть тривалий термін служби та високу доступність машини.

У цьому випадку технологічне середовище може мати високу температуру, тиск і вологість або обмежений об'єм [2]. Для прогнозування втрат запропонована аналітична модель, яка поєднана з тепловою моделлю для прогнозування температури в різних частинах машини та впливу температури на параметри, важливі для продуктивності ЕМ.

Важливим є питання пошуку альтернативних рішень щодо заміни органічних ізоляційних матеріалів, які не витримують гарячих умов експлуатації. Відомі роботи, в яких виконано порівняльний аналіз ламінованого та суцільного ротора синхронної машини, що працює при високих температурах з використанням обмоток з неорганічних матеріалів [3-5]. Також представлено застосування тривимірної поєднаної електромагнітного та теплового аналізу нових конструкцій машин, призначених для підвищеної температури.

Існує широкий спектр технологічних процесів з важкими температурними навантаженнями, які потребують безпосереднього об'єднання обертових частин ЕМ з виконавчими механізмами. В роботах [6-8] доведено ефективність використання шнекового перетворювача, яке приваблює універсальністю в переробці різного роду матеріалів, незважаючи на темп технологічного процесу. Вплив параметрів гідролізу на крутний момент змішування було досліджено для одно- та двошнекових електромеханічних перетворювачів у роботах [7,9]. У цих дослідженнях були

розроблені регресійні моделі для встановлення кореляції між параметрами системи та параметрами, що змінюються в часі. Результати показали, що підвищення температури обробки понад рекомендовані рівні призвело до зниження в'язкості сировини, тиску в середовищі обробки та питомої механічної енергії. Крім того, M. Mushtuk et al. [10] досліджували питання високих витрат енергії, пов'язаних з обробкою в електромеханічному гвинтовому перетворювачі. В роботі проведено математичне моделювання і визначені силові та енергетичні параметри технічної системи.

Технології 3D-друку великомасштабних споруд дозволяють архітекторам і будівельникам значно розширити межі проектування споруд і підвищити ефективність їх зведення [11]. Мобільні роботизовані платформи для 3D-друку все частіше впроваджуються в будівельній сфері, а також у виробництві дорожніх покриттів, що дозволяє вирішити проблему обмеженого робочого простору. Типова конструкція екструдерного вузла роботизованої платформи для 3D друк великомасштабних структур можна покращити, поєднавши в одному корпусі електродвигун, шнековий екструдер і нагрівач. У запропонованому шнековому електротермомеханічному перетворювачі використовується зовнішній шнековий ротор, який одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівального елемента, виконавчого механізму та захисного кожуха. Для перетворювачів, що працюють у важких умовах, актуальним є використання польових методів розрахунку.

Таким чином, поряд з вирішенням проблеми забезпечення надійності роботи електромеханічних перетворювачів у важких умовах, існує науковий напрям щодо підвищення енергоефективності їх застосування шляхом структурної, функціональної і теплової інтеграції з технологічним середовищем. Це новий клас поліфункціональних електромеханічних перетворювачів з масивним ротором технологічного призначення.

1.3 Проблеми моделювання асинхронних машин з загальним зовнішнім масивним ротором

Одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності і продуктивності технологічних систем для переробки грубодисперсних речовин є структурна і теплова інтеграція окремих елементів обладнання, використання дводвигунової системи з спільним ротором-валом і дисипативної складової енергії цих елементів, а також застосування принципу безредукторного забезпечення низької частоти обертання й кратного посилення обертового моменту [12,13]. В роботах [14-17] розглянуто двостаторні перетворювачі і представлено аналітичний підхід з використанням еквівалентної схеми заміщення асинхронної машини (АМ) з масивним ротором (МР), а також розрахунки з використанням кінцево-елементної моделі. Для узагальненого електромеханічного перетворювача (ЕМП) справедливі відомі рівняння [18-23], але моделювання асинхронних машин із загальним ротором - валом проводиться без взаємної ув'язки процесів в окремих машинах, використовуються стандартні, але не взаємопов'язані схеми заміщення, що наводить при аналізі процесів у динамічних режимах роботи до суттєвих помилок. Відсутня єдиний підхід до моделювання АМ з МР, на підставі якого можна було б методом успадкування сформувати математичну модель (ММ), базуючись на вихідній узагальненій ММ. Особливо це стосується асинхронних машин із загальним ротором, який є одночасно виконавчим механізмом.

1.4 Особливості використання та проблеми виробництва гідровугілля

Гідротермальна карбонізація (НТС) — це екологічно чистий, гнучкий і ефективний еносіб утилізації вологих твердих відходів, утворюючи насичений вуглецем матеріал під назвою гідровугілля. Значні зусилля були спрямовані на вивчення доцільності використання вуглецю в утилізації відходів для досягнення мети циркулярної економіки. Проте всебічної оцінки впливу вуглецю на рекуперацію енергії в результаті анаеробного зброджування (AD), утилізацію поживних речовин і очищення стічних вод наразі немає. Щоб

зрозуміти вплив типу вуглецю на його застосування, спочатку представимо механізми та обробку біомаси для приготування вуглецю [24].

Поводження з біомасою відходів як із стійкими ресурсами може вирішити проблеми щодо пошуку альтернатив викопному паливу відновлюваної енергії та безпечної утилізації органічних відходів.

Перетворення біомаси на біовугілля за допомогою піролізу в безкисневих умовах і при високій температурі процесу (300–700 °C) є типовим підходом до підвищення цінності органічних відходів і використання їх потенціалу як палива . Однак низький вихід біовугілля та значні витрати тепла для

проведення піролізу підштовхнули дослідників до вивчення іншого методу валоризації біомаси. Альтернативою піролізу є відносно новий термохімічний процес, який називається гідротермальна карбонізація (ГТК). У цьому новому процесі біомаса нагрівається у водному середовищі при температурах від 160 до 350 °C під тиском від 2 до 10 МПа . Враховуючи, що немає необхідності

проводити попередню обробку під час сушіння під час виконання ГТК, тому більш доцільно використовувати ГТК для обробки відходів із високим вмістом вологи. Гідровугілля є основним кінцевим продуктом, отриманим з ГТК, і його вихід і характеристики регулюються як умовами реакції гідротермальної

карбонізації, так і типом сировини для біомаси. Враховуючи, що вуглеводневугілля виробляється при нижчому ступені карбонізації, ніж біовугілля, утворюється більше аліфатичного вуглецю (C) і менша кількість ароматичного C разом із меншою питомою площею вуглецю.

Останнім часом гідровугілля привертає велику увагу завдяки своїм потенційним функціям: 1) підвищення виходу енергетичного метану та сприяння виробленню хімічних речовин із доданою вартістю через платформу анаеробного зброджування (AD), 2) забезпечення поживними речовинами для водоростей або рослин, служачи носіями поживних речовин, і 3) видалення

забруднюючих речовин зі стічних вод як абсорбентів. Щоб полегшити подальше застосування цього деревного вугілля у вищезгаданих галузях, важливо мати чітке розуміння механізмів виробництва вуглецю. Залежно від

типу вихідної сировини конкретні етапи перетворення сирової біомаси на гідровугілля відрізняються. Такі відмінності означають, що умови НТС для досягнення вищого виходу вуглецю з кращими властивостями також різноманітні. Таким чином, спочатку необхідно представити механізми утворення вуглецю та пов'язані з цим умови, що контролюють перетворення біомаси.

Однак AD все ще стикається з деякими технічними проблемами, такими як нестабільність роботи та низька ефективність деградації кількох конкретних субстратів. Отже, AD не може повністю використовувати потенціал усієї біомаси як джерела енергії [24]. Тому важливо шукати стратегії для підвищення виробництва CH_4 з AD. Додавання вуглеводню в метантенк є можливим способом отримати вищий і чистіший вихід CH_4 (збільшений на 20–30% порівняно з контекстом без вуглецю). Враховуючи, що леткі жирні кислоти (ЛЖК) є попередниками CH_4 , концентрації ЛЖК також змінюватимуться з різною швидкістю після дозування вуглеводнів. Відносно велика кількість азоту (N) і фосфору (P) зберігається у вуглеводні під час НТС, що вказує на те, що ця тверда речовина, що утворюється в результаті, може працювати як постачальник поживних речовин. Крім того, використання гідровугілля, отриманого з малоцінних відходів, як заміник цінних добрив також може вирішити проблему утилізації відходів.

Гідровугілля також може служити адсорбентом для видалення забруднюючих речовин зі стічних вод завдяки своїй схожості з комерційним активованим вугіддям. Більш конкретно, висока адсорбційна здатність гідровугілля в основному пояснюється його високою питомою поверхнею (80–280 m^2/g).

Нещодавно було опубліковано кілька оглядів гідровугілля з точки зору потенціалу використання його як чистого твердого палива. Виявлені також відмінності між гідровугіллям і біовугіллям щодо механізмів їх виробництва, фізико-хімічних властивостей і застосування в області рекультивациі ґрунту як адсорбенту важких металів, припустивши, що гідровугілля перевершує

біовугілля в багатьох аспектах, включаючи усунення попереднього - етап
супшіння. Незважаючи на те, що протягом останніх років гідровугілля
використовувалося для удобрення ґрунту, очищення стічних вод і відновлення
джерел вуглецю з відходів, систематична оцінка застосування гідровуглю у
вищезазначених галузях все ще є недостатньою, але вона вкрай необхідна для
сприяння подальшому розвитку цього вуглецевого матеріалу.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 2 ПОБУДОВА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПІРОЛІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНВЕРСІЇ БІОМАСИ

У загальному вигляді, піроліз — це термохімічний процес, під час якого вихідна біомаса нагрівається в інертній атмосфері для отримання газу, рідини (біо-нафта) і твердої (вугілля) продуктів. Ми будемо розглядати дві модифікації електромагнітних пристроїв для піролізних технологій конверсії біомаси:

- енерготехнологічний комплекс (ЕТК) на базі ПЕМП технологічного призначення для виготовлення біовуглецю;
- електричної установки для гідротермальної карбонізації дигестату (продукту біоконверсії органічних матеріалів у процесі метанового бродиння).

Ці модифікації передбачають ефективне використання дисипативної складової енергії, структурну, функціональну і теплову інтеграцію [25–27].

2.1 Енерготехнологічний комплекс з синергічним ефектом в піролізному процесі виробництва біовугілля та синтез-газу

Ідея створення вискоелективного ЕТК полягає в тому, що його структура включає в себе не тільки елементи і вузли, що виконують основні функції перетворення енергії одного виду в інший з певним ККД і забезпечують переробку, наприклад, біомаси по фракційним, формотворчим і вологим параметрам, а й реалізує ряд побічних (супутніх) фізико-хімічних ефектів для додання біомасі нових властивостей і отримання додатково цінних речовин. Крім того, ЕТК доповнений підсистемою рекуперації енергії відпрацьованого теплового агента.

Кожна стадія перетворення енергії, фазових переходів, фізико-хімічних перетворень і впливів на біомасу повинна відображатися функцією «корисності» і мати енергетичну оцінку. Функція «корисності» — це частка

виробленого основним процесом або привнесеного побічними ефектами корисної властивості продукту в загальному балансі корисних властивостей.

Модулі ПЕМП об'єднуються в єдину транспортну шнекову артерію відповідно до технологічних операцій. ЕТК по тепловому і аеродинамічному впливу на біомасу є паралельним гібридом, який містить як мінімум два перетворювача енергії.

Гібридна система ЕТК може розглядатися як підсилювач потужності та ефективності і її головна перевага – зниження витрати палива, електроенергії та шкідливих викидів. Квазістаціонарні і динамічні режими роботи ЕТК і

процеси переробки біомаси супроводжуються більш ніж 15 ефектами різної природи. Основні ефекти формують роботу електромеханічної та теплогенеративної систем: створення електромагнітного моменту для обертання шнека; генерація тепла при згорянні, кондуктивно-конвективний теплообмін і турбулентний режим переміщення біомаси. На рис. 2.1 зображена

картина поля вектора магнітної індукції для номінального режиму роботи модуля ПЕМП при ковзанні ротора 0,88. У повітряному зазорі магнітна індукція становить близько 0,8...0,9 Тл, у ніжках зубців статора досягає значення 2 Тл, а на внутрішньому поверхневому шарі ротора перевищує

величину 4 Тл.

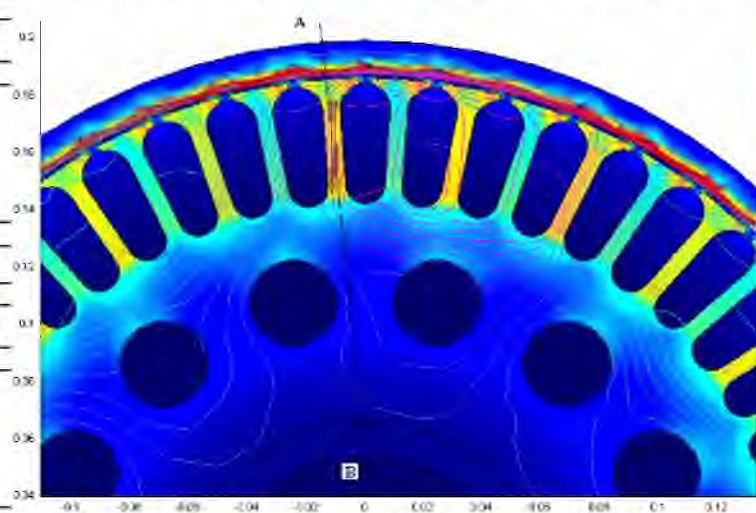


Рис. 2.1. Картина магнітного поля ПЕМП у сталому режимі роботи при ковзанні 0,88

У зовнішньому поверхневому шарі ротора, який знаходиться у безпосередньому контакті з біомасою, магнітна індукція складає більше 0,25 Тл. Значення температур у зазначених зонах знаходиться в діапазоні від 210 до 400°C. Таким чином, ротор ПЕМА — джерело довгохвильового інфрачервоного (ІЧ) випромінювання ($\lambda = 50\text{--}2000$ мкм). ІЧ випромінювання ротора ПЕМА носить імпульсний характер дії і практично повністю поглинається біомасою, у той час як для нагрітого повітря, що виходить з сопел аксіальних лопаток, поглинання мінімальне. У кінцевих зонах ГМ частота вихрових струмів визначається ковзанням ($2 - s$), тобто інтенсивність ІЧ тут вище.

Поверхня гвинтових лопаток ротора-шнека є ефективним відбивачем ІЧ-випромінювання. Більш сильна бактерицидна дія ІЧ-випромінювання, у порівнянні з традиційною тепловою обробкою пояснюється тим, що при використанні ІЧ-нагрівання, тепло до мікроорганізмів підводиться не тільки ззовні, але і за рахунок поглинання, генерується всередині самих мікроорганізмів, викликаючи, крім того, поляризацію їх структури. Завдяки миттєвому впливу випромінювання з високою щільністю потоку енергії, створюються необхідні умови для ліквідації токсичної і баластної мікрофлори.

Комплексний вплив мультифізичних полів у активній зоні ПЕМА на властивості біомаси та сумішей створює умови для отримання палива другого покоління і якісних добрив, в яких знищена патогенна мікрофлора [25-27].

Структурна схема енерготехнологічного комплексу [25] для термохімічної конверсії рослинної біомаси з високою ступінню рекуперації теплової енергії відпрацьованого теплоносія зображена на рис. 2.2. Газовий теплоносії формують в технологічній топці 1 і подають для зовнішнього нагріву камери сухої перегонки 2 і камери прокалювання 3. Теплоносії може бути сформований теплогенератором, що працює на відходах виробництва або з підключенням до біогазової установки. Подрібнена біомаса подається в бункер завантажувального пристрою 4 і далі за допомогою живильника — в шнекову герметичну камеру сухої перегонки 2, в якій здійснюється двобічне

нагрівання шару біомаси шляхом кондуктивної передачі тепла і випромінювання через стінки камери і від поверхні зовнішнього простора поліфункціонального електромеханічного перетворювача 5. Індуктори 6 електромеханічного перетворювача, які підключені до джерела змінної напруги і частоти, створюють обертові магнітні поля. При цьому в масивному роторі збуджуються вихрові струми, які нагрівають останній до температури 350°C. Одночасно, за рахунок взаємодії магнітного поля і вихрових струмів створюється електромагнітний момент, що обертає ротор, який за допомогою гвинтових лопатей просуває біомасу вздовж камери 2. Обертовий момент за допомогою зубчатої передачі передається також шесту 7 камери прокачування. В герметичній камері сухої перегородки 2 біомаса термічно розкладається на леткі та тверді продукти, але при завантаженні все ж містить певну частку кисню.

