

УДК 620.97
УКПП
№ держреєстрації 0116U002542
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
(ХНУРЕ)

61166, м. Харків, пр. Науки, 14; тел./факс: (057) 702 10 13

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Харківського національного
університету радіоелектроніки
д-р техн.наук, проф.

_____ В.В. Семенець
2017.12.____

ЗВІТ

про науково-дослідну роботу

РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ
ОДЕРЖАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА
ТА ЇХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ

Науковий керівник

Д-р техн.наук, проф. _____ І.І. Зима
2017.12.____

2017

Рукопис закінчено 19 грудня 2017 р.

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою ХНУРЕ, протокол від
26 грудня 2017 р. № 7

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, гол.наук.співроб., д-р техн. наук, професор	І.І. Зима (Розділ 1.2)
Відповідальний виконавець, наук.співроб.	В.Й. Стрільченко (розділ 1.1, 1.3)
Виконавці: Старш.наук.співроб.	О.І. Толстих (розділ 1.3, 1.4)
Пров.наук.співроб., канд.техн.наук	Г.М. Валевахін (розділ. 2.1–2.4, висновки)
Старш.наук співроб.	Е.Р. Галеев (розділ 2.4–2.7)
Пров.наук.співроб. канд.техн.наук	О.І. Дохов (розділ 1.1, 1.4, Висновки)
Мол.наук.співроб.	М.Г. Писаренко (розділ 1.3 –1.4)
Пров.наук.співроб., канд.техн.наук	В.В. Жирнов (розділ. 1.2)
Пров.наук.співроб., канд.техн.наук	О.О.Жаліло (розділ 2.1)
Старш.наук.спіроб.	О.І. Шкарлет (розділ. 3.4 – 3,5)
Старш.наук.співроб.	О.Ф. Семенов (розділ. 3.1–3.3, Висновки)
Асистент, канд.техн.наук	В.Ю. Приймак (розділ. 3.6)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: с. 163, рис.42, табл. 24, джерел 59.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ, НВЧ ДІАПАЗОН, КАВІТАЦІЯ, МАГНІТОАКУСТИЧНИЙ РЕЗОНАНС, БІОПАЛИВО, ВУГІЛЬНИЙ ПИЛ, АДСОРБЦІЯ, ВОДНО-СПИРТОВА СУМІШ, МОЛЕКУЛЯРНЕ СИТО, ДЕСОРБЦІЯ, НВЧ-РЕГЕНЕРАЦІЯ, ЦЕОЛІТ, ПЛАЗМО-ХІМІЧНИЙ ПРОЦЕС, ПЛАЗМОТРОН

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси одержання альтернативних видів палива: рідкого котельного, що одержується з біогенних відходів та відходів нафтопереробної та вугільної промисловості, синтез-газу та абсолютного спирту при стимулюючій дії електромагнітних випромінювань, акустичних коливань, кавітації та магніто-акустичного резонансу.

Мета – розроблення енергоефективних технологій одержання альтернативних видів палива на основі використання стимулюючої дії електромагнітних випромінювань, акустичних коливань, кавітації та магніто-акустичного резонансу.

На основі використання стимулюючої дії фізичних полів на технологічні процеси в речовинах при одержанні альтернативних видів палива запропонована сукупність технічних засобів для їх реалізації, експериментально визначені параметри цих технічних засобів, експериментально підтверджена їх ефективність на дослідних лабораторних макетах, що реалізують такі розроблені технології:

1) одержання рідкого котельного альтернативного біопалива з суміші біогенних відходів та вуглеводневих добавок. Ця технологія ґрунтується на використанні впливів кавітації на робочу суміш, молекули якої попередньо були активізовані в пристрої магніто-акустичної обробки. Обґрунтоване використання в якості добавки модифікованого вугільного пилу. Одержані зразки біопалива досліджені в акредитованих лабораторіях;

2) модифікації вугільного пилу з використанням дії електромагнітного поля НВЧ діапазону;

3) безперервної регенерації молекулярних сит під дією електромагнітного поля НВЧ діапазону;

4) плазмової газифікації вугілля на основі використання запропонованого енергоефективного НВЧ-плазмотрону.

Оцінена економічна ефективність цих технологій.

Впровадження результатів роботи сприятиме розширенню виробництва альтернативних видів палива, енергозбереженню та покращенню екології, так як відходи, що забруднюють довкілля будуть використовуватися при виробництві палива.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначення.....	9
Вступ.....	10
1 Одержання рідкого альтернативного котельного палива з біогенних відходів з використанням модифікованого вугільного пилу.....	12
1.1 Впливи фізичних полів на інтенсифікацію фізико-хімічних процесів	12
1.1.1 Впливи електромагнітних полів і акустичних коливань	12
1.1.2 Вплив кавітації на інтенсифікацію фізико-хімічних процесів.....	15
1.2 Резонансна магніто-акустична обробка рідких речовин.....	18
1.2.1 Збудження магнітного резонансу в рідині	19
1.2.2 Фактори апріорної невизначеності напруженості геомагнітного поля й методи їхнього відбивання.....	20
1.2.3 Створення пристрою магніто-акустичної обробки в складі установки одержання біопалива із біогенних відходів	21
1.2.4 Розробка пристрою магніто-акустичної обробки робочого середовища.....	22
1.2.5 Схема контролю й управління пристрою магніто-акустичної обробки.....	25
1.3.4 Експериментальні дослідження пристрою магніто-акустичної обробки.....	27
1.3 Модифікація поверхні вугільного пилу рідкими вуглеводнями.....	34
1.3.1 Постановка задачі. Робоча гіпотеза.....	34
1.3.2 Можливі варіанти реалізації гіпотези модифікації вугільного пилу	35
1.3.3 Модифікація вугільного пилу при конвективному нагріванні	35
1.3.4 Теоретичне обговорення та обґрунтування результатів конвективного нагріву	37
1.3.5 Модифікація вугільного пилу під дією електромагнітної енергії НВЧ діапазону	38
1.3.6 Обговорення результатів і їх теоретичне обґрунтування	40

1.3.7 Перспективи отримання модифікованої вугільного пилу на основі топкового мазуту	42
1.3.8 Аналіз й експериментальна перевірка процесу модифікації при ініціюванні фізичних процесів електромагнітними хвилями НВЧ діапазону	42
1.3.9 Визначення необхідних параметрів технологічних процесів	46
1.3.10 Дослідна установка модифікації вугільного пилу та проведення експериментальних досліджень	49
1.4 Одержання альтернативних видів палива	51
1.4.1 Загальні характеристики вихідних матеріалів і вимоги до альтернативних видів палива	51
1.4.1.1 Загальні характеристики біогенних відходів, що використовувались при одержанні АБП	52
1.4.1.2 Характеристики модифікованого вугільного пилу для використання при одержанні АБП	55
1.4.2 Приготування АБП на основі використання вугільного пилу й рідких вуглеводнів	60
1.4.3 Обґрунтування методу досліджень	61
1.4.4 Опис дослідного стенду для проведення експериментальних досліджень технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів	62
1.4.5 Дослідження зразків АБП в профільних акредитованих лабораторіях	67
1.4.6 Оцінка економічних показників технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів та модифікованого вугільного пилу	73
1.4.6.1 Технічне устаткування	74
1.4.6.2 Екологічні фактори	74
1.4.6.3 Сировинна й енергетична база виробництва	74
Висновок по розділу 1	78

Рекомендації з використання вугільного штибу для його застосування в якості компоненту АБП.....	79
2. Мікрохвильова безперервна регенерація молекулярних сит при одержанні абсолютного спирту мембранним методом.....	80
2.1 Обґрунтування методів досліджень	80
2.1.1 Стан проблеми.....	80
2.1.2 Постановка завдання експериментальних досліджень	84
2.2 Аналіз економічної переваги процесу НВЧ-регенерації	85
2.3 Експериментальне дослідження процесу НВЧ-регенерації	89
2.3.1 Матеріали та технічні засоби, що були використані при експериментальних дослідженнях.....	89
2.3.2 Програма експериментальних досліджень.....	93
2.3.3 Методика проведення експериментальних досліджень.....	94
2.3.4 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	98
Висновки по розділу 2	106
3 Плазмохімічна газифікація вугілля з використанням плазмових реакторів з ВЧ і НВЧ-плазмотронами	107
3.1 Особливості протікання плазмохімічних процесів	110
3.1.1 Дисоціація вуглекислого газу	110
3.1.2 Пряме розкладання пару води в нерівноважній плазмі	113
3.2.3 Порівняльний аналіз плазмохімічних реакторів – плазмотронів....	115
3.3 Технологічна установка для одержання синтезу-газу.....	121
3.4 Оцінка економічної ефективності плазмохімічної газифікації бурих вугілля.....	125
3.5 Результати експериментальних досліджень лабораторного макета високочастотного плазмотрона.....	138
Висновки по розділу 3	139
Висновки	141
Рекомендації	143
Перелік джерел посилання	145

Додаток А Результати лабораторних досліджень альтернативного біопалива, одержаного із використанням мулового осаду, що були проведені в період 2008-2009 р.р.....	151
Додаток А.1 Результати досліджень мікробіологічних показників альтернативного біопалива	152
Додаток А.2 Результати досліджень з виділення ентеровірусів альтернативного біопалива	153
Додаток А.3 Результати досліджень з виявлення яєць гельмінтів і членистоногих в альтернативному біопаливі.....	154
Додаток А.4 Висновок державної санітарно-епідемічної експертизи.....	155
Додаток А.5 Результати вимірювань газоподібних викидів при спалюванні АБП	156
Додаток А.6 Протокол випробування сухого мулового осаду з Міських очисних споруд № 2 Комплексу «Харківводовідведення» КП «Харківводоканал»	158
Додаток А.7 Протоколи випробування зразків АБП, одержаних із використанням мулового осаду	159
Додаток Б Аналіз теплотворної властивості вугільного шламу	161
Додаток В Результати випробувань зразка альтернативного біопалива одержаного з мулового осаду та модифікованого вугільного пилу	162
Додаток Г Результати випробувань зразка альтернативного біопалива одержаного з спиртової барди та відпрацьованого мастила	163

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АБП – альтернативне біопаливо

ВЧ – висока частота

ВЧЄ – високочастотні ємнісні

ВЧІ – високочастотні індукційні

ВЧФ – високочастотні факельні

ГМП – геомагнітне поле Землі

ЕДП – електродугові плазмотрони

ЕМЕ – електромагнітна енергія

КВП і А – контрольно-вимірювальні прилади і автоматика

ККД – коефіцієнт корисної дії

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі

НВЧ – надвисока частота

об. – об'єм

ТП – трансформаторні плазмотрони

TSR – метод регенерації адсорбенту, (англ. Temperature Swing Regeneration – регенерація коливанням температури)

PSR – метод регенерації адсорбенту, (англ. Pressure Swing Regeneration – регенерація коливанням тиску).

Вступ

Останнім часом все більшої уваги приділяється використанню альтернативних видів палива із залученням нетрадиційних джерел енергії. До таких джерел, безумовно, із-за наявності в їх складі органічних речовин, відносяться відходи життєдіяльності міст - муловий осад стічних вод з очисних споруд та відходи спиртового виробництва - барда. Ці відходи часто не утилізуються, а складаються на мулових полях очисних споруд та відстійниках, що спричиняє забруднення ґрунтових вод та довкілля. За кордоном, зокрема в країнах ЄС, стимулюється використання відходів для виробництва енергії, про що свідчать директива Європарламенту про відновлювану енергетику та Рамкова директива про відходи. Державна політика України в галузі альтернативної енергетики визначена Законом "Про альтернативні види палива", яким передбачається до 2020 року збільшення їх частки в енергетичному балансі України до 20% від загального обсягу споживання палива. По цій причині дослідження з вивчення можливостей одержання енергії з відходів активно проводяться у всіх країнах.

В роботі проведенні дослідження з розробки енергоефективних технологій, що базуються на стимулюючій дії фізичних полів, що дозволяє при їх використанні значно зменшити витрати енергії на виробництво та тривалість виробничі циклів. Крім цього використання стимулюючої дії полів дозволяє створити більш екологічно чисті технології. Виконана робота узагальнює одержані в попередні роки результати авторів роботи.

Робота присвячена розробці таких технологій:

- 1) одержання рідкого котельного альтернативного біопалива з суміші біогенних та вуглеводневих відходів;
- 2) модифікації вугільного пилу під дією електромагнітного поля НВЧ діапазону;
- 3) безперервної регенерації молекулярних сит, що використовуються при виробництві абсолютного спирту, з використанням енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону;

4) плазмової газифікації вугілля на основі використання енергоефективного НВЧ-плазмотрону.

Робота з розробки альтернативного біопалива з мулового осаду стічних вод були розпочаті в 2006 році. За цей час була розроблена технологія одержання композитного альтернативного біопалива, що вироблялося при утилізації мулового осаду міських стічних вод на очисних спорудах міста. Розроблена технологія ґрунтувалась на використанні кавітаційної обробки суміші мулового осаду стічних вод з вуглеводневим добавкою. В якості таких вуглеводневих добавок можуть використовуватися відходи нафтопродуктів (відпрацьовані машинні масла всіх видів, нафтошлам, важка нафта, мазути будь-яких марок та ін.), а також відходи рослинних і тваринних жирів. В результаті такої обробки, яка здійснюється технологічним комплексом, виходить рідкий горючий продукт - альтернативне біопаливо (АБТ), близьке за своїми споживчими якостями до топкового мазуту М100. Це паливо придатне для спалювання на всіх стандартних рідинних парових та водогрійних котлах, що використовуються в Україні.

В 2008 році зразки каналізаційного осаду та одержані зразки альтернативного біопалива (АБП) були досліджені в акредитованих лабораторіях Харківської обласної санепідемстанції, ДП «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», продукти згоряння АБП досліджені в акредитованій лабораторії Українського науково-дослідного інституту екологічних проблем. Протоколи досліджень наведені в Додатку А.

Технологія захищена патентами №№ 83980, 89917, 82856, 95587, 101680, 109389, 113731 [1] – [5], [8], [9] та Заявкою а201607953 [10]. На альтернативне біопаливо оформлені та затверджені Технічні умови ТУ У 24.1-02071197-001: 2009 «Біопаливо альтернативне АБТ».

Перевагою розробленої технології є комплексне рішення соціально значущих проблем: енергетичної – за рахунок виробництва відносно дешевого екологічного альтернативного біопалива та екологічної – за рахунок повної утилізації осадів каналізаційних стоків.

Основним недоліком цієї технології є використання в якості вуглеводневої добавки рідких вуглеводнів, що створює логістичні та організаційні труднощі пов'язані з їх доставкою та використанням. Крім того, що відходів нафтопродуктів недостатньо для їх промислового використання, їх ціна відносно висока.

В межах виконаної НДР ці труднощі переборюються використанням більш технологічної вуглеводневої добавки – модифікованого вугільного пилу. Технологія одержання якого буде розглянута нижче.

Розпочаті роботи з регенерації молекулярних сит для спиртової промисловості при виробництві біоетанолу. В результаті цих робіт запропонована технологія НВЧ-регенерації цеоліту, яка була запатентована [6] та розроблений спосіб регенерації цеолітів [7].

В результаті дослідження одержання НВЧ-плазми запропонований більш ефективний плазмотрон.

1 Одержання рідкого альтернативного котельного палива з біогенних відходів з використанням модифікованого вугільного пилу

1.1 Впливи фізичних полів на інтенсифікацію фізико-хімічних процесів

1.1.1 Впливи електромагнітних полів і акустичних коливань

В технологічних процесах речовини, що обробляються з метою зміни їх стану, властивостей та складу під впливом багатьох факторів: електромагнітного випромінювання, акустичних коливань високих температур, тиску та ін., а також фізичних факторів, що впливають на тепло-масообмін, подрібнення, змішування та ін. Переважна більшість хімічних процесів (механічні, тепло-масообмінні та ін.) проходить на "фізичному" рівні, тобто не зв'язані з хімічними перетвореннями. В механічних процесах, таких як диспергація, подрібнення, змішування та утворення неоднорідних багатофазових систем потрібний фізичний вплив для активного їх перемішування з використанням спеціальних захо-

дів для створення потужних коливальних потоків, вихрів та мікроциркуляцій необхідної інтенсивності.

При впливі на мікроскопічному рівні, на рівні окремих атомів при проходженні хімічних реакцій, активізація атомів здійснюється із-за поглинання квантів енергії. Для цього можуть використовуватися електричні та магнітні поля, акустичні коливання і електромагнітне поле. На рис. 1.1 зображена порівняльна діаграма інтенсифікації технологічних процесів акустичних коливань (А) і електромагнітного поля (ЕМ) [11].

В роботі [12] відмічено, що всі фізико-хімічні ефекти, що виникають при енергетичних впливах на речовини, можна розділити на чотири ієрархічних рівні:

- 1) сукупність явищ на атомарному-молекулярному рівні; ефекти в масштабі надмолекулярних або глобулярних структур;
- 2) безліч фізико-хімічних явищ, пов'язаних з рухом одиничного включення дисперсної фази, з урахуванням хімічних реакцій і явищ міжфазного енерго- і масопереносу;

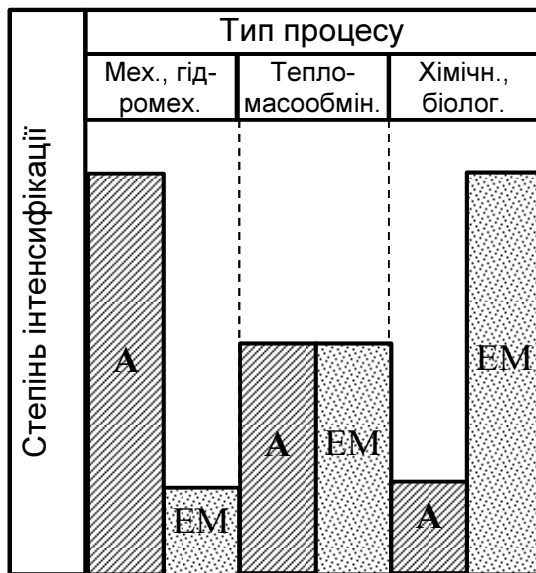


Рисунок 1.1 – Порівняльна діаграма інтенсифікації технологічних процесів акустичних коливань (А) і електромагнітного поля (ЕМП)

В роботі [12] відмічено, що всі фізико-хімічні ефекти, що виникають при енергетичних впливах на речовини, можна розділити на чотири ієрархічних рівні:

3) сукупність явищ на атомарному-молекулярному рівні; ефекти в масштабі надмолекулярних або глобулярних структур;

4) безліч фізико-хімічних явищ, пов'язаних з рухом одиничного включення дисперсної фази, з урахуванням хімічних реакцій і явищ міжфазного енерго- і масопереносу;

5) фізико-хімічні процеси в сукупності включень, які рухаються в потоці основної фази;

6) сукупність процесів, що визначають макрогідродинамічний стан речовин в реакторі.

Види впливів, фізико-хімічні ефекти, що виникають в результаті цих впливів та їх результати наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація енергетичних впливів на речовини

Види впливу	Фактори впливів	Фізико-хімічні ефекти	Результати впливу
Механічний	Удар, здвиг, стиснення, розтягання, вібрація, формування потоків з визначеною траєкторією, швидкістю	Гідроудар, турбулентність, ефект Кармана, трибоефект, ефект Рейнольдса, автоколивання, активація, накопичення дефектів структури, концентрація напруг	Пульсації тиску і швидкості потоку рідини, трансформація кінетичної енергії в потенційну та ін. Енергетичне накачування
Акустичний	Пружні та квазіпружні коливання в рідині	Акустичні хвилі, акустична турбулентність, кавітація, кумулятивний ефект, звукохімічні реакції, резонанс, розклинюючий тиск, автоколивання, капілярний ефект	Пульсації тиску, кумулятивний удар, зміна фізико-хімічних властивостей, активація, трансформація акустичної енергії в механічну, соноліз
Електричний	Електричні поля різної структури	Електросепарація, електрофорез, електроосмос, ефект Юткіна, електрокоагуляція, електрохімічні ефекти, електронагрів	Зміна фізико-хімічних параметрів, трансформація електроенергії в механічну, теплову, електричну, хімічну та інші види енергії
Магнітні	Магнітні поля різної структури	Ефект Риги–Ледюка, магнітосепарація, магнітогідродинамічний ефект, магнітохімічні ефекти (в т.ч. магнітна роторна преди-	Зміна фізико-хімічних параметрів, трансформація електроенергії в механічну, теплову, електричну, хімічну та інші види енергії

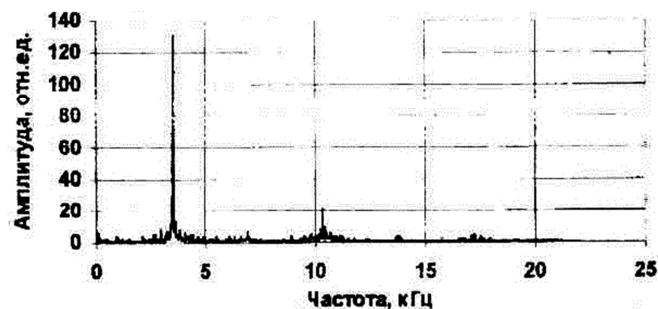
Види впливу	Фактори впливів	Фізико-хімічні ефекти	Результати впливу
		соціація)	
Теплові	Нагрівання, охолодження (теплові потоки)	Теплопередача, теплопровідність, теплове випромінювання, конвекція, ефект Сорі, ефект Марангоні, термoeфект	Кипіння, конденсація, фазові переходи, інверсія фаз, зміна фізико-хімічних властивостей, трансформація теплової енергії в механічну, радіаційну та ін.
Електромагнітні	Електромагнітні хвилі, інфрачервоне, світлове, ультрафіолетове, рентгенівське випромінювання	Іонізація, енергетичне нагачування, фотохімічні реакції, збудження молекул	Зміна фізико-хімічних властивостей речовини, активація, випромінювання, трансформація енергії випромінювання в теплову та інші види.

1.1.2 Вплив кавітації на інтенсифікацію фізико-хімічних процесів

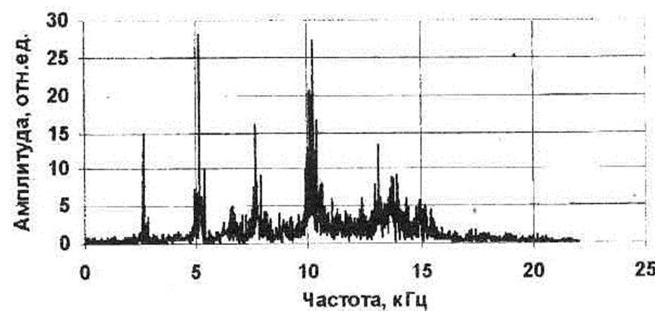
У гідродинамічних кавітаторах роторного типу утворюється два типи кавітації: гідродинамічна і акустична. Утворення кавітації спричиняється за рахунок розвиненої турбулентності, пульсацій тиску і швидкості потоку рідини в каналах кавітатора, інтенсивної кавітації, ударних хвиль і вторинних нелінійних акустичних ефектів [13].

При обертанні ротора, його канали періодично поєднуються з каналами статора, в результаті чого тиск та швидкість проходження рідини в каналах кавітатора зазнають різких змін, утворюючи при цьому гідравлічні коливання. При різкій зміні високого тиску в рідині на низький, при падінні тиску нижче граничного виникає кавітація. Виникають численні кавітаційні бульбашки, які збільшуються в розмірах до моменту коли тиск в рідині починає зростати. Зменшення в розмірах кавітаційної бульбашки відбувається з великою швидкістю й супроводжується звуковим імпульсом (гідравлічним ударом) тим сильнішим, чим менше газу містить бульбашка. При розвинутій кавітації виникає та захоплюється безліч бульбашок, що супроводжується акустичними коливаннями із суцільним широким спектром до декількох сотень кГц. На рис. 1.2 зображений спектр таких коливань, характерний для роторного кавітатора. Як видно з рисунку спектр коливань в роторі визначається перетворенням збуджуючого гар-

монійного акустичного сигналу в складний спектр ультра- і субгармонічних складових, а також шумову складову спектра [14]. Спектр, зображений на рис. 1.2а, відповідає режиму при якому відсутня фаза різкого схлопування кавітаційних пухирців. Спектр в цьому випадку представляє собою вузьку смугу на частоті основної гармоніки, яка визначається частотою перекриття отворів ротора і статора кавітатора. Вищі гармоніки коливань слабо виражені. На рис. 1.2б зображений спектр, отриманий в режимі початку кавітації. При цьому амплітуда основної гармоніки нижча, в порівнянні з першим випадком. Оскільки площі під кривими однакові за площею (нормовані), то перехід до початку масового схлопування кавітаційних пухирців можна уявити як перерозподіл енергії гармонійної хвилі в бік гармонік більш високих частот. На рис. 1.2в зображений спектр коливань, що відповідає режиму розвиненої кавітації. При цьому амплітуда основної роторної гармоніки ще більш знижується, але виникає суцільна шумова смуга в високочастотній області.

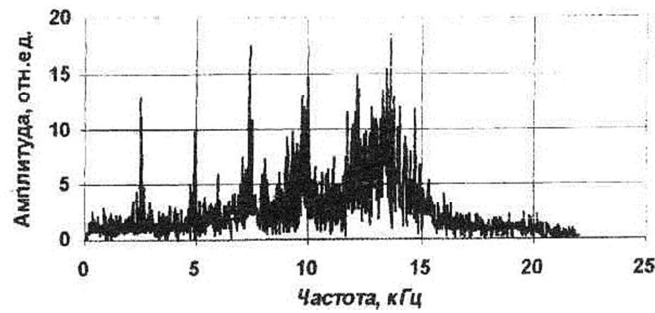


а)



б)

Рисунок 1.2а, б – Спектри гідралічних коливань кавітатора:
а – при відсутності кавітації; б – початок виникнення кавітації



в)

Рисунок 1.2 в – Спектри гідралічних коливань кавітатора:
в – розвинута кавітація.

При схлопуванні кавітаційних бульбашок створюються короткочасні (порядку 10^{-6} с) імпульси тиску (до 10^3 МН/м² і вище), які здатні спричинити руйнування навіть міцних матеріалів. Схлопування бульбашок супроводжується адіабатичним нагріванням газу в бульбашках до температури порядку 10^4 °С, його іонізацією, що і викликає світіння бульбашок при кавітації (звукolumінесценцію).

Ці процеси обумовлюють виникнення в рідині різних фізико-хімічних і хімічних ефектів, в тому числі емісію світла (сонолюмінесценцію), ерозію поверхонь, диспергування твердих тіл, появи різних хімічних, біологічних та інших ефектів.

Кавітаційно-кумулятивний вплив енергії бульбашок, що схлопуються, дозволяє інтенсифікувати багато технологічних процесів, що протікають в рідких середовищах. Це, насамперед, масообмінні процеси, коли при схлопуванні кавітаційних бульбашок утворюються кумулятивні мікропотоки і мікрровихрі з великою щільністю енергії, що дозволяє отримувати високу однорідність та гомогенність рідини. Під дією гідродинамічного впливу кавітаційно-кумулятивних мікропотоків частинки твердої або пружної фази, а також їх скупчення, що містяться в оброблюваній рідині, здрібнюються. В результаті чого отримують високодисперсні, гомогенні рідкі суміші. Причому, витрати енергії на кавітаційну обробку в порівнянні з ультразвуковою обробкою менші на порядок, а технологічне обладнання – конструктивно простіше.

Як відмічено в роботі [15] кавітаційні бульбашки можуть перебувати в одному з трьох станів: пульсації, розщеплення і схлопування, при цьому в кавітаційній області можуть одночасно існувати бульбашки, що знаходяться в різних станах. Кожному стану бульбашки співвідносяться свої фізико-хімічні ефекти (див. табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Відповідність фізичних ефектів, що супроводжують стан кавітаційної бульбашки

Стан бульбашки	Фізичні ефекти	Технологічні умови	Технологічні ефекти
Пульсації	Сильні суб- та ультрагармоніки низьких порядків. Рівень суцільного спектру шуму незначний. Інтенсивність сонолюмінесценції незначна, фаза виникнення спалахів випадкова.	1. Високий газовміст. 2. Низький статичний тиск. 3. Низька частота 4. Високий тиск насичених парів.	Дегазація Емульгування. Випаровування.
Розщеплення	Інтенсивне світіння. Характер кавітаційного шуму залежить від умов і може значно змінюватися.	1. Високий вміст газу. 2. Великий коефіцієнт поверхневого натягу.	Хімічні реакції. Емульгування.
Схлопування	Інтенсивна суцільна частина спектру кавітаційного шуму. Суб- и ультрагармоніки слабо виражені. Світіння незначної інтенсивності.	1. Низький вміст газу. 2. Великі в'язкість й коефіцієнт поверхневого натягу.	Диспергація твердих часток фази. Гетерофазні хімічні реакції.

Таким чином, кавітаційна обробка рідин є високоефективним технологічним засобом широкого застосування, що дозволяє вдосконалювати старі і створювати нові технології з корисними властивостями або характеристиками кращими, ніж при використанні інших відомих технологій.

1.2 Резонансна магніто-акустична обробка рідких речовин

Останнім часом все більш широке застосування знаходить такі види магнітного резонансу, як електронний, протонний та акустичний. Магнітний резонанс являє собою вибіркове поглинання електромагнітних або акустичних хвиль певної довжини, речовиною, що перебуває в магнітному полі. Він обумовлений ротацією обумовлений ротацією протонів і електронів речовини навколо своєї осі та наявністю в них спінового й магнітного моментів, які утворюють спінову систему речовини. Збудження магнітного резонансу електромагнітним

полем відбувається за рахунок магнітного впливу на магнітні моменти протонів або електронів атомів речовини, які знаходяться в магнітному полі, а акустичними коливаннями – за рахунок спін-фононного впливу на їхні спіни.

1.2.1 Збудження магнітного резонансу в рідині

Збудження магнітного резонансу в рідині відбувається під впливом електромагнітних хвиль або акустичних хвиль. Рідина повинна знаходитися в магнітних полях: поздовжнього постійного та змінного поперечного. Під дією збуджуючих хвиль протони й електрони в ортогональних магнітних полях прецесують зі своїми гіромагнітними частотами. Гіромагнітні частоти пов'язані з напруженістю постійного магнітного поля. Для порушення відповідного магнітного резонансу частота змінного магнітного поля повинна збігатися з гіромагнітною. При цьому відбувається резонансний зеємановський розподіл часток по напрямках (по полю або проти поля) і по відповідних магнітних енергетичних рівнях. Квантові переходи протонів або електронів з нижнього на верхній відбувається при поглинанні кванта електромагнітної енергії рівної різниці енергій між зеєманівськими рівнями, а з верхнього рівня на нижній супроводжуються випромінюванням, так званих роторних хвиль. Роторні хвилі мають магнітну природу в ближній зоні й електромагнітну – у дальній і можуть бути виявлені вимірювальними пристроями.

При розв'язанні багатьох практичних задач в якості поздовжнього постійного магнітного поля використовується завжди присутнє геомагнітне поле (ГМП). Змінне магнітне поле одержують індукційними або акустичними перетворювачами, на які подаються електричні сигнали резонансної частоти. Частота відповідного магнітного резонансу визначається напруженістю ГМП. Для природних умов геомагнітного поля діапазон резонансних частот протонів розташований в області наддовгих хвиль, а електронів - в області середніх хвиль.

Очевидно, що для виконання умов магнітного резонансу в рідких середовищах необхідно враховувати різні фактори, що викликають невизначеність напруженості ГМП. Тому, в ході виконання досліджень були проаналізовані ці фактори й показана можливість збудження й дистанційного управління магніт-

ним резонансом в умовах апіорної невизначеності напруженості ГМП.

1.2.2 Фактори апіорної невизначеності напруженості геомагнітного поля й методи їхнього відбивання

Геомагнітне поле можна розглядати як таке, складається з складових: головного поля, аномального й роторного.

Вважається [16], [17] що основне поле зумовлене механіко-електромагнітними процесами у зовнішньому шарі ядра Землі, аномальне пов'язується намагніченістю гірських порід земної кори, роторне – зумовлене електричними струмами, що існують у навколоземному космічному просторі, та індукованими у мантиї Землі.

Варіації ГМП й похибки його вимірювання є основними факторами апіорної невизначеності його напруженості. Так, наприклад, напруженість ГМП на магнітному екваторі становить близько 27,1 А/м, а в магнітних полюсів – близько 52,5 А/м. У деяких районах, названих магнітними аномаліями, напруженість ГМП різко зростає. Зокрема, у районі курської магнітної аномалії вона може зростати до 160 А/м. Середні по зміни ГМП становлять 40–50 гам у рік. Часові варіації ГМП можуть виникати в інтервалі від кількох секунд до тисячоріч.

Крім того, невизначеність напруженості геомагнітного поля пов'язана з відсутністю даних щодо екрануючих властивостей робочих приміщень та установок, оскільки споруд можуть ослаблювати магнітне поле в 1,5–20 разів. Зокрема, у підземних спорудах метрополітену рівні природних ГМП можуть бути знижені в 2–5 разів, у житлових будинках, виконаних із залізобетонних конструкцій в 1,3–2 рази, у кабінах бурових установок і екскаваторів в 1,8–8,5 разів, у кабінах швидкісних ліфтів 15–19 разів [18].

На рівень ГМП впливає також висота знаходження робочого приміщення відносно земної поверхні.

Рідкі робітничі середовища (рідини) перебувають у ГМП із невизначеним рівнем у різних трубопроводах і вузлах установок.

На точність вимірювання напруженості ГМП можуть впливати:

– варіації роторної складової, що визначає рівень фонових випромінювань атмосфери; сонячної та космічної активності, різні природні й штучні перешкоди, створювані джерелами магнітних і електромагнітних полів, а також потоками нейтронів, радикалів та іонрадикалів.

Врахування і корекція факторів невизначеності напруженості ГМП здійснюється, наприклад, шляхом складання карт середньорічних змін на основі інформації з обсерваторій та даних пунктів спостережень. Проте часто користувачам ці карти не доступні. Тому, для усунення невизначеності доцільно використовувати спеціальні методи, що дозволяють виключити операцію вимірювання напруженості ГМП. До них відносяться, насамперед, методи послідовного й паралельного збудження, засновані на використанні широкосмугові електромагнітні й акустичні випромінювання з рівномірним спектром.

Сутність послідовного збудження полягає в тому, що можливі резонансні частоти знаходяться в смузі частот налаштування, обслуговуються послідовно (по черзі). Цей метод може бути реалізований, наприклад, на основі використання генераторів електричних сигналів індукційних або акустичних перетворювачів. У процесі налаштування генератора його частота, плавно змінюючись, періодично збігається з гіромагнітного частотою речовин робочого середовища, збуджуючи магнітний резонанс.

Сутність паралельного збудження полягає в тому, що всі можливі резонансні частоти речовин, що містяться в робочому середовищі, перекриваються широкосмуговими сигналами генераторів. При цьому умова магнітного резонансу виконується автоматично без додаткового налаштування. Для реалізації методу паралельного збудження можуть бути використані безперервні псевдовипадкові сигнали і широкосмугові шуми, а також хаотичні імпульсні послідовності, що мають рівномірний спектр в смузі можливих резонансних частот.

1.2.3 Створення пристрою магніто-акустичної обробки в складі установки одержання біопалива із біогенних відходів

Одним із додаткових способів стимуляції фізико-хімічних процесів у робочому середовищі кавітаційного ректора в технологічному процесі вироблен-

ня альтернативного біопалива є збудження різних типів резонансів, в тому числі магнітних. У робочому середовищі одночасно можуть порушуватися кілька типів магнітних резонансів, наприклад, протонний, електронний, магнітогідродинамічний та ін.

Для вирішення цього завдання був розроблений пристрій магніто-акустичної обробки, який включений в установки одержання рідкого альтернативного біопалива з біогенної сировини в контур подачі сировинної суміші в кавітаційний реактор. Цей спосіб одержання альтернативного біопалива описаний в патенті авторів [3]. При цьому в робочому середовищі, що проходить через пристрій, збуджуються різні типи магніто-акустичних резонансів під дією змінних магнітних і електромагнітних полів та акустичної кавітації в діапазонах звукових і ультразвукових частот. Зміни, що виникають при цьому, в робочому середовищі досліджені й висвітлені авторами в попередніх дослідженнях [19].

1.2.4 Розробка пристрою магніто-акустичної обробки робочого середовища

Розроблений пристрій магніто-акустичної резонансної обробки робочого середовища, що знаходиться в магнітних полях під дією електромагнітних і акустичних хвиль в діапазонах звукових і ультразвукових частот. При виконанні умов виникнення протонного магніто-акустичного ~~резонанс~~ або електронного магніто-акустичного резонансів відбувається резонансне поглинання енергії електромагнітних й акустичних хвиль робочим середовищем, що призводить до зміни його стану.

Схема розробленого пристрою приведена на рис. 1.3. Основними елементами пристрою магніто-акустичної резонансної обробки є: робоча камера пристрою, яка являє собою металеву ємність – 1; циліндричний магніт – 2; вібровипромінювач звуковий – 3; вібровипромінювач ультразвуковий – 4; антена рамкова – 5; соленоїд – 6; генератор звукових частот – 7; генератор радіочастот – 8.

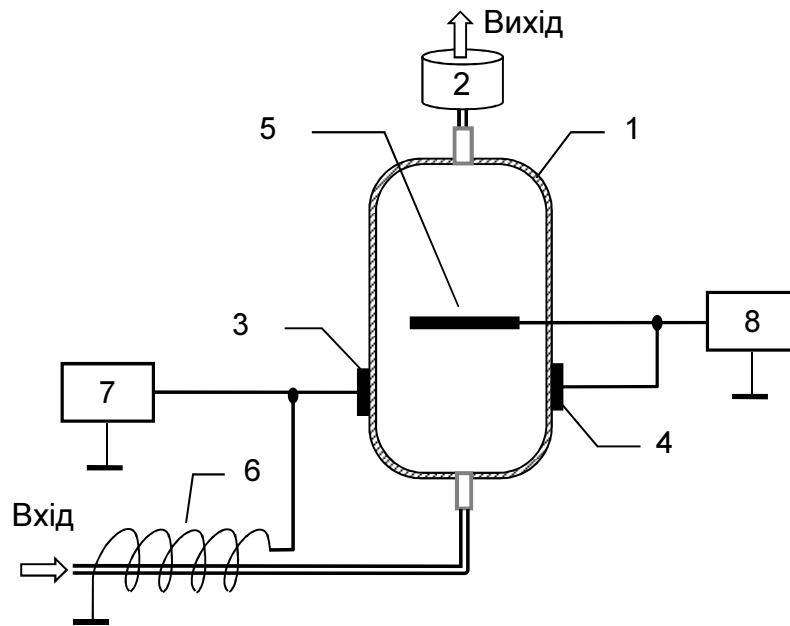


Рисунок 1.3 – Схема пристрою магніто-акустичної резонансної обробки

Конструктивно ємність пристрою 1 розміщена на металевій основі; акустичні вібровипромінювачі 3 і 4 закріплені на зовнішній поверхні робочої камери пристрою; рамкова антена 5 розміщена всередині робочої камери пристрою; соленоїд 6 розміщений на діаманітному каркасі на вході в робочу камеру 1; циліндричний магніт 2 закріплений різьбовим з'єднанням на виході робочої камери 1; генератор звукових частот 7 і генератор радіочастот 8 жорстко закріплені на металевій основі пристрою. Для забезпечення максимальної реакційної здатності пристрою акустичні вібровипромінювачі 3 і 4 фокусуються в активній зоні, що знаходиться в центрі кола рамкової антени 5.

Принцип дії пристрою магніто-акустичної обробки робочого середовища такий. Робоче середовище, що обробляється, являє собою багатофазну систему з вмістом твердих дрібнодисперсних часток органічних біогенних відходів, рідких вуглеводнів, води та ін. проходить трубопроводом через магнітний соленоїд 6 на вхід ємності пристрою 1. Магнітний соленоїд 6 впливає змінним магнітним полем звукової частоти на робоче середовище в трубопроводі. Відомо [18], що під впливом магнітного поля відбувається прецесія електронів в молекулах, які набувають індукований магнітний момент, перпендикулярний напрямку магнітного поля. Внаслідок цього енергія водневих зв'язків змінюється, відбува-

ється їх послаблення й можливий розрив. Це тягне за собою зміну взаємного розташування молекул, а отже, і структури речовин, що обумовлює зміни параметрів робочого середовища, таких як щільність, поверхневий натяг, в'язкість та інших властивостей, це відбувається внаслідок збудження протонного магніто-акустичного резонансу. Багатофазова система (робоче середовище) деякий час зберігає набуті властивості, так як ці процеси мають релаксаційний характер. Дослідження показали, що найбільш помітні зміни властивостей після впливу магнітного поля відзначалися на границі розділу фаз – твердої й рідкої.

Пристрій магніто-акустичної обробки підсилює процеси гетеролітичної дисоціації води, а також деструкції кластерів і СН зв'язків макромолекул з утворенням іонів H^+ , які виникають в кавітаційному реакторі.

Збуджена магнітним полем соленоїда оброблювана речовина надходить в робочу камеру пристрою і потрапляє під вплив електромагнітних широкосмугових випромінювань рамкової антени 5. Ці випромінювання збуджують в робочому середовищі електронний магніто-акустичний резонанс, який викликає процеси гемолітичної дисоціації води з утворенням атомарного водню і деструкції СС зв'язків високомолекулярних вуглеводнів і макромолекул робочого середовища з утворенням низькомолекулярних вуглеводнів і стабілізацією іонами і радикалами водню.

При проходженні робочого середовища через активну зону пристрою ці процеси посилюються із-за акустичних випромінювань вібровипромінювачів звукових 3 і ультразвукових частот 4. Віддаляючись від активної зони оброблювана речовина все ще перебуває під впливом електромагнітного випромінювання від рамкової антени 5.

На виході з пристрою оброблювана речовина додатково піддається впливу постійного магнітного поля циліндричного магніту, що руйнує міцні іонні кластери твердої дисперсної фази за рахунок збудження МГД резонансу. З виходу пристрою магніто-акустичної обробки оброблювана речовина подається в кавітаційний реактор.

1.2.5 Схема контролю й управління пристроєм магніто-акустичної обробки

Схема контролю й управління пристроєм магніто-акустичної обробки приведена на рис. 1.4.

Живлення реактора здійснюється від однієї фази електромережі напругою 220В 50 Гц. Через окремий вимикач напруга живлення подається на паралельно включені генератори акустичного шуму РІАС-2ГС і смуговий радіочастотного шуму РІАС-1ГК, на схемі позначені ГЗЧ і ГРЧ відповідно.

Генератор акустичного шуму звукової частот РІАС-2ГС має два виходи, до яких підключаються п'єзоелектричний і електро механічний вібровипромінювачі звуку.

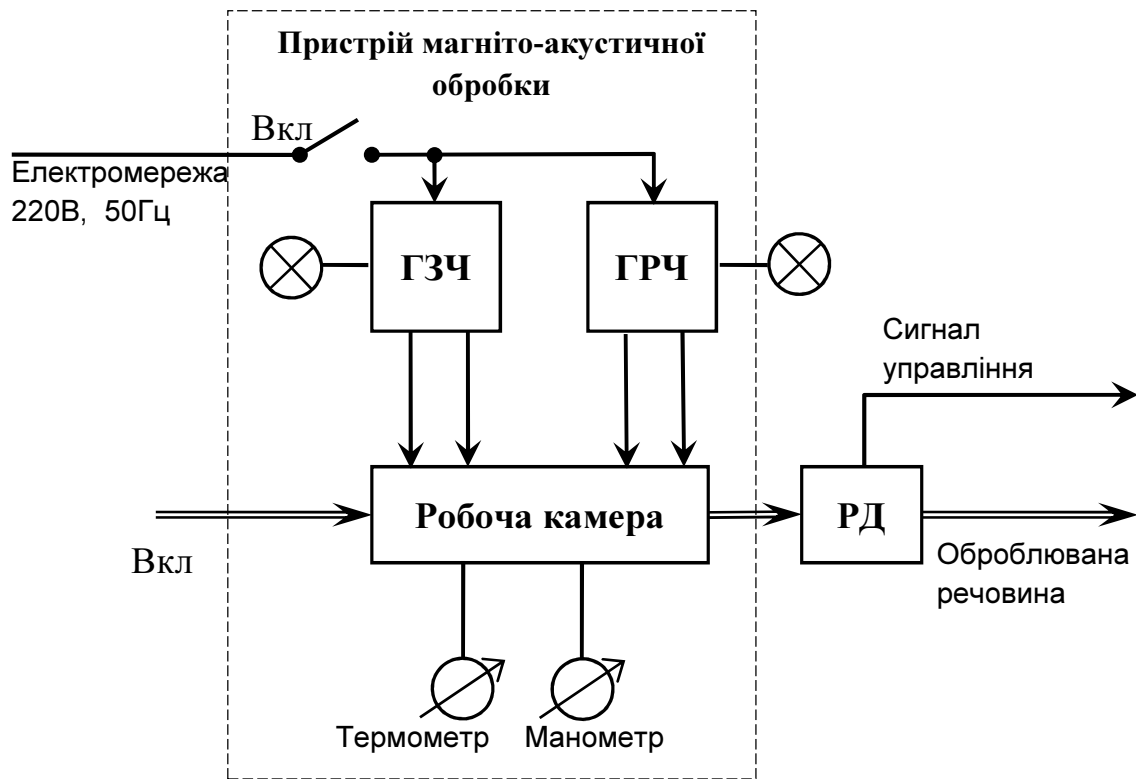


Рисунок 1.4 – Схема контролю й управління пристроєм магніто-акустичної обробки

Генератор забезпечує глибину регулювання рівня шумового сигналу в робочому діапазоні частот не менше 20 дБ.

Час технічної готовності генератора - не більше 5 секунд.

Генератор смуговий радіочастотного шуму РІАС-1ГК має два виходи, до яких підключаються п'єзоелектричний вібровипромінювач ультразвуку і рамкова антена.

Живлення реактора здійснюється від однієї фази електромережі напругою 220В 50 Гц. Через окремий вимикач напруга живлення подається на паралельно включені генератори акустичного шуму РІАС-2ГС і смуговий радіочастотного шуму РІАС-1ГК, на схемі позначені ГЗЧ і ГРЧ відповідно.

Генератор акустичного шуму звукової частот РІАС-2ГС має два виходи, до яких підключаються п'єзоелектричний і електромеханічний вібровипромінювачі звуку.

Генератор забезпечує глибину регулювання рівня шумового сигналу в робочому діапазоні частот не менше 20 дБ.

Час технічної готовності генератора - не більше 5 секунд.

Генератор смуговий радіочастотного шуму РІАС-1ГК має два виходи, до яких підключаються п'єзоелектричний вібровипромінювач ультразвуку і рамкова антена.

Генератор забезпечує глибину регулювання рівня шумового сигналу в робочому діапазоні частот не менше 20 дБ.

Час технічної готовності генератора - не більше 5 секунд.

Прилад має вбудовану систему автоматичного контролю і звукову індикацію цілісності антени і вібровипромінювачів.

Конструктивною основою пристрою магніто-акустичної обробки є його робоча камера в якості якої взятий мембранний вертикальний бак сепаратора 10 Бар ємністю 50л з граничнодопустимими температурами 10 –110°C.

Для захисту від надлишкового тиску в робочій камері встановлене реле тиску $\frac{1}{4}$ Н 29мм 8 (0,3) Бар (PRSW / MALE), яке видає сигнал управління в загальну систему управління установки одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів.

Макет пристрою магніто-акустичної обробки був виготовлений і випробуваний як автономно, так і в складі випробувального стенду для відпрацю-

вання технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів. Зовнішній вигляд пристрою зображений на рис. 1.5.

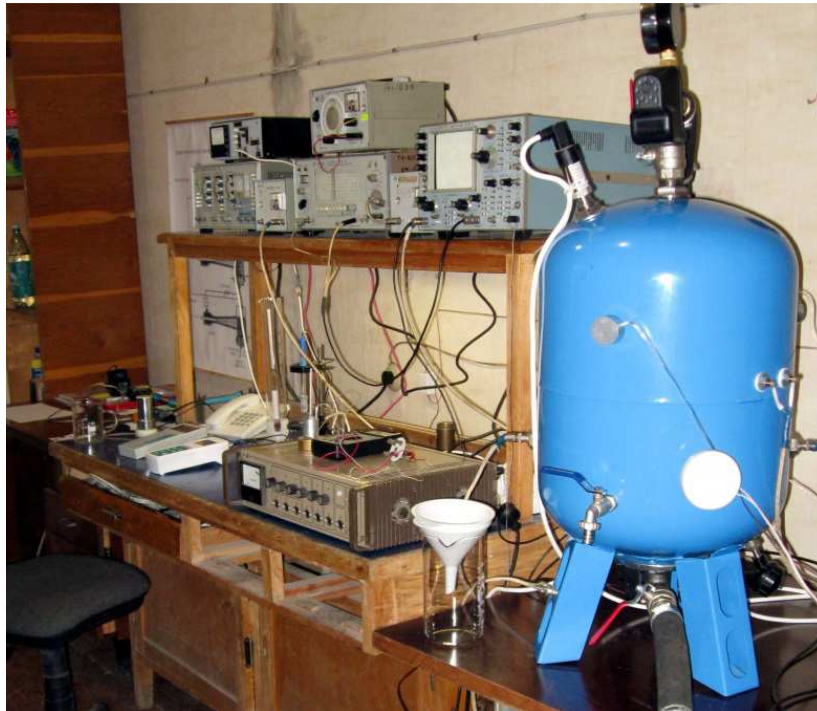


Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд пристрою
магніто-акустичної обробки

1.3.4 Експериментальні дослідження пристрою магніто-акустичної обробки

1. Вимірювання напруженості геомагнітного поля в місцях розміщення пристрою збудження магнітоакустичних резонансів і в робочій камері пристрою

Експериментальне визначення варіацій напруженості геомагнітного поля в місцях розміщення пристрою збудження магнітоакустичних резонансів і в робочій камері пристрою.

Дата досліджень: вимірювання проводились в період з 21.09.2016 р. по 28.09.2016 р.

Об'єкти досліджень – геомагнітне поле Землі.

Апаратура й прилади для проведення досліджень:

- магнітометр ферозондів, аналоговий, тип МФА2-2А, точність вимірювання $\pm 3,5\%$.

Методика проведення вимірів

1. Умови проведення експериментів:

- розташування вимірювального зонда магнітометра: ззовні й в робочій камері пристрою збудження магнітоакустичних резонансів;
- місця проведення вимірювань: приміщення дослідних лабораторій № 1 та №2.

2. Фізичні параметри, що реєструються:

- складові напруженості геомагнітного поля: H_V – вертикальна, H_H – горизонтальна;
- час вимірювання;
- температура.

Результати вимірювань

1. Результати вимірювання напруженості геомагнітного поля в приміщеннях лабораторій наведені в табл.1.3.

Таблиця 1.3 – Напруженості геомагнітного поля в лабораторних приміщеннях

Місце проведення вимірювань	Умови проведення вимірювань		H_V , А/м	H_H , А/м
	час	температура, °С		
Лабораторія №3	11 ³⁸	20-23	33,0	24,0
5-й поверх корпусу розміщення лабораторій	14 ⁴²	27-28	36,0	24,0
4-й поверх —«—	14 ⁵⁰	27-28	36,2	18,0
3-й поверх —«—	14 ⁵⁵	27-28	36,0	24,0
2-й поверх, приміщення лабораторії к. 220-1	11 ⁵⁷	25-27	37,5	24,0
2-й поверх, приміщення лабораторії, к. 220-5	12 ⁰¹	26-27	36,0	24,0
1-й поверх, корпусу розміщення лабораторій	15 ⁰⁰	27-28	30,0	21,0

2. Результати вимірювання напруженості геомагнітного поля ззовні й в робочій камері пристрою збудження магніто-акустичних резонансів наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Напруженості геомагнітного поля в пристрої збудження магнітоакустичних резонансів

Місце проведення вимірювань	Умови проведення вимірювань		Н _В , А/м	Н _Г , А/м
	час	температура, °С		
В центрі робочої камери	12 ¹⁵	26-27	30	18-42
В робочій камері біля стінки	12 ¹⁵	26-27	66	42
Зовні робочої камери пристрою	12 ¹⁵	26-27	36	24

Висновок

Існують зовнішні й внутрішні фактори, що впливають на резонансні властивості РМАР і необхідність їхнього обліку при організації резонансного впливу на робоче середовище.

1. Вертикальна й горизонтальна складові напруженості геомагнітного поля змінюються в залежності від місця розташування пристрою в широких межах, до 275 %.

2. Для комплексної резонансної магнітоакустичної обробки робочого середовища пристроєм доцільно використовувати широсмугові шумові сигнали звукових і ультразвукових частот.

Дослідження впливу різних видів магніто-акустичної обробки на властивості води

Мета досліджень

Визначення змін властивостей води при різних видах резонансної магніто-акустичної обробки.

Дата досліджень: з 21.10.16 по 21.11.16.

Об'єкти дослідження – вода.

Апаратура й прилади для проведення дослідження:

1. РН-вимірник типу «РН-150МП»;
2. Кавітатор 4-Т;
3. Генератори сигналів акустичного й радіошуму «РІАС»;
4. Мультиметр -М890G ;

5. Вимірювач температури;

Методика проведення вимірів

1. Умови проведення досліджень:

- магнітне поле для збудження резонансів - геомагнітного поле Землі;
- типи акустичних і електромагнітних сигналів - шумоподібні;
- діапазони частот сигналів - звуковий, ультразвуковий;
- об'єм робочої камери пристрою – 60 мл.

2. Режим роботи реактора – статичний (без заміни робочого середовища в процесі вимірювання).

3. Параметри, що вимірюються:

- температура;
- показник активності іонів водню (pH);
- окислювально-відновний потенціал (Eh);
- діелектрична проникність (ϵ);
- електрична провідність (χ);

4. Порядок проведення досліджень:

4.1. Види резонансної магнітоакустичної обробки: індукційна, електромагнітна, акустична, кавітаційна.

4.3. Оброблювана вода перебувала в скляній камері ємністю 60 мл і обновлялася перед кожною обробкою.

Результати досліджень

На рис. 1.6, 1.7, 1.8 і 1.9 наведені графіки залежностей нормованих параметрів води від часу експозиції при різних видах її магнітоакустичної обробки (залежності ΔpH , ΔEh , $\Delta \epsilon$, $\Delta \chi$ від часу обробки (Т, хв):

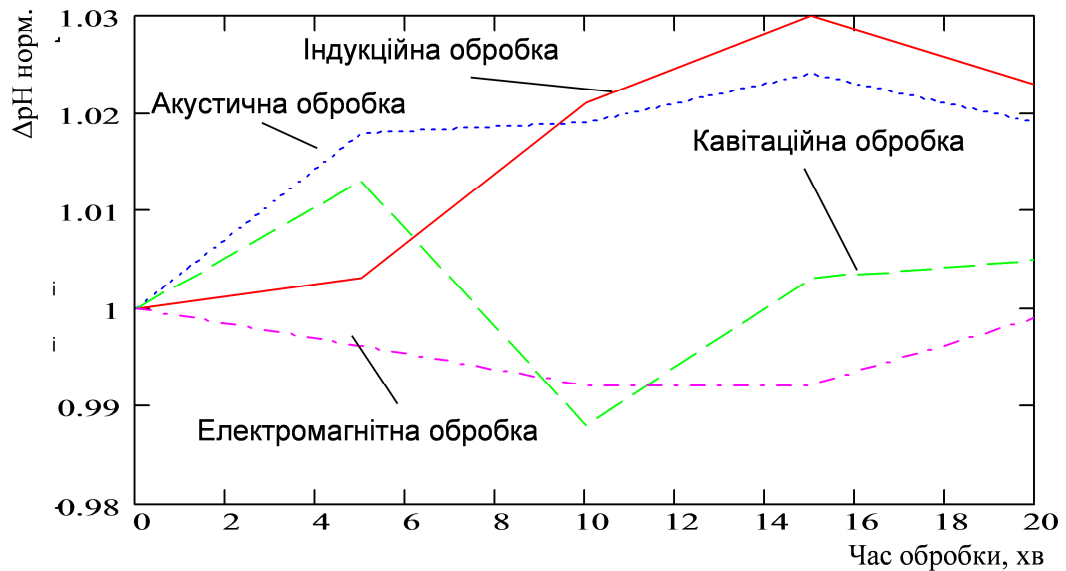


Рисунок 1.6 – Залежність $\Delta pH_{\text{норм}}$ від часу обробки для різних видів магнітоакустичної обробки

Коментарі:

1. При індукційній та акустичній обробках має місце плавне збільшення $\Delta pH_{\text{норм}}$ води (до 4%) протягом перших 15 хв обробки.
2. При кавітаційній обробці $\Delta pH_{\text{норм}}$ має вигляд коливального процесу (в межах 2%) протягом перших 15 хв.
3. При електромагнітній обробці $\Delta pH_{\text{норм}}$ плавне зменшується до 1% протягом перших 15 хв.

Висновки:

1. Максимальний ефект обробки досягається при часу експозиції від 5 хв. до 15 хв. Надалі має місце відновлення вихідного рН води.
2. Зміни рН води при обробці коливаннями в смузі звукових частот (індукційна і акустична) і в широкій смузі частот (електромагнітна і кавітаційна) носять протилежний характер.

На рис. 1.7 зображені залежності нормованого окислювально-відновного потенціалу $\Delta Eh_{\text{норм}}$ від часу обробки при індукційній, акустичній, кавітаційній і електромагнітній обробці.

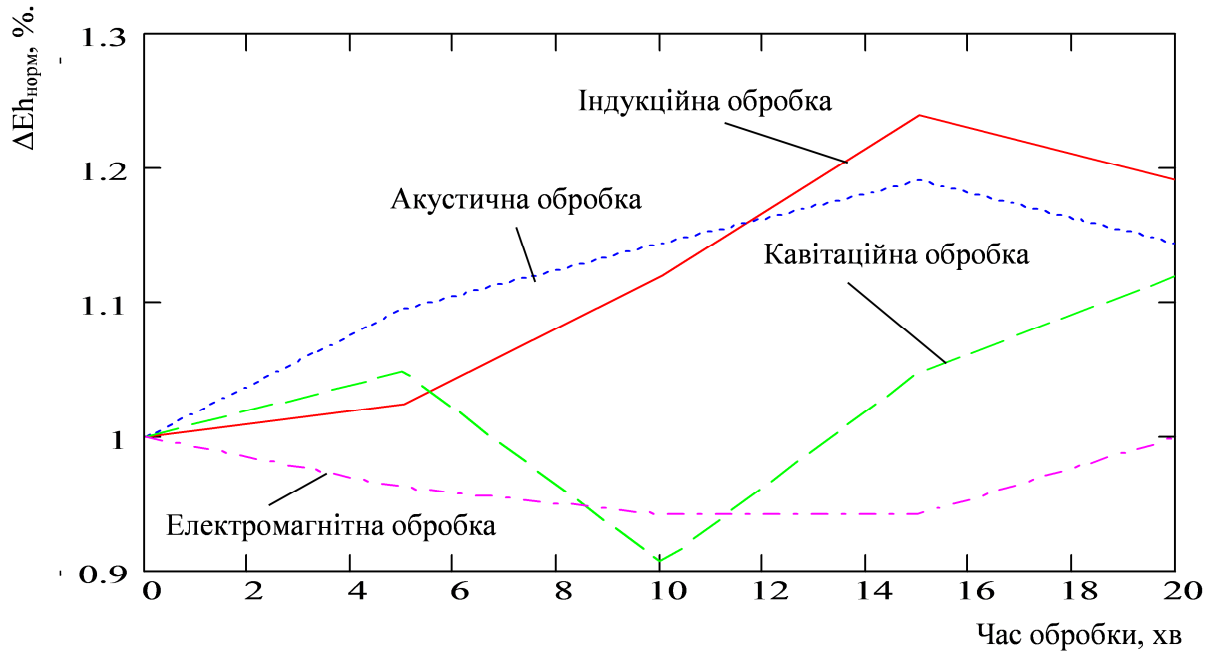


Рисунок 1.7 – Залежності $\Delta E_{h_{\text{норм}}}$ від часу обробки при індукційній, акустичній, кавітаційній і електромагнітній обробці

На рис. 1.8 зображені залежності нормованого окислювально-відновного потенціалу $\Delta \epsilon_{\text{норм}}$ від часу обробки при індукційній, акустичній, кавітаційній і електромагнітній обробці.