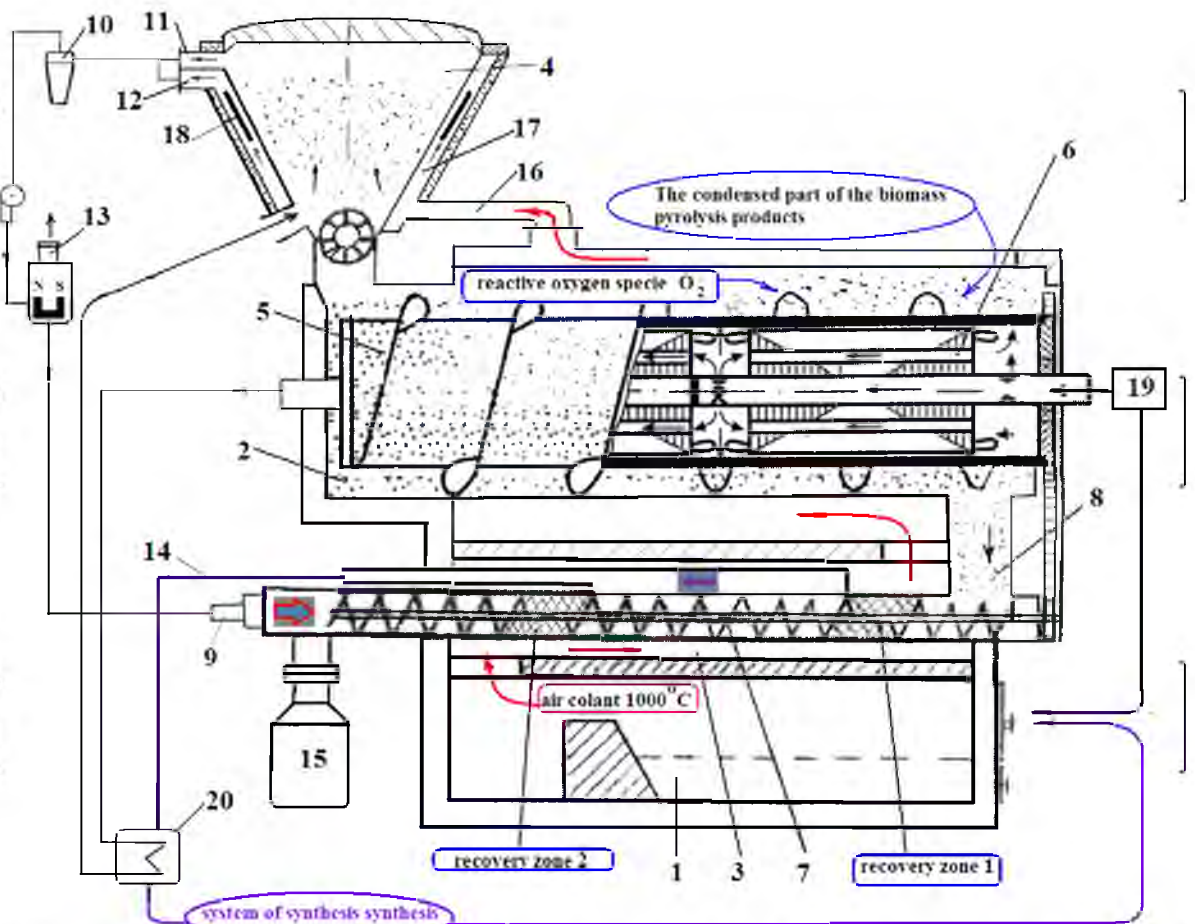


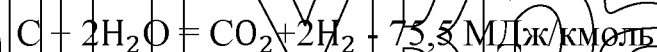
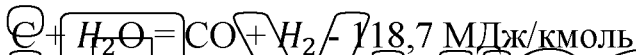
Рис. 2.2. Енерготехнологічний комплекс з високою ступінню інтеграції і рекуперації теплові енергії відпрацьованого теплоносія

Кисень є парамагнітним речовиною і його присутності у невеликій кількості достатньо, щоб розглядати воду як пара- і діамагнітну систему. В процесі окислення киснем води під впливом магнітного поля будуються такі з'єднання, як вільні радикали, перекиси, синглетний молекулярний кисень (молекула кисню O_2 у збудженому синглетному стані), що володіють високою хімічною активністю і впливають на на обробку твердих вуглецевих матеріалів. Відповідні продукти створюються в перших від живильника зонах реакції – кроках шнека, як показано на рис.2.2 і розглядаються як можливість динамічного коригування параметрів процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси.

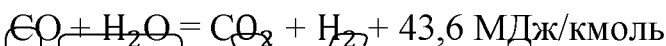
При температурах 450-500°C, на останніх витках шнека камери сухої перегонки при інтенсивному проходженні екзотермічних реакцій завершується вихід летких (конденсованих і неконденсованих) продуктів піролізу біомаси. Наявність на поверхні ротора різниці електричних потенціалів по контурах вихрових струмів створює умови протікання короточасних струмів і електролізу водних розчинів з частковим виділенням водню.

Отримані продукти піролізу через перехідний патрубок 8 надходять у камеру прокалювання 3, де проходять через затиснутий, рухомий і розжарений (800-850°C) шар біовуглецю першої зони відновлення (рис.2.2), яка утворюється в місці розриву витка шнека 7. При цьому смоли і інші високомолекулярні сполуки розкладаються з утворенням переважно монооксида вуглеця і водня. Крім того, відбувається взаємодія незконденсованих продуктів піролізу з вуглицем і парами пірогенетичної вологи з утворенням CO та H_2 . Основними з цих реакцій є такі:

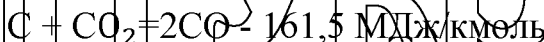
– реакція парової газифікації біовуглецю



– реакція конверсії водяної пари



реакція Будуара



Більша частина відновлювальних реакцій є ендотермічною, коли фізична теплота біовуглецю поглинається з утворенням горючих газів CO та H₂, які суттєво підвищують теплоту згоряння вихідного горючого газу. Тверді мілкодисперсні частки біовуглецю і мінеральних сполук затримуються у шарі біовуглецю відновлювальної зони. Після першої зони відновлювання біовуглець надходить у другу відновлювальну зону, також утворену в місці розриву витка шнека 7 довжиною 1,2-1,5 його діаметра, куди через патрубок подачі додаткового дуття 9 назустріч руху біовуглецю подають за допомогою системи відведення повітря 10 (циклон-вентилятор) очищену пароповітряну суміш, яка надходить з вихідних патрубків повітря 11 і 12 завантажувального пристрою 4. Водяна пара по ходу охолоджує біовуглець і перегрівається, а в другій зоні відновлення реагує з біовуглецем, з отриманням додаткового водню. При цьому внутрішня поверхня біовуглецю розкривається більш повно, що підвищує його якість. Фактично використовується метод термохімічної регенерації – конверсія вихідного палива з продуктами згоряння за рахунок теплоти відпрацьованих газів. Якщо реакція іде до кінця, то калорійність палива (біовуглецю) підвищується на 10–15%. Але, якщо серед вихідних речовин є кисень, ступінь завершеності цих реакцій помітно падає за інших рівних умов. Ми вносимо, як окрему операцію, розділення пароповітряної суміші на виході з завантажувального пристрою на два потоки: один – в атмосферу з більшою кількістю кисня, окису NO і двоокису азота NO₂, другий – на здійснення термохімічної регенерації. Для цього використовується пристрій для очищення від кисню і оксидів азоту 13, заснований на методі магнітної конвекції. Гази, крім кисню, окису і двоокису азоту, є практично немагнітні, оскільки їх об'ємна магнітна сприйнятливість на два порядки нижче, ніж у кисня. Якщо в газовому середовищі є кисень, то під дією магнітного поля, що створюється постійними магнітами або

електромагнітним збудженням, кисень втягується в напрямку падіння напруженості магнітного поля, що викликає рух частини відпрацьованого повітря з максимальною часткою кисню до атмосфери.

Для підвищення ККД установки [28,29] збільшена ступень використання енергії біомаси шляхом подавання частки виробленого горючого газу до топки 1. Це виключає необхідність підведення природного газу, схема установки стає утилізаційною та більш мобільною і наближеною до сировинної бази. Для початкового запалювання використовується джерело допоміжного газу.

Задача зниження теплових втрат вирішується за рахунок рекуперації частки теплової енергії відпрацьованого теплоносія, а також дисипативної складової енергії електромеханічної частини установки та утилізації теплової енергії виробленого горючого газу у теплообміннику. Відпрацьований теплоносій через патрубок 16 надходить до зовнішньої кільцевої порожнини 17

завантажувального пристрою, де через стінку бункера здійснюється кондуктивний нагрів вихідної біомаси. В зовнішній кільцевій порожнині завантажувального пристрою 4 здійснюють конверсію частини фізичної теплоти відпрацьованого теплоносія способом прямого перетворення за допомогою термоелектричного генератора 18 теплової енергії в електричну,

яку далі використовують, наприклад, для живлення пристрою очищення відпрацьованого теплоносія від кисню і оксидів азоту. Від магнітної системи 19 повітря надходить усередину нерухомого порожнистого валу

поліфункціонального електромеханічного перетворювача 5, потрапляє у внутрішню порожнину масивного ротора, охолоджує активні частини індукторів 6 і виходить з другого кінця нерухомого порожнистого валу

Далі через теплообмінник 20 горючого газу другий потік відпрацьованого теплоносія надходить усередину завантажувального пристрою 4.

Розрахункова швидкість повітря повинна бути достатня для створення «киплячого» шару завантаженої біомаси. Теплова енергія двох відпрацьованих теплоносіїв використовується для попереднього проєшування і нагрівання біомаси у завантажувальному пристрої, що

забезпечує стабільний режим прогрівання біомаси по довжині піролізної камери з досягненням температур початку екзотермічних реакцій незалежно від її початкової вологості і не потребує додаткової теплоти від спалювання палива в топці.

У [30] викладені основні принципи інтеграції теплових потоків у ПЕМП, відповідно до яких слід попередньо розподілити теплові потужності (гарячі утиліти) між активними частинами, встановити орієнтацію градієнтів температур, виключити утворення «холодних зон», а також зробити розбивку потоків тепломасообміну на «гарячі» і «холодні» потоки.

Принцип координації термоградієнта. Формування термоградієнта – достатньо складне завдання. З одного боку, ПЕМП належить до системи з гранично високим ККД, оскільки робоче тіло (матеріал, що переробляється) одночасно є охолоджуючим середовищем і усі види дисипативної енергії (тертя в підшипниках, електричні втрати в обмотках, додаткові втрати) зрештою, передаються матеріалу, що переробляється.

Швидкість передачі тепла визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

де z – координата по ліній зв'язку активних частин ПЕМП і об'єму з матеріалом, що переробляється; α – коефіцієнт теплопровідності; T – температура.

З іншого боку, перевагою ПЕМП є формування випереджаючого теплового потоку, який починається від зовнішнього масивного ротора, в якому електромагнітне поле створює вихрові струми. Нестационарний процес зміни напруженості H цього поля визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\rho}{\mu_0 \mu} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

де ρ – питомий опір;
 μ_0, μ – магнітна постійна і відносна магнітна проникність відповідно.

Коефіцієнти α і $\rho/\mu_0 n$ в рівняннях (2.2), (2.3) характеризують швидкості розповсюдження T і H відповідно мають однакову розмірність, але відрізняються, наприклад, для металів в 100-1000 разів. Оскільки електромагнітна хвиля розповсюджується значно швидше, це забезпечує створення випереджаючого теплового потоку. Таким чином, ротор ПЕМП і є основним елементом системи, регулюючої спрямованість термоградієнта.

Пінь-принцип при побудові теплообмінної структури

Практично усі внутрішні вузли та деталі ПЕМП є джерелами гарячих утиліт, від яких виходять «гарячі» потоки. Технологічні потоки при нагріванні деревної маси увійдуть до потоків, які необхідно нагрівати, – «холодні потоки». Зміни тепловмісту вказаних потоків аналізують на температурно-ентальпійній площині (рис. 2.3). Зв'язок між зміною температури потоку і зменшенням (збільшенням) його тепловмісту – ентальпії в загальному випадку

буде виражатися нелінійною функцією:

$$dH_T = C_p M dT, \quad (2.4)$$

де C_p – питома теплоємність речовини в технологічному потоці при постійному тиску; M – масова витрата речовини потоку; T – температура; H_T – тепловміст потоку.

Загальні зміни тепловмісту технологічного потоку в межах зміни його температури

$$\Delta H_T = \int_{T_1}^{T_2} C_p M dT. \quad (2.5)$$

Добуток питомої теплоємності C_p і витрати M формує нове поняття потокової теплоємності $C_P(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta H_T}{\Delta T}$.

Рушійною силою в процесі теплопередачі є температурний натиск ΔT або різниця температур теплоносіїв, що беруть участь в теплообміні.

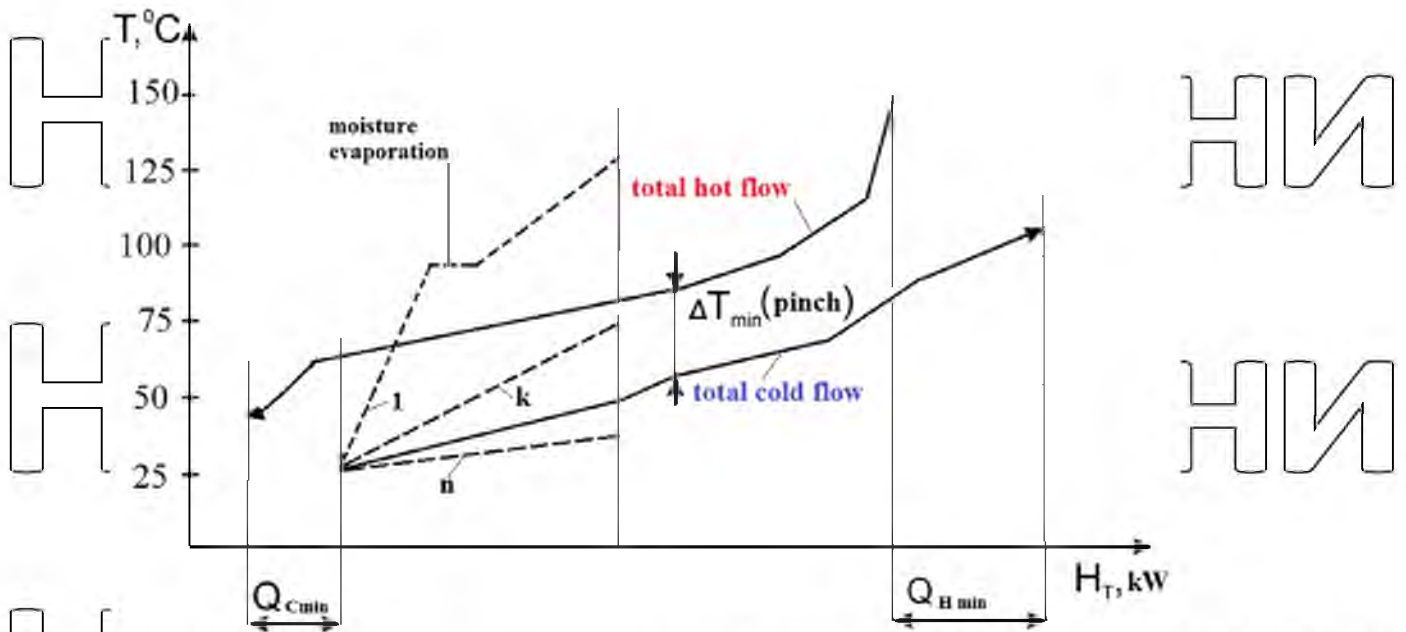


Рис. 2.3. Криві холодних і гарячих потоків в шнекового

Мінімальна відстань між складовими кривими уздовж температурної осі (pinch) визначає мінімальне температурне зближення потоків в теплообмінній мережі.

Оптимальність структури ПЕМШ як теплообмінної системи з внутрішніми джерелами теплової енергії при виконанні всіх призначень для перетворювача функцій досягається при максимально можливому перекритті на температурно-ентальпійній площині складових кривих холодних і гарячих потоків і їх економічно доцільному зближенні (пінчі).

Значні енергетичні втрати і проблеми екологічного характеру на промислових підприємствах існують через неповне використання теплоти в технологічних процесах, оскільки нагрітий відпрацьований газ викидається в атмосферу. У нагрівальних печах з димовими газами втрачається від 40% до 65% потенційної теплоти. Існують методи і засоби повернення частини теплоти димових газів шляхом попереднього підігріву матеріалу або технологічного повітря перед подачею їх в піч, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання теплоти пічного агрегату, знизити витрати палива і негативні екологічні впливи. В [31] здійснено порівняння двох варіантів використання тепла відпрацьованих газів: генерація електроенергії та

попередній нагрів вихідної сировини і повітря перед завантаженням у піч.

Виходячи з терміну окупності, попередній нагрів вихідної сировини і повітря є більш вигідним варіантом. В [32] розроблені три термодинамічні моделі

рекуперації тепла та генерації електроенергії з промислових газів. Показано,

що ієрархічна стратегія енергетичної інтеграції подвоює ефект від вироблення

електроенергії з економією палива. Для палива більш низької якості

рекуперація тепла з донної золи більш важливіша в системах спалювання

побутових відходів [33]. У цьому дослідженні проведено аналіз

продуктивності системи попереднього нагріву повітря (зольного

охладження), яке далі змішується з основним повітрям для горіння і

використовується в котлі при спалюванні комунальних відходів. Процес

згоряння моделюється припускаючи однорідність змішування холодного

повітря для горіння і продуктів згоряння, а сама модель побудована з

використанням програмного забезпечення GAMBIT, яке має недолік в

точності результатів при побудові сіток з кількістю точок більше 500. Система

підігрівання бункерів з видаленою золою в електрофільтрах за рахунок

теплоти відпрацьованих газів запропонована в [34]. Відомі методи непрямої

передачі тепла в теплообмінниках, що утворені модулями з порожнистими

сталевими пластинами з теплопровідністю більше $1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. Протитечія

відпрацьованого теплоагента в цих модулях забезпечує теплопередачу до

сировини, яка повільно переміщується 5-10 хвилин під дією сили тяжіння

повздож поверні порожнистих пластин [35]. Але на сьогодні відсутні роботи,

що містять результати моделювання рекуперації тепла в установках для

деструктивної енергетехнологічної переробки рослинної біомаси, особливо

при наявності двох окремих потоків відпрацьованого теплоносія. Важливим

аспектом рекупераційних процесів слід вважати супутнє насичення

відпрацьованого теплоносія у завантажувальному бункері парою з вологої

біомаси, що попередньо підігривається і підсушується, з метою використання

частини відпрацьованого теплоносія і вологи у термохімічній конверсії.

Моделювання процесів рекуперації тепла у завантажувальному пристрої комплексу для деструктивної енерготехнологічної переробки рослинної біомаси проведено при наявності двох окремих потоків відпрацьованного теплоносія. Враховуючи великі розміри завантажувального пристрою і його осьову симетрію прийнято рішення використовувати розрахункову схему лише однієї симетричної половини пристрою. Завантажувальний пристрій виконано в SOLID WORKS, після чого він був завантажений в ANSYS Design Modeler. Для моделювання газів вибрано компонент заливка (Fill) та зроблено симетрію. Виставлено граничні умови та передано проект в ANSYS Meshing.