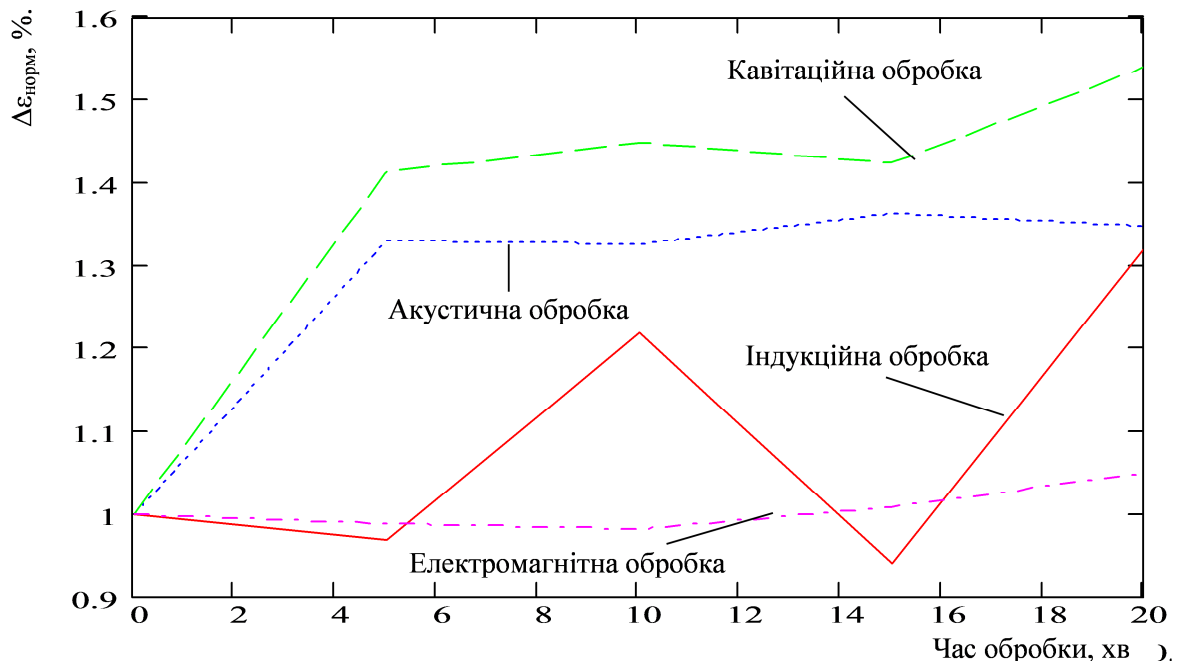


Рисунок 1.8 – Залежності $\Delta \epsilon_{\text{норм}}$ від часу обробки при індукційній, акустичній, кавітаційній і електромагнітній обробці

Коментар:

1. При індукційній обробці має місце коливальна зміна діелектричної проникності ϵ води протягом перших 5-20 хв.

2. При акустичній та кавітаційній обробці в перші 5 хв. відбувається збільшення діелектричної проникності ϵ на 30-40%.

Висновки:

1. Зміни діелектричної проникності ϵ при різних видах обробки різні, що свідчить про наявність різних механізмів виникновени додаткової дисоціації у воді і варіаціях її діелектричних властивостей в результаті обробки в межах 50%.

2. Діелектрична проникність ϵ є параметром води, чутливим до резонансної магніто-акустичної обробки.

На рис. 1.9 зображені залежності нормованого електропровідності $\Delta\chi_{\text{норм}}$ від часу обробки при індукційній, акустичній, кавітаційній і електромагнітній обробці.

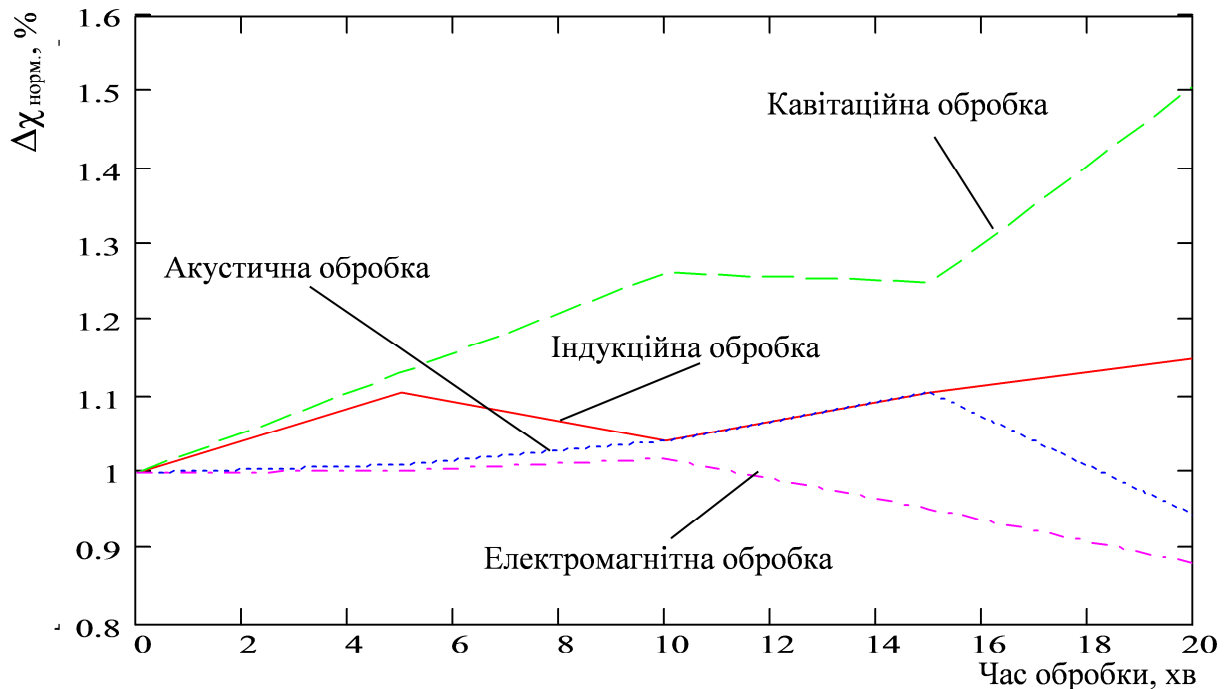


Рисунок 1.9 Залежності $\Delta\chi_{\text{норм}}$ від часу обробки при індукційній, акустичній, кавітаційній і електромагнітній обробці

Висновки

1. Резонансна магнітоакустична обробка створює передумови для зміни структури води (предисоціації) і підвищення активності іонів водню при незмінній температурі.
2. Зі збільшенням початкової температури швидкість зміни параметрів води більша
3. Максимальний ефект впливу обробки досягається при часі експозиції 5–15 хвилин.
4. Найбільш чутливим параметром до резонансної магнітоакустичної обробки є електрична провідність.
5. Найбільш ефективним видом резонансної магнітоакустичної обробки є комплексний вплив акустичних і електромагнітних хвиль у діапазонах звукових і ультразвукових частот.

1.3 Модифікація поверхні вугільного пилу рідкими вуглеводнями

1.3.1 Постановка задачі. Робоча гіпотеза

Вугільний пил різних марок вугілля, особливо антрациту, знаходить широке застосування в якості технологічного палива на потужних теплових електростанціях.

Певний практичний інтерес як енергетичної основи представляє вугільний пил некоксівного вугілля для одержання альтернативних видів палива при поєднанні з біогенними відходами, такими як мулові осади з міських очисних споруд, спиртова барда, відходи тваринницьких виробництв та інше. В більшості випадків вологість таких відходів в межах 75...80%. Одержані паливні композиції з використанням біогенних відходів в суміші з вугільним пилом мимовільно поступово поділяються на пастоподібну і дисперсну компоненти.

Одним із способів стабілізації такої композицій на основі використання вугільного пилу і підвищення їх теплотворної здатності є модифікація поверхні часток вугільного пилу рідкими вуглеводнями.

Для проведення досліджень обрані рідкі вуглеводні трьох видів, які не змінюють своїх характеристик при короткотривалому термічному впливі: соля-

рове масло – покриває поверхню часток вугільного пилу; соняшникова олія – здатна при тривалому термічному впливі до передполімерізації і полімерізації завдяки вмісту молекул з подвійними зв'язками; антраценове масло – здатне розчиняти вугільний пил при тривалому термічному впливі.

1.3.2 Можливі варіанти реалізації гіпотези модифікації вугільного пилу

Реалізація наміченої програми досліджень включала декілька серій експериментів.

Перша серія полягала у визначенні кількості адсорбованих рідких вуглеводнів на поверхні вугільного пилу після термічного нагріву до температури на 20...25°C нижче температури кипіння вибраного рідкого вуглеводню і безперервному перемішуванню компонентів. Співвідношення компонентів у всіх експериментах було однаковим і становило 75% вугільного пилу з аналітичної вологістю 6% і 25% рідкого безводного вуглеводню. Швидкість нагрівання суміші становила 8,5...10°C. Тривалість перемішування при кінцевій температурі встановлювалася однаковою і становила 0,5 години, що дозволяло рівномірно нанести рідкий вуглеводень на поверхню частинок вугільного пилу.

1.3.3 Модифікація вугільного пилу при конвективному нагріванні

Температурно-часовий фактор може впливати на зміну фізико-хімічного стану рідких вуглеводнів на поверхні вугільного пилу. Для перевірки цього припущення визначалося кількість адсорбованих рідких вуглеводнів на поверхні вугільного пилу при збільшенні часу контакту і постійній температурі.

Результати експериментів наведені в табл. 1.5 і наочно свідчать, що при зазначених температурах поверхню вугільного пилу зазнає змін, пов'язаних з властивостями рідких вуглеводнів.

Кількість адсорбованого солярного масла в межах 0,1 ... 0,15% можна пояснити дифузійними процесами в пористій структури вугільного пилу. Збільшення кількості адсорбованої соняшникової олії можна пояснити початковими процесами передполімерізації ненасичених вуглеводнів на окислених неоднорідностях поверхні вугільного пилу. Збільшення часу теплового впливу на вугі-

льний пил з соняшниковою олією при температурі 300 С може сприяти процесу предполімерізації з подальшою полімеризацією, що приводить до зміни агрегатного стану системи вугільний пил – соняшникова олія.

Таблиця 1.5 – Експериментальні результати впливу вуглеводню на вугільний пил при тривалості контакту 0,5 години

Рідкий вуглеводень	Температура суміші, °С	Тривалість контакту, год	Кількість адсорбованого рідкого вуглеводню, %	Загальна характеристика композиції
Солярове масло	250±5	0,5	0,1...0,15	Розсипчаста маса, що легко перемішується
Соняшникова олія	300±5	0,5	0,15...0,2	Розсипчаста, легко рухома маса
Антраценове масло	3000±5	0,5	0,25...0,3	Розсипчаста, легко рухома маса

Контакт гарячого антраценового масла з поверхнею вугільного пилу і гаданої адсорбції 0,25 ... 0,3% в першу чергу показує можливість початку розчинення вугільного пилу [20] під дією ароматичних вуглеводнів, що містяться в антраценовому маслі.

Для перевірки висловлених гіпотез проведені три серії дослідів, в яких час контакту вугільного пилу з рідкими вуглеводнями змінювалося від однієї до трьох годин при вище зазначених температурах. Після кожного часового інтервалу вимірювалась кількість адсорбованих рідких вуглеводнів і визначався агрегатний стан системи. Результати досліджень наведені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Експериментальні результати впливу вуглеводню на вугільний пил при тривалості контакту від 1 до 3 годин

Рідкий вуглеводень	Температура суміші, °С	Тривалість контакту, год	Кількість адсорбованого рідкого вуглеводню, %	Загальна характеристика композиції
Солярове масло	250±5	1	0,15...0,2	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Солярове масло	250±5	2	0,25...0,3	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Солярове масло	250±5	3	0,25...0,3	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору

Рідкий вуглеводень	Температура суміші, °C	Тривалість контакту, год	Кількість адсорбованого рідкого вуглеводню, %	Загальна характеристика композиції
Соняшникова олія	300±5	1	0,25...0,35	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Соняшникова олія	300±5	2	0,55...1,0	Частки вугільного пилу, що злипаються, чорного кольору
Соняшникова олія	300±5	3	3,0...5,0	Пружня маса із вугільного пилу й оліфи, що утворилась, чорного кольору
Антраценове масло	300±5	1	0,5...0,85	Частки вугільного пилу в чорній в'язкій масі
Антраценове масло	300±5	2	4,0...8,0	Важко перемішувана маса із залишками вугільного пилу
Антраценове масло	300±5	3	15,0...25,0	Маса чорного кольору консистенції гудрону

1.3.4 Теоретичне обговорення та обґрунтування результатів конвективного нагріву

Аналізуючи результати, наведені в табл. 1.6, слід зазначити три різних ефекти, що супроводжують нагрівання вугільного пилу з трьома розглянутими видами вуглеводнів.

Тривалий процес нагріву вугільного пилу з соляровим маслом супроводжується поступовим збільшенням адсорбції останнього, яка досягає максимуму при другій годині термічної обробки. Процес адсорбції можна пояснити дифузійними явищами, тому що не адсорбоване солярове масло легко видаляється з поверхні вугільного пилу стандартними розчинниками, які не впливають на зміну стану поверхні частинок вугільного пилу.

Взаємодія вугільного пилу з соняшниковою олією, що містить ненасичені вуглеводні, при термічному впливі супроводжується процесами адсорбції, передполімеризації і полімеризації. Другий процес активізується молекулами кисню, наростає з часом і після першої години термічного впливу переважає полімеризація рідкого вуглеводню, що виражається в збільшенні в'язкості. Після другої години термічної дії процес передполімеризації переходить в процес по-

лімеризації, що супроводжується різким збільшенням в'язкості рідкого вуглеводню і склеюванням частинок вугільного пилу в окремі згустки. Після трьох годин термічної обробки процес полімеризації призводить до утворення пружною маси, наповнювачем якої є вугільний пил, а зв'язувальною речовиною - оліфа, що полімеризувалась.

Не менш цікаві результати спостерігаються при термічній взаємодії вугільного пилу з антраценовим маслом. В роботі [21] зазначається про розчинення деяких марок вугілля в антраценовому маслі, що призводить до одержання рідких вуглеводнів консистенції мазуту. Наведені в табл. 1.6 результати взаємодії вугільного пилу з антраценовим маслом підтверджують дані літературних джерел. Одночасно слід зазначити, що збільшення часу термічного взаємодії супроводжується стадіями адсорбції і дифузії протягом перших 0,5 години з подальшим початком розчинення вугільного пилу протягом однієї години і завершується цей процес до кінця третьої години утворенням густої чорної маси консистенції гудрону.

Всі три процеси пов'язані зі зміною поверхні частинок, які відбуваються при високих температурах, досить повільно, що обумовлено теплопровідністю рідких вуглеводнів, дисперсністю і теплопровідністю вугільного пилу.

1.3.5 Модифікація вугільного пилу під дією електромагнітної енергії НВЧ діапазону

Одним з напрямків з інтенсифікації процесів модифікації поверхні вугільного пилу є використання електромагнітної енергії надвисоких частот (ЕМЕ НВЧ).

Підставою для проведення експериментів в цьому напрямку є відмінність в діелектричній проникності рідких вуглеводнів і вугільного пилу [22, 23]. Діелектрична проникність взятих для дослідження рідких вуглеводнів знаходиться в межах 2,1 ... 3 відносних одиниць, а вугільного пилу, який використовувався, – 5 ... 9. Широкий діапазон значень діелектричної проникності вугілля спричинений в основному вологістю, яка залежно від сорту вугілля становила від 8 до

12%. Враховувався і той фактор, що вугілля відноситься до класу недосконалих діелектриків і надзвичайно ефективно взаємодіє із ЕМЕ НВЧ-поля.

Вугільний пил одержується в результаті дроблення вугілля з утворенням гострих кромek і кутів на пилових частках. Відомо [24], що в електричних полях на поверхні гострих кромek зосереджений максимальний електричний заряд, який може синхронно змінюватися, слідує за зовнішнім полем. При високих і надвисоких частотах ця синхронність порушується, що призводить до виникнення коронного або дугового пробою з виділенням теплової енергії, яка витрачається на нагрів неоднорідностей та навколишнього середовища. Температура поверхні частинок вугільного пилу зростає на кілька сотень градусів за одну секунду при частотах 2,4 ... 3 ГГц і потужності в резонаторі 800 Вт.

Для зіставлення раніше отриманих результатів з результатами, отриманими із застосуванням ЕМЕ НВЧ, використовувалися однакові масла і вугільний пил при однаковому співвідношенні компонентів і по чергово кінцевих температур в обох серіях експериментів в якості критерію підвищення інтенсивності процесу модифікації із застосуванням ЕМЕ НВЧ взята тривалість нагріву композицій до температур, зазначених в табл. 1.5 і табл. 1.6.

Підготовка композицій до цієї серії експериментів, як і раніше, включала ретельне перемішування компонентів в термостійкому скляному стакані місткістю 0,5 л. Це дозволяло забезпечити в склянці шар композиції товщиною 40 ... 45 мм, необхідний для об'єктивного вимірювання температури після впливу ЕМЕ НВЧ. Для рівномірного впливу ЕМЕ НВЧ на композицію в склянці його встановлювали на піддон, що обертався, поверхню якого закривали термостійким радіопрозорим матеріалом з низькою теплопровідністю. Це обмежує тепловідвід від дна склянки і дозволяло стабілізувати температуру в обсязі маси.

Результати, отримані в процесі проведених досліджень, наведені в табл.1.7. З неї видно, що процес модифікації поверхні частинок вугільного пилу під дією ЕМЕ НВЧ проходить більш інтенсивно. Така особливість може бути пояснена процесами, що відбуваються на виступах і краях вугільного пилу. Ці процеси пов'язані з цілою низкою фізико-хімічних змін в системах рідкий

вуглеводень – вугільний пил і хімічними реакціями, що супроводжують такі зміни.

Таблиця 1.7 – Залежність процесу модифікації поверхні часток вугільного пилу під дією ЕМЕ НВЧ

Рідкий вуглеводень	Температура суміші, °C	Тривалість контакту, год	Кількість адсорбованого рідкого вуглеводню, %	Загальна характеристика композиції
Солярове масло	250±5	5,0	0,25...0,3	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Солярове масло	250±5	4,95	0,35...0,4	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Солярове масло	250±5	4,9	0,35...0,4	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Соняшникова олія	300±5	6,5	0,35...0,5	Розсипчаста маса, що легко перемішується чорного кольору
Соняшникова олія	300±5	6,28	0,9...2,0	Частки вугільного пилу, що злипаються, чорного кольору
Соняшникова олія	300±5	6,3	3,5...7,0	Пружня маса із вугільного пилу й оліфи, що утворилась, чорного кольору
Антраценове масло	300±5	6,3	1,5...2,2	Частки вугільного пилу в чорній в'язкій масі
Антраценове масло	300±5	6,4	6,8...12,0	Важко перемішувана маса із залишками вугільного пилу
Антраценове масло	300±5	6,3	18,0...31,0	Маса чорного кольору консистенції гудрону

1.3.6 Обговорення результатів і їх теоретичне обґрунтування

Проаналізуємо одержані результати, які були одержані по стандартним методикам, наведених в літературі [25, 26, 27, 28].

При контакті вугільного пилу з соляровим маслом під дією ЕМЕ НВЧ відбуваються процеси деструкції і полімеризації, що призводять до утворення більш низькомолекулярних насичених вуглеводнів з одночасною пришиттям молекул граничних вуглеводнів або їх частини до окислених атомів вуглецю на поверхні вугільного пилу. Отже, застосування ЕМЕ НВЧ інтенсифікує процес

модифікації поверхні вугільного пилу рідкими граничними вуглеводнями і суттєво впливає на фізико-хімічні і теплотворні характеристики. Вугільний пил, що пройшов модифікацію рідкими граничними вуглеводнями під дією ЕМЕ НВЧ, може бути використаним в якості основного пального компонента при виготовленні рідких альтернативних видів палив, включаючи мулові осади очисних споруд.

При дії ЕМЕ НВЧ на композицію вугільного пилу з соняшниковою олією відбувається інтенсифікація процесу окисної полімеризації останнього. Це можна пояснити розривом однієї з подвійних зв'язків в його структурі з ініціюванням процесу передполімеризації, що починається до кінця перших шести хвилин опромінення. Подальший вплив ЕМЕ НВЧ прискорює процес полімеризації, який закінчується на третьому шестихвилинному інтервалі нагріву утворенням пружної маси, в об'ємі якої містяться частки вугільного пилу.

Контакт вугільного пилу з антраценовим маслом під дією ЕМЕ НВЧ супроводжується стадіями набухання вугільного пилу з подальшим початком розчинення. Перша стадія набухання супроводжується дифузними процесами, які ускладнюють визначення кількості адсорбованого антраценового масла безпосередньо поверхнею вугільного пилу. Процес відбувається досить швидко і до кінця шостої хвилини вся поверхня частинок вугільного пилу покрита в'язкою чорною масою. Наступні дії інтенсифікують процес і після третього етапу утворюється маса чорного кольору, консистенції гудрону, з частинками вугільного пилу.

Результати, отримані в процесі досліджень впливу ЕМЕ НВЧ на системи рідкі вуглеводні – вугільний пил, розкривають особливості взаємодії вуглеводнів з вугільним пилом і супроводжуючи їх фізико-хімічними та хімічними перетвореннями. Показано, що ЕМЕ НВЧ активізує процеси деструкції, полімеризації рідких вуглеводнів на поверхні вугільного пилу, прискорює ці процеси в порівнянні з конвективним нагріванням в десятки разів.

1.3.7 Перспективи отримання модифікованої вугільного пилу на основі топкового мазуту

Отримані результати становлять практичний інтерес для вирішення ряду технологічних завдань, пов'язаних зі зміною поверхневих і об'ємних властивостей вугільного пилу при її підготовці до виробництва альтернативних видів палив.

Для реалізації одного з напрямків по створенню альтернативних видів палив виконані дослідження, в яких в якості рідких вуглеводнів використовували топковий мазут, який містить важкі вуглеводні. Мета досліджень полягала у визначенні співвідношення компонент в такій композиції. Параметрами, за якими оцінювалася придатність композиції до використання при подальшому створенні альтернативного палива, були теплотворна здатність і плинність композиції при різній температурі.

Приготована композиція (модифікована топковим мазутом вугільний пил) при співвідношенні 25/75 пройшла випробування на теплотворну здатність і плинність при різних температурах. Час модифікації – 6,5 хв при потужності НВЧ 800 Вт, маса композиції – 200 г, кінцева температура – 350°C. Теплотворна здатність композиції, в середньому, становила 7 400...7450 ккал/кг. Це забезпечує можливість вводити в модифіковану вугільний пил додатково різні горючі добавки з меншою теплотворною здатністю для їх утилізації та створення альтернативних видів палив з теплотворною здатністю від 5000 до 6500 ккал/кг. Одночасно позитивно вирішується проблема уповільнення і виключення мимовільного осадження вугільного пилу в складі альтернативного палива внаслідок незмочуваності поверхонь часток вугільного пилу внаслідок модифікації рідкими вуглеводнями.

1.3.8 Аналіз й експериментальна перевірка процесу модифікації при ініціюванні фізичних процесів електромагнітними хвилями НВЧ діапазону

Розробка процесу модифікації вугільного пилу ґрунтується на фізико-хімічних характеристиках компонентів, що використовуються.

Процес модифікації вугільного пилу повинен забезпечити зміни її поверхневих властивостей, а саме зменшити тертя між частинками з одночасним збільшенням теплотворної властивості чотирьохфазної системи. Вважається, що в процесі модифікації поверхонь кожної частинки вугільного пилу адсорбує певну кількість рідких вуглеводнів. Технічне рішення процесу модифікації при якому рідкі вуглеводні утворюють, як мінімум, мономолекулярну плівку на всій поверхні твердої фази.

Для досягнення максимальної теплотворної властивості необхідно максимально зменшити вміст води в вугільному пилу. Поставлена мета досягається організацією безперервного процесу сушіння при температурі 190°C зі зниженням кінцевої вологості до 0,5–1,0%. Технічна реалізація процесу має декілька варіантів, в тому числі сушіння газовим інертним теплоносієм в киплячому шарі, сушіння в барабанних сушарках або в стрічкових сушильних агрегатах з інфрачервоними джерелами випромінювання.

Найбільш перспективним можна вважати варіант сушіння в киплячому шарі, який характеризується мінімальними тепловими втратами так як інертний теплоносій безперервно циркулює в системі й проходячи через теплообмінник разом з водяним паром віддає надлишок енергії, що використовується в технології.

На рис. 1.10 зображена схема такої сушарні.

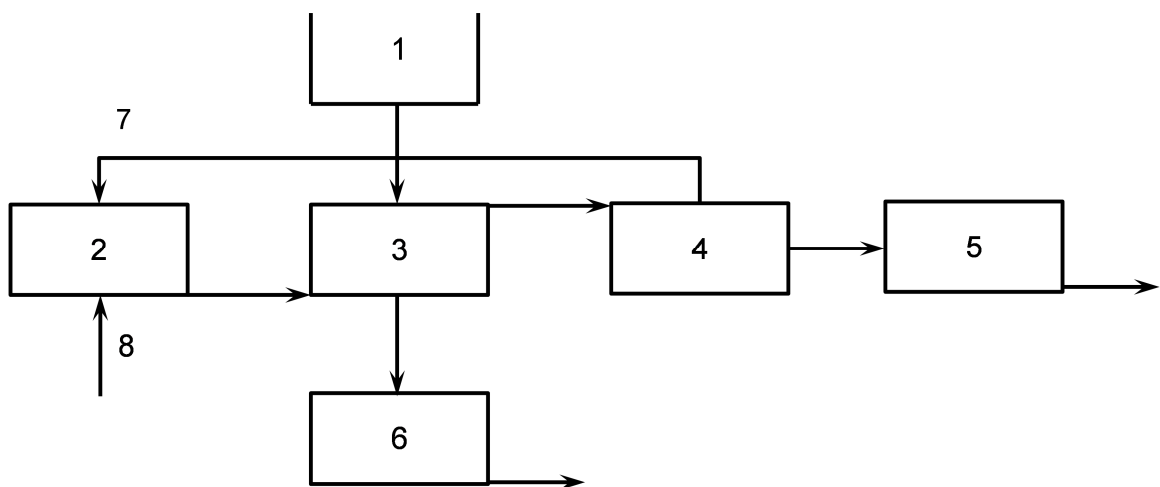


Рисунок 1.10 – Схема сушарки вугільного пилу в киплячому шарі з інертним теплоносієм

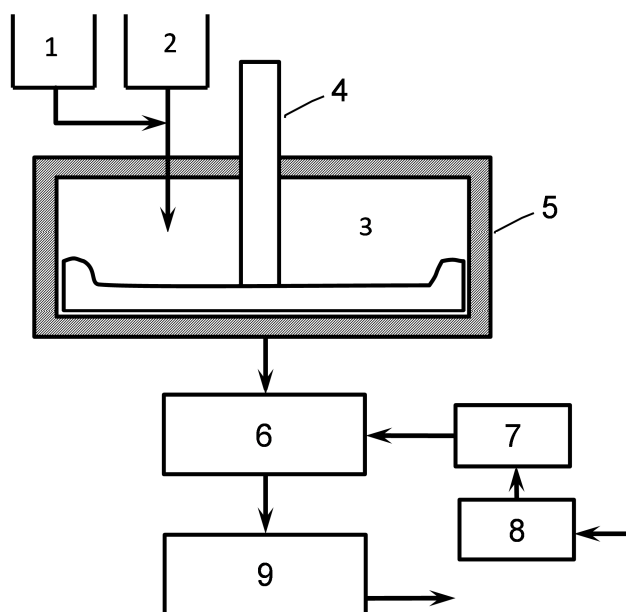
На схемі, зображеній на рис. 1.10 зображена сушарка вугільного пилу в киплячому шарі з інертним теплоносієм. Вугільний пил поступає з пристрою подачі пилу 1 в камеру сушарки 3, куди надходить інертний теплоносій 8 з теплогенератора 2. Гарячий пар з камери сушарки поступає в теплообмінник 4, звідки охолоджений теплоносій повертається в теплогенератор, а сконденсована в конденсаторі 5 вода виводиться з сушарки. Сухий вугільний пил поступає в накопичувач пилу 6.

Температура сухого вугільного пилу знаходиться в межах 180–190°C.

Наступним етапом після сушіння є модифікація рідкими вуглеводнями. Як відмічалось раніше товщина мономолекулярного шару рідких вуглеводнів зв'язана з їхньою молекулярною вагою. Проте, ми повинні враховувати, що технічні рідкі вуглеводні, такі як солярна олія, топковий мазут та інші складаються з суміші фракцій, які характеризуються широким інтервалом температури кипіння й середнім значенням молекулярної ваги. Враховуючи цю особливість температура сухого вугільного пилу перед змішуванням повинна бути на 20–25°C нижче температури кипіння рідких вуглеводнів.

Процес модифікації складається з двох стадій, які включають первинний розподіл молекул рідких вуглеводнів на поверхні частинок вугільного пилу й адсорбцію цих молекул поверхнею. Чим більша величина адсорбції, тим більш рівномірне буде покриття частинок поверхні вугільного пилу мономолекулярною плівкою й краще буде утримуватися поверхнею.

В основі уявлення щодо збільшення сили адсорбції рідких вуглеводнів покладене теоретичне уявлення про перезарядці поверхні твердого тіла й створенні активних центрів, які виконують роль індукторів поля, що створюють наведений індукційний ефект в неполярних молекулах рідких вуглеводнів. Схема апаратної реалізації процесу первинного розподілу рідких вуглеводнів та їх адсорбції на поверхні вугільних частинок зображена на рис. 1.11.



Дозатор рідких вуглеводнів – 1;
 дозатор сухого вугільного пилу – 2;
 змішувач – 3;
 мішалка – 4;
 теплоізоляція – 5;
 резонаторна камера – 6;

НВЧ – генератор – 7;
 джерело живлення з блоком управління – 8;
 ємність для модифікованого вугільного пилу – 9.

Рисунок 1.11 – Схема апаратної реалізації процесу модифікації вугільного пилу з можливістю впливу електромагнітного поля НВЧ діапазону

Реалізація процесу модифікації з використанням устаткування, схема якого приведена на рис. 1.112 передбачає дозовану синхронну подачу із дозатора 1 рідких вуглеводнів, що використовуються в процесі модифікування, а з дозатора 2 сухого вугільного пилу, який поступає в змішувач 4, так що максимальна поверхня частинок вугільного пилу покривається шаром рідких вуглеводнів. Для забезпечення однакових умов процесу змішування змішувач покритий шаром теплоізоляції 5 з можливістю регулювання температури. Вугільний пил, з первинним шаром рідких вуглеводнів із змішувача надходить до камери 6, в яку подається електромагнітна енергія НВЧ діапазону із генератора 7, управління якого здійснюється блоком 8. Під дією електромагнітної енергії НВЧ діапазону на поверхні частинок вугільного пилу відбуваються фізико-хімічні процеси, обумовлені ефектом молекулярної дифузії, й адсорбції молекул рідких вуглеводнів. В результаті цих процесів відбувається закріплення молекул рідких вуглеводнів з утворенням мономолекулярного шару.

1.3.9 Визначення необхідних параметрів технологічних процесів

Роль мономолекулярного шару рідких вуглеводнів на твердій поверхні зводиться до початку утворення проміжних шарів з максимальним заповненням тріщин й пор різної форми на поверхні частинок вугільного пилу.

Після утворення n шарів рідких вуглеводнів на поверхні частинок вугільного пилу починає збільшуватися ефект плинності, що залежить від температури, сили тяжіння g або зовнішнього впливу P .