На рис.2.4 показано граничні умови завантажувача. На вхідній границі (mass-flow inlet, рис.2.4, а) завантажується біомаса з продуктивністю 300 кг/год і масовою часткою повітря 180 кг/год, температура яких відповідно становить +20 °С. На рис.2.4.а також показано граничні умови (velocity inlet): відпрацьований теплоносій (потік С) має швидкість 6 м/с з температурою +400 °С а повітря, що містить дисипативну складову енергії електромеханічної частини комплексу (потік В) має швидкість 5 м/с і температуру +100 °С. Всі вихідні границі (рис.2.4,б) виставлені по тиску (pressure outlet). Корпус завантажувального пристрою виконаний із конструкційної низьковуглецевої сталі.

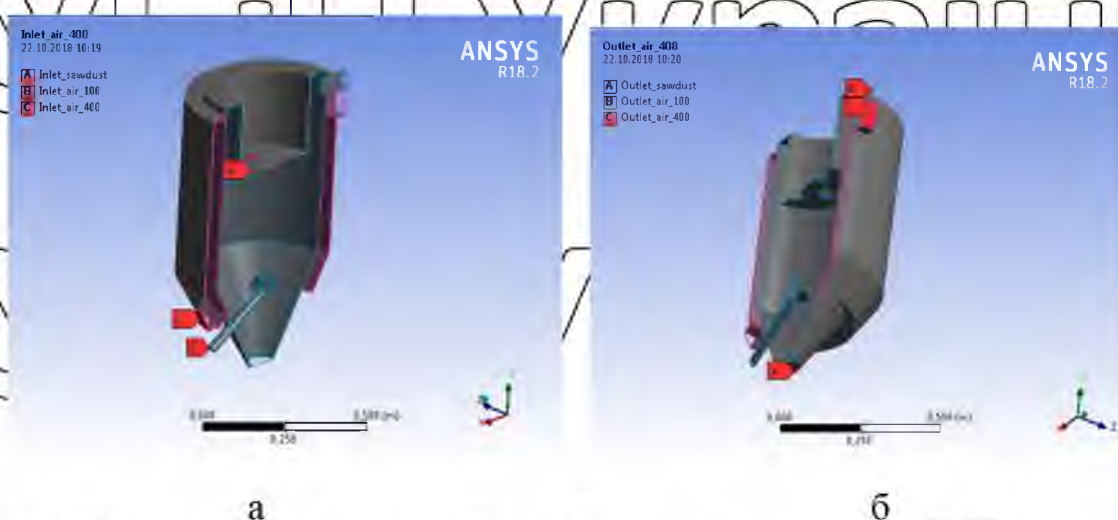


Рис.2.4. Граничні умови

Проведено чисельне моделювання гідродинамічних процесів і процесів перенесення теплоти у завантажувальному бункері. Для цього використано метод комп'ютерного (CFD) моделювання на базі програмного комплексу ANSYS Fluent. В основі математичної моделі лежать рівняння Нав'є-Стокса і рівняння переносу енергії для конвективних течій. У розрахунках застосована стандартна модель турбулентності k-ε.

Рівняння Нав'є-Стокса мають вигляд:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \quad (2.6)$$

де, ρ - щільність середовища, кг/м^3 ; μ - динамічна в'язкість середовища,

$\text{Па}\cdot\text{с}$; p - тиск, Па ; u, v, w , - векторне поле швидкостей, м/с ; t - час, с .

Рівняння нерозривності має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2.7)$$

Рівняння збереження енергії записується у вигляді:

$$\rho C_p \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

де, T - температура в деякій точці, $^{\circ}\text{C}$; λ - коефіцієнт теплопровідності

середовища, $\text{Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$; C_p - питома теплоємність середовища, $\text{Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$.

Кінетична енергія турбулентності k і її швидкість дисипації ε знаходиться із розв'язку наступних транспортних рівнянь.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.9)$$

i

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b + G_p) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.10)$$

Для завантаження біомаси використано DDPM Ейлера з постійним діаметром частинки, яка становить 8 мм:

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_p \rho_p) + \nabla \cdot (a_p \rho_p \vec{v}_p) = \sum_{q=1}^{nphases} (m_{qp} - m_{pq}) \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(a_p \rho_p \vec{v}_p) + \nabla \cdot (a_p \rho_p \vec{v}_p \vec{v}_p) = & -a_p \nabla p + \nabla \cdot [a_p \mu_p (\nabla \vec{v}_p + \nabla \vec{v}_p^T)] + \\ & + a_p \rho_p \vec{g} + F_{inj,lf,user} + \sum_{q=1}^{nphases} [K_{qp} (\vec{f}_q - \vec{v}_p) + m_{qp} \vec{v}_{qp} - m_{pq} \vec{v}_{pq}] + \\ & + K_{DPM} (\vec{v}_{DPM} - \vec{v}_p) + S_{DPM,explicit} \end{aligned} \quad (2.12)$$

На рис. 2.5-2.7 представлені основні результати моделювання. Контурне поле температур по біомасі та повітря зображено на рис. 2.5. Повітря, що містить дисипативну складову енергії електромеханічної частини комплексу (рис. 2.5, а) і має на вході температуру +100 °С, за рахунок повітряного прошарку у верхній зоні досягає температури +120 °С. Відпрацьований теплоносій (рис. 2.5, б) входячи до зовнішньої кільцевої порожнини завантажувального пристрою, має швидкість 6 м/с і температуру +400 °С та при обтіканні розподіляється по об'єму з середньою температурою в межах від +290 до +310 °С. Температура основного об'єму біомаси на днищі бункера завантажувального пристрою знаходиться у межах від +40 до +50 °С.

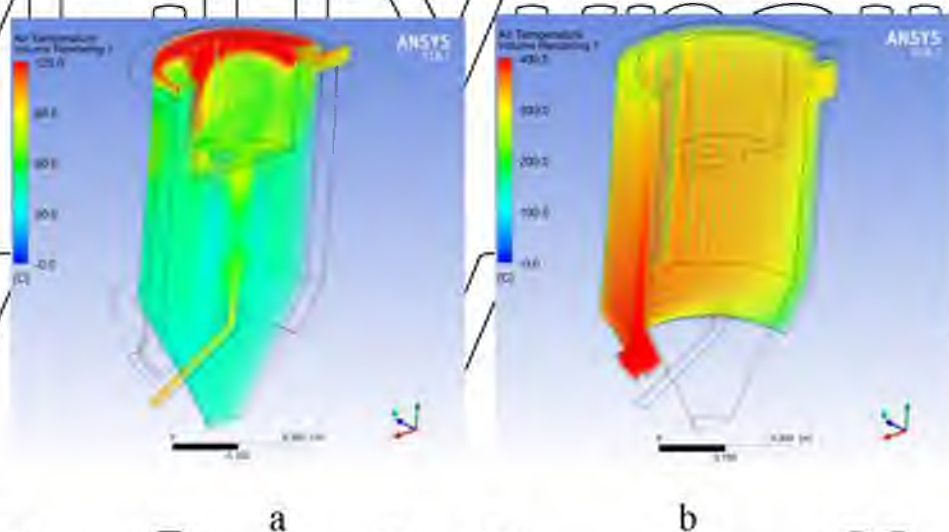


Рис. 2.5 Температурне поле у 3D, °С: а – в області завантаження сировини, б – в області проходження відпрацьованого теплового агента

З рис.2.6 можемо спостерігати швидкість повітря по двом потокам відпрацьованого теплоносія. Максимальна швидкість складає 10,2 м/с на виході по біомасі. Біомаса з повітрям входить у завантажувач з швидкістю в межах від 6 до 8 м/с. Середня швидкість біомаси становить 3,7 м/с, а відпрацьованого теплоносія – 2,4 м/с.

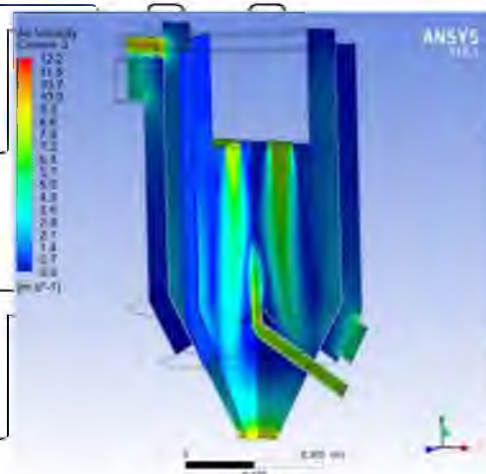


Рис.2.6. Поле швидкостей (а) по двом теплоносіям, м/с

На рис.2.7 показано об'ємну долю біомаси в завантажувальному пристрої. На вході завантажувача спостерігається згущення біомаси. Для зменшення застійної зони рекомендується збільшити отвір виходу біомаси, за рахунок чого зменшиться і швидкість виходу біомаси з часткою долі повітря.

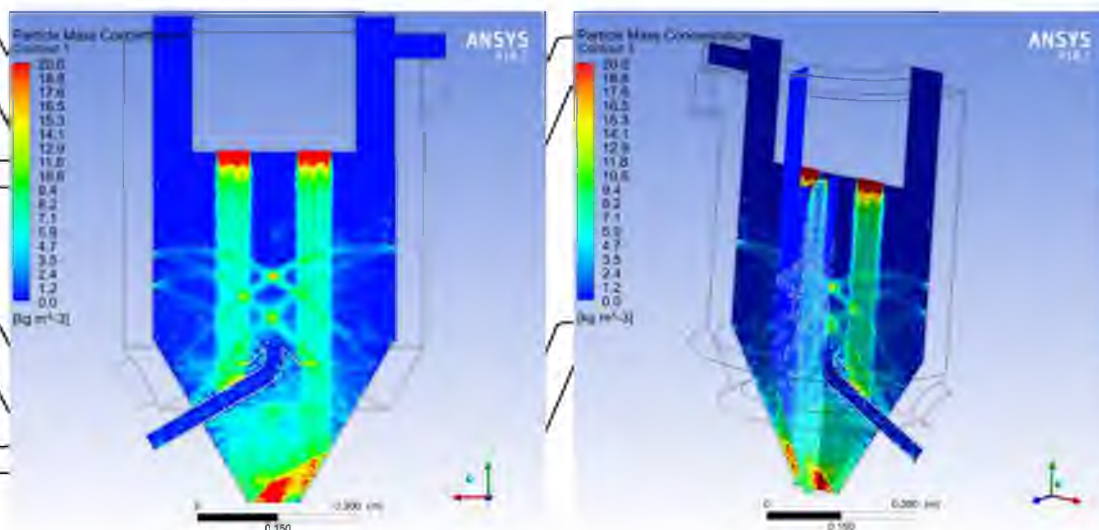


Рис.2.7. Масова концентрація у завантажувачі біомаси, кг/м³

Попередні випробування експериментального зразка установки (рис.2.8) для термохімічної конверсії рослинної біомаси підтвердили основні

електромагнітні та термодинамічні характеристики процесів, що відбуваються в камерах сухої перегонки, камері прокаливання і завантажувальному пристрої.



Рис.2.8. Експериментальний зразок установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси

Біомаса при переміщенні у завантажувальному пристрої у пристінних зонах нагрівається до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ та, перебуваючи в ньому до 70 с, втрачає відносну вологість з 60% до 50-52%. Для зменшення тепловтрат рекомендується встановити утеплення зовнішньої камери. Основна абсолютна похибка вимірювань швидкості руху повітря (V), $\pm (0,1 + 0,05 \cdot V)$ м/с. Вимірювання температури проводилося попередньо градуйованими термометрами. Допустима похибка градуювання $\Delta t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тиск вимірювався ψ -подібним

рідинним манометром, гранична похибка вимірювального комплексу при вимірюванні повітря склала 8,8%. Відхилення основних результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень не перевищує 12%. Надалі передбачено відпрацювання режимів та удосконалення процесів переробки бімаси.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 3 ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ У СКЛАДІ БІОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ

Пропонується концептуальний проект суміщеного процесу виробництва біогазу, гідротермальної карбонізації дигестату і використання гідровугілля для покращення анаеробного перетравлення. В основу покладено ідею використання заглибних і шнекових поліфункціональних електромеханічних перетворювачів в операціях переробки біомаси [25, 36, 37].

Лінія двостадійної анаеробної переробки посліду містить наступне обладнання: прийомний бункер (1) з камерою гомонізації; насосну станцію (2); реактор гідролізу (3); реактор метаногенеза (4), в якому розміщені заглибні поліфункціональні електромеханічні перетворювачі (5); газольдер і система очищення газу (6); блокова когенераційна установка (7) для енергозабезпечення всієї системи переробки; сепаратор (8); ємності збору рідкої (9) і твердої (10) фракцій дигестата; блок керування (11). У метантенк завантажується курячий послід, з розрахунку, що на 1 кг посліду доводиться 2,175 кг води. Частина діоксиду вуглецю, отриманого в реакторі гідролізу (3), може використовуватися в тепличному господарстві птахофабрики або піддаватися подальшій переробці в продукти хімії і синтетичне паливо. Перероблений субстрат після біогазової установки подається на сепаратор, де розділяється на тверді і рідкі фракції. Тверді фракції становлять 3-5% субстрату і являють собою біогумус, що містить сирий протеїн (до 20%) і велику кількість органічних речовин (до 80%), в тому числі і складові клітковини, що важко розкладаються. На рис.3.1показано конструктивно-технологічну схему суміщеного процесу виробництва біогазу, гідротермальної карбонізації дигестату і використання гідровугілля для покращення анаеробного перетравлення, яка пропонується для промислового варіанта.

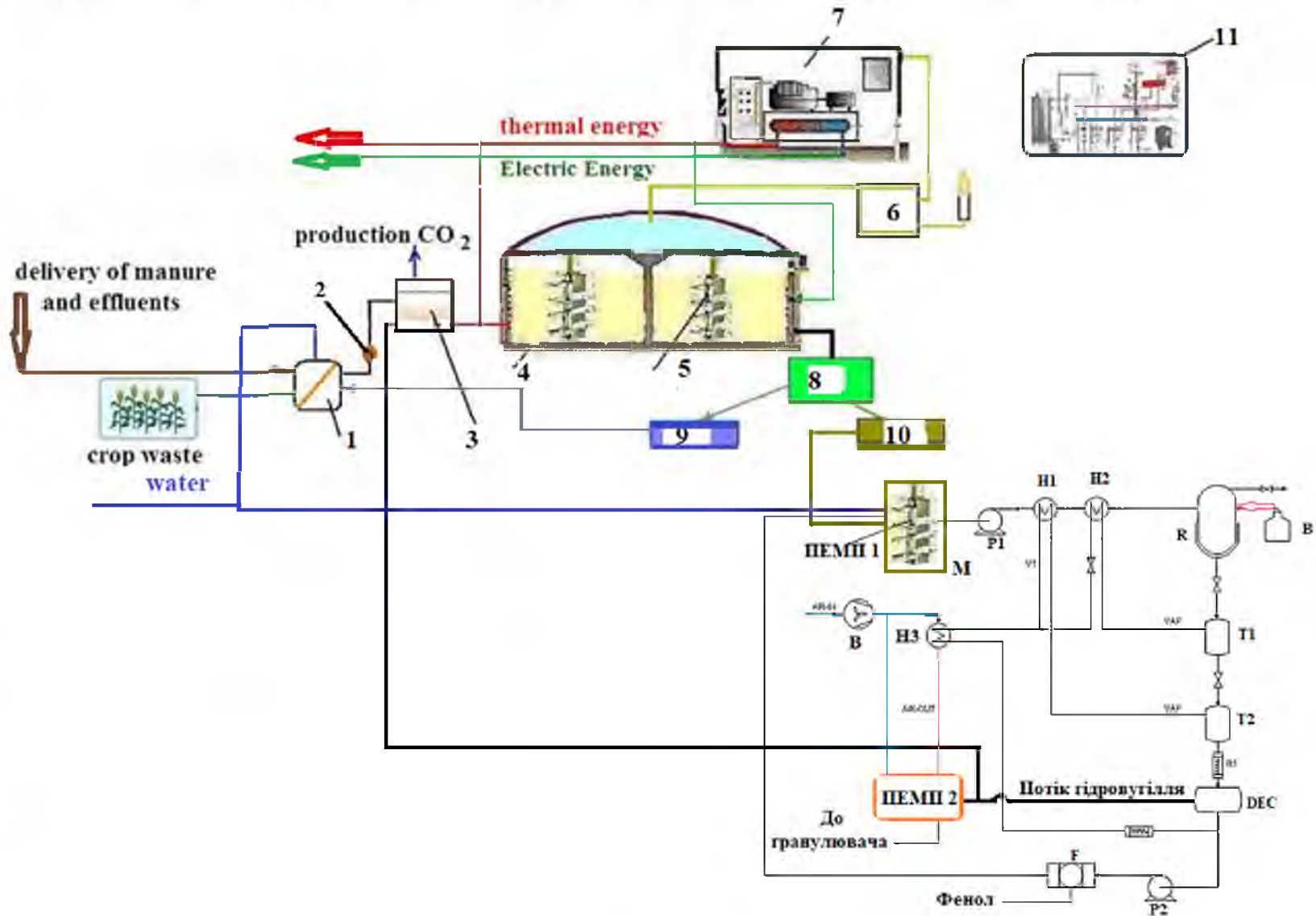


Рис.3.1. Конструктивно-технологічна схема сумішеного процесу виробництва біогазу, гідротермальної карбонізації дигестату

Тверда фаза дигестату, яка поступає з ємності (10) збору твердої фракції біогазової установки змішується з водою для досягнення очікуваного співвідношення органічної речовини і води. Процес змішування відбувається у змішувачі (M), у якому за рахунок заглибного ПЕМП 1 здійснюється попередній нагрів суміші дигестату. Далі суміш перекачується насосом (P1) через два теплообмінники (H1 і H2). Насос підвищує тиск для подачі суспензії в реактор безперервної дії НТС. Теплообмінники попередньо нагрівають суспензію біомаси. Далі суміш надходить у верхню частину реактора (R), тоді як суспензія НТС, що містить вуглеводні та водні продукти, видаляється знизу.