Аналітичне визначення плинності композиції здійснюється за стандартною методикою з використанням лабораторних віскозиметрів [26].

Другим важливим показником для характеристики властивостей модифікованого вугільного пилу є її стабільність, тобто час мимовільно розділення на тверду й рідку фази. В якості модифікуючих вуглеводнів використовувались солярна олія (відпрацьована) й паливний мазут. Процес модифікації здійснювався двома способами в першому із яких сухий вугільний пил змішувався з рідкими вуглеводнями в змішувачі 3, а в другому – одержана суміш піддавалась опроміненню електромагнітною енергією НВЧ в резонаторі 6. Рівень потужності НВЧ випромінювання 800 Вт при експозиції до 15 хв для солярної олії, для паливного мазуту – 3 хв на паливну композицію масою 200 г. Результати одержані в ході експериментів приведені в табл. 3 і табл. 4 відповідно з солярною олією й паливним мазутом. Діелектрична проникність для вугільного пилу приймається рівною 7–7,5 для солярної олії та 2,5 для топкового мазуту.

Таблиця 1.8 – Експериментальні результати для солярної олії

Вугільний пил, %	Солярна олія, %	Теплотворна здатність, ккал/кг	Плинність при 50°C, кг/год	Плинність при 50°C після НВЧ, кг/год	Стабільність при 50°C, год	Зовнішня характеристика при 25°C
95	5	7400–7650	Не тече	Не тече	> 2000	Чорного кольору сипуча однорідна маса
90	10	7500–7750	Не тече	Не тече	> 2000	Чорного кольору сипуча однорідна маса
85	15	7600–7900	Не тече	Не тече	> 1500	Чорного кольору однорідна маса
80	20	7700–8000	Не тече	0,5	> 1000	Чорного кольору, початок плинності

Вугільний пил, %	Соляр- ова олія, %	Теплотворна здатність, ккал/кг	Плинність при 50°C, кг/год	Плинність при 50°C після НВЧ, кг/год	Стабіль- ність при 50°C, год	Зовнішня харак- теристика при 25°C
						однорідна маса
75	25	7900–8200	Не тече	1,5	> 800	Чорного кольору плинна однорідна маса
70	30	8000–8300	0,5	3	420–480	Чорного кольору плинна однорідна маса
65	35	8000–8400	1,5	10	300–410	Чорного кольору плинна однорідна маса
60	40	8000–8500	3,5	20	220–300	Чорного кольору плинна однорідна маса
55	45	8100–8700	10	35	100–150	Чорного кольору плинна однорідна маса
50	50	8200–8900	28	100	24	Чорного кольору плинна маса, що розшаровується

Аналізуючи результати моделювання процесу модифікації вугільного пилу можна стверджувати, що в розглянутих варіантах теплотворна здатність знаходиться в межах 7400–8900 ккал/кг. Плинність композиції проявляється при співвідношенні 75 на 25 і росте зі збільшенням кількості соляркової олії. Ефект розшарування композиції проявляється при співвідношенні компонентів 50 на 50, що між частинками вугільного пилу крім адсорбованих шарів соляркової олії утворюються вільні мономолекулярні шари. В результаті накопичення таких шарів виникають умови виникнення ламінарної течії рідкої фази й розшарування композиції. Це наочно відмічається при співвідношенні компонентів 50 на 50. Слід звернути особливу увагу на результат впливу електромагнітної енергії НВЧ діапазону (ЕМЕ НВЧ). Основна частина ЕМЕ НВЧ поглинається вугільним пилом, що приводить до його нагрівання й різкому підвищенню температури всієї композиції. При зміні температури адсорбційно–дифузійні процеси істотно міняються й результатом цих змін поверхневий об’ємний перерозподіл та структурування молекул рідких вуглеводнів. Відмітний ефект має істотне значення в розробці технології модифікації горючих речовин рідкими вуглево-

днями і забезпечують можливість створення горючої композиції з високою стабільністю. В таких композиціях тверді горючі компоненти захищені від мимовільного окислення шаром рідких вуглеводнів при одночасному забезпеченню плинності всієї композиції. Створюється паливо, що складається із твердої фази в оболонках із рідкої фази й не розшаровується на компоненти.

Таблиця 1.9 – Експериментальні результати для топкового мазуту

Вугільний пил, %	Топковий мазут, %	Теплотворна здатність, ккал/кг	Плинність при 50°C, кг/год	Плинність при 50°C після НВЧ, кг/год	Стабільність при 50°C, год	Зовнішня характеристика при 25°C
95	5	7300–7500	Не тече	Не тече	> 4500	Чорного кольору сипуча однорідна маса
90	10	7350–7600	Не тече	Не тече	> 3000	Чорного кольору сипуча однорідна маса
85	15	7450–7850	Не тече	Не тече	> 2600	Чорного кольору однорідна маса
80	20	7600–8100	Не тече	Не тече	> 1800	Чорного кольору однорідна маса
75	25	7750–8150	Не тече	0,3	> 1000	Чорного кольору, початок плинності однорідна маса
70	30	79200–8280	0,2	1,	> 800	Чорного кольору плинна однорідна маса
65	35	8000–8320	1,0	2,8	480–540	Чорного кольору плинна однорідна маса
60	40	8000–8480	2,8	7	300–450	Чорного кольору плинна однорідна маса
55	45	8050–8600	7,5	26	200–260	Чорного кольору плинна однорідна маса
50	50	8100–8800	22	73	110–130	Чорного кольору плинна маса, що розшаровується

Аналізуючи результати моделювання процесу модифікації вугільного пилу топковим мазутом можна стверджувати, що при будь-якому розглянутому варіанті теплотворна властивість знаходиться в межах 7300–8800 ккал/кг. Плинність композиції надійно відмічається при співвідношенні 70 на 30 і збереженні стабільних властивостей, тобто відсутності розшарування на рідку й

тверду фази. Одночасно необхідно відмітити збільшення плинності композиції подібно до варіанту застосування соляркової олії, але із-за великої в'язкості, яка проявляється при концентрації топкового мазуту 35–40%. ЕМЕ НВЧ впливає на утворення поверхнево-об'ємних шарів рідких вуглеводнів і призводить до структуроутворення стабільного палива. В такому паливі частинки вугільного пилу знаходяться в завислому стані в об'ємі рідкої фази – топкового мазуту.

1.3.10 Дослідна установка модифікації вугільного пилу та проведення експериментальних досліджень

На підставі описаного в розділі 1.3.5 способу виготовлення модифікованого вугільного пилу для його використанні при одержанні композитного палива з використанням біогенних відходів розроблена схема дослідної установки модифікації вугільного пилу з використанням стимулюючої дії електромагнітної енергії НВЧ діапазону. При розробці дослідної установки одним з головних параметрів був її продуктивність. Виходячи з передумови, що ця установка повинна працювати сумісно з дослідною установкою одержання альтернативного біопалива для її забезпечення модифікованим вугільним пилом при дослідженнях та відпрацювання технології одержання альтернативного біопалива. Так як продуктивність такої установки знаходиться в межах 150–200 кг/год, то продуктивність дослідної установки модифікації вугільного пилу повинна бути не менше 2 кг/год.

Структурна схема дослідної установки модифікації вугільного пилу зображена на рис. 1.12.

Основними вузлами цієї установки є змішувач вугільного пилу з рідкими вуглеводнями, які подаються через дозатори 1 і 2. Змішування проводиться при робочій температурі процесу 50–150°C. Процес змішування циклічний, з постійним контролем якості модифікації. Змішана маса вугільного пилу з рідкими вуглеводнями поступає в камеру обробки суміші енергією НВЧ діапазону. Змішувальна камера являє собою узгоджений резонатор. Узгодження здійснюється в автоматичному режимі зрівнюючи повний опір навантаження й хвильовий опір лінії передачі НВЧ енергії. Управління здійснюється регулятором, що контролює

лює рівень відбитих НВЧ хвиль від входу в робочу камеру, та управляє роботою НВЧ-генератора. За сигналом аналізатора якості модифікації вугільного пилу регулятор направляє робочу суміш на повторну обробку або в накопичувач модифікованого вугільного пилу.

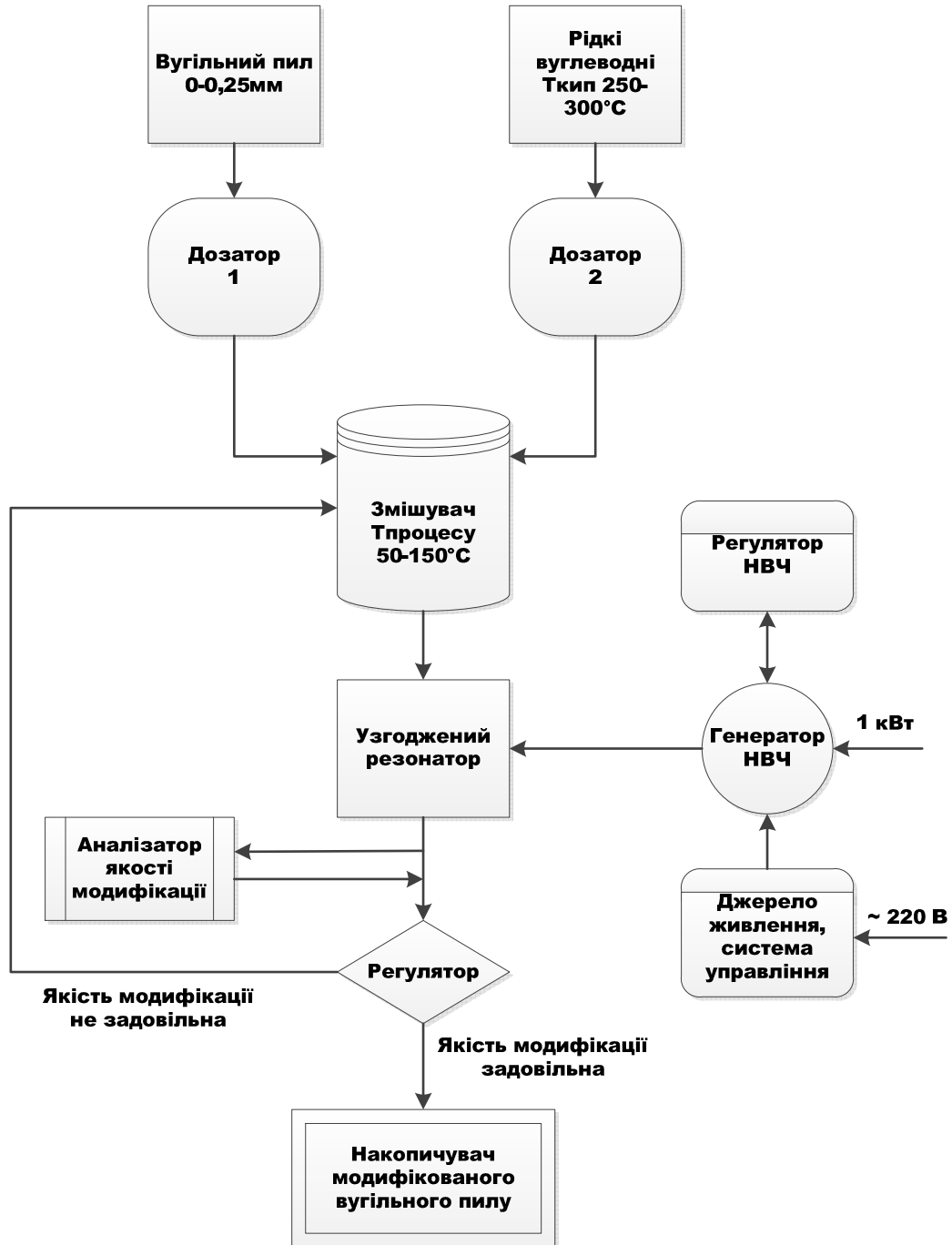


Рисунок 1.12 – Структурна схема дослідної установи модифікації вугільного пилу

В табл. 1.10 наведене обґрунтування вартості розробки конструкторської документації на дослідну установку, її виготовлення та експериментальне дослідження з відпрацюванням режимів роботи та регламентів.

Таблиця 1.10 – Витрати на устаткування та комунікаційні операції

№ з/п	Назва статті витрат	Ціна (орієнтовна), грн.
1.	Сушильна установка продуктивністю не меншою 2 кг/год	5000–7000
2.	Змішувач компонентів з дозатором, продуктивністю не меншою 2 кг/год	8000–12000
3.	Узгоджений резонатор	3000–5000
4.	Генератор НВЧ на 800 Вт з джерелом живлення на 1,2 кВт з блоком управління	2500–4000
5.	Контрольно-вимірювальні прилади та датчики: температурні до 250°C, тиску, в'язкості, плинності.	6000–10000
6.	Зборка та налаштування установки	12000
7.	Аналізи, що супроводжують технологічний процес по параметрам: теплотворної властивості, вологості, плинності, стабільності.	12000–17000
8.	Сумарні витрати на створення лабораторної установки	48500–67000
9.	Витрати на закупку вугільного пилу й рідкі вуглеводні	4000–5000
10.	Витрати на оплату електроенергії	800–1200
11.	Накладні витрати, 30%	15990–21960
12.	ВСЬОГО	69290–95160

1.4 Одержання альтернативних видів палива

1.4.1 Загальні характеристики вихідних матеріалів і вимоги до альтернативних видів палива

Основну увагу в розробці і створенні палив для стаціонарних енергоустановок приділено альтернативним видам, включаючи біопалива (АБП). В склад АБП входять біогенні відходи, такі як осади стічних вод з очисних споруд, спиртова барда, відходи з тваринницьких ферм та ін., а також добавки високоенергетичних вуглеводневих компонентів. В якості таких добавок можуть використовуватися відходи нафтопродуктів, некондиційний мазут, відпрацьоване мастило, модифікований вугільний пил, жирові відходи харчової промисловості та ін.

1.4.1.1 Загальні характеристики біогенних відходів, що використовувались при одержанні АБП

Муловий осад стічних вод

Основну частину сухої речовини в осаді первинних відстійників (в середньому 60 - 75%) складають органічні речовини. Органічна частина активного мулу в основному представлена речовинами білкового походження (до 50%) при вмісті жирів і вуглеводів відповідно до 30 і 10%. В осаді білків приблизно в два рази менше, а вуглеводів в 2,5-3,0 більше, ніж в активному мулі. Ця органічна фракція мулових осадів є тією складовою, яка використовувалась при одержанні АБП.

При використанні у виробництві АБП мулового осаду з очисних споруд потрібно враховувати їх біологічна забрудненість, вимагає при роботі з ними виконання вимог з техніки безпеки.

Консистенція осадів міських стічних вод, як і любых дисперсних матеріалів, залежить від їх вологості. Мулові осади при вологості 90% є рідкою текучою масою, при 86-90% вони пастоподібні, при 80-86% - грязеподібні. При більш низькій вологості осади зберігають надану їм форму, подібно вологій землі.

В сухій речовині осадів первинних відстійників міститься, %: 35-88 С; 4,5-8,7 Н; 0,2-2,7 S; 1,8-8 N; 7,6-35,4 О, а в суха речовина активного мулу, %: 44-76 С; 5-8 Н; 0,9-2,7 S; 3,3-9,8 N; 12,5-43,2 О [1]. В осадах присутні також сполуки кремнію, алюмінію, заліза, кальцію, магнію, калію, натрію, цинку, хрому, нікелю та інших хімічних елементів.

Гранулометричний склад свіжих опадів первинних відстійників зазвичай представлений такими фракціями, %: 5-20 частинок більше 10-7 мм, 9-33 розміром 7-1 мм, 50-88 менше 1 мм від маси сухої речовини. Осад переброджений в метатенку в порівнянні зі свіжим дрібніше і однорідніше за структурою. Зокрема, частинки розміром менше 1 мм складають в середньому 85%. В активному мулі ця фракція досягає 98%.

В середньому на очисних спорудах Харкова здійснюється повна біологічна очистка 700 тис.м³ стічних вод на добу. В результаті очищення цих вод щодоби утворюється близько 3 тисяч кубометрів опадів вологістю 97,6%.

Якісний склад опадів, що отримується при очищенні міських стічних вод, не постійний і залежить від багатьох факторів - роботи промислових підприємств, сезонності, фоновому хімічному складу питної води, характером опадів та ін.

У табл. 1.11 наведено якісний склад мулових осадів м. Харкова, одержаний усередненням експериментальних даних.

Таблиця 1.11 – Якісний склад мулових осадів м. Харкова

№№ з/п	Найменування	Од. вим.	Кількість	
			І черга	Перспектива
1	2	3	4	5
1	Добова кількість суміші осадів КБОД і КБОБ	м ³ /доб	3000,0	6000,0
	в т.ч. сирих осадів ПО	м ³ /доб		2580,0
	Надлишковий акт. мул	м ³ /доб		3420,0
2	Усереднена вологість	%	96,37	96,37
3	Зольність суміші осадів	%	27,16	27,16
4	Хім.склад осадів вологістю 96,37%			
	- азот аміачний	мг/л	73	73,0
	- азот загальний		773,2	773,2
	- фосфор загальний	—" —	574,76÷911,1	727,9
	- калій загальний —	—" —	83,49	66,7-83,49
	- вуглеводи	в г на 1 г беззольних речовин осадів	0,23	0,23
	- білки	—" —	0,36	0,36
	- жироподібні речовини	—" —	0,162	0,162
	-кадмій	мг/л	0,283	0,286
	- мідь	—" —	26,45-38,59	30,83
	-никель	—" —	8,75	6,99
	- кобальт	—" —	не виявлено.	не виявлено.
	- марганець	—" —	32,82	26,22
	-свинець	—" —	7,89	6,306
	-стронцій	—" —	4,22	3,3756
	-хром	мг/л	9,154-53,41	42,67
	-цинк	—" —	33,29	26,6
	- залізо	—" —	686,67-728,86	548,579
	- срібло	—" —	1,27	1,015
	- олово	мг/л	5,73	4,582
	- ванадій	—" —	1,88	1,5

1	2	3	4	5
	- титан —	—"	98,01	78,3
	- вісмут -	—"	0,27	0,22
	- кальцій	—"	До 3,3	до 3,3
	- нафтопродукти	—"	6,99	7,0
	-СПАВ	—"	0,639	0,7
	- сульфати		7654,697	7000
	- хлориди	—"	2227,11	2000

Спиртова барда

Біля більшості спиртових заводів склалася важка екологічна ситуація пов'язана з тим, що спиртову барду направляють на поля фільтрації, де вона розкладається з виділенням шкідливих для довкілля речовин. Приготування АБП із спиртової барди є одним із способів її утилізації з одержанням корисного продукту – АБП. Вміст органічних речовин в барді це дозволяє.

Сира обезводнена спиртова барда з вологістю 8–9% має такий склад:

– сухих речовин натуральної барди - 7..9%;

Вміст в масі сухих речовин барди:

- протеїну 25..30%;

- білок 19..25%;

- зола 5..6%;

- азот 4..5%, (білковий 3,0..3,5%, небілковий 1,0..1,5%);

– насипна щільність гранульованої зернової барди - 600 ... 650 кг / м³

Теплофізичні властивості гранульованої зернової барди

Вологість - 8..9%;

Зольність - 1,5..2,0%;

Летючі речовини - 70..80%;

Вміст сірки - 0,5..1,0%;

Теплота згоряння - 18..19 МДж/кг (4,3...4,54 Ккал/кг).

В табл. 1.12 наведений склад сирої зернової барди, а в табл. 1.13 склад сирої мелясової барди.

Таблиця 1.12 – Склад сирової зернової спиртової барди

Речовини	Вміст, %				
	Картопляна	Кукурудзяна	Житня	Вівсяна	Ячмінна
Вода	95,5	93,2	92,6	92,0	93,0
Сухі речовини	4,5	6,8	7,4	8,0	7,0
Розчинні сухі речовини	2,1	2,5	2,9	2,0	2,7
Вуглеводи					
редуковані речовини в перерахунку на мальтозу	0,30	0,50	0,40	0,25	0,45
Крахмал	0,4	0,5	0,3	—	—
пентозани (в фільтраті)	0,45	0,40	0,45	0,25	0,40
геміцелюлози	2,3	1,8	1,7	1,4	1,7
целюлоза	0,3	0,3	0,5	0,9	0,7
Азот	0,17	0,40	0,27	0,19	0,24
в тому числі в фільтраті	0,06	0,04	0,09	0,13	0,07
Зола	0,50	0,40	0,45	0,57	0,57
в тому числі в фільтраті	0,42	0,29	0,20	0,30	0,32
Жир	—	0,67	—	0,94	0,46

Таблиця 1.13 – Склад сирової мелясової барди

Речовини	Вміст, % від СР мелясової барди	Речовини	Вміст, % на СР мелясової барди
Органічні сполуки	70—83	Органічні кислоти	5—27
Протеїн	17—27	- в том числі летучі	3—12
Азот		Гліцерин	6—13
загальний	3—5	Редуковані речовини	3—7
білковий	0,4—1,0	Зола в перерахунку на K_2O	17—24
амінний	0,3—0,6	Na_2O	7—8
амонійний	0,1—0,3	CaO	0,5—3
Бетаїн	7—15	Мікроелементи	1,5—2
Амінокислоти	6—10		

1.4.1.2 Характеристики модифікованого вугільного пилу для використання при одержанні АБП

Забезпечення високої теплотворної здатності АБТ, на рівні 6000 – 6100 Ккал/кг при відпускній ціні нижче вартості традиційних палив, є актуальною науково-технічною задачею. Для вирішення цього завдання пропонується використовувати в якості вуглеводневих добавок вугільний пил з теплотворною здатністю 7500 – 7800 Ккал/кг й зерною характеристикою часток 25–28 мкм. АБТ, що розробляється, повинно мати властивості, які зазвичай пред'являтися

до котельних палив за такими характеристиками: в'язкість, вміст сірки, температура застигання, температура спалаху, теплота згоряння, наявність шкідливих домішок. Кожна з цих характеристик є важливою. Так в'язкість впливає на ступінь розпилення палива (тобто на повноту згоряння), умови зливання та наливання при транспортуванні палива, схему паливних систем споживача (попередній підігрів перекачування по трубопроводах, ефективність роботи форсунки). Норми по в'язкості¹ при 50°C становлять від 5 до 12°ВУ (36 і 89 мм²/с), а при 80° С від 8 і 16°ВУ (59 і 118 мм²/с). Вважається, що така в'язкість палива дозволяє його транспортування трубопроводами котельні установки і забезпечити необхідне розпорошення палива форсункою. Вміст сірки і наявність шкідливих домішок – на вплив продуктів згоряння палива на навколишнє середовище, а також на конфігурацію фільтрів з очищення продуктів згоряння. Наявність в газах SO³ підвищує температуру початку конденсації води – точку роси. Вона підвищується на 50-60°C при підвищенні вмісту сірки від 0 до 2%, що призводить до конденсації на виході з котлів сірчаної кислоти й, як наслідок, до корозії.

Необхідно враховувати, що вище перелічені біогенні відходи мають вологість 75-80%, а сухий залишок при вологості 8–10% 4,0–5,5 має теплотворну здатність 4200–4600 Ккал. Отже, для високо потенційного альтернативного палива, що включає біогенні відходи, для підвищення теплотворної здатності необхідно використовувати вуглеводневі добавки.

Найбільш перспективним напрямком збільшення теплотворної здатності вугільного пилу є його модифікація рідкими вуглеводнями.

Відомо, що вугіль містить природні газоподібні речовини, зокрема метан й адсорбовану воду від 6 до 10%, в залежності від зовнішніх умов. Сума складових частин має електростатичний палива

$$C + H + O + S + N + A + W = 100\%,$$

¹ Під в'язкістю тут прийнята умовна в'язкість, яка вимірюється в градусах Енглера і позначається ВУ. Умовну в'язкість переводять в кінетичну по таблиці ГОСТ.

де A – кількість золи, W – кількість води, а основні: вуглець – C , кисень – O , сірка – S й азот – N .

Нижня теплота згоряння палива оцінюється по класичній емпіричній формулі Д.І. Менделєєва в Ккал/кг по елементарному складу [20]

$$Q = 81 \cdot C + 246 \cdot H - 26 \cdot (O + S) - 6 \cdot W.$$

Отже, зменшення кількості тільки однієї баластної складової частини води до 1% призведе до збільшення теплотворної здатності вугільного пилу.

Процес сушки відбувається в інтервалі температур 180–190°C. Необхідно враховувати, що процес подрібнення вугілля зв'язаний зі зміною поверхневої енергії вугільних частинок. Збільшення площі поверхні вугільних часток на границі розділу фаз в порівнянні з об'ємною енергією самих фаз. Поверхнева енергія пропорційнальна поверхневій площі розділу фаз й особливо велика у високодисперсних системах [22].

Зміна поверхневої енергії часток вугільного пилу закріпленням на її поверхні рідких вуглеводнів може призвести до зменшення їх тертя між собою, тобто створюються умови для плинності такої системи [23]. Степінь плинності системи – тверда дисперсна фаза, покрита шаром рідких вуглеводнів залежить від ряду факторів, в тому числі від температури і товщини покриваючого вугільні частки шару рідких вуглеводнів. В свою чергу, товщина цього шару істотно залежить від адсорбуючої й вбираючої здатності вугільного пилу. Пористість й зольність істотно впливають на товщину покриваючого шару і його рівномірність. Процес закріплення молекул рідких вуглеводнів на поверхні вугільного пилу має електростатичний та адсорбційний характер й інтенсифікується після термічної обробки при температурах деполяризації молекул органічних з'єднань в межах від –50°C до +150°C [24]. Отже, при рідких і полярних вуглеводнів з поверхнею вугільних часток проявляється індукційна або наведена поляризація, яка збільшується при зниженні температури й зменшується при збільшенні, що необхідно враховувати при розробці технології модифікації вугільного пилу. Теоретичне уявлення [25] про мономолекулярну товщину покрит-

тя рідкими вуглеводнями дозволяє визначити площу q , що займає одна молекула по формулі

$$q = \frac{M\rho}{VdN}, \quad (1.1)$$

де S – площа плівки – см^2 , V – об'єм рідкого вуглеводню – см^3 , M – молекулярна вага, d – щільність – г/см^3 , N – число Авогардо. Отже, товщина плівки приймається рівною довжині молекули – δ , тоді вона може бути вчисленою по формулі

$$\delta = \frac{M}{S} \quad (1.2)$$

й залежить від молекулярної ваги рідкого вуглеводню. В технічних рідких вуглеводнях містяться різні варіанти ізомерів з різною молекулярною масою, що різко обмежує можливості застосування теоретичних формул для визначення товщини плівки на поверхнях часток вугільного пилу. Величина адсорбуючої властивості практично невідома. Вона може сильно варіюватися в залежності від співвідношення між величиною частинок адсорбуючої речовини й їх поверхнею. Зменшення розміру частинок приводить до збільшення адсорбуючої властивості, що практично виключає можливість утворення мономолекулярного шару.

Необхідно враховувати, що можливі й хімічні взаємодії між вугільним пилом–адсорбентом і рідкими вуглеводнями – адсорбтивом.

Гідрофобність (олеофільність) поверхні обумовлена тим, що вона краще змочується рідинами з низькою діелектричною постійною. Враховуючи, що проведені дослідження повинні були забезпечити теоретичне обґрунтування сумісності компонентів альтернативного біопалива (АБП) та його плинності, висвітливо більш детально встановлення причин рухомості дисперсної системи.

Для рідин витікаючи під дією власної ваги можна визначити силу – P , що приводить її в рух по формулі

$$P = h\rho g \quad (1.3)$$

де h – висота гідростатичного стовпа рідини, ρ – її щільність, g – прискорення сили тяжіння. В цій формулі всі три складові є фізичними залежностями від властивостей однорідної рідини. Для складних систем, які містять дисперсійну фазу та покриваючим її рідким компонентом (рідким вуглеводнем) сила P істотно залежить механічної взаємодії (тертя) частинок дисперсної фази, що істотно залежить від системи дисперсності. Регулювання величини тертя в техніці вирішується розділенням поверхонь, що труться. При розробці АБП функції роздільника виконують рідкі вуглеводні, що характеризуються в'язкістю й молекулярною вагою. Отже, щільність ρ втрачає своє смислове значення, а замість нього входять концентрації C_1 – дисперсної фази, C_2 – рідких вуглеводнів, а також в'язкість η цих вуглеводнів, поміряна при однаковій температурі.

Враховуючи перелічені фактори можна представити варіант формули, що дозволяє оцінити силу P і визначити «плинність» АБТ при умові, що розміри часток дисперсної фази (вугільного пилу) не будуть перевищувати 0,25 мм при діаметрі отвору вимірювальної ємності 1 см.

$$P = h \left(\frac{C_1 + C_2}{\eta_{C_2}} \right) g. \quad (1.4)$$

Для розробки рекомендацій по застосуванню цієї методики вимірювань і розробці вимірювальної ємності необхідно узгодити найбільш прийнятні співвідношення компонентів АБП та їх характеристик. Розглянуті теоретичні основи, які визначають плинність (рухливість) рідини дозволяють виділити три основні групи рідких вуглеводнів, які становлять практичний інтерес для створення АБП.

Перша група включає рідкі вуглеводні, одержані в процесі переробки нафти, серед яких солярове масло, топковий мазут.

Друга група включає продукти переробки (коксування) вугілля і містить антраценову олію.

Третя група включає олії рослинного походження, в тому числі пальмову.

Загальні характеристики рідких вуглеводнів, що використовувалися при дослідженнях, приведені в табл. 1.14.

Таблиця 1.14 – Характеристики рідких вуглеводнів

ε	Рідкий вуглеводень	В'язкість динамічна μ	Температура кипіння, °C	Температура спалаху, °C	Щільність, г/см ³
2,5	Солярне масло	2,3–4	180–250	120–140	0,89–0,9
3	Топковий мазут	60–85	230–350	150–180	0,95–0,99
2,7	Антраценова олія	48–65	150–350	65–100	1,04–1,08
3	Соняшникова олія	51–56	150–280	170–350	0,91–0,97

Антраценова олія при температурі вище 350°C розчиняє вугіль, що приводить до одержання рідкої однорідної фази, в'язкість якої залежить від кількості антраценової олії.

При нагріванні з ініціатором полімеризації соняшникова олія переходить у в'язкий стан (оліфу).

1.4.2 Приготування АБП на основі використання вугільного пилу й рідких вуглеводнів

Вирішуючи проблему плинності ми повинні враховувати ймовірність седиментаційних процесів – мимовільного осідання твердої фази при збільшенні плинності паливної композиції.

Седиментаційний процес описується законом Стокса, згідно якого сила тертя f , що виникає при повільному рівномірному русі твердої частинки з умовним радіусом r із швидкістю v в середовищі з в'язкістю η виражається формулою

$$f = 6\pi\eta r v. \quad (1.5)$$

Сила тяжіння, діюча на частинку, рівна уявній вазі частинки

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3(D - d)g, \quad (1.6)$$

де P – уявна сила тяжіння частинки, рівна уявній вазі частинки, D – щільність речовини частинки, g – прискорення сили тяжіння.

Вважаємо, що швидкість v зсідання частинок з радіусом r можна визначити по формулі

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^3(D-d)g}{\eta}. \quad (1.7)$$

Природно припустити, що великі частинки будуть зсідатися швидше й тому потрібно ждати розшарування композиції. Процес розшарування залежить від в'язкості рідких вуглеводнів та їх кількості в системі.

1.4.3 Обґрунтування методу досліджень

Для виготовлення АБП з стабільними властивостями необхідно забезпечити нульову швидкість зсідання частинок вугільного пилу, виключаючи тим самим процес розшарування двохкомпонентної композиції. Досягнення цього можливе шляхом модифікації частинок вугільного пилу рідкими вуглеводнями з високою динамічною в'язкістю μ .

Основним компонентом по масі в АБП-композиціях є твердий вуглеводень, наприклад, антрацит, газові й полум'яні вуглі, кокс, а також штиб із збагачувальних фабрик.

В табл. 1.15 приведені характеристики цих видів вугілля.

Таблиця 1.15 – Характеристики різних видів вугілля

ε	Назва	Щільність, г/см ²	Теплотворна здатність, ккал/кг	Пористість, %	Активність поверхонь, γ
7,5	Антрацит	1,4–1,8	7650–8150	5–8	3–5
7	Кам'яний вугіль	1,2–1,5	7000–8000	10–15	7–12
8,5	Кокс	1,25–1,4	7600–8200	40–60	30–80
5	Вугільний штиб	1,35–1,8	5824	9–12	20–28

Характерною особливістю твердих не монокристалічних речовин є пористість², тому доводиться визначати кількість рідких вуглеводнів які будуть заповнювати поверхневі пори. В основі процесу заповнення пор і тріщин переважające значення мають дифузійні процеси.

Швидкість дифузії $v_{\text{диф}}$ любого процесу визначається рівнянням

$$v_{\text{диф}} = \frac{dx}{d\tau} = -\frac{FD}{\delta V}(a - \chi). \quad (1.8)$$

З рівняння отримуємо коефіцієнт дифузії D

$$D = \frac{2.3\delta V}{\tau F} \lg \frac{a}{a-\chi}, \quad (1.9)$$

² Пористість - властивість гірських порід, яка визначається наявністю в ній пор, тріщин і каверн.

де F – площа поверхні розділу фаз, см^2 ; товщина насиченого шару на поверхні розділу фаз, через яку проходить дифузія; V – об'єм рідкої фази; χ – кількість рідкого вуглеводню поглинутого за час від початку процесу, г-моль/л .

Значення коефіцієнту дифузії D рідкої фази залежить від температури й в'язкості рідкої фази та інших факторів й має порядок 10^{-3} – 10^{-4} $\text{см}^2/\text{хв}$.

1.4.4 Опис дослідного стенду для проведення експериментальних досліджень технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів

Дослідного стенд призначений для:

- відпрацювання технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів, таких як осад стічних вод з міських очисних споруд, спиртова барда та ін.;
- відпрацювання конструкції кавітаційного реактора;
- експериментальне визначення параметрів технологічного процесу: енерговитрати, тиск і температура рідини в гідродинамічному контурі стенду, продуктивності та ін.;
- експериментальне визначення режимів обробки оптимальних за критерієм мінімуму енергетичних затрат на обробку;
- експериментальне визначення режимів роботи пристрою магніто-акустичної обробки та його ефективності;
- одержання зразків альтернативного біопалива.

Схема дослідного стенду для проведення експериментальних досліджень технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів та вуглеводневої добавки зображена на рис. 1.13.

Дослідний стенд реалізує технологію одержання альтернативного біопалива при циклічній обробці рідкої суміші, що містять дрібнодисперсну пульпу з біогенних відходів та вуглеводневу складову, наприклад, відходи нафтопродуктів, рослинних жирів та модифікований вугільний пил.

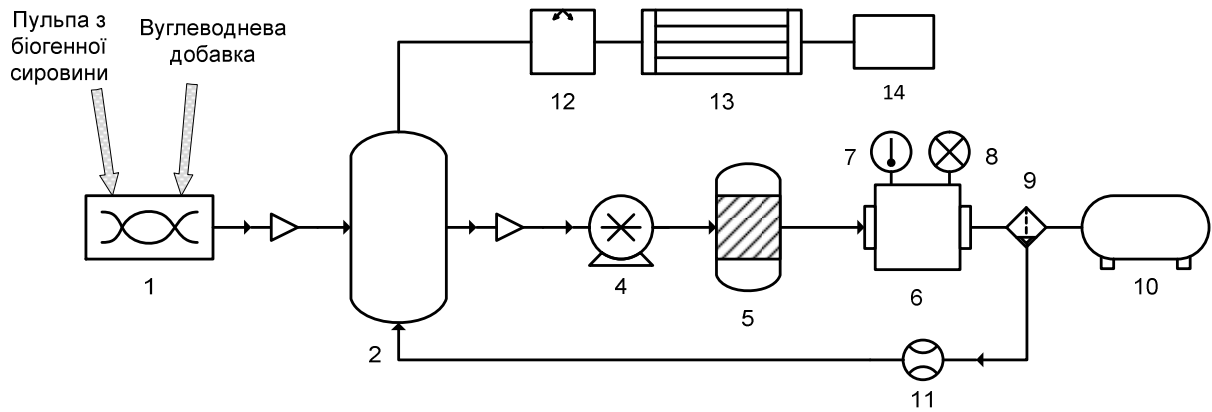


Рисунок 1.13 – Схема будови дослідного стенду

Основними пристроями, що входять в дослідний стенд, є: камера змішувача 1 в яку завантажують вихідні складові суміші; камера змішувача й дегазації 2; циркуляційний насос, який здійснює подачу робочої суміші в технологічні пристрої; пристрій магніто-акустичної обробки 5; кавітативний реактор 6; датчики температури 7 і тиску 8; регулятор 9, який здійснює перемикання гідравлічних контурів по сигналу аналізатора робочої суміші – на повторну обробку або в ємність 10 накопичення готового продукту - біопалива; тепловодомір 11; вакуумний насос 12, який відкачує з камери 2 газові продукти, що утворюються в кавітативному реакторі; конденсатор 13, де конденсується пар; ємність для конденсату 14.

Модульна побудова дослідного стенду дозволяє легко міняти його конфігурацію для виконання поставленої задачі, підключати необхідні пристрої, встановлювати додаткові датчики і вимірювальну апаратуру або відключати непотрібні пристрої чи апаратуру.

Принципова електрична схема підключення основних пристроїв стенду і датчиків вимірювання зображена на рис. 1.14.

У схему включений перетворювач частоти ALTIVAR 21 для управління частотою обертання ротора кавітатора, а також датчики тиску і температури. Електроприводи циркуляційного насосу, змішувача та вакуумного насосу до електроживлення без управління частотою обертання.

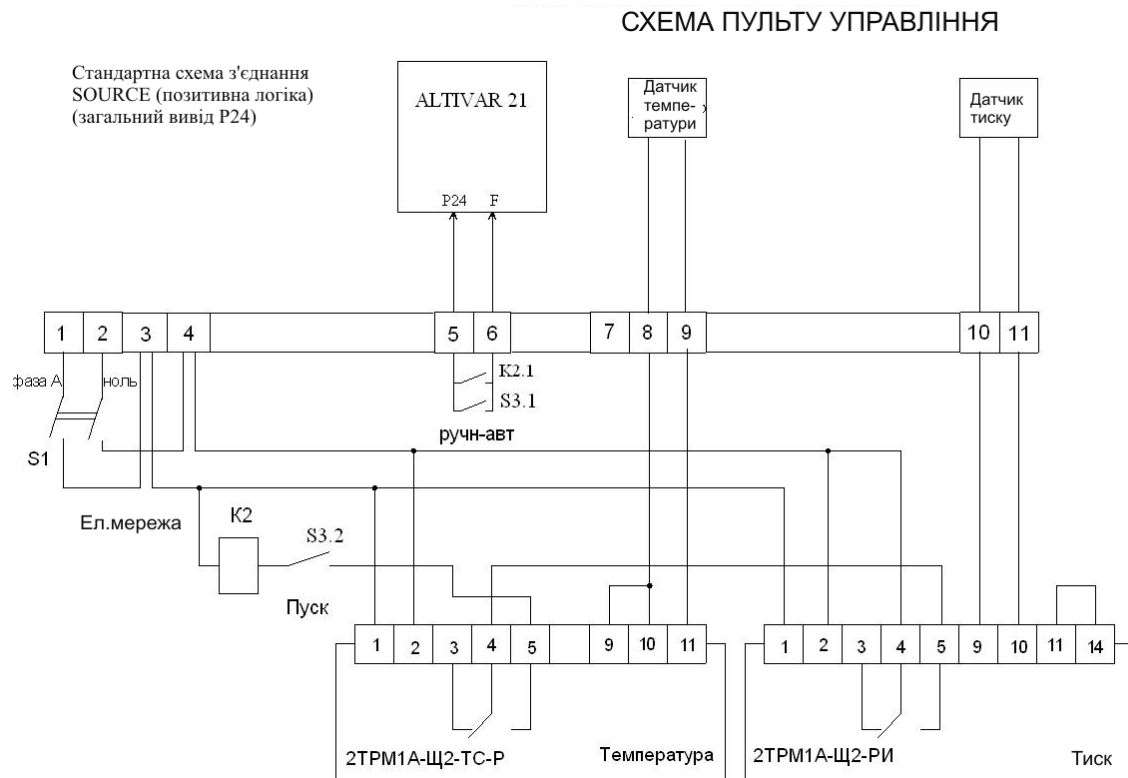


Рисунок 1.14 - Принципова електрична схема підключення основних пристроїв стенду

Для обліку маси рідини, що проходить через кавітаційний реактор та виділеної теплової енергії в склад дослідного стенду включений тепловодолічильник Ергомера–125. Лічильник забезпечує безперервне вимірювання величин – теплової потужності, витрат рідини, температури та тиску. Результати вимірювання перетворюються в імпульсні цифрові сигнали, які по протоколу обміну інтерфейсу RS-232 або RS-485 передаються на дисплей лічильника та при необхідності в автоматизовану систему контролю, обліку та управління.

На рис. 1.15, 1.16, 1.17, 1.18 і 1.19 зображені окремі вузи дослідного стенду та зовнішній вигляд самого стенду на рис. 1.20.



Рисунок 1.15 – Зовнішній вигляд кавітаційного реактора

Як видно з рис. 1.15 на вході й виході кавітаційного пристрою встановлені датчики температури й тиску, що дозволяє по їх показникам контролювати технологічні параметри в оброблюваному середовищі.

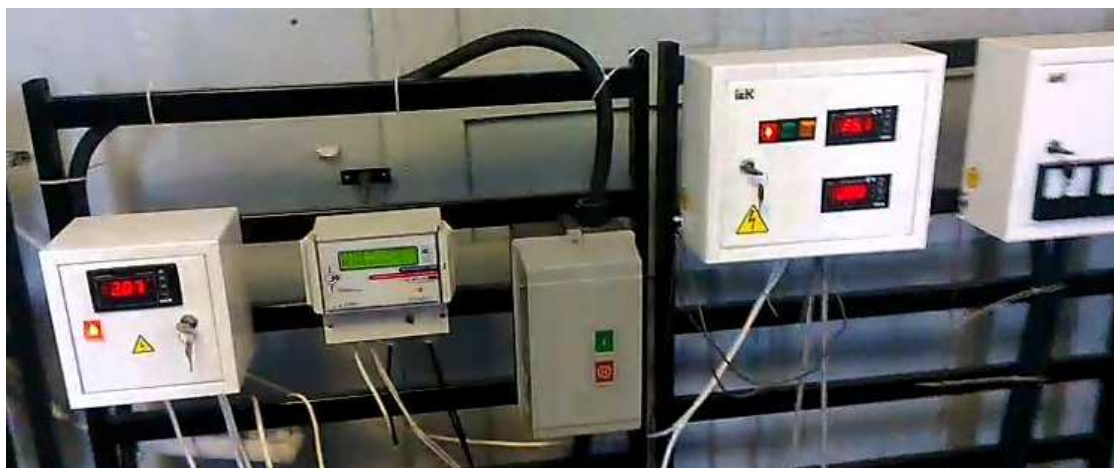


Рисунок 1.16 – Пульт управління дослідним стендом



Рисунок 1.17 – Частотний перетворювач



Рисунок 1.18 – Тепловодолічильник Ергоміра-125



Рисунок 1.19 – Показання датчиків температури й тиску

За показниками приладами обліку рівня споживання електричної енергії та продуктивності випробувального стенду визначається енергоефективність процесу.

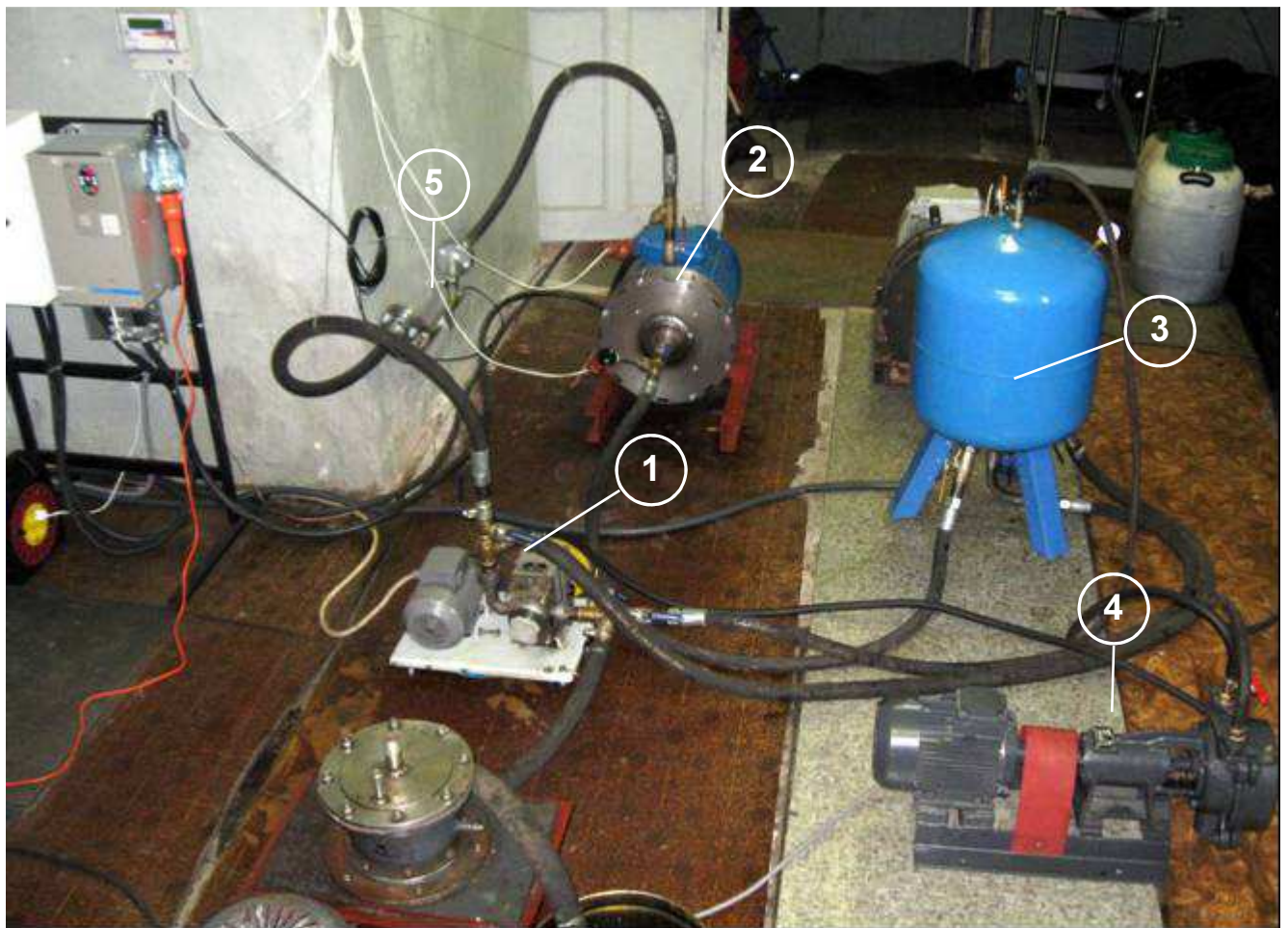


Рисунок 1.20 – Зовнішній вигляд дослідного стенду

На рис. 1.20 зображений зовнішній вигляд дослідного стенду. Стенд містить циркуляційний насос 1, кавітаційний реактор 2, пристрій магніто-акустичної обробки 3, вакуумний насос 4, тепловодолічильник «Ергоміра-125» 5.

1.4.5 Дослідження зразків АБП в профільних акредитованих лабораторіях

При одержанні зразків альтернативного біопалива на дослідному стенді використовувались: муловий осад стічних вологістю 80%, модифікований вугільний пил з використанням мазуту М100 та спиртова барда вологістю 75%.

Характеристики вихідної сировини

Муловий осад

Протокол випробування приведений в Додатку А.6. За даними протоколу:

– масова частка золи, %	– 31,7
– масова частка сірки, %	– 0,11
– нижня теплота згоряння на сухе паливо, кДж/кг	– 15813
Ккал/кг	– 3777

Модифікований вугільний пил

Модифікований вугільний пил виготовлений з вугільного штибу зі збагачувальної фабрики його розсівом на ситові з виділенням фракції з розміром вугільних частинок до 0,25 мкм. В процесі модифікації був використаний вуглеводень – мазут М100, який має в'язкість 6,8°ВУ. Така в'язкість, як показано в розділі 1.3.7, забезпечує достатню стійкість одержаного палива. Модифікація проведена у співвідношенні мазуту до вугільного пилу 25% : 75%.

В Додатку Б приведений протокол дослідження вугільного пилу. За даними протоколу характеристики використаного вугільного пилу такі:

– вологість, %	– 19,8
– масова частка золи, %	– 42,6
– масова частка сірки, %	– 1,25

– нижня теплота згоряння	
на сухе паливо, кДж/кг	– 32920
Ккал/кг	– 7863
– масова частка водню, %	– 2,74

Значна зольність сухого мулового осаду визначається вмістом в осаді мінеральних речовин, таких як частинки піску, глини, окисли заліза, солі кальцію та ін. Згідно даних аналізу складу золи мулового осаду стічних вод зола осаду містить:

розчинні в воді солі, %	– 2,5;
оксид кремнію (кварцовий пісок), %	– 19,5;
оксиди і солі кальцію, магнію, заліза, %	– 51,7;
невизначені речовини на фільтрі, %	– 26,3.

Барда

За лабораторними даними підприємства барда обезводнена з вологістю 75% містить близько 25% сухих речовин.

Склад сухих речовин барди:

- протеїну, %	– 25...30;
- клітковина, %	– 13,4...21,2
- зола, %	– 5...6;
- азот небілковий, %	– 1,0..1,5.

Згідно протоколу дослідження, який приведений в Додатку Г, нижча теплота згоряння сухого залишку спиртової барди, яка була використана в дослідженнях, рівна 20550 кДж/кг або 4908 Ккал/кг.

на сухе паливо, кДж/кг	– 32920
Ккал/кг	– 7863.

В табл. 1.16 наведені дані лабораторних випробувань, протоколи яких приведені в Додатках А – Г. Досліджені три зразки АБП: зразок АБП №1, зразок АБП №2 і зразок АБП №3.

Зразок АБП №1. Протокол випробування зразка приведений в Додатку А.7. Біопаливо одержане з суміші зневодненого мулового осаду вологістю 80%

та відпрацьованого мастила в співвідношенні 50% : 50%. При аналізі потрібно брати до уваги, що теплота згоряння відпрацьованого мастила вище мазуту М100 від 1,5% до 4,0% і її значення для відпрацьованого мастила знаходиться в межах від 9670 Ккал/кг до 10270 Ккал/кг .

Зразок АБП №2. Протокол лабораторного дослідження зразка приведений в Додатку В. Біопаливо одержане з суміші зневодненого мулового осаду вологістю 80% та модифікованого мазутом М100 вугільного пилу у співвідношенні 20% : 80%.

Зразок АБП №3. Протокол лабораторного дослідження зразка приведений в Додатку Г. Біопаливо одержане з суміші зневодненої спиртової зернової барди вологістю 75% та відпрацьованого мастила у співвідношенні 1 : 3.

Таблиця 1.16 – Характеристики АБП за даними лабораторних досліджень

№№ з/п	Найменування показника	Од. вимір.	АБТ №1	АБТ №2	АБТ №3	М100
1.	Щільність при 20°C	Кг/м ³	921	1010	932	1015
2.	Масова частка води	%	12,2	9,5	32,3	
3.	В'язкість при 80°C	Град ВУ	5,48	23,0	7,13	6,8
4.	Частка механічних домішок	%	8,7	28,2	0,914	1,0
5.	рН водної витяжки	—	5,0	6,77	8,3	
6.	Частка сірки	%	0,2	0,14	0,31	<3,5
7.	Коксівність:					
	- I ступеня (400°C)		6,72	15,8	1,78	
	- II ступеня (600°C)		6,40			
8.	Температура спалаху у відкритому тиглі	°C	185	215	215	>110
9.	Температура застигання	°C	-16	-15	-4	25
10.	Теплота згоряння нижча в перерахунку на сухе паливо	кДж/кг Ккал/кг	40823 9750	39140 9348	41120 9821	39900 9530
11.	Масова частка водню на сухе паливо	%	7,62	8,69		

Потрібно зважувати на те, що при одержанні АБП використовувався вугільний штиб із зольністю 42,6%. Очевидно, що його використання призведе до значної зольності АБП. Як видно з табл. 1.16 зольність зразку АБП №2 висока – 28,2%, проте це АБП має значну теплоту згоряння – 9348 Ккал/кг, що робить його, зважаючи на низьку ціну компонентів палива, привабливим.

Для наочності основні характеристики палива, які визначають якість палива, відображені діаграмами на рис. 1.21 – 1.26.

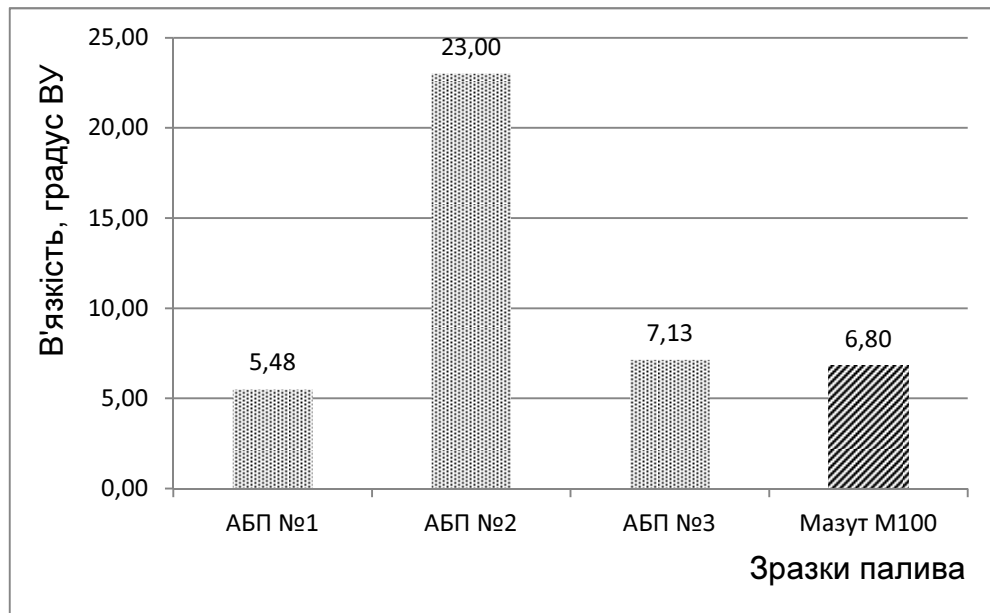


Рисунок 1.21 – Значення в'язкості досліджених зразків АБП

Як видно з діаграми в'язкість палива з використанням модифікованого вугільного пилю значно перевершує в'язкість інших зразків палива. Висока в'язкість зменшує швидкість його розшарування, що робить одержане паливо більш стабільним при його зберіганні.

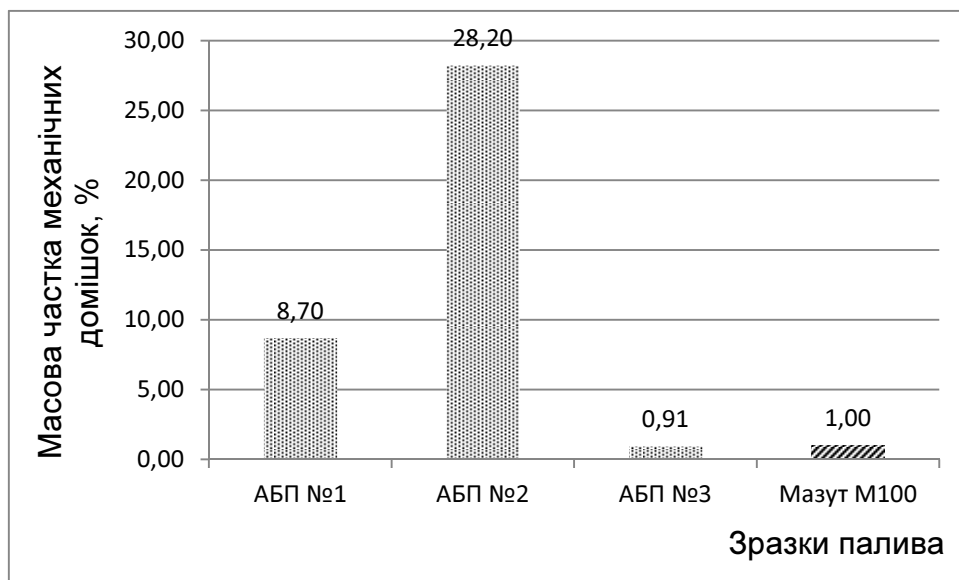


Рисунок 1.22 – Значення масової частки механічних домішок досліджених зразків АБП

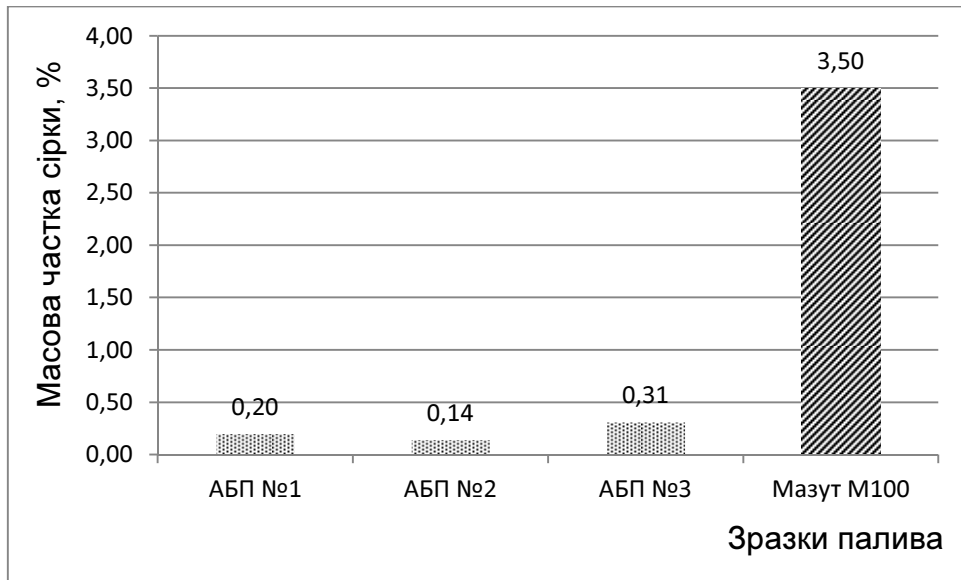


Рисунок 1.23 – Значення масової частки сірки в досліджених зразків АБП

Як видно з рис. 1.23 зразка АБП №3 містить найбільше сірки, що спричинене більш високим вмістом білку в спиртовій барді ніж в муловому осаді.

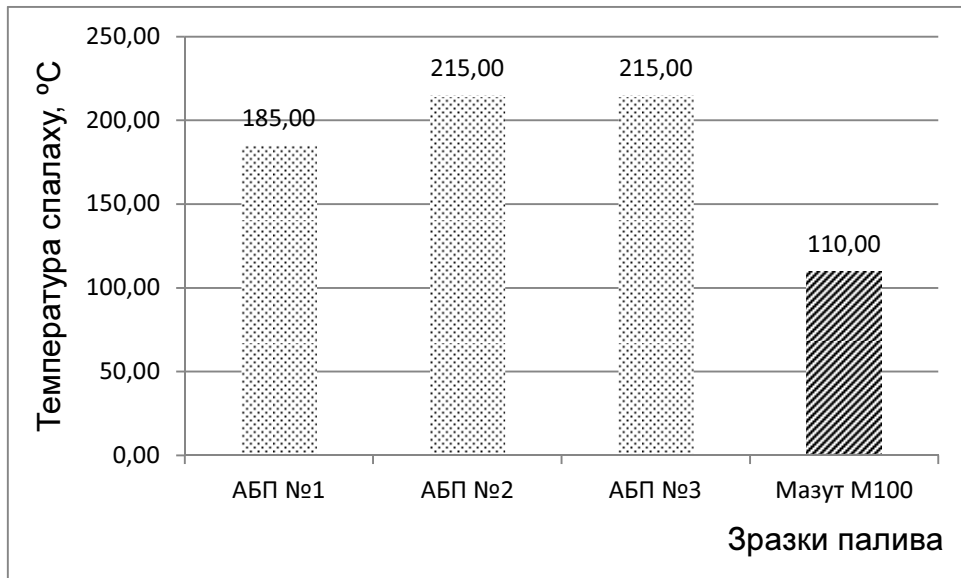


Рисунок 1.24 – Температура спалаху в закритому тиглі досліджених зразків АБП

Зразки альтернативного біопалива характеризуються більш високою температурою спалаху в закритому тиглі ніж мазут М100 із-за більш низької концентрації летючих речовин.