Гази, що утворюються під час реакцій, виходять із верхньої частини реактора, проходячи через клапан, який регулює тиск усередині реактора. Метановий пальник (B) підвищує температуру попередньо нагрітої суспензії біомаси до температури НТС (180–250 °С). Потім суспензію НТС скидають у два етапи у спалахувальних резервуарах T1 і T2. Суспензія, що виходить з T2, транспортується в декантатор (DEC), де виконується розділення рідини та твердої речовини. Тверда речовина, тобто гідровугіль, потім передається частково до реактору гідролізу (3) біогазової установки, а основна решта – до шнекового ПЕМП 2. Вентилятором (B) до шнекового ПЕМП 2 подається два повітряні потоки: перший потік холодний; другий потік підігрітий після проходження теплообмінника H3. Після сушіння утворений вуглець переміщують у гранулювач. Парі, що утворюються при розширенні рідкого шламу (потоки VAP1 і VAP2), використовуються для попереднього нагрівання шламу біомаси в H1 і H2 і повітря (потік AIR-IN) до осушувача в теплообміннику H3. Конденсована пара (потік V3) разом із рідиною, що виходить із декантера, перекачується (P2) для повторного використання в процесі. Фільтр F відокремлює органічні рідини (фенол у поточному спрощенні) від технологічної води, яка рециркулює в змішувач M. Наявність фільтра F не є обов'язковою: рідина з декантера (DEC) може бути повторно використана в процесі – повністю або частково – що може бути корисним з точки зору збільшення виходу вуглецю. І навпаки, якщо водна фаза процесу

НТС відновлюється для інших застосувань, наприклад, як рідке добриво, використання фільтра стає очевидним вибором. У цьому випадку необхідне відділення фенолоподібних сполук від рідини, оскільки феноли є токсичними для рослин.

Використання гідровугілля, отриманого з дигестату для покращення анаеробного перетравлення і збільшення виходу CH_4 – нова парадигма для контролю відходів.

Вплив піролізної рідини дигестату на термофільне анаеробне зброджування осаду стічних вод досліджувався в роботі [38]. Гідротермальна карбонізація (НТС) була оцінена як багатообіцяюча процедура для підвищення потенціалу біометану під час анаеробного зброджування (AD) органічної фракції твердих міських відходів (OFMSW). OFMSW карбонізували за різних умов, а продукти НТС перевіряли на потенціал біометану в AD. Результати показали, що використання рідини та суспензії НТС у AD призвело до збільшення виробництва біометану до 37%. Енергетична оцінка показала, що спалювання біогазу, виробленого AD рідини та суспензії НТС, покриває до 30% і 104% теплової потреби НТС відповідно.

Коли енергія від спалювання вуглецю та біогазу була рекуперована, ефективність процесу досягла 60%. Таким чином, НТС у поєднанні з AD демонструє ефективний спосіб валоризації OFMSW.

Конструктивно – технологічна схема заглибного ПЕМП 1 представлена на рис.3.2. Заглибний електротепломеханічний перетворювач складається з нагрівального пристрою 1 у вигляді порожнистого циліндричного магнітопроводу 2, який має пази 3 на внутрішній і пази 4 на зовнішній поверхнях, двох торцевих магнітопроводів 5, 6 з пазами 7, кільцевою обмоткою 8, лопатевого перемішувального вузла 9 у вигляді масивного порожнистого циліндра 10 з лопатями 11, додаткового порожнистого циліндра 12, верхнього додаткового масивного кільця 13 з лопатями 14, нижнього масивного кільця 15 з лопатями 16, магочини 17 з кризними отворами 18,

порожнистої вісі 19 з допаями 20 і відцентровим колесом 21, напорної камери 22 з напірним патрубком 23 і вагонесучик стрижнів 24.

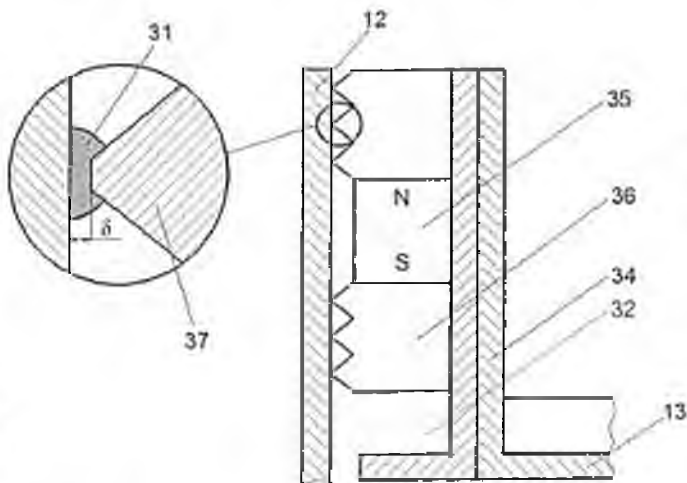
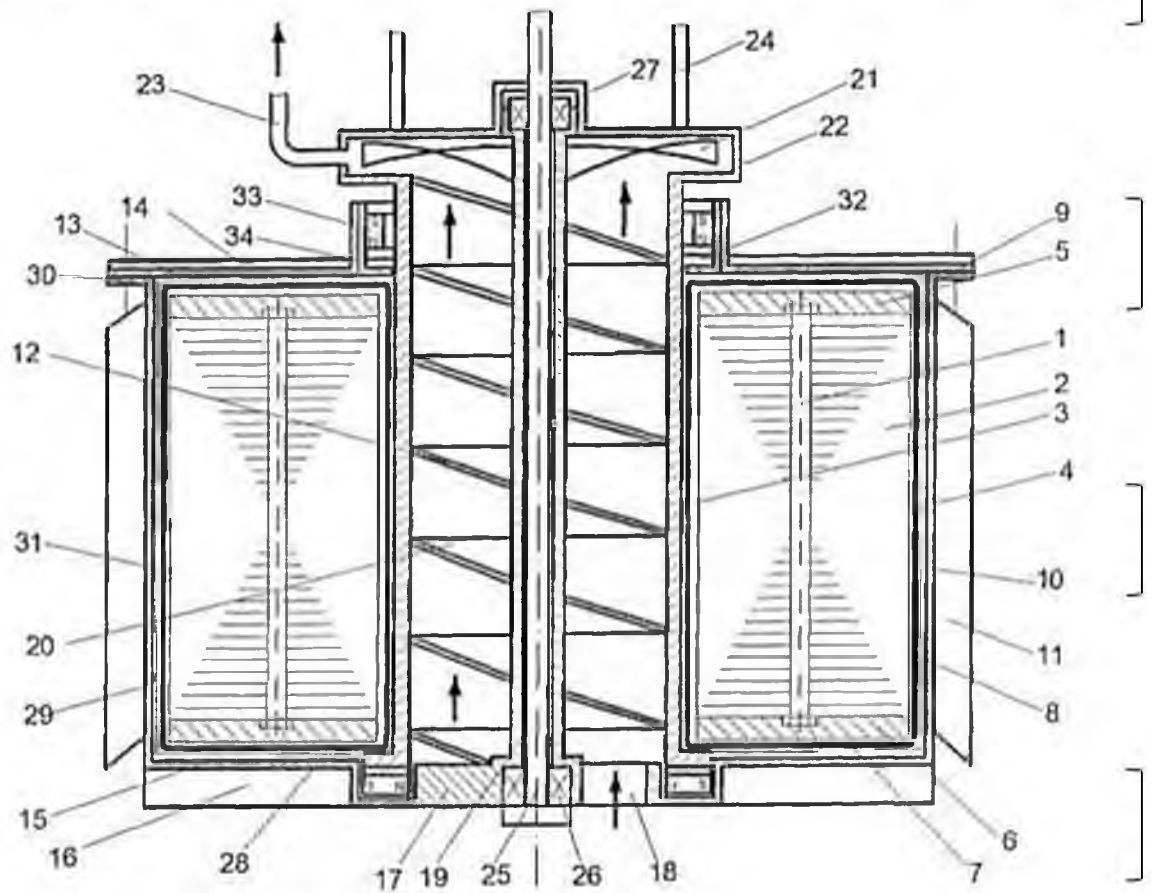


Рис.3.2. Конструктивно – технологічна схема заглибного ПЕМП 1

Перемішувальний вузол 9 встановлений на вагонесучій осі 25 у підшипниках 26, 27. Робочі проміжки 28, 29, 30 перетворені та заповнені магнітною рідиною 31 і сполучаються з резервуаром 32 магнітної рідини.

Всередині рухомих з'єднань додаткового порожнистого циліндра з додатковим масивним кільцем і маточиною встановлені магніторідинні герметизатори 33 у вигляді немагнітної втулки 34, постійних магнітів 35, полюсних приставок 36 з концентраторами 37.

Заглибний електротепломеханічний перетворювач працює таким чином.

Перетворювач, який закріплено на завантажувальному пристрої (не показаний) за допомогою вагонесуних стрижків 24, знаходиться у резервуарі змішувача М (рис.3.1), куди поступає суміш дигестата. При підключенні до джерела змінного струму кільцева обмотка 8 створює обертові магнітні поля у трьох робочих проміжках 28, 29, 30, а також в масиві додаткового порожнистого циліндра 12, що скріплений з порожнистим циліндричним магнітопроводом 2. Обертові магнітні поля збуджують в масивах порожнистого циліндра 10, додаткового порожнистого циліндра 12, верхнього і нижнього масивних кілець 13, 15 вихрові струми.

Лопатевий перемішувальний вузол 9 під дією електромагнітного моменту, створеного взаємодією вихрових струмів і обертових магнітних полів, починає обертатись з поступовим збільшенням частоти обертання, перемішуючи матеріал лопатями, і створює умови інтенсивного теплообміну між перемішувальним вузлом і різними шарами матеріалу. Лопаті 11, 14, 16, 20 створюють нагнітальний ефект і подають рідкий матеріал уздовж центральної порожнини додаткового порожнистого циліндра 12 у напірну камеру 22, де за рахунок обертання відцентрового колеса 21 створюється необхідний гідравлічний напір рідкого матеріалу і він через напірний патрубок 23 подається далі за допомогою насоса Р1 по трубопроводу до реактора R. При цьому температура і, відповідно, реологічні властивості матеріалу, який перемішується, не знижуються завдяки постійному тепловому потоку зі стінок циліндра 12, інтенсивність якого забезпечена тим, що вихрові струми в нерухомому циліндрі 12 мають промислову частоту ($f=50\text{ Гц}$). Наявність магнітної рідини з магнітною проникністю, що перевищує на порядок магнітну проникність повітря, зменшує магнітний опір для магнітного

обертового потоку і сприяє зменшенню струму намагнічування і реактивної потужності, що споживається з електричної мережі, тобто збільшенню коефіцієнта потужності загального електротепломеханічного перетворювача.

Одночасно магнітна рідина під дією обертового магнітного поля створює в проміжках 28, 29, 30 ущільнені шари, які перешкоджають проникненню рідинного матеріалу, що переробляється. Крім того, за рахунок демпферного ефекту магнітної рідини, знижуються радіальні навантаження на підшипники 26, 27, а також зменшуються коливання рухомих частин, які спричинені ексцентриситетом між магнітопроводом 2 та порожнистим циліндром 10, при цьому кількість підшипникових вузлів у порівнянні з аналогом зменшується.

Після відключення електротепломеханічного перетворювача від мережі функція герметичного ущільнення виконується магніторідинними герметизаторами 33.

Кільцевий постійний магніт 35 має аксіальну намагніченість. До полюсів магніту дотичні полюсні приставки 36, які виконані з магнітного матеріалу і утворюють з ділянкою додаткового порожнистого циліндра 12 робочий проміжок 8. На поверхнях полюсних приставок 36, що повернуті до циліндра 12, виконані зубці - концентратори 37 магнітного поля, які перетворюють магнітне поле робочого проміжку 5 у різко

неоднорідне. Магніторідинний герметизатор закріплено на немагнітну втулку 34. Магнітна рідина, яка розміщена у робочому проміжку, втягується в області з максимальною напруженістю поля, утворюючи між зубцями з

концентраторами 37 і поверхнею циліндра 12 герметичні магніторідинні кільця - затвори. Величина робочого проміжку магніторідинного герметизатора складає 0,05-0,15 мм. Періодично при зменшенні об'єму магнітної рідини внаслідок випарювання здійснюється її поповнення в резервуар 32.

Наявність магнітної рідини, яка має коефіцієнти теплопровідності 0,21 Вт/(м·к), що перевищує теплопровідність повітря в 7 разів, забезпечує більш інтенсивний теплообмін нагрівального пристрою і лопатевого

перемішувального вузла через проміжки 28, 29, 30 і, відповідно, теплообмін з матеріалом, що переробляється.

Конструктивно-технологічна схема шнекового ПЕМП 2 представлена на рис. 3.3. З погляду структурного аналізу, даний об'єкт відноситься до класу сумішених технічних систем, об'єднуючих електромеханічну (багатостаторний приводний двигун із спільним зовнішнім феромагнітним ротором), механічну (шнековий рушій) і теплову (статори, ротор) підсистеми. Вказану сукупність функціональних ознак ПЕМП представимо у вигляді її інтегральної цільової функції $F_{Ц}$.

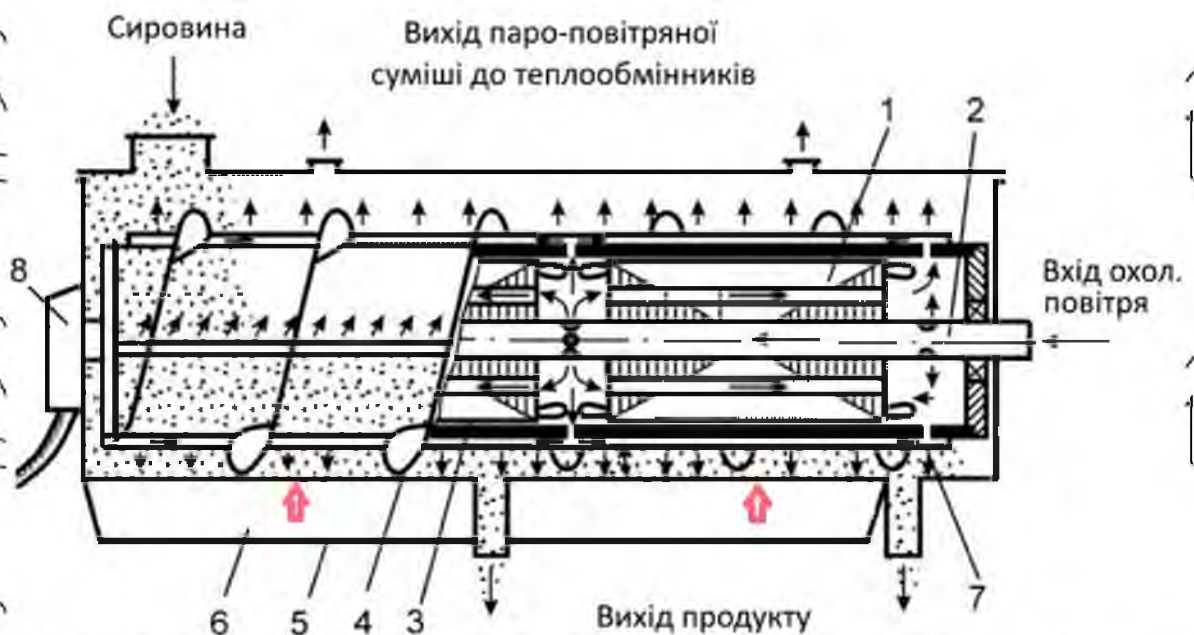


Рис. 3.3. Конструктивно-технологічна схема шнекового ПЕМП 2: 1 – статор двигунового (гальмівного) модуля; 2 – порожнистий нерухомий вал;

3 – зовнішній ротор-шнек; 4 – днище шнека; 5 – корпус; 6 – порожнина проходження повітряного потоку для підігріву днища; 7 – аксіальні канали ротора-шнека; 8 – введення напруги живлення

Структурна декомпозиція і аналіз структури ПЕМП дозволяє встановити наступну кореляцію структурних ознак системи з генетичними операторами синтезу:

- поєднання двох або більш початкових ЕМ-структур, що розрізняються своєю генетичною інформацією, моделюється оператором схрещування f_c ;

- наявність декількох елементарних модулів статорів і спільного ротора приводного двигуна ставить у відповідність операторів реплікації f_R (з коефіцієнтом реплікації $K_R = 2, 3 \dots n$) і внутрішньовидової мутації f_M ;

- компоновальна схема двигуна із зовнішнім ротором вказує на обернений варіант компоновки ЕМ-структури, якій ставиться у відповідність оператор просторової інверсії f_i ;

- конструктивне поєднання масивного ротора з шнековим рушєм і наявність в системі додаткових індукторів для нагріву середовища моделюється відповідними композиціями структурно-функціонального поєднання підсистем, що характеризуються різними цільовими функціями;

- наявність в структурі системи деякої кількості ($N \geq 2$) елементарних приводних електричних машин відкриває можливість використання електромагнітної інверсії, що моделюється відповідним оператором f_E .

Таким чином, *принципи структурної і функціональної інтеграції ПЕМП можна сформулювати так: суміщена технічна система, об'єднуюча електромеханічну, механічну і теплову підсистеми для реалізації інтегральної цільової функції по сукупності функціональних ознак приводного двигуна, виконавчого механізму і нагрівача створюється на основі збереження складової інформації первинного джерела електромагнітного поля, кореляції структурних ознак з генетичними операторами синтезу: схрещування, реплікації, внутрішньовидової мутації, просторової і електромагнітної інверсії.*

Процес видоутворення ПЕМП із заданою $F_{Ц}$ можна описати узагальненою композицією ΣK_f операторів синтезу [39]:

$$\Sigma K_f \in (f_e, f_i, f_M, f_R, f_E). \quad (3.1)$$

Даний склад операторів синтезу є достатнім для генетичного опису не лише даного конструктивного варіанту системи, але і інших генетично споріднених варіантів суміщених ЕМС.

На рис.3.4 показана комплектація шнекового ПЕМП.

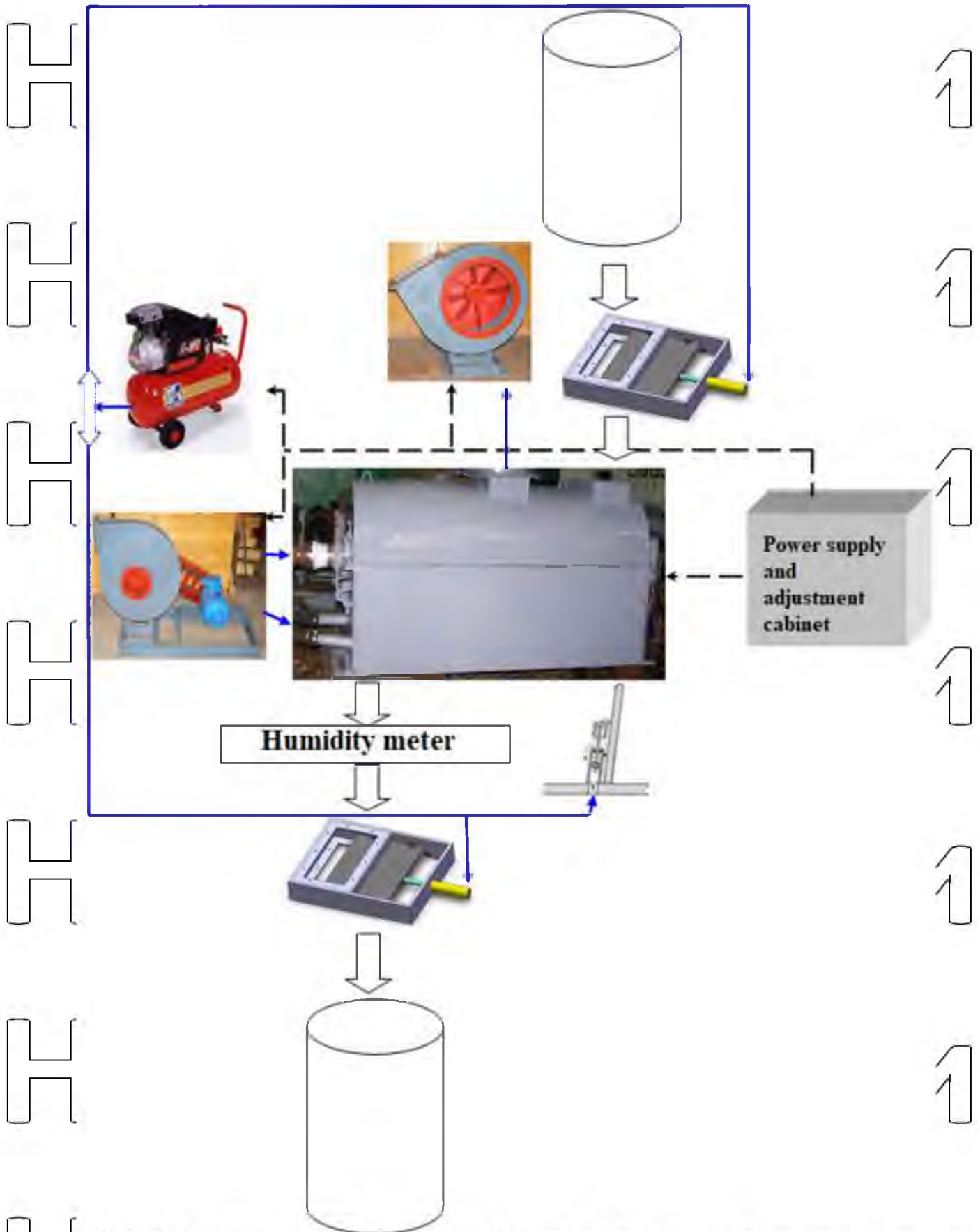


Рис.3.4. Комплектація пшечового ПЕМП

Шнековий ПЕМП додатково оснащений шиберами завантаження і розвантаження біомаси, робота яких забезпечується компресором з блоком керування. Подавання повітря для охолодження електромагнітної системи ПЕМП, а також аеродинамічне вивантаження висушеного продукту здійснюється за допомогою відповідних вентиляторів.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 4 ПРОЄКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

4.1 Особливості проєктування поліфункціональних електромеханічних перетворювачів для режимів високотемпературного навантаження

В опублікованій літературі обмежена кількість даних про вплив температури та тиску на магнітні властивості сталі, наприклад, у випадку занурювальних двигунів, що використовуються в нафтових свердловинах, або глибоководних маслонаповнених двигунів [40, 41]. Важко визначити магнітні властивості листів електротехнічної сталі в середовищі, де є зв'язок температури та тиску, використовуючи відомі дані та моделі гістерезису.

Тому, щоб підвищити точність проєктних розрахунків ЕМ, необхідно знати магнітні властивості сталі за тих же умов. Такий аналіз здійснено в [42] і встановлено, що відносна проникність при низькій щільності потоку збільшується з підвищенням температури, а при вищій щільності потоку зменшується. В той же час коли напруга стиску перевищує 50 МПа, вплив напруги стиску на відносну проникність і втрати заліза зменшується.

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

Окремі дослідження стосуються вимірювання магнітних властивостей сталі та інших м'яких магнітних, електропровідних матеріалів при високих температурах до температури Кюрі і трохи вище. Вимірювання показують, що поляризація насичення незначно зменшується до 500 °С, а потім падає до нуля при температурі вище 700 °С. В роботах [43, 44] експериментально та чисельно досліджені магнітні властивості магнітних матеріалів, збуджуваних синусоїдальною та широтно-імпульсною модуляцією на вході інвертора за високих температур навколишнього середовища використовуючи модель відтворення зі схемою Кауера.

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

Автоматизоване проектування в Maxwell RМхрт

Додаток для автоматизованого проектування електричних машин RМхрт, що входить до дистрибутиву ANSOFT Maxwell, прискорює процес проектування та оптимізації електричних машин, що обертаються [45].

Результати ООП оптимізованого ЕМПЕ, збережені у вигляді таблиць параметрів у текстових файлах, можуть увійти в параметричну модель пакету RМхрт. У такій моделі всі геометричні розміри та параметри ЕМПЕ задаються як змінних, які, своєю чергою, ініціалізуються з файлів даних.

RМхрт використовує класичну аналітичну теорію електричних машин і метод еквівалентного магнітного ланцюга для обчислення робочих характеристик машини. Дане програмне забезпечення дуже зручно застосовувати у випадку, коли потрібно змодельовати якусь із 13 запропонованих електричних машин стандартного типу, методики розрахунку яких відомі і закладені в програму (рис. 4.1).

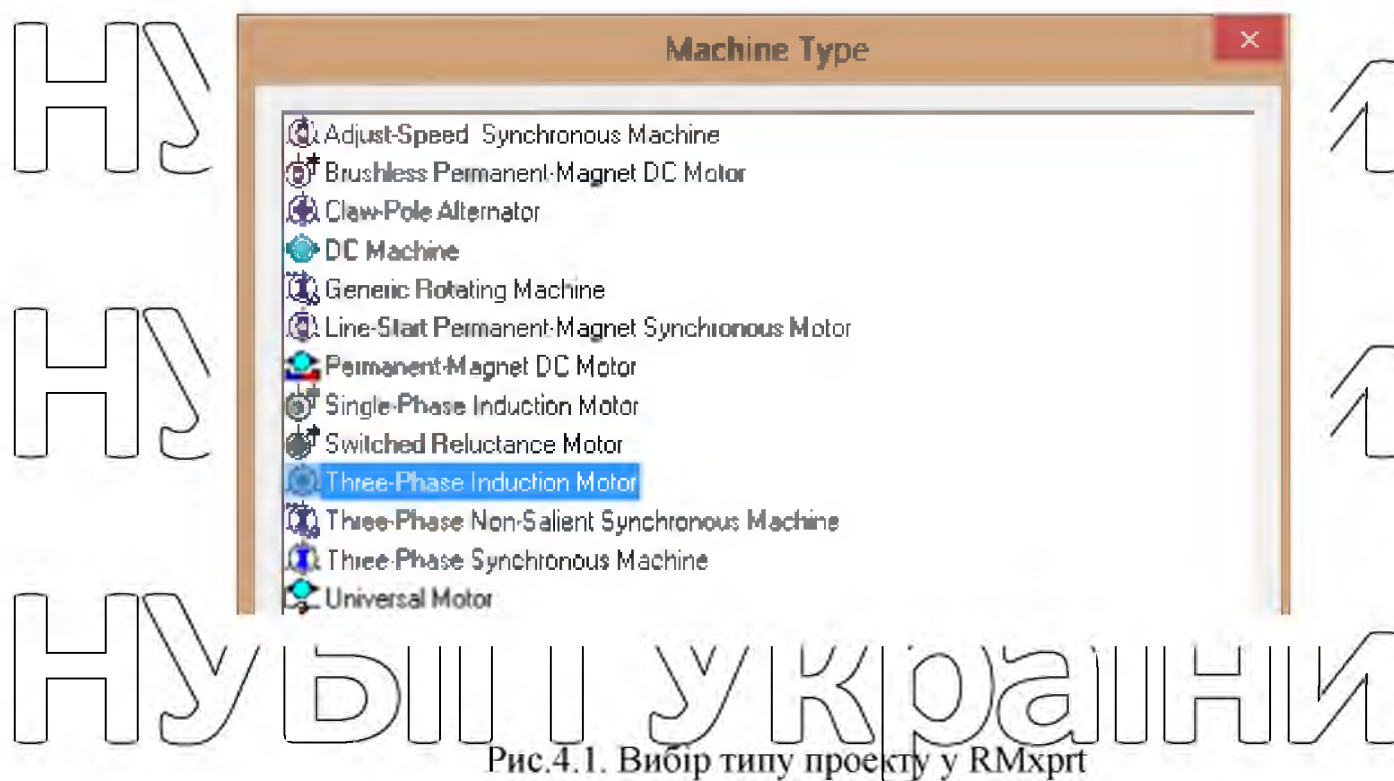


Рис.4.1. Вибір типу проекту у RMxprt

Користувачеві потрібно лише ввести вихідні дані: геометричні розміри, властивості матеріалів статора та ротора, тип обмоток, схему підключення, дані щодо живлення, навантаження, вентилятора тощо. Інтерфейс програми, представлений на рис. 4.2. Якщо необхідна конфігурація відрізняється від стандартної, розробнику корисно порівняти, які характеристики може дати за його вихідних даних класична конфігурація електричної машини.

У RMxprt можна створити конфігурацію машини, найбільш близьку до потреби; конвертувати модель в завдання Maxwell, де вже вносити всі необхідні зміни в конструкцію. Це буде набагато швидше ніж проектувати модель з нуля.

Результати розрахунку асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [46] у RMxprt наведено на рис. 4.3, приклад однієї з багатьох доступних для побудови показників – на рис.4.4.

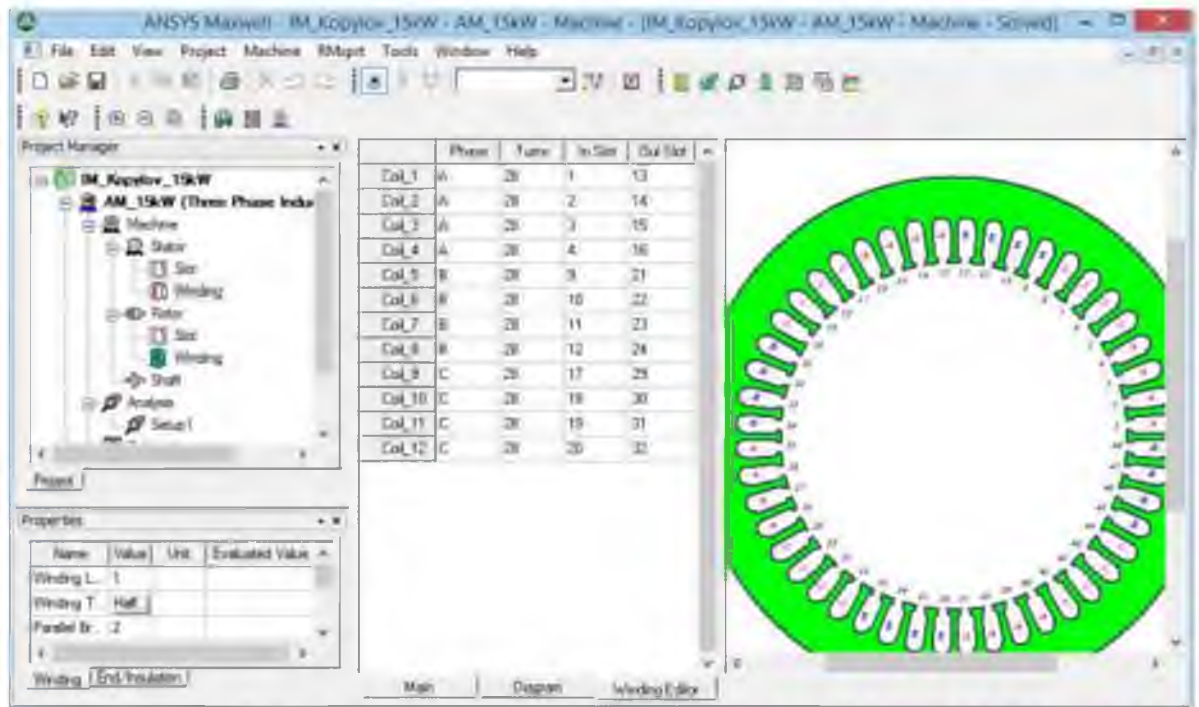


Рис.4.2. Робоча сфера програми RMxprt при проектуванні АД з КЗР

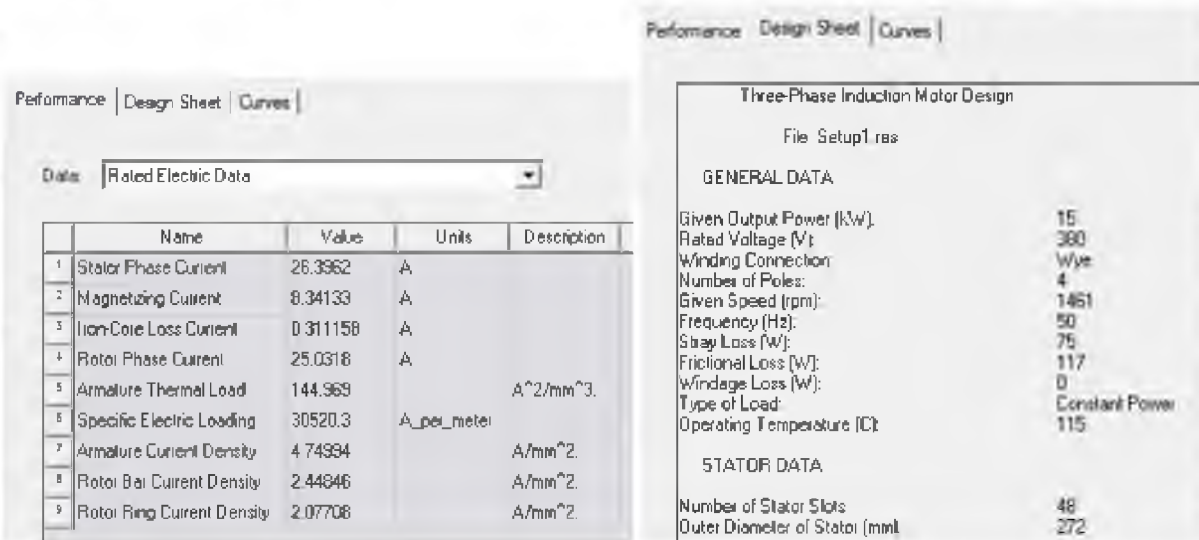


Рис. 4.3. Вікна результатів розрахунку АД з КЗР у RMxprt

НУБІП України

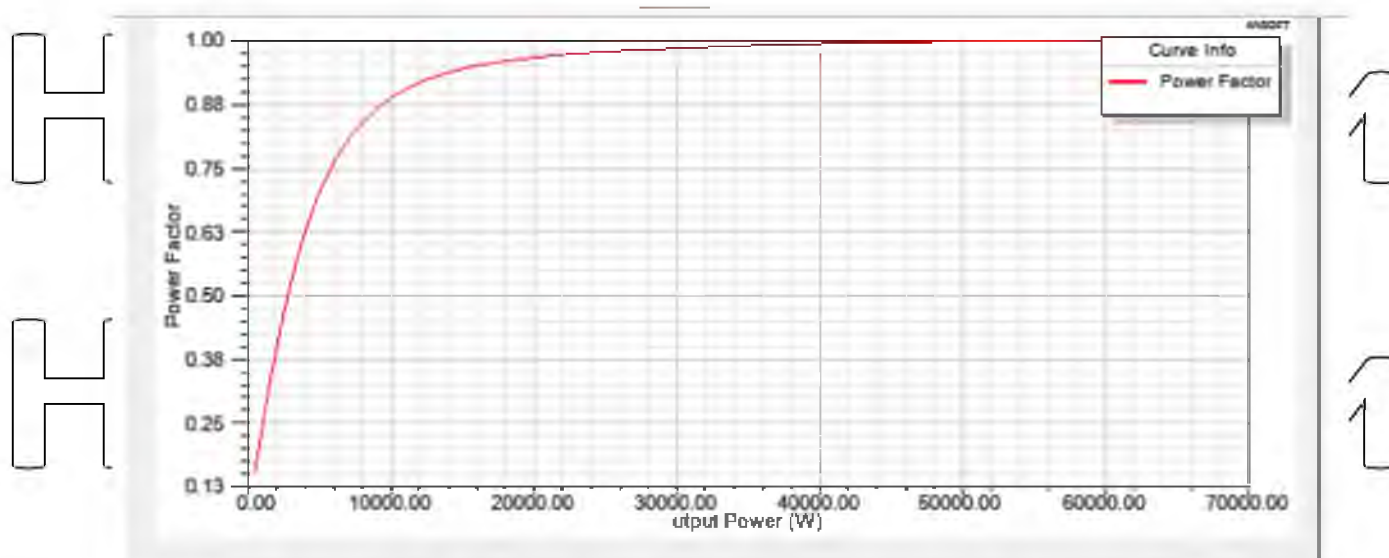


Рис. 4.4. Вікно результатів RMxpnt, вкладка Curves, ККД = f(P2)

Конвертування моделі RMxpnt в модель Maxwell стане в нагоді в тому випадку, коли для стандартної електричної машини потрібно побудувати картину розподілу поля, а також для інших операцій, для яких потрібен розрахунок полів.