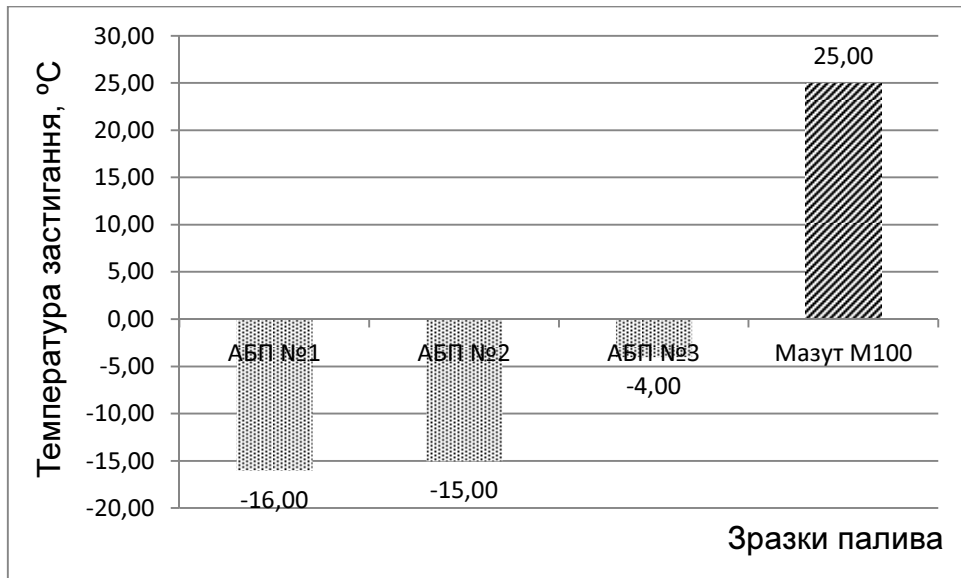


Рисунок 1.25 – Температура застигання досліджених зразків АБП

Температура застигання зразків АБП значно нижча від температури застигання мазуту М100. Це як і в'язкість важливий параметр при використанні палива. Параметр характеризує умови транспортування, злива, наливання, перекачування палива і підготовку палива до його використання.

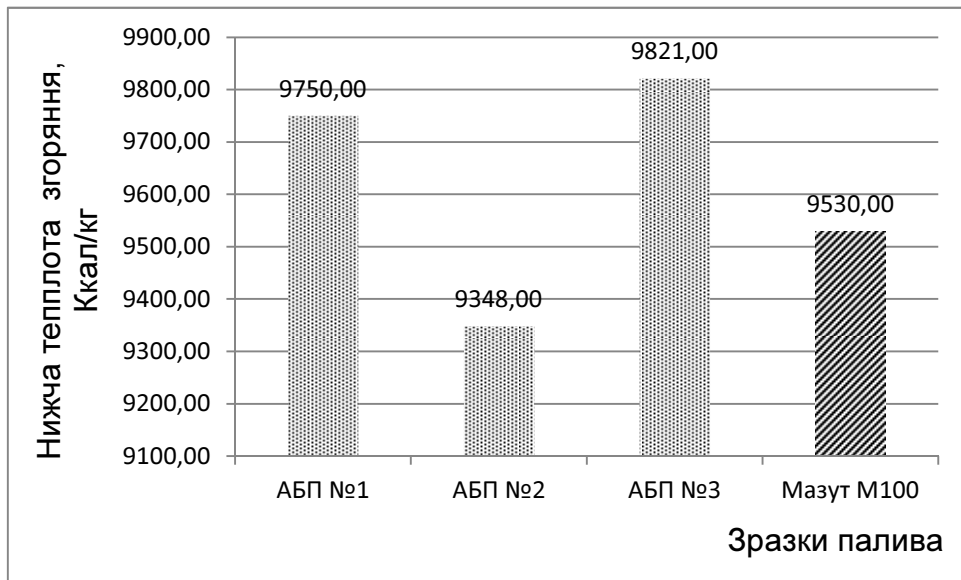


Рисунок 1.24 – Нижча теплота згоряння в перерахунку на сухе паливо досліджених зразків АБП

Перевершення нижчої теплоти згоряння для зразків АБП №1 і №3 теплоти згоряння мазуту М100 визвано тим, що в якості вуглеводневої компоненти

було використане відпрацьоване мастило, теплота згоряння якого до 10270 Ккал/кг.

Усі зразки одержаного біопалива випробувані на вогневому стенді. Горіння усіх одержаних зразків палива стабільне. Температура горіння висока, судячи по світінні вогневого факелу, температура горіння в межах 1100 – 1200°C.

На рис. 1.25 зображено процес горіння зразка АБП у вогневому стенді.



Рисунок 1.25 – Процес горіння АБП на вогневому стенді

На підставі аналізу результатів лабораторних досліджень зразків альтернативного біопалива, таких їх характеристик можна зробити висновок щодо придатності цих видів палива для одержання теплової та електричної енергії.

1.4.6 Оцінка економічних показників технології одержання альтернативного біопалива з біогенних відходів та модифікованого вугільного пилу

Аналіз економічних показників технології одержання альтернативного біопалива був виконаний для технологічної лінії продуктивністю лише 1 т/год.

При експлуатації такої виробничої лінії, оснащеною тільки одним технологічним модулем продуктивністю 1 т/год, при 3-х змінній роботі за місяць бу-

де вироблятися 540 тонн АБП. З цього палива при ККД 85% можна виробити біля 4 000 Гкал теплової енергії, або при ККД 40% більше 2 000 МВт·год електричної енергії.

1.4.6.1 Технічне устаткування

Технологічна лінія з виробництва альтернативного біопалива складається з виробничого обладнання, основою якого є технологічний модуль, що здійснює переробку мулового осаду в АБП, реалізований в модульному виконанні. Модульний принцип побудови забезпечує можливість швидко нарощувати виробничу потужність виробничої лінії установкою додаткових технологічних модулів, а також забезпечує їх мобільність для оперативного розміщення поблизу джерел сировинних компонентів.

Типовий варіант виробничого модуля технологічної лінії продуктивністю 1 тонна в годину зображений на рис. 1.21.



Рисунок 1.26 – Виробничий модуль технологічної лінії

Він складається з загрузочного бункера, блоку попередньої обробки сировинної суміші та технологічного блоку. На переробку подається суміш з мулового осаду, спиртової барди або іншої біогенної сировини з вуглеводневою

добавкою – модифікованим вугільним пилом. На виході в результаті кавітаційної обробки одержують продукт – альтернативне біопаливо (АБП) близький по своїм споживчим якостям до топкового мазуту М100.

1.4.6.2 Екологічні фактори

- 1). Утилізація біогенних відходів.
- 2). При виробництві АБП не відбувається шкідливих викидів та інших негативних для навколишнього середовища явищ.
- 3). Викиди газових продуктів згоряння альтернативного біопалива нижчі гранично допустимого рівня.

1.4.6.3 Сировинна й енергетична база виробництва

При виробництві альтернативного біопалива з біогенних відходів використовується сировина, яка підлягає утилізації, тому при економічній оцінці її вартість враховуватися не буде.

Сировинну й енергетичну базу для виробництва представлена в табл. 1.17.

Таблиця 1.17 – Сировинна й енергетична база

Вид сировини	Од. вим.	Потреби виробництва на місяць	Вартість за 1од., грн.	Витрати на сировину, тис.грн
Електроенергія	кВт	95 000	1,83576	174,40
Модифікований вугільний пил	т	280	3500	980,00
Усього				1 154,40

Показники якості сировини не вимагають постійних параметрів, тому що в процесі виробництва існує можливість корегувати ці параметри до необхідних значень.

Нижче в табл. 1.18 приведені виробничі витрати при умові трьохзмінної роботи устаткування. При розрахунку витрат по статті заробітна плата був використаний рівень середньогалузевої заробітної плати для комунальних підприємств з очистки стічних вод.

Таблиця 1.18 - Витрати виробництва на місяць

Найменування статей	Сума, тис. грн.
Сировина й матеріали	1154,40
Заробітна плата	63,00
Страховання (22%)	13,86
Транспортні витрати	26,00
Інші витрати	42,74
Разом	1300,00

Обсяги продажів продукції по рокам представлені на рис. 1.27.

Розрахунок проводився за умови, що ціна виробленої продукції в перерахунку на тону умовного палива на 20% нижче від ціни викопних видів палива, таких як природний газ та мазут.

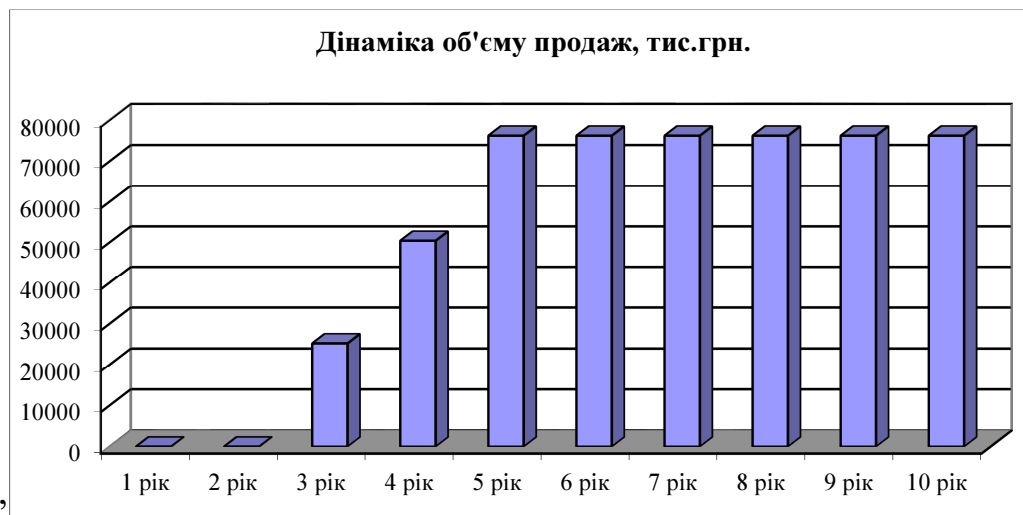


Рисунок 1.27 – Обсяги продажів АБП по роках

Динаміка одержання чистого прибутку, виходячи із запланованих обсягів продажів, представлена на рис. 1.28.

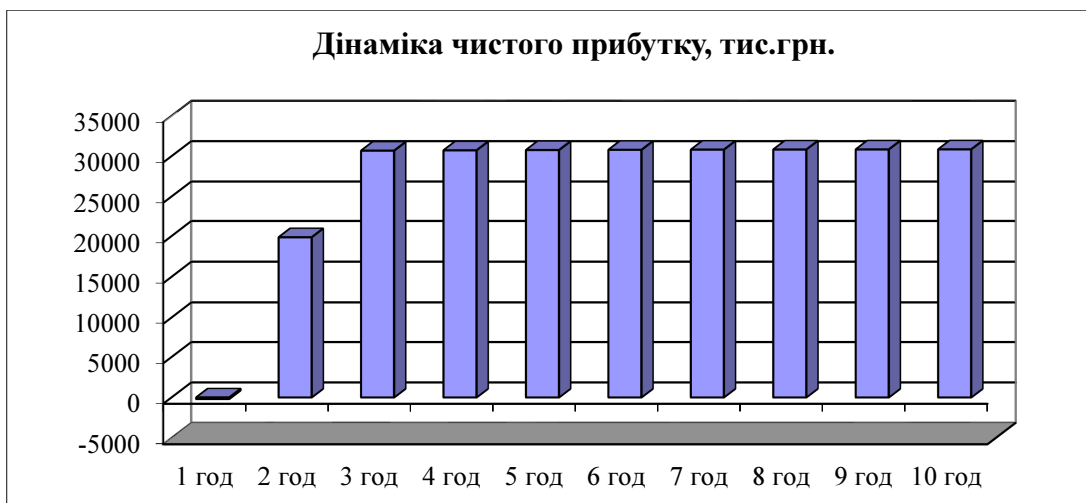


Рисунок 1.28 - Динаміка одержання чистого прибутку

При прийнятих вихідних даних розрахункові фінансові результати в цілому будуть такими:

Строк окупності проекту (PB), місяців:	15,1;
Рентабельність проекту (NPM) середня, %	– 36,3;
Прибуток до оподаткування, тис. грн	– 162 195,00;
Чистий прибуток, тис. грн	– 138 568,00;
Баланс готівки за 10 років, тис. грн.	– 144 136,00;

При ставці дисконтування 20% річні показники ефективності капітальних вкладень мають наступне значення:

Чистий дисконтований дохід (NPV), тис. грн	– 101 535,87;
Індекс прибутковості (PI)	– 6,04;
Внутрішня норма прибутковості ³ (IRR), %	– 75,00;
Дисконтований строк окупності (DPB), місяців	– 18,0.

Аналіз показників економічної ефективності дозволяє стверджувати, що впровадження розглянутої технології є інвестиційно-привабливим, оскільки він характеризується низьким строком окупності капітальних вкладень – 15 місяців і показником рентабельності інвестицій 36,3 %, який рази вище, ніж середня річна процентна ставка в національній валюті.

³ Визначена як значення ставки дисконтування, при якій NPV=0

Висновок по розділу 1

1. Використання магніто-акустичної обробки скорочує технологічний цикл обробки робочої суміші на 15–25%.

2. Для здешевлення виробництва альтернативного біопалива в якості вуглеводневої добавки запропоноване використання модифікованого вугільного пилу.

3. Розроблена технологія одержання модифікованого вугільного пилу з використанням енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону, що значно прискорює процес модифікації.

4. Для наочності технологічний процес модифікації представлений у вигляді технологічної карти із зазначенням послідовності операцій та температурних характеристик процесів.

4.1. Методом розсіву вугільного пилу виділення фракції розміром 0–0,250 мкм. Температура процесу 20–25°C.

4.2. Визначення вологості по стандартним методикам.

4.3. Сушіння в середовищі інертного газу при температурі 180–190°C.

4.4. Визначення вологості. Вологість сухого вугільного пилу повинна бути не більше 1%.

4.5. Змішування сухого вугільного пилу з рідкими вуглеводнями. Процес змішування здійснюється при температурі на 20–25°C нижчою температурі кипіння рідкого вуглеводню.

4.6. Термодинамічний контроль рівномірності розподілу рідких вуглеводнів на поверхні частинок вугільного пилу.

4.7. Подача самотоком модифікованого вугільного пилу в резонаторну камеру при температурі не нижче 50°C.

4.8. Вплив ЕМЕ НВЧ на композицію визначається для кожного варіанту складу композиції індивідуально. Час впливу залежить від температури кипіння рідких вуглеводнів, їх в'язкості й кількості в композиції.

4.9. Визначення теплотворної властивості композиції по стандартній методиці.

4.10. Визначення плинності по стандартній методиці.

4.11. Визначення часу мимовільного розшарування на композиції на компоненти.

Рекомендації з використання вугільного штибу для його застосування в якості компоненту АБП

Компоненти АБП

1) Вугільний штиб

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} - 5500 - 5900 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}, \quad \text{вологість} - 19,3\%$$

2) Солярова олія

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} - 9700 - 11000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}, \quad \text{вологість} - 19,3\%$$

3) Муловий осад з очисних споруд

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} - 1100 - 1500 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}, \quad \text{вологість} - 75-80\%$$

Варіанти композицій при виготовленні палива при вологості штибу не більше 1% наведені в табл. 1.19.

Таблиця 1.19 – Варіанти композицій для приготування АБП

№ з/п	Муловий осад, мас. %	Штиб, мас. %	Солярова олія, мас. %	Теплотворна властивість, ккал/кг	Плинність при 50°C, кг/год
1.	20	40	40	6400	160–180
2.	20	45	35	6230	98–110
3.	20	50	30	8080	63–80
4.	20	—	80	8600–8850	Не менше 600
5.	20	80	—	4480–4600	Не тече

Для реалізації рекомендується склад композиції №№ 1 і 2 для яких можливі допуски по масі $\pm 2,5\%$ при умові, що маса мулового осаду залишається на рівні 20%.

2. Мікрохвильова безперервна регенерація молекулярних сит при одержанні абсолютного спирту мембранним методом

2.1 Обґрунтування методів досліджень

2.1.1 Стан проблеми

Широке застосування абсолютного спирту в якості паливної добавки спричинені його властивостями: високий показник октанового числа; утворює стійкі суміші з моторним паливом; суміші з моторним паливом мають кращі антидетонаційні властивості, що дозволяє застосовувати більш високу степінь стиснення, проте для його виробництва використовуються застарілі технології основані на використанні у виробничому надзвичайно шкідливого бензолу.

Сучасні виробництва одержання абсолютного спирту застосовують екологічно чисті технології, засновані на використанні молекулярних сит.

Молекулярні сита – кристалічні алюмосилікати, що мають тривимірну структуру з тетраедрів оксиду кремнію й оксиду алюмінію й характеризуються точним і однорідним розміром пор. Пори в молекулярних ситах досить великі, щоб пропускати невеликі молекули, але в той же час вони затримують більші молекули, що визначило їхнє використання як осушувачі й адсорбентів. Розмір молекули води становить 2,8 Å, а молекули етанолу - 4,4 Å. У технології одержання абсолютного спирту в якості молекулярних сит часто використовують цеоліт з розміром пор 3 Å або 4 Å (ангстрем).

Ця технологія складається із двох основних процесів: адсорбції (поглинання) води з пароподібної суміші етанол/вода молекулярним ситом і регенерації (десорбції, видалення поглинутої води й відновлення поглинаючої здатності) абсорбенту після насичення його водою.

Рівні швидкості адсорбції і десорбції рівні свідчать про встановлення адсорбційної рівноваги. У стані рівноваги кількість адсорбованих молекул залишається постійною скільки при незмінних зовнішніх умовах (тиск, температура і склад системи).

При адсорбції суміш етанол/вода в пароподібному стані пропускають через шар цеоліту. Цеоліт поглинає молекули води, а молекули етанолу проходять крізь його шар.

Адсорбована вода може бути десорбованою з адсорбенту зміною рівноваги, що установились при адсорбції. Цього можна досягти зміною зовнішніх умов: шляхом збільшення температури адсорбенту (термічна регенерація), зменшенням парціального тиску адсорбованої речовини, або зміною обох параметрів одночасно.

Відповідно до цього регенерацію здійснюють із використанням двох методів: TSR (Temperature Swing Regeneration) і PSR (Pressure Swing Regeneration).

У методі TSR здійснюється термічна регенерація шляхом пропускання через шар адсорбенту гарячого газового потоку збездвоженого повітря або інертного газу з температурою, що перевищує температуру, при якій відбувався процес адсорбції, що забезпечує випарювання води з адсорбенту й видалення водяної пари з колони. Тиск при протіканні процесів адсорбції й десорбції при цій технології залишається практично постійним.

Цьому методу властиві такі недоліки:

- необхідність у використанні газів, зберігання й підготовка (зневоднювання, нагрівання) що вимагає більших витрат. Крім того, виникають екологічні проблеми, пов'язані з очищенням і утилізацією використаних газів;

- нагрівання до високої температури насиченого водою молекулярного сита, що перебуває в колоні (адсорбері), пов'язане з необхідністю нагрівання й самого адсорбера, що істотно підвищує енергетичні витрати на процес десорбції;

- процес десорбції протікає повільно через низьку теплопровідність речовин в адсорбері.

В установках по зневоднюванню етанолу з використанням молекулярних сит для регенерації останніх частіше використовується технологія PSR як більш

економічна, ніж технологія TSR. При PSR адсорбер працює при майже постійній температурі [29].

Процес регенерації при PSR заснований на сильному зниженні тиску в колоні в порівнянні з тиском у колоні, коли вона перебувала в режимі адсорбції, що приводить до випарювання води з адсорбенту, нагрітого енергією, що виділяється при адсорбції, і видаленню водяної пари за допомогою газового потоку або вакуумним насосом. На кожний кілограм адсорбованої цеолітом води виділяється 4186,8 кДж тепла (теплота адсорбції). Відповідно на кожний кілограм десорбованої води цеоліту повинне бути забезпечене надходження такої ж кількості тепла. Отже, під час адсорбції шар адсорбенту буде нагріватися, а під час десорбції буде охолоджуватися.

Сухий цеоліт може адсорбувати воду до 22% своєї маси (адсорбційна ємність). Повне використання адсорбційної ємності може привести до високої різниці температур між циклами адсорбції й десорбції. Це, у свою чергу, приводить до прискореного виходу з ладу молекулярного сита. Щоб уникнути цього в методі PSR працюють при більш низьких адсорбційних рівнях, обмежуючи тим самим стадію сушіння шляхом скорочення часу адсорбції, одночасно запобігаючи високій різниці температур між циклами [30]. Однак, ці заходи приводять до неповного використання адсорбційної ємності цеоліту, тим самим знижують продуктивність всієї установки.

Якщо в процесі десорбції деяким економічним способом організувати нагрівання води, що втримується в молекулярному ситі, компенсуючи охолодження його при зниженні тиску й випарюванні води, можна домогтися зменшення різниці температур між процесами адсорбції й десорбції, що дозволить повністю використовувати адсорбційну ємність молекулярного сита, а, отже, підвищити продуктивність установки.

Існує ряд рішень удосконалення технології PSR [31, 32, 33]. Всі вони спрямовані на зниження рівня споживання енергії шляхом оптимізації використання парів зневодненого спирту, що утворюються на стадії адсорбції. Один зі шляхів [33] полягає в тому, що водяною парою перегрівають частину зневодне-

ного спирту, отриманого на стадії адсорбції, і на стадії регенерації при тиску нижче атмосферного пропускають його через молекулярне сито, насичене водою, для десорбції води.

Ця операція спрямована на те, щоб, з одного боку, компенсувати надмірне охолодження молекулярного сита при регенерації в умовах зниженого тиску, а з іншого боку - щоб організувати вихідний потік з десорбційної колони (парова суміш спирту й води). Виключивши використання водяної пари при регенерації молекулярного сита, можна суттєво зменшити витрати енергії. Цього можна домогтися, якщо здійснювати нагрівання адсорбованої води безпосередньо в адсорбенті.

Таке нагрівання адсорбованої води в цеоліті можливо здійснити з використанням енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону. Оскільки вода внаслідок своїх властивостей полярної рідини поглинає енергію електромагнітних коливань високої частоти більш інтенсивно, ніж цеоліт, то ЕМЕ буде витрачатися в основному на нагрівання води в цеоліті, а не всієї маси цеоліту та колони в цілому. При цьому досягається можливість практично миттєвої зміни теплового впливу на молекулярне сито, що дозволяє підвищити точність управління процесом нагрівання й забезпечити його відтворюваність.

Для рішення проблеми регенерації молекулярних сит способом зневоднювання їх під дією ЕМЕ був проведений ряд досліджень [34]- [37]. Проблема регенерації актуальна для різних застосувань молекулярних сит. Крім одержання абсолютного спирту з азеотропної суміші етанол/вода молекулярні сита використовуються для зневоднювання масел (наприклад, трансформаторних), газів та ін.

Стосовно до технології одержання абсолютного спирту дослідження процесу регенерації молекулярних сит наведені в роботах [38] – [40].

Загальним недоліком цих досліджень є те, що вони проводилися з молекулярним ситом малої маси (усього 4 г) і на одній частоті електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону 2450 МГц. Використання молекулярного сита малої маси та об'єму виключає можливість вивчення поглинання ЕМЕ в системі

цеоліт/вода залежно від глибини проникнення електромагнітного випромінювання й процесу масотеплопереносу в реальних молекулярних ситах промислових установок.

Частота електромагнітного випромінювання 2450 МГц застосовується у відносно малопотужних генераторах НВЧ (до 5 кВт) у той час, як для регенерації реальних сит масою сотні кілограмів будуть потрібні більш потужні джерела НВЧ енергії, що працюють на частоті 915 МГц і менше.

2.1.2 Постановка завдання експериментальних досліджень

Для обґрунтування можливості, доцільності й ефективності використання ЕМЕ випромінювання НВЧ діапазону для регенерації молекулярних сит із цеоліту необхідно досліджувати, які зміни відбуваються в системі цеоліт/вода при взаємодії з електромагнітним полем в умовах зниженого тиску навколишнього середовища, щоб використовувати їх для відновлення адсорбційної ємності молекулярного сита, а при можливості й збільшити її найбільш економічним способом.

Оскільки молекулярні сита є заповненням циліндричних колон, то збудження електромагнітного поля усередині колони перетворює її в резонатор, а молекулярне сито - у навантаження, що поглинає ЕМЕ з характеристиками, що змінюються, залежно від рівня насичення цеоліту водою. Тому необхідно дослідження властивості молекулярного сита як поглинаючого навантаження, а саме:

- ступінь його узгодження із джерелом електромагнітної енергії залежно від рівня насиченості цеоліту водою як характеристики використання ЕМЕ, що підводиться для десорбції води,
- зміна властивостей молекулярного сита поглинати ЕМЕ в межах станів повністю зневодненого цеоліту й гранично насиченого водою,
- залежності ступеня використання потужності джерела ЕМЕ на десорбцію води від рівня потужності джерела;
- дослідження режиму регенерації молекулярного сита при імпульсному впливі.

2.2 Аналіз економічної переваги процесу НВЧ-регенерації

Економічну перевагу процесу НВЧ-регенерації цеоліту доцільно оцінити на основі порівняльного аналізу затрат енергії в процесі НВЧ-регенерації та існуючими технологіями регенерації, наприклад, з конвекційним способом.

Порівняльне експериментальне дослідження процесів регенерації молекулярних сит $3\text{\AA}$, що використовувалися для сушіння етанолу при конвективному й мікрохвильовому нагріванні, проведено в роботі [40]. Експерименти проводилися на зразках масою 4 г на частоті 2,45 ГГц. НВЧ-регенерація реалізовувалася за допомогою мікрохвильового поля потужністю 75 Вт, змінними процесу були час і температура регенерації. Ці ж параметри були при конвекційній регенерації. Було встановлено (див. рис. 2.1), що при мікрохвильовому нагріванні за 15 хвилин десорбується така ж кількість води, як за 45 хвилин при конвективному способі регенерації.

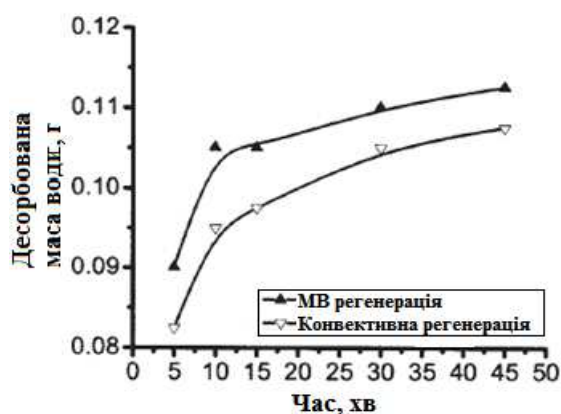


Рисунок 2.1 - Графік залежності десорбованої води від часу

Питомі енергії регенерації (відношення поглиненої енергії до кількості десорбованої води або до кількості обробленого молекулярного сита) явно краще у випадку мікрохвильової регенерації (див. рис. 2.2 і 2.3).

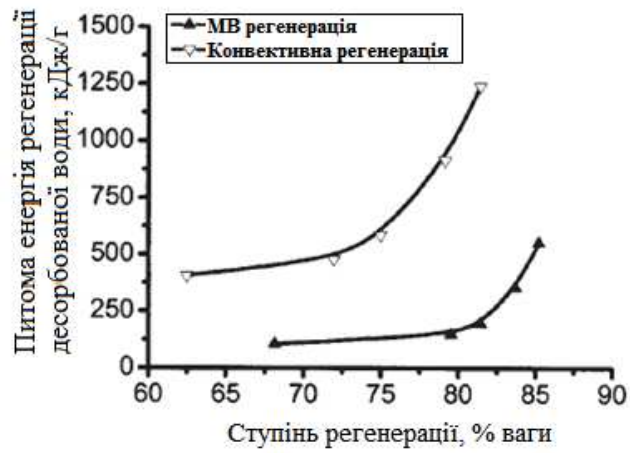


Рисунок 2.2 – Графік залежності питомої енергії від ступеня регенерації ($T_{\text{рег}}=190^{\circ}\text{C}$)

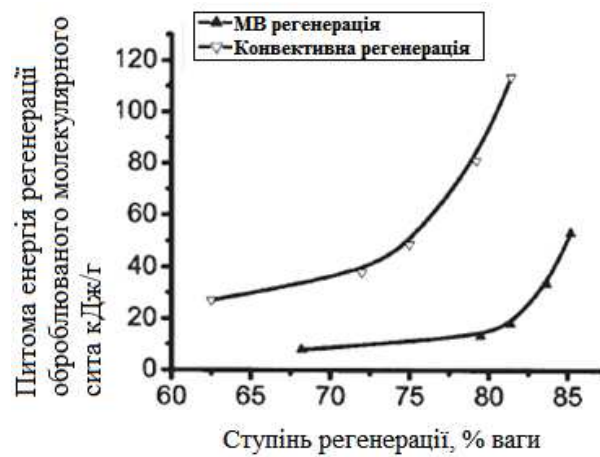


Рисунок 2.3 - Графік залежності питомої енергії регенерації від ступеня регенерації ($T_{\text{рег}}=190^{\circ}\text{C}$)

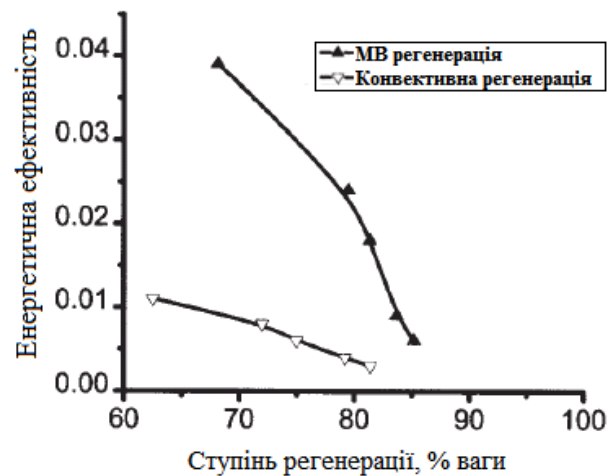


Рисунок 2.4 – Графік залежності енергетичної ефективності від ступеня регенерації

Енергетична ефективність, що визначається як відношення переданої енергії до енергії, що подається, залежно від ступеня регенерації, при мікрохвильовому процесі вище, як показано на рис. 2.4. У діапазоні ступеня регенерації 70...75 % енергетична ефективність мікрохвильового процесу приблизно в чотири рази вище енергетичної ефективності звичайного процесу.

У табл. 2.1 представлене споживання енергії для декількох значень питомої щільності енергії (потужності) електромагнітних хвиль в адсорбері, що застосовувалися у процесі НВЧ-регенерації, а також тривалості процесу та економія енергії в порівнянні з термічною регенерацією [41].

Таблиця 2.1 - Енергоспоживання мікрохвильового процесу

Питома поглинута потужність, кВт/кг сухого цеоліту	0,75	1,69	2,26	8,92
Споживання енергії, кДж/кг на масу десорбованої води	17007	13693	12195	11600
Тривалість процесу, хв	38,0	13,5	9,0	2,2
Економія енергії, %	16,0	32,5	39,9	42,8

Для наочності залежність тривалості процесу НВЧ-регенерації від питомої щільності потужності НВЧ випромінювання з табл. 2.1 представлена графіком на рис. 2.5.