При цьому в Maxwell конвертування моделі RMxpnt в модель Maxwell 2D/3D включає не тільки промальовування геометрії даної машини, але й створення повноцінної моделі для розрахунку з типом завдання - перехідний процес з обертальним рухом та підключенням до обмоток електричної схеми управління.

Безпосередньо після конвертування можна запускати розрахунок і спостерігати на графіку за кутом повороту ротора на кожному тимчасовому кроці перехідного процесу.

4.2 Моделювання поліфункціональних електромеханічних перетворювачів

Рівняння електромагнітного поля асинхронного обвигуна з масивним ротором

Асинхронні двигуни з масивним ротором (АД з МР) відрізняються простотою конструкції, значними пусковими моментами, можливістю роботи при низьких і високих частотах обертання. Разом з тим, внаслідок ефекту

вигніснення струму, масивний ротор має високий активний опір. Це призводить до підвищених втрат у роторі і, отже, до зниження ККД. Тим часом, цей недолік не відноситься до індукційних АД із зовнішнім МР (промислова назва - ЕДШ), в яких дисипативна енергія використовується в технологічному процесі нагрівання матеріалів [47 – 50].

Особливістю АД з МР є збереження відношення індуктивного опору ротора до активного опору в широкому діапазоні ковзання. За сталості параметрів статорної обмотки результуючий опір двигуна та коефіцієнт потужності виявляються близькими до постійної величі. При збільшенні частоти обертання активний та індуктивний опір ротора зменшуються. В результаті механічна характеристика набуває вигляду «екскаваторної», сприятливої для пускових режимів роботи двигуна.

Аналіз електромагнітних процесів АД з МР показує, що характер їх протікання, так само, як і розподіл магнітних полів, виявляється значно складніше ніж у машинах із роторами традиційних конструкцій. Основною причиною, що зумовлює це ускладнення, є ефект вигніснення струму ротора характер прояву якого залежить від частоти обертання.

Для дослідження магнітного поля АД з МР використовуємо двовимірну модель, що дозволяє отримувати його розподіл за двома координатами. Використання одновимірної моделі в даному випадку не є можливим через те, що глибина проникнення магнітного поля в тіло ротора виявляється меншою за радіальний розмір ротора. Крім того, зі зміною частоти обертання глибина проникнення змінюється, що необхідно враховувати при використанні одновимірної моделі.

Система рівнянь Максвелла наводиться до рівняння у часткових похідних, що записується для аксіальної складової векторного потенціалу [51]

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu'} \frac{\partial A}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{1}{\mu'} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - \mu_0 \gamma \omega \frac{\partial A}{\partial \varphi} - \mu_0 \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = -\mu_0 j_{ст} \quad (4.1)$$

З урахуванням щільності струму ротора, вираженої через векторний потенціал

$$J_r = -\gamma \left(\omega \frac{\partial A}{\partial \varphi} + \frac{\partial A}{\partial t} \right),$$

рівняння (4.1) перетворюється на вигляд

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{1}{\mu'} \frac{\partial A}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{1}{\mu'} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} = -\mu_0 (J_{\sigma} + J_r). \quad (4.2)$$

Для АД з МР в остаточному вигляді отримаємо

$$\frac{1}{R_0^2} \frac{d^2 A}{d\varphi^2} - qA = -\mu_0 (J_{\sigma} + J_r). \quad (4.3)$$

Математична модель асинхронного двигуна з масивним ротором

На сьогоднішній день відсутній єдиний підхід у моделюванні АД з МР, тому немає того базового матеріалу, з якого можна було б методом успадкування або модифікацій сформувавши ММ, базуватись на вихідній узагальненій ММ.

Розглянемо формування математичної моделі електромеханічного перетворювача із масивним ротором. Для АД з МР система рівнянь в усталеному режимі за відомою Т-подібною схемою замикання (рис. 4.5), з урахуванням наявності у масивному роторі короткозамкненої обмотки, має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_0 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \\ 0 &= \dot{E}_0 - \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_{20}) - \frac{1}{\sqrt{s}} \dot{I}'_2 jx'_{20} \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2, \end{aligned} \quad (4.4)$$

где x'_{20} – индуктивное сопротивление ферромагнитного ротора;

x'_{20} – индуктивное сопротивление короткозамкнутой обмотки ротора.

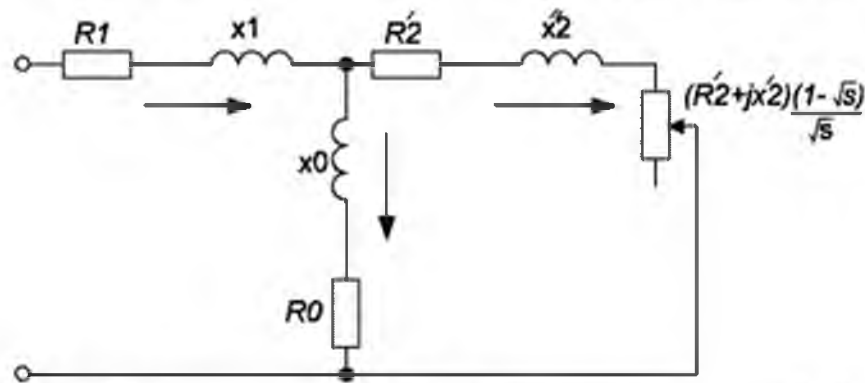


Рис.4.5. Т-подібна схема заміщення узагальненої асинхронної машини (для випадку $\alpha \neq 0,5$)

Интерес для аналізу становить друге рівняння системи (4.4), записане для ланцюга ротора, оскільки для ланцюга статора перетворення аналогічні в домім для узагальненої електричної машини.

Після перетворень другого рівняння в системі (4.4), запишемо вираз для миттєвих значень у двофазній системі координат α, β . При врахуванні $x'_{20} = 0$

для АМ з МР отримаємо

$$0 = r_r i_{ra} + \frac{d}{dt} (L_r i_{ra} + M i_{sa}) + \frac{d}{dt} L_{\sigma} i_{ra} \omega_f + (L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta}) \omega_f \omega_r \quad (4.5)$$

Де r_r – активний опір обмотки ротора;

L_r – власна індуктивність обмотки ротора;

$L_{r\sigma}$ – індуктивність розсіювання обмотки ротора;

M – взаємна індуктивність обмоток машини;

$i_{sa}, i_{s\beta}$ – струми обмотки статора по осям α, β ;

$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – струми обмотки ротора по осям α, β ;

$\omega_s = 1 - \sqrt{s}$ – приведена швидкість ротора.

У виразі (4.5) складова $\frac{d}{dt}(L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha})$ є не що інше, як зміна

потокозчеплення $\frac{d}{dt}\Psi_{r\alpha}$, а $(L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta})$ – потокозчеплення $\Psi_{r\beta}$.

В остаточному вигляді для АМ з МР система рівнянь для миттєвих значень у двофазній системі координат, яка обертається зі швидкістю ротора,

має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} &= u_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha} + \omega_e \Psi_{s\beta}; \\ \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - r_s i_{s\beta} - \omega_e \Psi_{s\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -r_r i_{r\alpha} - \frac{d}{dt} i_{r\alpha} L_{r\sigma} \omega_s - \Psi_{r\beta} (\omega_e - \omega_0 \omega_s); \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} = -r_r i_{r\beta} - \frac{d}{dt} i_{r\beta} L_{r\sigma} \omega_s + \Psi_{r\alpha} (\omega_e - \omega_0 \omega_s),$$

де $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ – потокозчеплення статора по осям α, β ;

$\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – потокозчеплення ротора по осям α, β ;

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – синусоїдальна напруга обмотки статора по осям α, β ;

r_s – активний опір обмотки статора;

ω_0 – синхронна швидкість поля;

ω_e – швидкість обертання системи координат.

Потокозчеплення статора знаходяться за такими рівняннями :

$$\begin{aligned} \Psi_{s\alpha} &= L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \Psi_{s\beta} &= L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \end{aligned} \quad (4.7)$$

де L_m – індуктивність гілки намагнічування.

Потокозчеплення ротора визначаються за аналогічними рівняннями

$$\begin{aligned} \Psi_{r\alpha} &= L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \Psi_{r\beta} &= L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}; \end{aligned} \quad (4.8)$$

Параметри обмотки статора (активний опір та індуктивність) знаходяться за відомими співвідношеннями для трифазних обмоток АМ. Параметри феромагнітного ротора знаходяться за співвідношеннями, наведеними у [52].

Доповнивши систему (4.6) відомими рівняннями руху та моменту [53], отримаємо повну систему диференціальних рівнянь для АМ із МР.

За отриманою системою (4.6) можна зробити такі висновки: повний опір ротора відрізняється на величину індуктивності розсіяння феромагнітного масиву із врахуванням швидкісного коефіцієнту апроксимації ω_s ; нелінійна зміна параметрів машини врахована введенням швидкісного коефіцієнту апроксимації ω_s .

Розглянемо приклад формування моделі асинхронного двигуна із МР за системою (4.6) у пакеті *Simulink MatLab*, для двухстаторної АМ с МР [54]. У такій машині два статори знаходяться всередині сталеві труби ротора і працюють у режимі противмикання, утворюючи руховий модуль та гальмівний модуль. Для дослідження динамічних характеристик ЕМД із МР у пакеті *Simulink MatLab* зручно розробляти модель для випадку обертання системи координат із швидкістю ротора $\omega_e = \omega_r$. Для моделювання використовуються параметри електродвигуна шнекового типу ЕДШ-1, наведені у табл.4.1.

Таблиця 4.1.

Параметри електродвигуна шнекового типу

Найменування	Двигунний модуль	Гальмівний модуль
Потужність, кВт	50	33
Лінійна напруга, В	380	380
Кількість полюсів	8	8
Активний опір обмотки статора, Ом	0,11	0,127

Індуктивний опір обмотки статора, Ом	1,424	2,04
Приведений активний опір обмотки ротора, Ом	1,671	1,926
Приведений індуктивний опір обмотки ротора, Ом	1,021	1,177
Індуктивний опір намагнічування, Ом	6,256	8,888
Маса ротора, кг		250
Діаметр ротора, м		0,374
Товщина ротора, м		0,012

Слід звернути увагу, що конструктивно статор ОДШ-1 подібний до ротора АМ з фазним ротором. Така особливість має бути врахована під час знаходження параметрів трифазної обмотки статора [52].

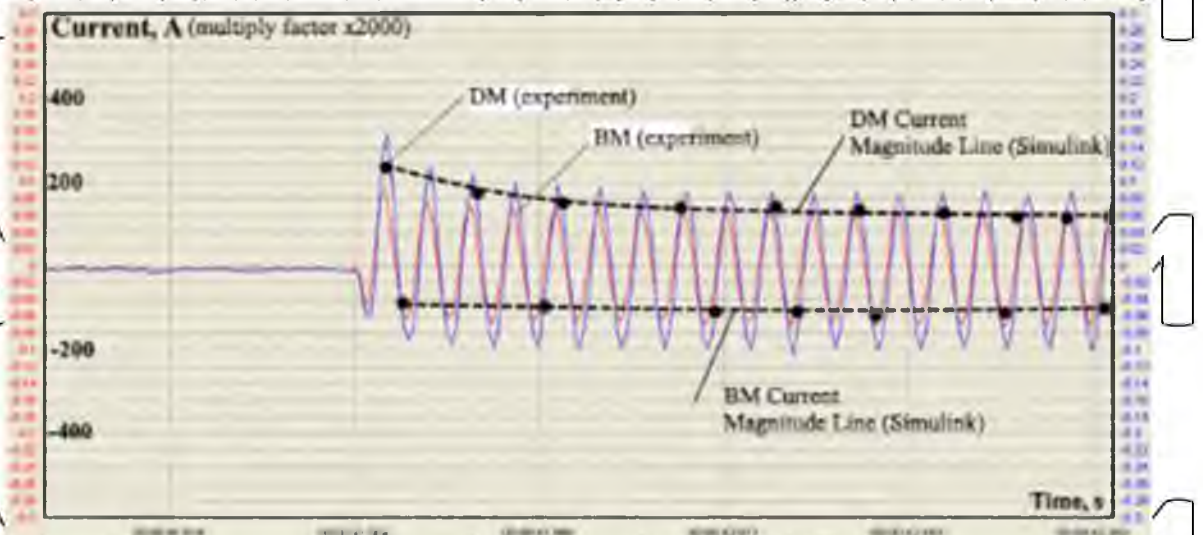
У математичній моделі розраховується двомасова модель електроприводу з жорсткими зв'язками. У підсистемах розрахунку динаміки кожної з двох машин (руховий модуль і гальмівний модуль) складається модель розрахунку електромагнітної частини. Електромагнітний момент обох машин підсумовується та подається на механічну частину. В результаті інтегрування отримуємо результуючу швидкість постійної часу, що дорівнює сумі постійних часу обох машин. Отримана в результаті розрахунку швидкість заводиться на обидві машини для розрахунку ЕРС. Достоїнство розробленої моделі у тому, що вона адекватна у тому разі, якщо двигуни різних потужностей, тобто можна подивитися, як розподілилося навантаження між ними. До навантаження кожного з модулів додається, крім того, потоковий навантажувальний момент транспортованого матеріалу.

Режим пригосного обертання полів використовується лише у разі включення ЕДШ при заштибуванні шнека або транспортуванні високов'язкої

маси. Отже, основним режимом слід вважати зустрічне обертання полів, у якому модуль ТМ функціонує зі ковзанням $s_G > 1$, тобто, у режимі електромагнітного гальма. Для рухового модуля ЕДШ проєктна потужність вибирається виходячи із суми теплової P_t та механічної $P_{\text{мех}}$ потужностей.

Для гальмівного модуля, що працює в режимі противмикання, - лише теплової.

Підсистема формування живлення гальмівного модуля має такі особливості: а) живлення починає подаватися з моменту часу 25 мс, коли двигунний модуль на холостому ходу розганяється до 1/5 синхронної швидкості; б) знак фазних напруг змінений на протилежний порівняно із системою живлення двигунного модуля. Результати моделювання двомодульного ЕМП із МР показані на рис. 4.6.



a)

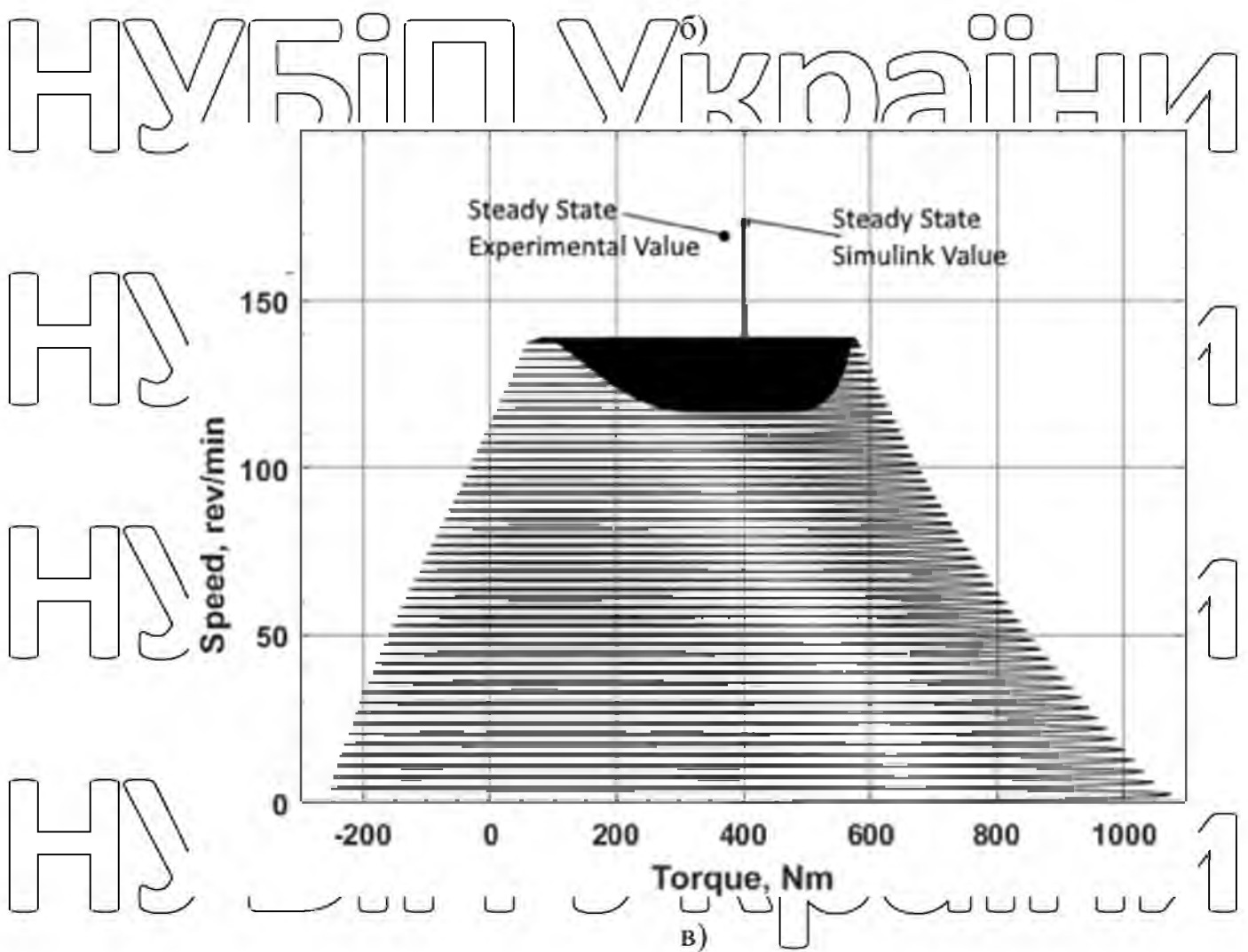
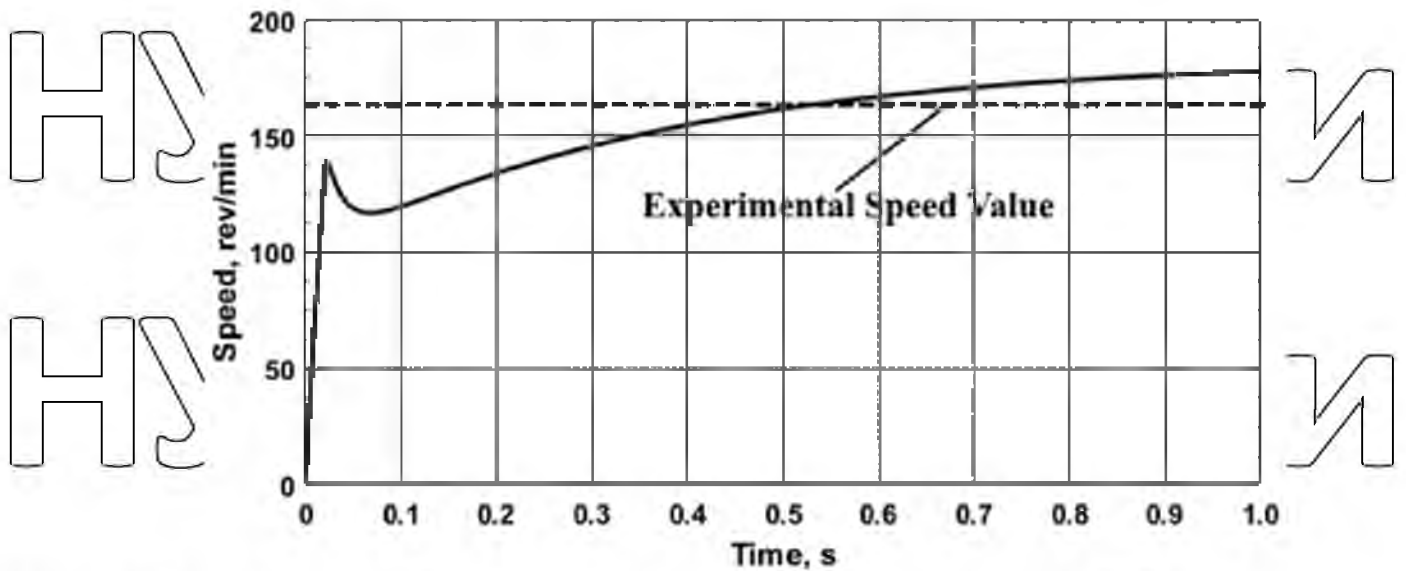


Рис.4.6. Результати моделювання двомодульного ЕМП із МР :

а – струми статора рухового та гальмівного модулів, б – частота обертання ротора, в – динамічна механічна характеристика

Зафіксований експериментально початковий пусковий момент становить 670 Н·м для ДМ. У момент підключення ТМ значення електромагнітного моменту ДМ, отримане під час моделювання, практично збігається з експериментальним. Електромеханічний процес завершується через 0,2 с. При цьому значення значення результуючого моменту (400 Н·м) з відхиленням 9,8 % відповідає отриманому експериментально (365 Нм). Результати моделювання мають задовільну схожість із даними, отриманими для аналогічної машини експериментально – середня хибка розрахунку не перевищує 10%.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

НУБІП України

В процесі виробництва маємо справу із біогазом, який є легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною, та різноманітними хімічними речовинами, що являються відходами в процесі виробництва, установками, що працюють під тиском. Тому для забезпечення безпеки потрібно строго виконувати заданий режим, неперервно слідкувати за роботою апаратури, забороняється залишати її без нагляду.

При проектуванні було розроблено заходи, що забезпечують безпеку персоналу виробництва в процесі експлуатації приладів, засобів автоматизації, шитових пристроїв системи автоматики у відповідності до Державних актів, що забезпечують виконання Закону України «Про охорону праці». На робочому місці оператора присутні такі шкідливі фактори:

- Повітря робочої зони
- Шум та вібрації
- Електробезпека
- Пожежна небезпека

НУБІП України

5.1 Шум та вібрації

Шум один з основних факторів, що негативно впливає на людей у сучасних містах і на виробництві. Збільшення потужності устаткування, насиченість виробництва високошвидкісними механізмами, різке збільшення транспортного потоку приводить до збільшення рівня шуму як у побуті так і на виробництві. Шкідливий вплив шуму на організм людини досить різноманітний. Працюючи в умовах тривалого шумового впливу випробують зниження пам'яті, запаморочення, підвищену стомлюваність, дратівливість і ін. До об'єктивних симптомів шумової хвороби відносяться: зниження слухової чутливості, зміна функцій травлення, що виражається в порушенні кислотно-лужного балансу у шлунку, серцево-судинна недостатність,

НУБІП України

нейроендокринового розлад. У процесі виробництва біогазу головними джерелами шуму й вібрації можуть бути вентилятори, електродвигуни, насоси, резервуари, що працюють під тиском. Одним з джерел шуму є вентилятори і насоси, рівень шуму яких сягає 80- 100 дБА. Тривалий вплив інтенсивного шуму (вище 80 дБА) на слух приводить до його часткової або повної втрати. Відповідно до ДСН 3.3.6037-99 для наладчика, ця гучність не повинна перевищувати 80 дБ, тому приймаються наступні міри для її зниження. Оскільки шум від вентиляційного агрегату поширюється через повітряне середовище, по будівельних конструкціях і через стінки повітропроводів, боротьба з шумом може здійснюватися, методом зниження початкової гучності вентиляційного агрегату і насосів, ізоляцією агрегатів за допомогою віброзахисних елементів. Амортизатори вібрації виготовляють зі сталевих пружин чи гумових прокладок. Фундаменти під відцентрові насоси ізолюють азбестом, для зменшення вібрації. Застосовують також звукопоглинаючі матеріали, такі як скловолокно, поролон для повітропроводів і облицювання вентиляційних систем.

Як індивідуальні засоби захисту від шуму:

- протишумні шоломи ШШЗ-65, ШШЛ-65, шолом-каска ВЦНИИОТ-2М;
- протишумні навушники ВЦНПОТ-2;

В результаті, відповідно до ДСН 3.3.6037-99, для персоналу забезпечується гучність 50-60 дБА.

5.2 Електробезпека

Відповідно до ПУЕ цех виробництва за небезпекою електротравм відноситься до приміщення без підвищеної небезпеки. В приміщенні застосовується трифазна чотирипровідна мережа напругою 380 В з глухозаземленою нейтраллю. У цьому випадку захисне заземлення не є досить надійним захистом щодо профілактики електротравм. Більш ефективним засобом попередження електротравм при замиканні на корпус у даному

випадку вважається занулення – навмисне електричне з'єднання неструмовідних елементів електроустановки, які можуть опинитися під напругою в результаті замикання на корпус, з нульовим проводом.

Система технічних засобів і заходів з електробезпеки.

Основні технічні засоби і заходи, що застосовуються для забезпечення електробезпеки при нормальному режимі роботи електроустановок в цеху

включають:

- ізоляція струмовідних частин - забезпечує технічну працездатність електроустановок, зменшує вірогідність попадань людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок;

- недоступність струмовідних частин – застосовуються захисні огороження, закриті комутаційні апарати, неізольовані струмовідні частини розміщуються

на висоті, недосяжній для ненавмисного доторкання до них інструментом, різного роду пристосуваннями, обмежується доступ сторонніх осіб в електротехнічні приміщення;

- блоківки безпеки - унеможливають доступ до неізольованих струмовідних частин без попереднього зняття з них напруги, попереджують помилкові оперативні та керуючі дії персоналу при експлуатації електроустановок, не допускають порушення рівня електробезпеки та вибухозахисту електрообладнання;

- засоби орієнтації в електроустановках – дають можливість персоналу чітко орієнтуватися при монтажі, виконанні ремонтних робіт і запобігають помилковим діям.

В аварійному режимі діє захисне занулення та автоматичне відключення мережі.

Система електрозахисних засобів.

Основні електрозахисні засоби для роботи з електричним обладнанням в цеху:

- ізолювальні штанги;

- ізолювальні кліщі;

- електровимірювальні кліщі;

- покажчики напруги;

- діелектричні рукавички;

- інструмент з ізолювальним покриттям;

- діелектричне взуття;

- сигналізатори напруги;

- захисні огороження (щити, ширми);

- переносні заземлення;

5.3. Пожежна безпека

На виробництві знаходяться горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини та матеріали (в тому числі пил і волокна). За вибухопожежною та пожежною небезпечністю належить до категорії В пожежонебезпечні у відповідності з НАПБ Б 03.002-2007, за умови, що

приміщення, не належать до категорій А і Б. Ступінь вогнестійкості будівлі II згідно з ДБН В.1.1-7-2016, тому що стіни приміщення кабінету цегляні. Приміщення відповідає класу пожежонебезпечної зони П-І відповідно до ПУЕ. Найбільш швидким та надійним засобом виявлення ознак займання та сигналізації про пожежу вважається автоматична установка пожежної сигналізації (АУПС), яка повинна працювати цілодобово.

Пожежні сповіщувачі полум'я

Комбіновані сповіщувачі ІПК-1, ІПК-2, ІПК-3 контролюють відразу два чинники, що супроводжують пожежу: дим та температуру. Пожежні сповіщувачі характеризуються: порогом спрацювання - найменшим

значенням параметра, на який вони реагують; інерційністю – часом від початку дії чинника, що контролюється, до моменту спрацювання; захищеною площею - площею підлоги, яку контролює один сповіщувач. До засобів гасіння можна віднести:

– стаціонарний модульний порошковий вогнегасник САМ-3

– вогнегасник порошковий призначений для гасіння загорянь тліючих матеріалів, горючих рідин, газів і електроустановок, що знаходяться під напругою не більше 1000 В, на промислових підприємствах, складах зберігання горючих матеріалів, а також на транспортних засобах. Порошкові

вогнегасники не призначені для гасіння загорянь речовин, горіння яких може відбуватися без доступу повітря (алюміній, магній та їх сплави, натрій, калій).

Вогнегасник порошковий повинен експлуатуватися в умовах помірного клімату, категорії 2, тип атмосфери ІІ по ГОСТ 15150-69 в діапазоні робочих температур від мінус 40 до плюс 50 ° С.

Порошковими вогнегасниками рекомендується обладнати легкові та вантажні автомобілі, сільськогосподарську техніку, протипожежні щити на хімічних об'єктах, у гаражах, майстернях, офісах, готелях і квартирах. Не слід використовувати порошкові вогнегасники для гасіння обладнання, яке може вийти з ладу при попаданні порошку (ЕОМ, електронне обладнання, електромашини колекторного типу і т. Д.).

Переносний вогнегасник вуглекислотний ОУ-3

В якості вогнегасної речовини застосовується діоксид вуглецю (СО₂), при переході вуглекислоти з рідкого стану в газоподібний відбувається збільшення її обсягу в 400-500 разів, супроводжуване різким охолодженням до температури -72. Ефект вогнегасіння досягається двоюко: зниженням

температури вогнища загорання нижче точки займання, і витісненням кисню із зони горіння негорючим вуглекислим газом.

5.4. Виробниче освітлення

У денний час в операторській передбачене денне освітлення згідно ДНБ В

25.28-2006. Роботи, виконувані в операторській, пов'язані зі зняттям показань

з контрольно-виміральної апаратури, відносяться до III розряду зорових робіт.

У приміщенні КВП (контроль вимірвальних пристроїв) маютья вікна

розміром 3300x2300 мм. Вони забезпечують значення коефіцієнта природного

освітлення 8 - 10 %. Коефіцієнт природного освітлення для даного розряду

робіт при верхньому і комбінованому освітленні складає 8 %. Отже, фактичне

значення КПО відповідає нормам. У темний час доби використовують штучне

висвітлення. По ДНБ В 25.28- 2006 освітленість відповідна III розряду зорових

робіт при газорозрядних лампах повинна бути $E_n=250$ Лк, $F_n=2800$ Лм

світловий потік газорозрядних ламп. Прийємо лампи типу ЛДЦ15-4.

Поставимо 9 світильників, що забезпечать освітленість приміщення для

даного розряду зорових робіт відповідно до ДНБ В 25.28-2006. При цьому

$E_{факт}=275$ Лк. $E_{нор}=250$ Лк. Освітленість приміщення відповідає нормам.

5.5 Заходи щодо захисту працівників від травмування

Працівники отримують захисний одяг – індивідуальний спецодяг – від впливу аміачних продуктів, газів, високих та низьких температур:

- бавовняні костюми ;
- рукавиці спеціальні , гумові технічні рукавички ;
- захисні окуляри ;
- захисні каски ;
- захисні щитки лицьові ;
- гумові чоботи, черевики МБС, підбиті цвяхами, що не дають іскри.

Знаходження обслуговуючого персоналу на робочому місці без спецодягу

заборонено. Весь обслуговуючий персонал установки зобов'язаний мати на робочому місці фільтруючі протигазу марки "БКО" захищаючі органи

дихання від парів вуглеводнів і кислих газів, "КД", що захищає від сірководню.

Індивідуальні фільтруючі протигази зберігаються в спеціальних шафах з комірками. Передача протигаса однією особою іншій забороняється. На

установці є шлангові протигази марок ПШ-1 або ПШ-2, які застосовуються при вмісті кисню в повітрі менш 18% об. і вмісті шкідливих парів і газів більше

0,5% об., при роботі всередині апаратів, ємностей, а також у колодязях, лотках і інших заглиблених місцях. Крім індивідуальних протигазів на установці в

спеціальній опломбованій шафі зберігається аварійний комплект газорятувальних засобів захисту: фільтруючі протигази, шлангові протигази.

Аварійний запас протигазів береться з розрахунку найбільшої кількості людей, що працюють у зміні.

До засобів захисту від високих температур ставляться огорожувальні пристрої, термоізоляційне покриття, пристрої автоматичного контролю,

сигналізації й дистанційного керування. До засобів захисту від впливу хімічних факторів ставляться пристрої огорожувальні, герметизуючі,

дистанційного керування, знаки безпеки.

5.6. Інструкції з відключення біогазової установки

1. Припинити подачу субстрату в бродильну камеру, паркан продовжувати.

Кількість подаваного субстрату не повинна перевищувати кількості виробленого газу.

2. Якщо кількість подаваного субстрату буде перевищувати кількість

виробленого біогазу, то система газозабора відключається і вироблений газ

виводиться в атмосферу, напр. через спустошення пристрою з запірною рідиною.

3. Відокремити газгольдер від бродильної камери щоб уникнути відтоку газу.

4. Відключити насоси і мішалки і поставити запобіжники від повторного включення.

5. Уникати появи в захисній зоні навколо бродильної камери вогнищ

займання.

6. Перед входженням і під час перебування в бродильній камері необхідно переконатися, що не існує небезпеки задухи / отруєння та є достатня кількість кисню, обладнання повинно бути поставлено на запобіжники від випадкового включення. Необхідно забезпечити достатню вентиляцію. У разі спустошені резервуари все ще містять залишки субстрату. Їх необхідно повторно розбавити холодною водою і потім викачати. Холодна вода зменшує активність бактерій і метаноутворення.

Обережно! Сірчані відкладення в ферментаторі легко спалахують і є високотоксичними!

Навколо газових накопичувачів і бродильних резервуарів необхідно передбачити захисні зони, з діючою заборонаю розпалювання вогню, куріння і іскріння. На це повинні вказувати жовті таблички з чорним шрифтом.

Розміри захисної зони коливаються між 1,5 і 20 м, в залежності від обсягу накопиченого газу, типу будови резервуара і використаних будівельних матеріалів.

Захисні дистанції орієнтуються на безпеку при вибуху. Зона 0 належить до такої, в якій постійно існує небезпека вибуху (при нормальному робочому режимі зазвичай не виникає на біогазових установках). Зона 1 охоплює територію, на якій час від часу виникає вибухонебезпечне середовище з різних газів (напр. Навколо горловини продувочного трубопроводу, газових факелів).

Зона 2 охоплює територію на якій не може утворитися вибухонебезпечне середовище з газів. Вибухонебезпечні зони (Зони 1 і 2) необхідно документувати на плані вибухонебезпечних зон. Цей план необхідно подавати разом з документами планування будівництва в органи, що видають дозволи.

Газопроводи та арматура повинні бути виконані згідно загально визнаним правилам техніки, відповідно повинна проходити і перевірка непроникності. Вони повинні бути стійкими до корозії і робітничому середовищу. Кольорові метали нестійкі до впливу біогазу. Трубопроводи зі штучних матеріалів

допускається застосовувати лише для прокладання в ґрунті і в якості з'єднувальних ліній ферментатора і газгольдера. Трубопроводи і арматура призначені для рівня номінального тиску PN 6 і повинні знаходитися в непромерзаючій зоні. Газопроводи повинні бути марковані жовтим кольором і відповідними позначками напрямку потоку руху. Арматура повинна мати безпечний доступ для обслуговування. Вентелі для газозабору повинні бути оснащені запобіжниками від несанкціонованого відкривання. Шибери в насосних шахтах (напр. В резервуарі попереднього зберігання) необхідно робити таким чином щоб їх можна було обслуговувати без заходження в шахту. Сепаратори для конденсату і запобіжні пристрої повинні перебувати в постійно доступному місці і не повинні розташовуватися в шахтах. Пристрої, що працюють під тиском і з заперіною рідиною повинні бути простими у контролі та доступними для обслуговування, а також мати захист від витікання рідини і промерзання.

Всі підземні приміщення, які необхідно регулярно відвідувати при обслуговуванні та в яких може накопичуватися газ (контрольні шахти, розташовані в товщі ґрунту запобіжники граничного тиску, сепаратори конденсату і т.д.) повинні проходити примусове провітрювання (автоматичне включення при відкритті перекриття). Для шахт в якості альтернативи можна встановлювати газовий сенсор. Рекомендація: якщо компресор розташований у вибухонебезпечній зоні, то він повинен відповідати вимогам для роботи в цій зоні. При використанні газових сенсорів слід звернути увагу щоб вони регулярно проходили перевірку професіоналами. Споживачі газу повинні встановлювати дозволені конструкції вогневих фільтрів. Газові резервуари і газгольдери повинні мати запобіжники граничного тиску газу, які б не замикалися. Гідрозапори повинні бути захищені від витікання і промерзання.