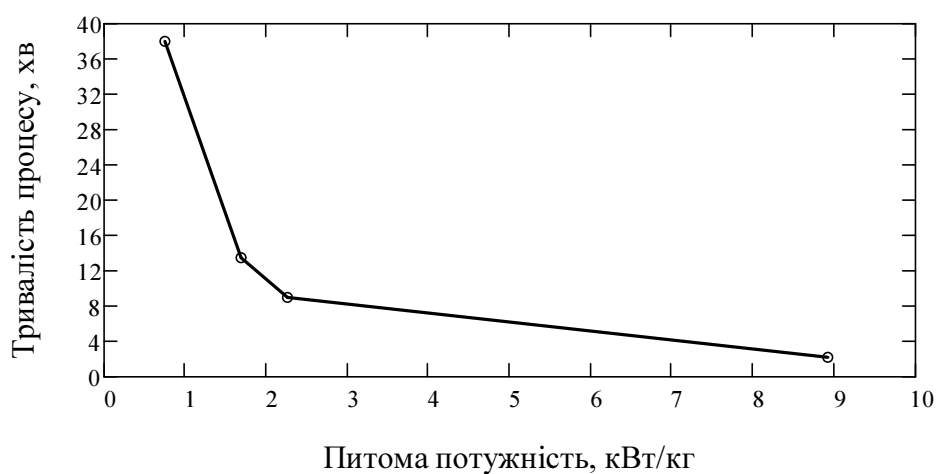


Рисунок 2.5 – Залежність тривалості процесу НВЧ-регенерації від питомої щільності потужності НВЧ випромінювання

З наведеної залежності можна зробити висновок, що з рівня питомої щільності потужності біля 2 кВт/кг ефективність використання ЕМЕ різко зменшується. Крім того потрібно враховувати той факт, що з підвищенням потужності електромагнітного випромінювання із-за існуючої неоднорідності розподілу електромагнітного поля в речовині підвищується ймовірність локального перегріву цеоліту. Це може призводити до руйнування його структури, або зменшення терміну придатності у виробничих процесах. На підставі перелічених факторів можна зробити висновок, що оптимальне значення по критерію мінімальних затрат енергії на процес НВЧ-регенерації питомої щільності потужності електромагнітного близьке до 2,2 кДж/кг для цеоліту.

Істотний вплив на швидкість дегідратації має режим опромінення. Швидкості дегідратації при імпульсному режимі опромінення (15 с включене опромінення цеоліту з потужністю 250 Вт і 60 с – виключене) були отримані на 30 % вище, ніж при постійному режимі опромінення (при збереженні середнього значення потужності опромінення). У той же час поглинена потужність в імпульсному режимі була лише на кілька відсотків вищою, ніж у постійному режимі. Факт більшого поглинання потужності в імпульсному режимі може бути пояснений більш високою температурою, до якої нагрівається шар десорбованого цеоліту. В імпульсному режимі шар цеоліту опромінюється підвищеним значенням падаючої потужності, що приводить до швидкого збільшення його температури. Протягом наступних 60 с вимикання потужності шар цеоліту не встигає охолонути й наступний імпульс потужністю в 250 Вт падає вже на шар з підвищеною температурою. Діелектричні властивості шару цеоліту при підвищеній температурі приводять до збільшення його поглинаючої здатності [42], до кращого перетворення енергії. Це сприяє збільшенню швидкості десорбції в імпульсному режимі опромінення в порівнянні зі швидкостями, отриманими при безперервному режимі опромінення.

Проведені експерименти, при різних витратах газу [41], показують, що цей робочий параметр практично не впливає на швидкість десорбції. Коли витрати газу змінювалися в 15 разів, криві втрати ваги цеоліту при десорбції за-

лишалися практично ідентичними. Тобто, при мікрохвильовому опроміненні роль газу складається більше не в тому, щоб поставляти енергію до десорбованого цеоліту, а в тому, щоб нести десорбовані молекули водяної пари за межі шару цеоліту, підтримуючи, тим самим, низький парціальний тиск у газовій фазі. При переході до промислового масштабу ця обставина приводить до значного скорочення споживання газу.

Проведений аналіз такі переваги мікрохвильової технології в процесі дегідратації цеоліту в порівнянні з конвекційним нагріванням:

- досягається більш висока швидкість десорбції;
- зменшується тривалість процесу;
- знижується питома енергія регенерації;
- підвищується енергетична ефективність;
- знижується витрата газу, що використовується при регенерації.

Ці переваги обумовлюють економічну доцільність використання мікрохвильової технології регенерації цеоліту.

2.3 Експериментальне дослідження процесу НВЧ-регенерації

2.3.1 Матеріали та технічні засоби, що були використані при експериментальних дослідженнях

Для експериментального визначення при проведенні експериментальних досліджень параметрів:

- адсорбційна ємність цеоліту;
- температура нагрівання речовини молекулярного сита;
- ступінь впливу зниженого тиску в адсорбері на процес регенерації

в процесі експерименту проводились вимірювання величин:

- маси адсорбованої води;
- маси десорбованої води;
- температури в адсорбері;
- часу;
- тиск в адсорбері;
- потужності електромагнітних коливань НВЧ діапазону.

В якості молекулярного сита для проведення експериментальних досліджень був вибраний цеоліт марки 4Å ТУ 2163-002-21742510-2004.

При виготовленні лабораторного адсорбера ємності для цеоліту були виготовлені з фторопласту. Вибір цього матеріалу був визначений його фізичними властивостями: відносна діелектрична проникність – 0,02; тангенс кута діелектричних втрат $-2 \cdot 10^{-4}$ та допустимістю його нагрівання до 240°C, що відповідає умовам проведення експериментальних досліджень.

При проведенні експериментальних досліджень використовувалася така апаратура:

- генератор Г4-160 (потужність до 100 Вт, діапазон частот 700...1000 МГц),
- ватметр поглинутої потужності МЗ-54 (межі вимірювання: від 0,1 мВт до 1 Вт, діапазон частот від 0,00 до 17,85 ГГц),
- направлений відгалужувач (коефіцієнт ослаблення – 20 дБ, коефіцієнт спрямованості – 36 дБ, діапазон частот 0,45 ... 1 ГГц),
- узгоджувальний трансформатор (узгодження по КСХ від 1,05 до 3, діапазон частот 0,8 ... 4 ГГц),
- атенюатор (коефіцієнт ослаблення – 20дБ, діапазон частот 700 ... 1000 МГц, потужність 100 Вт),
- вимірювач-регулятор ОВЕН ТРМ1 (похибка вимірювання $\pm 0,15\%$),
- термоперетворювач ТХА2-2 (діапазон температур – 40 ... 250°C, показник теплової інерції – 5с) ДСТУ ISO 9001: 2009,
- секундомір,
- вакуумметр ДВ 05 100 кл. 1,5,
- насос вакуумний ЗНВР-1Д,
- адсорбер НВЧ,
- ресивер,
- теплообмінник,
- шафа сухоповітряна,
- електроплитка,

- адсорбер тепловий,
- випарник.

Вимірювання адсорбційної ємності цеоліту здійснювалося таким чином:

- a) зважування проби цеоліту;
- b) повного висушування проби цеоліту в сухоповітряні шафі;
- c) зважування висушеної проби цеоліту
- d) насичення сухого цеоліту парами води в пристрої, що складається з

електронагрівача, випарника і теплового адсорбера. В якості електронагрівача використовувалася електроплитка, потужність нагріву якої регулювалася вимірником-регулятором ОВЕН ТРМ1 з термодатчиком ТХА2-2 по заданій температурі води в випарнику, виконаному у вигляді металевої циліндричної ємності. Пара надходила в тепловий адсорбер у вигляді металевої циліндричної ємності з дном з густої мідної сітки, яка з'єднана з випарником.

Експериментальні дослідження параметрів молекулярного сита з сухим цеолітом при нагріванні електромагнітної енергією і дослідження процесу регенерації молекулярного сита з насиченим водою цеолітом під впливом електромагнітної енергії і зниженого тиску проводилися на експериментальній установці, структурна схема якої наведена на рис. 2.6.

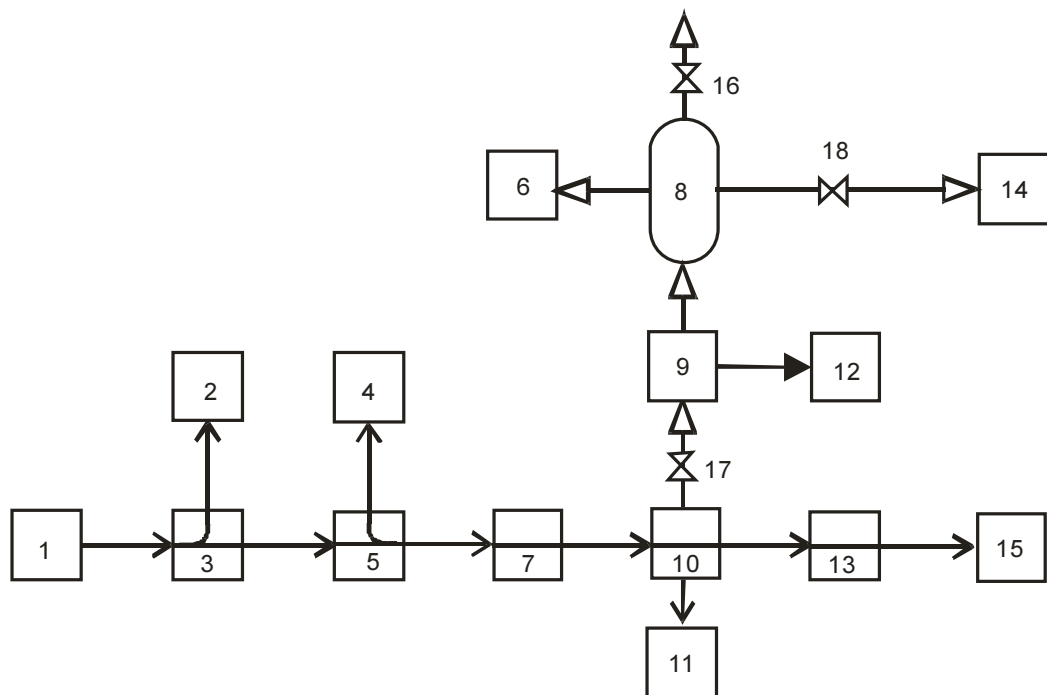


Рисунок 2.6 – Структурна схема експериментальної установки

Принцип дії експериментальної установки

Генератор 1 типу Г4-160 з коаксіальним виходом є джерелом електромагнітних хвиль НВЧ діапазону з регульованою потужністю до 100 Вт в діапазоні частот 700 ... 1000 мГц з можливістю роботи в імпульсному режимі.

НВЧ хвилі через коаксіальні спрямовані відгалужувачі 3 і 5 падаючого і відбитого хвиль з ослабленням 20 дБ і узгоджувальний трансформатор 7 надходять в адсорбер НВЧ 10. Ватметри 2 і 4 вимірюють потужності падаючих на вхід адсорбера і відбитих від нього хвиль. Узгоджувальний трансформатор 7 застосовується для узгодження опорів хвильового лінії передачі і повного навантаження – адсорбера НВЧ 10, схема якого зображена на рис. 2.7.

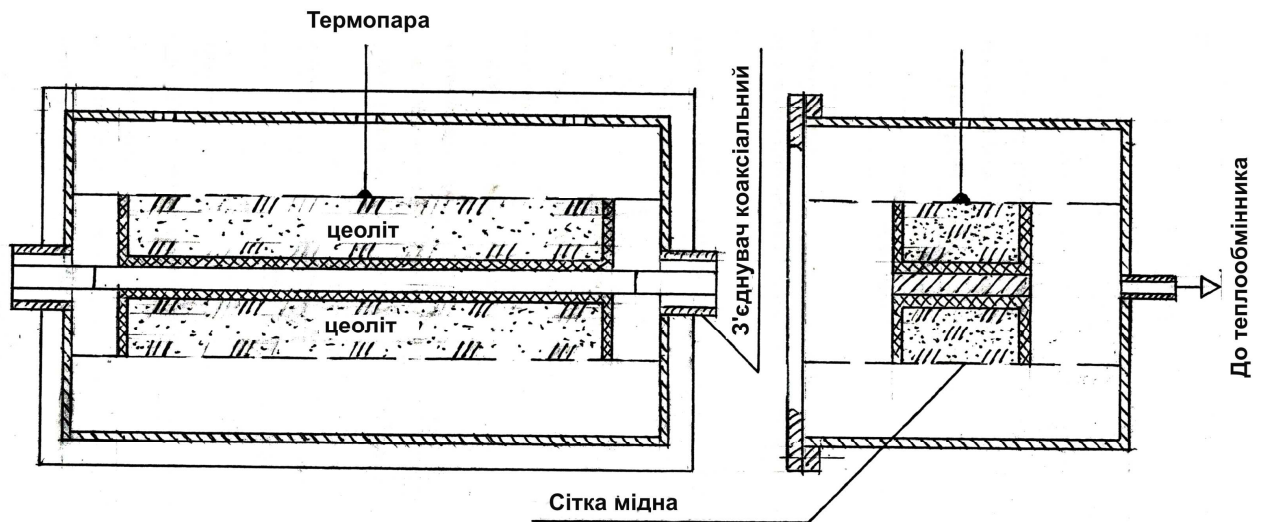


Рисунок 2.7 Схема будови адсорбера

Адсорбер НВЧ 10 виконаний у вигляді відрізка об'ємної симетричної плоскової лінії з хвильовим опором 150 Ом. Вибір хвильового опору плоскової лінії рівного 150 Ом при хвильовому опорі генератора, рівного 50 Ом, пов'язаний з тим, що діелектрична проникність молекулярного сита від станів насиченим водою до стану сухого цеоліту змінюється приблизно в межах від 20 до 6 для цеоліту 4А з адсорбційної ємністю 19%. В процесі регенерації за розрахунками вхідний опір адсорбера в залежності від насиченості водою буде змінюватися майже в 1,8 рази. Доцільно, щоб виключити необхідність підстроювання узгодження вхідного опору адсорбера з хвильовим опором лінії підведення, виготовити адсорбер з хвильовим опором 150 Ом, щоб при заповненні молекуля-

рним ситом спочатку вхідний опір було близько 35 Ом, а в кінці процесу - близько 64 Ом, що відповідає однаковим значенням коефіцієнта відбиття.

При цьому протягом процесу регенерації потужність, що підводиться буде використовуватися більш ефективно і відпаде необхідність підстроювання генератора.

Екрани полоскової лінії являють собою полоси густої мідної сітки (див. рис. 2.7). Ширина екранів взята достатньою для того, щоб все електромагнітне поле відрізка полоскової лінії було зосереджено в межах екранів. Відрізок полоскової лінії поміщений в корпус з нержавіючої сталі, який дозволяє створювати в об'ємі адсорбера НВЧ знижений тиск. Молекулярне сито у вигляді двох плоских прямокутних ємностей, виготовлених з фторопласту-4, заповнених цеолітом, розташовується між поверхнею центрального плоского провідника полоскової лінії і внутрішньою поверхнею екранів. Заповнення ємностей цеолітом повинно бути таким, щоб його гранули щільно прилягали до поверхні екранів.

Потужності випромінювання електромагнітного поля, що подається на адсорбер і на його виході вимірюються ваттметром 15.

Температура поверхні цеоліту в адсорбері вимірюється вимірювачем температури 11 на зовнішній поверхні екрану, яка контактує з цеолітом. Вимірювання температури цеоліту здійснюється через тонку мідну сітку, що виключає нагрівання термоперетворювача електромагнітним полем.

Десорбований водяний пар видаляється з об'єму адсорбера НВЧ вакуумним насосом 14, який створює знижений тиск в ресивері 8, що вимірюється вакуумметром 6. При цьому десорбований пар проходить через теплообмінник 9, конденсується в рідину, яка збирається і вимірюється в мірній ємності 12. Зовнішня поверхня корпусу адсорбера НВЧ покрита теплоізоляційним матеріалом.

2.3.2 Програма експериментальних досліджень

Згідно даним, наведеним в розділі 2.4, температура молекулярного сита в технологічному процесі регенерації повинна бути в межах інтервалу $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$. Такий режим можна забезпечити при імпульсному впливі електромагнітної енергії на молекулярне сито. Для отримання кількісних оцінок па-

раметрів і залежностей технологічного процесу необхідно провести такі експериментальні дослідження.

2.3.2.1 Визначення адсорбційної ємності цеоліту 4Å, що використовується в процесі досліджень.

2.3.2.2 Визначення параметрів імпульсної послідовності впливу ЕМЕ на молекулярне сито для підтримки обраного температурного режиму.

2.3.2.3 Визначення залежності маси десорбованої води від часу регенерації.

2.3.2.4 Визначення залежності модуля коефіцієнта відбиття від часу регенерації.

2.3.2.5 Визначення близького до оптимального співвідношення потужності джерела ЕМЕ НВЧ до маси молекулярного сита, при якій ефективність використання ЕМЕ в процесі регенерації найбільша при заданих температурних обмеженнях.

2.3.2.6 Визначення впливу рівня тиску в адсорбері на тривалість процесу регенерації.

2.3.3 Методика проведення експериментальних досліджень

2.3.3.1. Для виконання п. 2.3.2.1 Програми досліджень пробу цеоліту 4Å масою 150 г помістити в сухоповітряну шафу, нагріти зі швидкістю 5...6°C/хв до температури 200°C і витримувати протягом 4 годин. Після остигання до температури 20°C у герметичній ємності пробу зважити з погрішністю не більше 10 мг і помістити для насичення паром води в тепловий адсорбер.

Насичення проби цеоліту паром при температурі води у випарнику 90°C продовжувати до моменту, коли маса проби, періодично вимірювана з погрішністю не більше 10 мг, перестане змінюватися. Адсорбційна ємність цеоліту визначається як відношення маси води, адсорбованої цеолітом, до маси сухого цеоліту по формулі:

$$C = \frac{m_{\text{цв}} - m_{\text{ц}}}{m_{\text{ц}}}, \quad (2.1)$$

де $m_{\text{цв}}$ маса проби цеоліту, насиченого водою, $m_{\text{ц}}$ - маса проби сухого цеоліту.

2.3.3.2 Для виконання пунктів 2.3.2.2, 2.3.2.3 і 2.3.2.4 Програми пробу насиченого водою цеоліту масою 75 г помістити в ємності у вигляді двох пласких прямокутних ємностей, виготовлених із фторопласту-4. Ємності помістити в адсорбер НВЧ між поверхнями екранів і поверхнею плоского центрального провідника згідно рис. 2.7, при цьому шар цеоліту в ємностях повинен трохи підніматися над стінками контейнерів, щоб забезпечувався надійний тепловий контакт поверхні шару цеоліту із внутрішньою поверхнею екрана. Термопару встановлюють у положення надійного теплового контакту із зовнішньою поверхнею екрана, що межує з поверхнею шару цеоліту. Адсорбер закрити кришкою й з'єднати з лінією передачі НВЧ сигналу й вакуумною системою згідно рис. 2.6. У вакуумній системі закрити вентиль 16 і відкрити вентиль 17. Включити вакуумний насос 14 і понизити тиск у ресивері 8 до 90 кПа. Надалі підтримувати тиск у ресивері за допомогою вентиля 16. Подати ЕМЕ НВЧ генератора 1 потужністю 100 Вт в адсорбер 10. При досягненні температури 210°C за показниками вимірювача температури виміряти час нагрівання за допомогою секундоміра, потужність випромінювання, що подається в адсорбер, за показниками ватметра 2, відбиту за показниками ватметра 4 і ту, що пройшла через шар цеоліту за показниками ватметра 15.

При температурі сита 210°C виключити НВЧ випромінювання і в момент зниження температури сита виміряти час і масу десорбованої води за показами водозбірника 12. Включити подачу ЕМЕ генератора в адсорбер й повторити вимірювання при температурах сита 210°C та 190°C у подальших циклах до досягнення маси десорбованої води 80% від повної маси десорбованої води, рівної 12 г.

Визначити значення таких параметрів процесу в моменти вимірювання:

- потужність випромінювання НВЧ, що подається в адсорбер, (потужність генератора) P_{nad}

$$P_{nad}=P_2 K_3, \quad (2.2)$$

де P_2 – показання ватметра 4, K_3 – коефіцієнт ослаблення потужності відгалужувача 3;

- потужність випромінювання, відбитого від входу адсорбера $P_{відб}$

$$P_{відб} = P_4 K_5, \quad (2.3)$$

де P_4 – показник ватметра 4, K_5 – коефіцієнт ослаблення по потужності відгальника 5;

- потужність, що пройшла на вихід адсорбера $P_{вих}$

$$P_{вих} = P_{15} K_{13}, \quad (2.4)$$

де P_{15} - показник ватметра 15, K_{13} - коефіцієнт ослаблення потужності атенюатора 13; $K_{13} = 100$;

- потужність, поглинену ситом

$$P_{погл} = P_{пад} - P_{отр} - P_{прош} \quad (2.5)$$

- модуль коефіцієнту відбиття входу адсорбера $|\Gamma|$

$$|\Gamma| = \frac{P_4 \cdot K_5}{P_2 \cdot K_3}, \quad (2.6)$$

- поточне значення відношення десорбованої води до значення маси води в ситі при повному насиченні цеоліту $\Delta m_i (\%)$

$$\Delta m_i = \frac{m_i}{m_e}, \quad (2.7)$$

де m_i - поточне значення маси десорбированной води (г), m_e – початкова маса води в ситі;

- швидкість наростання температури сита при впливі ЕМЕ $V_{Tн}$

$$V_{Tн} = \frac{\Delta T}{t_n}, \quad (2.8)$$

де ΔT - інтервал температур між температурою сита на початку впливу ЕМЕ й температурою сита в момент закінчення впливу, t_n – тривалість впливу ЕМЕ;

- швидкість спаду температури сита в інтервалі $(210 - 190)^\circ\text{C}$ V_{Tc}

$$V_{Tc} = \frac{\Delta T_c}{t_c}, \quad (2.8)$$

де ΔT_c – інтервал спаду температур сита з 210°C до 190°C , $\Delta T_c = 20^\circ\text{C}$,

t_c – тривалість спаду температур сита в інтервалі $\Delta T_c = 20^\circ\text{C}$.

Результати вимірювань представити в таблиці .

2.3.3.3. Для виконання п. 2.3.2.5 Програми пробу насиченого водою цеоліту масою 30 г укласти в ємність у вигляді човників із фторопласта аналогічно п.2.5.2. Установити потужність генератора 1 40 Вт при роботі на узгоджене навантаження (атенюатор 13 з термоелектричним перетворювачем ватметра 15), за показниками ватметра 15. Виключити потужність генератора. З'єднати адсорбер 10 з лінією передачі сигналу НВЧ і вакуумною системою згідно рис.2.6. Установити тиск в адсорбері 90 кПа й включити потужність генератора . Зняти показання ватметрів 2,4,15 відразу після їхнього становлення (приблизно через 10 сек після подачі сигналу НВЧ). Продовжити вплив НВЧ опромінення на сито до досягнення температури 200 °С за показниками вимірника температури 11. Виміряти масу десорбованої води за показниками водозбірника й тривалість впливу НВЧ сигналу по секундомірові. Визначити частку десорбованої води Δm (%) від розрахункової відповідно до обмірюваного значення адсорбційної ємності цеоліту в п. 2.5.1 по формулі.

Повторити експеримент при значеннях потужності генератора 60 Вт, 90Вт із заміною проб насиченого водою цеоліту масою 30 г.

Визначити значення падаючої, відбитої, та, що пройшла, і поглиненої потужностей по формулах 2.2, 2.3, 2.4, 2,5.

Визначити коефіцієнт ефективності $K_{\text{эфф}}$ використання потужності генератора ситом на десорбцію води як відношення поглиненої потужності ситом до потужності генератора (падаючої потужності)

$$K_{\text{эфф}} = \frac{P_{\text{погл}}}{P_{\text{над}}} \quad (2.9)$$

Результати експерименту представити в таблиці.

2.3.3.4 Для виконання п.2.3.2.6 Програми зробити завантаження адсорбера 10 як у п. 2.3.2.2. У вакуумній системі закрити вентилі 16, 17, відкрити вентиль 18, включити вакуумний насос 14 і понизити тиск у ресивері 8 до 25 кПа. Подати сигнал генератора 1 потужністю 100 Вт в адсорбер 8 і відкрити вентиль 17. При досягненні температури сита 210 °С за показниками вимірника температури 11 виключити потужність генератора 1 і в момент спаду температури

сита до 190 °С виміряти масу десорбованої води за показниками водозбірника 12 і інтервал часу від моменту включення потужності за допомогою секундоміра.

Визначити вплив рівня зниженого тиску в адсорбері на тривалість процесу регенерації стосовно К часток десорбованої води $\Delta m_1(\%)$ і $\Delta m_2(\%)$ при значеннях тиску 90 кПа й 25 кПа відповідно

$$K = \frac{\Delta m_2}{\Delta m_1} \quad (2.10).$$

2.3.4 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

В якості об'єкту досліджень при проведенні експериментальних досліджень цеоліт 4Å (ТУ2163-002-21742510-2004) з характеристиками: склад $\text{Na}_2\text{O} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ цеоліт синтетичний NaA – молекулярне сито до 4 Å; діаметр гранул $3,6 \pm 0,4$ мм; насипна щільність не більша 0,8 г/см³.

Згідно п. 2.3.3.1. методики проведення експериментальних досліджень визначена адсорбційна ємність цеоліту. За результатами вимірювань адсорбційна ємність становила 19% від маси сухого цеоліту.

Визначені для сухого та насиченого водою цеоліту електрофізичні параметри: діелектричну проникність (див. табл. 2.2), довжину електромагнітних хвиль в цеоліті та глибину їх проникнення.

Згідно даних про склад цеоліту та методу визначення кількості адсорбованої води [43] при визначенні значення діелектричної провідності цеоліти був використаний адитивний метод [44]. Одержані значення представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок діелектричної проникності сухого цеоліт 4Å

Этапы расчёта	Складові цеоліту			Цеоліт
	Na ₂ O	Al ₂ O ₃ ·xH ₂ O	2SiO ₂	
Вміст, % мас.	20,30	40,30	39,70	100,0
Діелектрична проникність [45, 46]	5,90	5,00	8,00	6,36

Аналогічно розраховувалася діелектрична проникність цеоліту з вмістом води 20%. Вона становить 21,1. Довжина хвиль НВЧ коливань з частотою 915 МГц при поширенні в цеолітах 4Å становлять від 13,38 см для сухого цеоліту при $\epsilon = 6$ см і 7,16 см для насиченого водою цеоліту при $\epsilon = 21,1$. При цьому глибина проникнення НВЧ поля в цеоліт становила 42 см для сухого та 25 см для насиченого водою цеоліту.

Відповідно до п. 2.3.3.2 методики проведення експериментальних досліджень були виконані дослідження процесу НВЧ–регенерації при таких умовах:

- 1) потужність електромагнітних хвиль, що подається на вхід адсорбера, $P = 40, 60, 90$ і 100 Вт;
- 2) режим включення/вимикання подачі електромагнітної енергії з потужністю $P_{\text{вх}}$ на вхід адсорбера: 7 хв – прогрівання молекулярного сита, потім включення подачі НВЧ електромагнітних хвиль на 1 хв через кожні 7 хв, як це зображено на рис. 2.8 і відображені в табл. 2.2;
- 3) частота генератора $f = 915$ МГц;
- 4) початкова маса молекулярного сита 75 г;
- 5) початкова температура молекулярного сита перед початком експерименту 20°C ;
- 6) тиск в адсорбері при проведенні експериментальних вимірювань - 90 кПа та 25 кПа;
- 7) молекулярне сито – цеоліт типу 4Å;
- 8) вміст адсорбованої води в початковий момент процесу регенерації – 19% від маси сухого цеоліту.

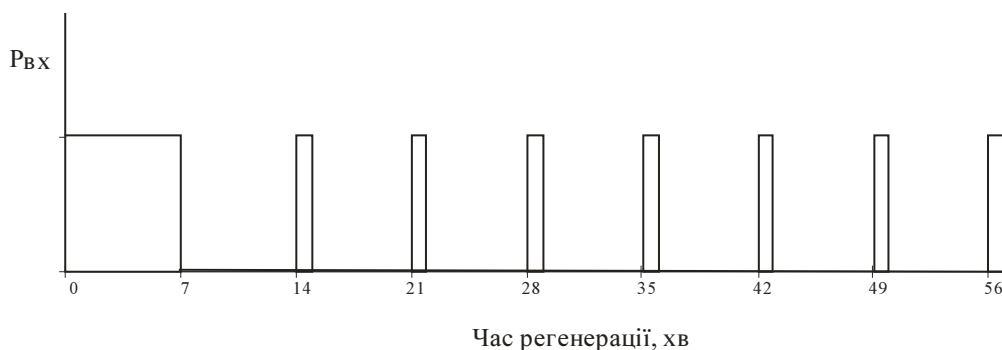


Рисунок 2.8 – Режим включення/виключення подачі НВЧ-енергії на вхід адсорбера

Таблиця 2.2 – Час включення $t_{вкл}$ та час вимикання $t_{викл}$ подачі електромагнітної енергії на вхід адсорбера в процесі регенерації

$t_{вкл}$, хв.	0		14		21		28		35		42		49		56	
$t_{викл}$, хв		7		15		22		29		36		43		50		57

Проведене вимірювання значень потужностей електромагнітних хвиль падаючої, що надходить на вхід адсорбера $P_{пад}$, відбитої від входу адсорбера $P_{відб}$, що пройшла на вихід адсорбера $P_{вих}$ та потужність поглиненої молекулярним ситом $P_{погл.}$, розрахована по формулі $P_{погл} = P_{пад} - P_{відб} - P_{вих}$. Усереднені значення потужностей і обчислене по формулі (2.6) значення модуля коефіцієнта відбиття $|\Gamma|$ відображені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати експериментальних вимірювань параметрів процесу регенерації.

t_i , хв	0	14	21	28	35	42	49	56
$P_{пад}$, Вт	100	100	100	100	100	100	100	100
$P_{вих}$, Вт	59,00	61,80	62,87	63,69	63,84	63,90	63,84	63,80
$P_{відб}$, Вт	4,00	1,69	0,81	0,11	0,04	0,00	0,06	0,07
$P_{погл.}$, Вт	37,00	36,50	36,30	36,20	34,30	36,10	36,00	36,15
$ \Gamma $	0,2	0,13	0,09	0,06	0,02	0,00	0,01	0,07
T , °C	20	210	190	210	190	210	190	210
Δm , %	0	35,6	51,10	63,5	70,60	75,90	78,60	79,90

На рис. 2.9 зображені залежності температури молекулярного сита T і відносної маси десорбованої води до початкової маси (2.7) у молекулярному ситі

від часу процесу регенерації та зображені на рис. 2.10 залежності визначених значень потужностей хвиль, одержаних при аналізі результатів експериментальних вимірювань.