Зливний трубопровід запобіжника граничного тиску повинен виходити в навколишнє середовище. Територія, на відстані 1 м навколо горловини є захисною зоною 1. Для установки газоотоплювальних котлів діють технічні

правила по установці газового обладнання. Приміщення для генераторів в сусідніх будинках повинні мати такі розміри, щоб кожен генератор мав доступ з 3 сторін. Двері повинні відкриватися у напрямку виходу з приміщення. Донні сливи слід оснастити сепараторами масла, альтернативою може бути уловлююча ванна з розрахунку на прийом усієї кількості масла в двигуні.

Приміщення, де встановлюються газоагривальне обладнання та генератори повинні мати перехресну вентиляцію з досить великими незачиненими отворами (приплив повітря в статевий зоні, висновок повітря під перекриттям).

За допомогою добре маркованого вимикача генератора та газозапірного вентеля поза технічного приміщення повинна бути можливість відключити агрегат в будь-який час. Готовий до експлуатації вогнегасник на 12 кг порошку і захисний ковпак для пожеж категорій А, В і С згідно DIN EN 319 повинен бути розміщений в добре видному місці на приміщенні генератора.

Перед запуском біогазова установка проходить процес прийняття експертом. Орган, що видає дозвіл перед запуском біогазової установки повинен отримати свідоцтво про перевірку на непроникність газгольдера до вказівок міцності на розрив, а також газопроникності щодо метану і стійкості використаного матеріалу плівки до температури, необхідно надати зразок матеріалу плівки. Також обов'язковою є наявність протоколу про прийняття з боку експерта в газовій галузі, яке б свідчило що газова установка, включаючи всі газопроводи відповідає всім загальноприйнятим правилам безпеки техніки, а також вимагає підтвердження цього з боку фахівця з електротехніки про те, що електричне обладнання відповідає вимогам безпеки експлуатації.

5.7. Інструкції з обслуговування біогазової установки в разі поломки

Газгольдер:

- 1) Перекрити подачу газу
- 2) Випустити газ з газгольдера
- 3) Доступ для персоналу тільки після належного провітрювання!

обов'язкова присутність третьої людини (який буде знаходитися поблизу вхідного отвору газгольдера) і наявність страховки у вигляді рятувального троса

Опалення:

1) Увага! Якщо вода витікає з системи опалення, то існує небезпека опіку!

Машинне відділення і генератор:

1) Припинити подачу газу за межі машинного приміщення

2) Вимкнути роботу техніки за допомогою вимикача, що знаходиться поза машинного відділення

3) У разі необхідності вдатися до примусового провітрювання (напр. У разі появи запаху газу)

4) При появі запаху газу відмовитися від включення освітлення, відкритого полум'я і іскроутворення! Небезпека вибуху!

Електротехніка:

1) Роботи з електрообладнанням можуть проводити тільки фахівці Трубопроводи для гною і шибери, насоси та міксери

1) Невідкладно усунути засмічення

2) У разі поломки системи насосів: закрити всі шибери; після повної зупинки насоса, відключити подачу електроенергії і поставити запобіжники з метою несанкціонованого включення. Особливо це стосується проведення робіт у попередніх резервуарах і бродильних резервуарах!

Котловани і шахти:

1) Увага! при входженні і під час перебування в котлованах і каналах необхідно переконатися, що не існує небезпеки задухи/отруєння та достатньо кисню для дихання

2) Обладнання має бути надійно захищене від включення

3) Необхідно стежити за належним провітрюванням

4) У разі недостатнього провітрювання виникає небезпека задухи, отруєння, пожежі та вибуху.

Стандартні вимоги з техніки безпеки:

1) Надійна підстава, хороша доступність і достатня стійкість наземних частин установки.

2) Уникати різниці у потенціалі шляхом з'єднання всіх електропровідних компонентів установки через вирівнює електропроводку і загальний заземлення.

3) Теплоізоляція бродильних резервуарів повинна кА мінімум бути на рівні середньої займистості (B2), в радіусі 1 м навколо отвору витікання біогазу вона повинна бути з важкозаймистий матеріалів (B1).

4) Для електроприладів усередині бродильного резервуару необхідно використовувати захищає від вибуху матеріал.

5) Газгольдери повинні згідно з вимогами бути непроникними, стійкими до впливу тиску, ультрафіолету, температури. Нестійкі у формі плівкові накопичувачі повинні бути захищені захисною плівкою від несприятливих погодних умов.

ВИСНОВКИ

НУБІП України

1. Розроблена концептуальна модель енерготехнологічного комплексу з синергічним ефектом в піролізному процесі виробництва біовугілля та синтез-газу.

НУБІП України

2. Проведено моделювання процесів рекуперації тепла у завантажувальному пристрої комплексу для деструктивної енерготехнологічної переробки рослинної біомаси при наявності двох окремих потоків відпрацьованого теплоносія. Відхилення основних

НУБІП України

результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень не перевищує 12%. Надалі передбачено відпрацювання режимів та удосконалення процесів переробки біомаси.

НУБІП України

3. Запропоновано концептуальний проект суміщеного процесу виробництва біогазу, гідротермальної карбонізації дигестату і використання гідровугілля для покращення анаеробного перетравлення. В основу покладено ідею використання заглиблених і шнекових поліфункціональних електромеханічних перетворювачів в операціях переробки біомаси.

НУБІП України

4. Розроблено математичну модель асинхронної машини з масивним ротором, яка враховує залежність параметрів масивного ротора від частоти його обертання. Отримана математична модель була

НУБІП України

використана у побудові математичної моделі двомодульної асинхронної машини із загальним порожнистим масивним ротором.

НУБІП України

5. Встановлено, що при зустрічному обертанні магнітних полюсів забезпечується безредукторний режим сталої роботи двомодульної асинхронної машини на низьких частотах обертання масивного ротора, поєднаного зі виконавчим шнековим механізмом.

6. Продемонстровано досить високу збіжність результатів дослідження динамічного режиму запуску з експериментальними даними. Похибка

результатів моделювання, порівняно з даними, отриманими експериментально, не перевищує 10%.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скляренко Є.В. Створення піролізної технології та установки для термохімічної конверсії рослинної біомаси: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : [спец.] 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика"/Ін-т технічної теплофізики НАН України, Київ, 2017, 27с
2. Laidoudi, A., Duchesne, S., Morganti, F., & Velu, G. (2020). High-power density induction machines with increased windings temperature. *Open Physics*, 18(1), 642-651.
3. Lefik, M., Komez, K., Napieralska-Juszczak, E., Roger, D., & Napieralski, P. A. (2019). Comparison of the reluctance laminated and solid rotor synchronous machine operating at high temperatures. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 38(4), 1111-1119.
4. Elmadah, H., Roger, D., & Takorabet, N. (2019). Design of inorganic coils for high temperature electrical machines. *Open Physics*, 17(1), 698-708.
5. Juszczak, E. N., Roger, D., Komez, K., Lefik, M., & Napieralski, P. (2020). Architecture choices for high-temperature synchronous machines. *Open Physics*, 18(1), 683-700.
6. Mazlan, M. M., Talib, R. A., Mail, N. F., Taip, F. S., Chin, N. L., Sulaiman, R., Shukri, R., & Mohd Nor, M. Z. (2019). Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss. *International Journal of Food Properties*, 22, 54-70. doi:10.1080/10942912.2019.1568458
7. Feng, C., Li, Z., Wang, Z., Wang, B., & Wang, Z. (2019). Optimizing torque rheometry parameters for assessing the rheological characteristics and extrusion processability of wood plastic composites. *Journal*
8. Campuzano, F., Brown, C. R., & Martínez, J. D. (2019). Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 372-409. doi:10.1016/j.rser.2018.12.014

9. Singha, P., & Muthukumarappan, K. (2016). Effects of processing conditions on the system parameters during single screw extrusion of blend containing apple pomace. *The Journal of Food Process Engineering*, 40(4), 1-11. doi:10.1111/jfpe.12513

10. Mushtuk, M., Gudzenko, M., Palamarchuk, I., Vasylyv, V., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Nychyk, O., Salavor, O., & Bober, A. (2020). Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 937-944. doi:10.5219/1436

11. Gritsyuk, V., Nevliudov, I., Zablodskiy, M., Subramanian, P. Estimation of Eddy Currents and Power Losses in the Rotor of a Screw Electrothermomechanical Converter for Additive Manufacturing. *Machinery & Energetics*, 2022, Vol. 13, No. 2, pp. 41-49

12. 1. Kim K. K., Ivanov S. N. On the problem of determining speed-torque characteristics of thermal electromechanical converters. *Russian Electrical Engineering*, 2009, No. 80. Pp. 459–465.

13. Zablodskiy N. Plyugin V., Gritsyuk V. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes. *Russian Electrical Engineering*, 2016, No 87(3). Pp. 140–144.

14. Szczygiel M., Kluszczynski K. Rotary-linear induction motor based on the standard 3-phase squirrel cage induction motor: constructional and technological features. *Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika*, 2016, No.112. Pp. 395–406.

15. Amiri E., Jagiela M., Dobzhanski O., Mendrela E. Modeling dynamic end effects in rotary armature of rotary-linear induction motor. *Proceedings of IEEE Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2013. Pp. 1088-1091.

16. Alwash J. H., Qaseer L. J. Three-dimension finite element analysis of a helical motion induction motor. *ACES*, 2010, Vol. 25, No. 8. Pp. 703-712.

17. Zhao J., Xinhui L., Xin Z., Han Y. Research on the energy-saving technology of concrete mixer trucks.

18. Popovych O.M., Golovan I.V. Determination of equivalent circuit parameters of the induction motor and non-linear functions for field analysis results. Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. 2012. No. 31. Pp. 38–48

19. Deshpande M.V. Electrical machines. – New Delhi: PHI, 2011. – 430 p.

20. Kutsevalov V.M. Questions of theory and calculation of asynchronous machines with massive rotors. M.-L.: Energy, 1966. – 302 p.

21. Zablodskii N., Pliugin V., Lettl J., Fligl S. Dynamic Simulation of the Double-Stator Induction Electromechanical Converter with Ferromagnetic Rotor. Power Engineering 2013. Pp. 1448–1453.

22. Proceedings of IV IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009. Pp. 3551–3554.

23. Sen S.K. Principles Of Electrical Machine Design With Computer Programs. –Oxford: IBH Publishing Company Pvt. Limited, 2006. – 415 p.

24. Wu, L., Wei, W., Wang, D., & Ni, B. J. (2021). Improving nutrients removal and energy recovery from wastes using hydrochar. Science of The Total Environment, 783, 146980

25. Патент України на винахід № 117986. Установа для енерготехнологічної переробки біомаси. МПК С10В 51/00 (2018.01). Заблодський М.М., Козирський В.В., Лут М.Т. та ін. Заявник та патенто власник, Національний університет біоресурсів і природокористування України № а201707310; заявл. 11.07.2017; Опубл. 25.10.2018. Бюл. № 20.

26. Патент України на винахід № 120684. МПК (2006) С10В 51/00 С10В 53/00. Спосіб деструктивної енерготехнологічної переробки біомаси./ Заблодський М.М., Козирський В.В., Жильцов А.В., Чуєнко Р.М., Клендій П.Б./ Національний університет біоресурсів і природокористування України – заявл. 09.11.2018 р, опубл. 10.01.2020, бюл. № 1/2020

27. Патент України на винахід № 120683. Установа для деструктивної енерготехнологічної переробки біомаси. МПК С10В 51/00 (2006). /Заблодський М.М., Козирський В.В., Горобець В.Г., Чуєнко С.М.,

Клендій П.Б. Заявник та патентовласник Національний університет
 б оресурсів і природокористування України. заявл. 09.11.2018,
 Спубл.10.01.2020. Б.сл. № 20.

28.. Zablodskiy, M., Zhylysov, A., Radko, I., Trokhaniak, V., Pugalendhi, S. i
 Subramanian, P. (2021). Thermochemical conversion of plant biomass in the
 energotechnological complex with heat recovery. *Engineering Review*, 41(3), 0-0.
<https://doi.org/10.30765/er.1554>

29..Zablodskiy, M., Zhylysov, A., Nalyvaiko, V., Trokhaniak, V., Pugalendhi,
 S. and Subramanian, P., 2020. Biomass Pyrolysis Using a Multifunctional
 Electromechanical Converter and a Magnetic Field. *Scientia agriculturae bohemica*,
 51(2), pp.65-73.

30..Заблодський М.М. Електричні поліфункціональні агрегати в
 технологіях переробки дисперсних речовин: Монографія / М.М. Заблодський,
 В.Є. Плюгін, В.Ю. Грицюк. – Київ: ЦП «Компринт», 2017. – 316 с.

31. / Gajendra K.Gaurav,ShabinaKhanam. Profitability analysis of power
 generation using waste heat of sponge iron process. *Energy*, Volume 141, 13
 December 2017- Elsevier , Pages 333-347.

DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.053

32. wang Y, Niu Y, Zhang X, Wang Z, Wang S, Hui S. Optimization
 and energy integration of heat recovery and power generation system. *Applied
 Thermal Engineering*, Volume 107, 25 August 2016, Pages 294-300.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.141>.

33. Zakariya Kaneesamkandi. Combustion Air Pre-heating from Ash
 Sensible Heat in Municipal Waste Incineration Systems. *Research Journal of
 Applied Sciences, Engineering and Technology*, (2014 / 01 / 20) , P551 – 558.

DOI:10.19026/rjaset.7.289

34. Sundarrajan S, S.Mohammed Shafee. Energy Conservation in Power
 plant Electrostatic Precipitator (ESP) by Using Waste Heat Recovered from Boiler
International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and

Technology, Vol. 4, Issue 2, February 2015, Pages 665-669. DOI:

10.15680/IJRSET.2015.0402085.

35. Solex thermal science INC.250, 4720 – 106 AVE. S.E. Calgary, Alberta, Canada, T2C 3G5. www.solexthermal.com

36. Патент України на корисну модель № 95853 . Заглибний електротепломеханічний перетворювач МПК H05B 6/10 (2006.01)

Заблудський М.М., Семірягін С.В., Грищук В.Ю. та ін. Опубл. 201.2015, Бюл.№ 1.

37. Lucian, M., & Fiori, L. (2017). Hydrothermal carbonization of waste biomass: Process design, modeling, energy efficiency and cost analysis. *Energies*, 10(2), 211

38. Hämaläinen, A., Kokko, M., Chatterjee, P., Kinnunen, V., & Rintala, J. (2022). The effects of digestate pyrolysis liquid on the thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge—Perspective for a centralized biogas plant using thermal hydrolysis pretreatment. *Waste Management*, 147, 73–82.

39. Шинкаренко В.Ф. Основи теорії еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка, 2002. – 288 с

40. M. Arshad, M. A. Khosa, T. Siddique, A. Ullah, “Modified biopolymers as sorbents for the removal of naphthenic acids from oil sands process affected water (OSPW)”, *Chemosphere*, Vol. 163, pp. 334-341, 2016. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.08.015

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

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

43. Boehm A, Hahn I (2014) Measurement of magnetic properties of steel at high temperatures. In: 40th Annu Conf Ind Electron Soc (IECON), IEEE, pp 715-721 <https://doi.org/10.1109/IECON2014.7048579>

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

45. Ansoft Maxwell 2D - Electromagnetic and Electromechanical Analysis: user's guide [Электронный ресурс] / Ansoft Corporation. – Pittsburgh, 2012. – 628

р. – Режим доступа к книге: <http://www.ansoft.com/support.cfm>.

46. Петрушин В.С. Використання модифікованого критерію зведених витрат при розробці вискоєфективних асинхронних двигунів / В.С. Петрушин, А.М. Якімець, П.А. Волощук // Електротехніка та електромеханіка, 2014. – № 1. – С. 68 – 71.

47. Пат. 49409, Україна, МПК7 E21B37/00, 36/04. Пристрій для видалення парафіну зі стінок нафто-газових свердловин / Заблодський М.М., Дорофеев В.М., Плюгін В.Є., Захарченко П.І., Шинкаренко В.Ф., Ревенко О.Є., Заблодський С.М.; заявник та патентовласник Донбаський держ. техн. ун-т. – № 2001128246; заявл. 03.12.2001; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10.

48. Пат. 75771, Україна, МПК7 H05B 6/10. Заглибний електронагрівач / Заблодський М.М., Дорофеев В.М., Плюгін В.Є., Окаєлов В.М., Захарченко П.І., Шинкаренко В.Ф.; заявник та патентовласник Донбаський держ. техн. ун-т. – № 20040605162; заявл. 29.06.2004; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.

49. Пат. 87223, Україна, МПК7 C10L 1/00 Спосіб одержання водовугільного палива / Заблодський М.М., Шинкаренко В.Ф., Грицюк Б.Ю., Гриць Г.М., Філатов М.А., Плюгін В.Є.; заявник та патентовласник Донбаський держ. техн. ун-т. – № 201310642; заявл. 03.09.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2.

50. Заблодський Н.Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения / Н.Н. Заблодский. – Алчевск: ДонГУ, 2008. – 295 с.

51. Zablodskiy N. 3D magnetic filed distribution in a screw double-stator induction motor / N. Zablodskiy, V. Plyugin // СРЕЕ 2015, Lviv. – 2015. – P. 239–241.

52. Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е., Скрыль В.В. Проблемы моделирования и проектирования двухмодульного ЭМПЭ с массивным ротором. Вісник НТУ «ХН». – 2013. – № 51. – С. 20–27.

53. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Т.Ю., Садовой О.В. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук, 2001. – 410 с.

54. . Zablodskiy N. Plyugin V., Gritsyuk V. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes. Russian Electrical Engineering. 2016. No 87(3). Pp. 140–144.

55. Лунгул І. П., Заблодський М.М. Поліфункціональний електромеханічний перетворювач для установок піролізної переробки рослинної біомаси у біовугілля // Тези доповідей 76-а науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», НУБІП України, м.Київ, 37. 20 квітня 2023 р.-С.25

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України