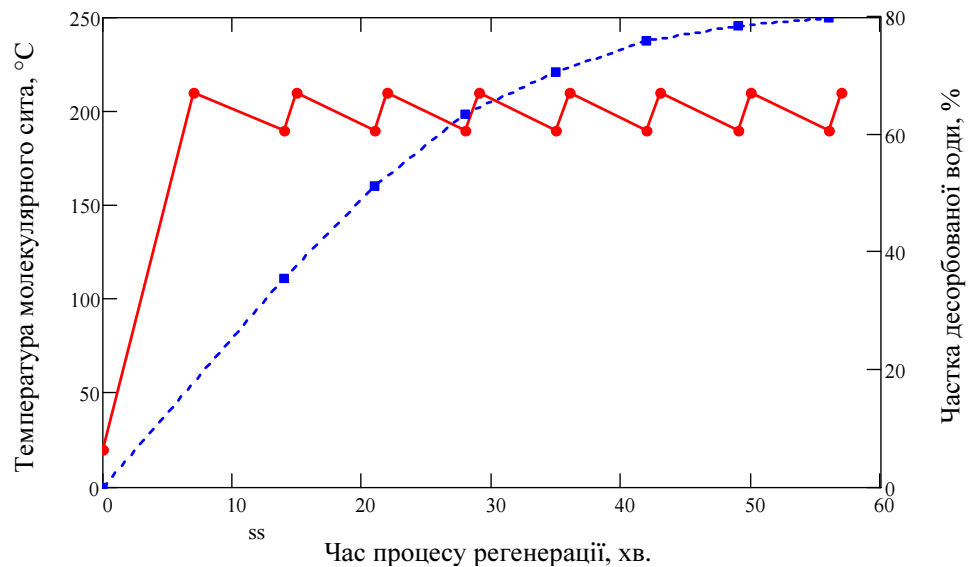


Рисунок 2.9 – Залежності температури молекулярного сита та частки десорбованої води від часу регенерації

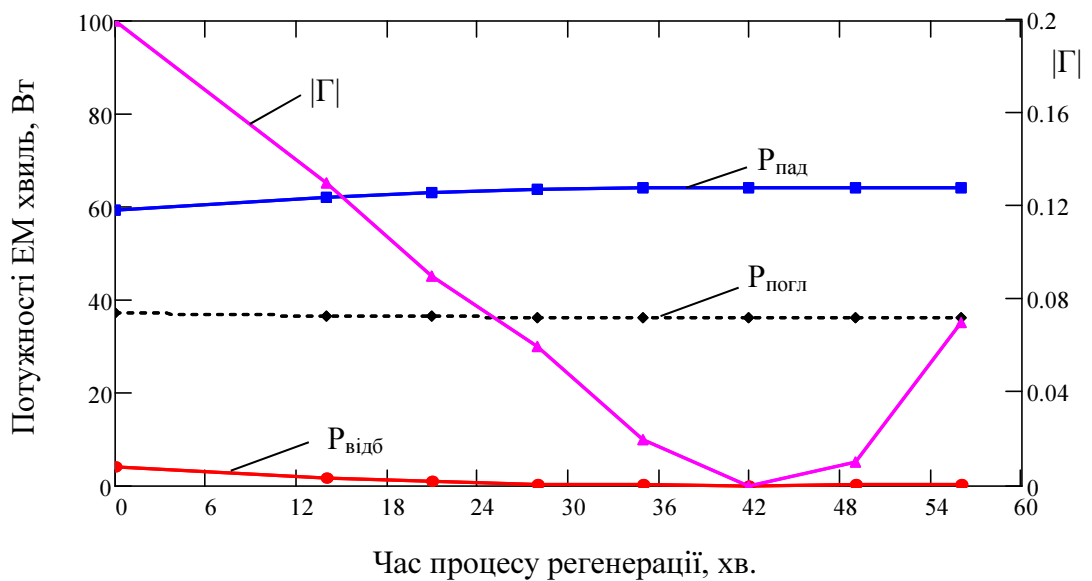


Рисунок 2.10 – Залежності потужностей електромагнітних хвиль від часу регенерації

За отриманими у ході експерименту значеннями температури в процесі регенерації (після 14 хв проведення експерименту) були розраховані швидкості зміни температури молекулярного сита при нагріванні: швидкість наростання температури при включеній подачі енергії V_{Tn} обчислювалася по формулі (2.8),

та швидкість спаду температури V_{Tc} при відключенні подачі енергії – по формулі (2.9). Для проведеної серії експериментів вони рівні:

$$V_{Th} = 0,45^{\circ}\text{C}/\text{с},$$

$$V_{Tc} = 0,05^{\circ}\text{C}/\text{с}.$$

Отримано усереднені значення потужностей: відбитої від входу адсорбера $P_{відб}$, що пройшла на вихід адсорбера потужності $P_{вих}$ і поглиненої молекулярним ситом $P_{погл}$, для значень потужностей генератора P_{ex} 40 Вт, 60 Вт і 90 Вт при регенерації 30 г молекулярного сита. Для цих даних по формулі (2.10) обчислені значення коефіцієнта ефективності використання енергії в процесі НВЧ-регенерації, які приведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Залежність коефіцієнта ефективності використання ЕМЕ НВЧ на десорбцію води від рівня подаваної на адсорбер потужності

№ з/п	Параметр	Потужність генератора, Вт		
		40	60	90
1	$P_{відб}$ – потужність випромінювання, відбитого від адсорбера, Вт	8,00	12,00	18,00
2	$P_{вих}$ – потужність на виході з адсорбера, Вт	16,80	21,00	35,10
3	$P_{погл}$ – потужність ЕМХ, поглинених адсорбером, Вт	15,20	27,00	36,90
4	$T_{рег}$ – температура регенерації, °C	200,00±10	200,00±10	200,00±10
5	$T_{нач}$ – початкова температура, °C	20,00	20,00	20,00
6	$t_{нагр}$ – час нагрівання, с	420,00	236,00	173,00
7	$ \Gamma $ – коефіцієнт відбиття від навантаження	0,20	0,20	0,20
8	VT-швидкість нагрівання при включеній подачі ЕМХ в адсорбер, °C/с	0,43	0,76	1,04
9	$K_{эф}$ – коефіцієнт ефективності	0,38	0,45	0,41

З табл. 2.4 видно, що в умовах проведення експериментів найбільше значення коефіцієнта ефективності $K_{эф}=0,45$ отриманий при потужності $P_{над}=60$ Вт. Збільшення або зменшення падаючої потужності приводить до зниження цього показника при обраних вихідних значеннях інших параметрів. Цьому

значенню коефіцієнта ефективності K_{ef} відповідає питома потужність генератора, визначена як відношення потужності $P_{погл}$ до маси молекулярного сита (2.10), для сухого цеоліту $K_{ef} = 2,4$ Вт/м.

На підставі проведеного аналізу експериментальних даних можна стверджувати, що є можливість оптимального узгодження тракту подачі електромагнітної енергії в адсорбер, з його входом. Цей висновок впливає з характеру зміни модуля коефіцієнта відбиття $| \Gamma |$ (див. рис. 2.10).

Узгодження можна здійснити безперервним узгодження хвильового опору тракту й повного опору адсорбера автоматично по твердій програмі, що враховує зміну вхідного опору адсорбера в залежності від зміни діелектричної проникності цеоліту. Однак це складно здійснити при високих рівнях потужності в тракті. Можна оптимізувати використання електромагнітної енергії джерела, забезпечуючи таку неузгодженість у початковий момент процесу регенерації, щоб повне узгодження відбулося в ході процесу саме собою й значення модуля коефіцієнта відбиття не перевищувало припустимого значення. В експерименті це значення приблизно дорівнює $| \Gamma | \approx 0,2$.

В експерименті рівень потужності, що поглинається молекулярним ситом у ході процесу регенерації, зберігався практично постійним, незважаючи на втрату води. Це пояснюється тим, що вміст води в цеоліті $4 \text{ \AA}$ не перевищує 19% від маси сухого цеоліту й зменшення поглинання ЕМЕ, діелектричні втрати в якому збільшуються при нагріванні.

2.4 Опис системи технічних засобів безперервної регенерації молекулярних сит у процесі одержання абсолютного спирту мембранним способом

Система технічних засобів, що реалізує технологію безперервної регенерації молекулярних сит з використанням НВЧ енергії при виробництві абсолютного спирту може бути представлена структурною схемою, що зображена на рис. 2.11.

Принцип дії установки

Азеотропна суміш етанолу й води, яка поступає з ректифікаційної колони, надходить на перегрівник 2, який її перетворює в перегрітий пар. Цей пар через систему паропроводів подає на одну з двох роздільну колону (1 та 8). Перемикач 3 паропроводу перенаправляє парову суміш на роздільну колону, готової до роботи. Якщо молекулярне сито колони 1 зневоднене, а молекулярне сито колони 8 насичене водою, пульт управління 9 за сигналами вимірників концентрації етанолу 4 і 10 за допомогою перемикача паропроводів 3 направляє перегрітий пар в колону 1.

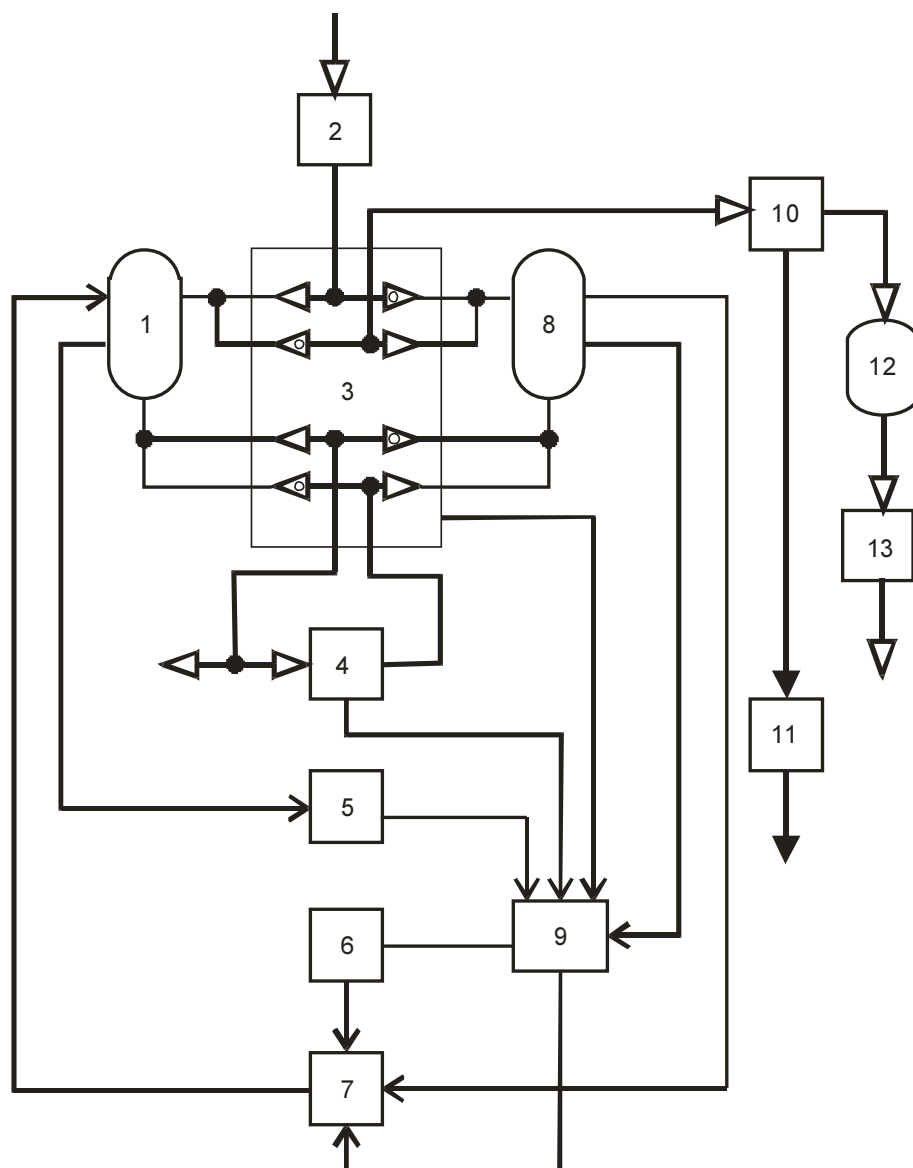


Рисунок 2.11 – Структурна схема технологічної установки безперервного зневоднення азеотропної суміші етанол-вода з використанням енергії електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону для регенерації молекулярних сит

Колона 1 починає працювати в режимі адсорбції молекул води з пари при підвищеному тиску в колоні. Пар, проходячи через молекулярне сито колони 1 зверху вниз, зневодненим надходить поступає на вихід установки для конденсації й частково через вимірник концентрації етанолу 4 на колону 8.

Під дією зниженого тиску в ресивері 11, що створюється вакуумним насосом 13, потік зневодненого пару етанолу, проходячи через колону 8 знизу нагору, захоплює молекули води, що випаровуються цеолітом, і надходить у теплообмінник 10, де конденсується й у вигляді рідини перекачується насосом 12 для повторної переробки.

У момент проходження парів в колоні 1, коли адсорбент припиняє поглинати молекули води, вимірник концентрації етанолу 4 фіксує початок зниження концентрації етанолу в паровій суміші й подає сигнал на пульт управління, який переводить колону 1 у режим регенерації, а колону 8 у режим адсорбції.

Колона 1 перемикачем паропроводів 3 з'єднується через теплообмінник 10 з ресивером 11 зі зниженим тиском, а колона 8 з'єднується з перегрівником пару 2 і через вимірник концентрації етанолу 4 з колоною 1.

Потік перегрітого пару суміші етанолу й води в колоні 8 під підвищеним тиском проходить через молекулярне сито зверху вниз, зневоднюється й через вимірник концентрації етанолу 4 направляється на вихід установки й частково в колону 1. Проходячи молекулярне сито колони 1 знизу нагору, потік зневодненого пару етанолу в колоні 8 захоплює воду, що випаровуються при зниженому тиску молекули, із цеоліту й надходить у теплообмінник 10, де конденсується.

Для реалізації безперервного процесу роботи установки потрібно, щоб час регенерації молекулярного сита колони був меншим за час процесу адсорбції.

Для прискорення процесу регенерації молекулярного сита для його нагрівання й випаровування води крім теплової енергії, що виділяється при адсорбції, необхідна додаткова теплова енергія. Цю додаткову енергію доцільно подавати у вигляді електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону, який інтенсивно поглинається водою.

Електромагнітна енергія НВЧ діапазону вводиться в камеру колони, що працює в режимі регенерації, за допомогою випромінювачів. Джерело НВЧ енергії підключається до колони хвилеводами перемикачем у відповідності до режиму роботи колони. Колона, підключена до джерела НВЧ енергії, відіграє роль резонатора, у якому електромагнітна енергія поглинається навантаженням, що складається із молекулярного сита (цеоліту) насиченого водою, в результаті чого це речовини, що входять в склад навантаження, нагріваються.

Підтримки необхідного теплового режиму роботи молекулярного сита здійснюється за показами датчиків температури, встановлених на колонах. Включення й виключення подачі електромагнітної енергії здійснюється системою управління за порівнянням показників з датчиків температури з заданими граничними значеннями температури.

Одним з методів вимірювання температури молекулярного сита усередині колони при наявності електромагнітного поля може бути використана теплова стінка. Метод теплової стінки застосовується для визначення розподілу ЕМЕ всередині хвилеводів по тепловому рельєфі зовні тонкоплівкової стінки ділянки хвилеводу. Крім того, вимірювання температури всередині колони в при наявності електромагнітного поля можливе волоконно-оптичним вимірником температури до значення 250°C.

Висновки по розділу 2

1. Порівняння результатів експериментів НВЧ-регенерації цеоліту в НВЧ-адсорбері при імпульсному впливі ЕМЕ і температурі $200 \pm 10^\circ\text{C}$ з конвективним сушінням в сухоповітряній шафі при температурі 200°C протягом 4-х годин підтвердило доцільність і ефективність проведення регенерації молекулярного сита з цеоліту з використанням ЕМЕ.

2. Визначено межі зміни діелектричної проникності цеоліту $4\text{\AA}$ в залежності від їх насиченості водою при частоті НВЧ-опромінюванні 915 МГц, які знаходяться в інтервалі $6 \leq \epsilon \leq 21$.

3. Визначено межі зміни довжини хвилі НВЧ коливань електромагнітних хвиль з частотою 915 МГц при поширенні в целіті $4\text{\AA}$ в залежності від його насиченості водою – $7,166\text{ см} \leq \lambda_{\text{цА4}} \leq 13,38\text{ см}$.

4. Глибина проникнення НВЧ поля в цеоліті становила 42 см для сухого та 25 см для насиченого водою.

4. Розроблений і виготовлений макет НВЧ адсорбера у вигляді камери з відрізком симетричною полоскової лінії забезпечив опромінення молекулярного сита електромагнітними коливаннями частотою 915 МГц з безперервним вимірюванням температури сита і маси десорбованої води при пониженому тиску 25 кПа.

5. У результаті експериментальних досліджень визначені параметри імпульсного режиму впливу ЕМЕ на молекулярне сито (целіт $4\text{\AA}$) при яких коефіцієнт ефективності процесу НВЧ-регенерації найбільший:

- температура нагріву цеоліту $(200 \pm 10)^\circ\text{C}$;
- швидкість нагріву цеоліту при впливі ЕМЕ – $0,45^\circ\text{C}/\text{с}$;
- швидкість спаду температури між імпульсами впливу ЕМЕ – $0,45^\circ\text{C}$;
- питома потужність електромагнітних хвиль, що поглинаються адсорбером, рівна $2,4\text{Вт}/\text{г}$;
- визначено, що зниження тиску в адсорбері до 25 кПа при регенерації молекулярного сита призводило до скорочення тривалості процесу за рахунок прискорення випаровування і десорбції води на 10 ... 12%;

6. Запропоновано систему технічних засобів для НВЧ регенерації молекулярних сит в процесі отримання абсолютного спирту.

3 Плазмохімічна газифікація вугілля з використанням плазмових реакторів з ВЧ і НВЧ-плазмотронами

Плазмохімія відноситься до перспективних технологічних процесів третього покоління переробки вугілля [47]. Висока селективність плазмохімічних процесів, можливість переробки різних видів сировини, невеликі габарити основного встаткування, можливість повної автоматизації, відсутність викидів

золи, оксидів сірки й азоту та інших шкідливих речовин у навколишнє середовище робить перспективним цей метод переробки твердих палив (кам'яних і бурих вугілля, сланців, торфу).

Високотемпературний процес плазмової газифікації вугілля з одержанням синтезу-газу (сингазу, у тому числі як енергетичного газу) - це складний гетерогенний фізико-хімічний процес, при якому здійснюється ряд хімічних взаємодій вуглецю і його з'єднань із реагентами, що газифікують (киснем, водяною парою та ін.).

Плазмова газифікація характеризується утворенням радикалів та іонів при дисоціації плазмоутворюючого газу, що спричиняється високою швидкістю протікання фізико-хімічних процесів при високій концентрації енергії в одиниці об'єму.

Хімічні перетворення у двофазних системах плазмоутворюючого газу із твердими частками палива надзвичайно складні й включають реакції різних типів: деструкцію твердого палива з виділенням летучих продуктів, газофазні реакції продуктів, що виділилися, реакції типу газ - тверде тіло.

При контакті потоку «холодної» повітряної суміші ($T_a=350-400$ K) із плазмовим потоком одночасно нагріваються вугільні частки й повітря. При цьому вугільні частки розміром до 250 мкм при темпах нагрівання $10^4 - 10^5$ K/с. через виникаючі термічні напруження в їхньому обсязі зазнають тепловий удар, у результаті якого частки вугілля дробляться на 8–10 осколків розміром 5-30 мкм за час 0,01-0,05 с. Це явище приводить до різкого зростання площі поверхні розділу газової та твердої фаз, а, отже, до відповідного збільшення реакційної здатності палива. Із цих осколків вихідних часток вугілля виходять летучі речовини (CO , CO_2 , CH_4 , C_6H_6 , N_2 , H_2OH) і азотовмісні компоненти – піридин ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$) і пірол ($\text{C}_4\text{H}_5\text{N}$). Потім у газовій фазі утворюються атомарні форми (OH , H , N , C , S), включаючи елементи мінеральної частини вугілля (Si , Al , Ca) і радикали (NH , CH , CN , OH та ін.). Крім того, у газовій фазі присутні електронний газ (e), позитивні (C^+ , H^+ , N^+ , CO^{++} , Si^+ , K^+ і ін.) і негативні (O^- , H^- , N_2^-) іони.

Тепловий вибух пиловугільних часток багаторазово пришвидшує вихід летучих речовин за рахунок більше розвинутої поверхні реагування й появи дуже дрібних часток, які нагріваються до температури виділення летучих речовин набагато швидше, ніж великі (100-250 мкм) частки. З підвищенням температури газу й часток починаються гетерогенні термохімічні перетворення палива (виділення летучих речовин, газифікація коксового залишку) за участю електрично нейтральних, але хімічно активних центрів (радикалів і продуктів дисоціації молекул).

З переходом летучих вугілля (CO , H_2 , C_6H_6 , CH_4 , CO_2 , H_2O та ін.) у газову фазу починається їхня хімічна взаємодія з повітрям і між собою. Саме на стадії газофазних реакцій може бути помітно, що інтенсифікує вплив, термоелектричної складової низькотемпературної плазми, який проявляється в прискоренні хімічних перетворень за рахунок переходу до реакцій з хімічно активними центрами й більше низькими значеннями енергії активації.

Зазначені вище особливості взаємодії плазми з пиловугільним паливом підвищують енергетичну ефективність плазмової газифікації палива в 3–4 рази, у порівнянні із традиційними процесами.

Процес плазмової газифікації є екологічно чистим. Завдяки високим температурам, реалізованим у зоні реактора, у газоподібних продуктах відсутні смоли, феноли й вуглеводні, що забруднюють продукти звичайної газифікації вугілля. При переробці твердих палив у плазмі водяного пару газоподібні продукти складаються більш ніж на 95 % з CO і H_2 , причому об'ємний вміст водню вище вмісту оксиду вуглецю. У невеликих кількостях є діоксид вуглецю ($\approx 3\%$), сліди метану, сірководень. Вміст у продуктах плазмохімічної газифікації вугілля CO_2 значно нижчий, ніж у звичайних процесах газифікації.

Основним приладом, у якому відбуваються плазмохімічні процеси, є плазмотрон. Розглянемо особливості роботи плазмотронів, які найбільш широко використовуються.

3.1 Особливості протікання плазмохімічних процесів

3.1.1 Дисоціація вуглекислого газу

Дисоціація CO_2 в умовах нерівновагої плазми в цей час — один з найбільш вивчених і важливих плазмохімічних процесів, що пов'язане з рядом обставин. По-перше, дисоціація CO_2 має істотне значення при описі процесів у CO_2 — лазері. По-друге, вона являє собою приклад процесу, що добре стимулюється коливальним збудженням основного електронного стану реагентів, у результаті чого практично весь енерговклад у розряд вдається направити на здійснення хімічної реакції. І нарешті, третя основна причина підвищеного інтересу — можливість широкого технологічного застосування одержаного в результаті плазмохімічного процесу окису вуглецю в металургії, хімічній промисловості та при створенні нових видів палив. Крім того, окис вуглецю практично без додаткових енерговитрат може бути конвертований у водень у термokatалітичному процесі одержання водню, що представляє особливий інтерес для атомно-водневої енергетики.

Процес дисоціації CO_2 вивчався в різноманітних газорозрядних системах: у тліючому, ВЧ, НВЧ, плазмово-пучкових, електродуговому розрядах, у розряді з порожнистим катодом, плазмовому радіолізі та ін. При вивченні процесу в розрядах різних типів важливим завданням було визначення оптимального енергетичного режиму дисоціації, тобто визначення таких параметрів розряду, при яких витрати енергії на одержання окису вуглецю були б оптимальними.

Теоретичне дослідження можливих механізмів здійснення процесу показало [47, 48], що найбільш висока ефективність дисоціації досягається в нерівновагих умовах ($T_i > T$) при стимулюванні дисоціації коливальним збудженням основного електронного стану молекули CO_2 . При цьому питомий вклад енергії повинен становити — 1 еВ/моль (5 Дж/см³). Дані аналізу досліджень процесу дисоціації CO_2 у різних типах електричних розрядів, наведені в огляді [47], показали, що оптимальні умови реалізуються у НВЧ- і ВЧ-розрядах помірного тиску (~ 100 гПа).

Уперше процес дисоціації CO_2 у НВЧ-розряді при тиску в діапазоні $6,67 \cdot 10^3$ — $6,67 \cdot 10^4$ Па при підведеній до розрядника потужності 2 кВт ($f = 2400$ МГц) був розглянутий в [49]. Розряд відбувався в плазмотроні на хвилі типу H_{10} в кварцовій трубці з внутрішнім діаметром 28 мм і стабілізувався вихровими газовими потоками, сформованими газорозподільником. В залежності від режиму в розряді поглинанні 70—85% від потужності, що підводиться до нього.

У ході досліджень установлено, що розряд стабільно горить у діапазоні тиску 66,7—1000 гПа. Перехід у контрагирований режим відбувається при тиску > 100 гПа. Нерівновагий характер розряду зберігається до тиску 200 гПа. При зростанні тиску від 66,7 до 333 гПа всередині по радіусу концентрація електронів зростає від $8 \cdot 10^{11}$ до $8 \cdot 10^{13}$ на см^3 , температура електронів в центрі розряду при цьому падає від 1,2 до 0,6 еВ, температура газу в центрі розряду зростає від 3000 до 6000 К, а в периферійній зоні розряду (зоні максимального поглинання НВЧ-потужності) $T \sim 1000$ К. Коливальна температура вище газової і становить $\Phi_n - 4000$ К для антисиметричних і $\Phi_n - 2500$ К для симетричних мод коливань [3].

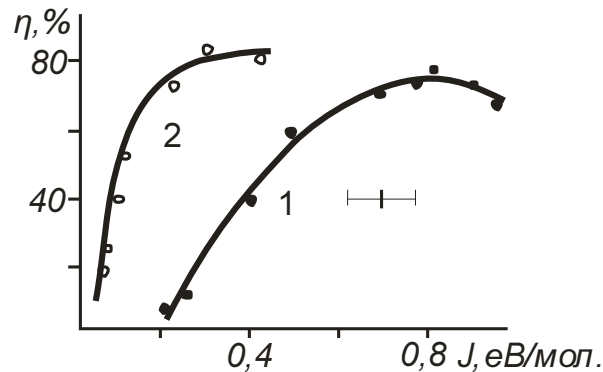


Рисунок 3.1 – Залежність енергетичної ефективності процесу дисоціації CO_2 від питомого енерговнеску: 1 — у дозвуковому режимі при $p - 100$ гПа [49]; 2 — у надзвуковому режимі [50, 51].

У результаті проведених експериментів установлено, що енергетична ефективність процесу досягає максимального значення — 80 % при тиску біля 160 гПа й питомому енерговкладі — 0,8 еВ/моль (рис. 3.2). Ступінь конверсії

при цьому 20-25 %. Отже, в оптимальних умовах експериментів [49] енерговитрати на дисоціацію 3,7 эв/мол. с.

В [50, 51] у НВЧ-плазмотроні на хвилях типу H_{10} досліджений процес дисоціації CO_2 у розряді з надзвуковим потоком газу. Потужність, що підводиться до плазмотрону мінялася в межах 10–100 кВт, робоча частота $f = 915$ МГц. Реактор представляв собою кварцову трубку діаметром 35 мм і довжиною 350 мм. Газовий потік формувався в циліндричному надзвуковому соплі Лавалю, розміщеному безпосередньо перед реактором. Діаметр критичного сопла 0,8 мм, ступінь розширення 20. Тиск газу на вході в сопло мінявся в межах 0,18–0,7 МПа, що відповідало статичному тиску в реакторі 50-200 ГПа й витраті газу 5–50 л/с. Число Маха $M = 2,5$. З експериментальної залежності енергетичної ефективності процесу (рис. 3.1) видно, що вона досягає 90 %, що вище, ніж у розряді з дозвуковим потоком газу.

Вивчення впливу добавок O_2 , C , H_2 , H_2O на ефективність процесу дисоціації CO_2 у НВЧ-розряді проводилось при питомих енерговкладах 3—4 Дж/см³ у плазмотроні з дозвуковим потоком газу, підводився до розряду потужності 2 кВт. Вплив добавок на процес дисоціації CO_2 необхідно враховувати при промисловій реалізації двухстадійного вуглекислотного циклу виробництва водню. Дослідження [52] показали, що добавки 0,03 об'ємної частки H_2 і C не впливають на протікання процесу. Добавка 0,01 об'ємної частки O_2 зменшує вихід на 10 %, добавка 0,01 об'ємної частки H_2 знижує вихід в 3 рази. Найбільше процес дисоціації залежить від добавки пару води. Спостерігалось зменшення виходу в 1,5 рази при додаванні 0,001 % об'ємної частки H_2O .

Таким чином, умови проведення процесу дисоціації CO_2 , близькі до оптимальних, досягнуті у НВЧ-розрядах з надзвуковим потоком газу, проте проведення процесу на рівні потужності 0,5 МВт і більше за такою схемою представляється проблемним.

3.1.2 Пряме розкладання пару води в нерівноважній плазмі

Особливістю нерівноважних НВЧ-плазмохімічних систем є їх більша питома продуктивність, низька металоємність і малі вагогабаритні характеристики таких реакторів.

Такі реактори недостатньо експериментально дослідженні. Існуючі дослідження були пов'язані з розкладанням вуглеводнів у тліючому розряді й характеризувалися низькою ефективністю. Тільки останнім часом в експериментах по прямому розкладанню води у НВЧ-розрядах отримана досить висока ефективність. Процес прямого розкладання водяної пари й одержання водню в плазмі може забезпечуватися різними механізмами. Проте найбільш високий ККД розкладання варто очікувати в системах, де температура електронів недостатня для інтенсивного збудження своїм станом і основна частина вкладеної в розряд енергії йде на коливальні збудження стану реагентів, а також на дисоціативне приєднання електронів до молекул H_2O . Як випливає з розрахунків, розкладання парів води й одержання водню в плазмі може здійснюватися із ККД 50 – 70%. Однак для досягнення такої високої ефективності необхідно задовольнити досить жорсткі вимоги до розряду. Основним обмеженням при розкладанні H_2O спричиненого коливальним збудженням стану реагентів, так і через дисоціативне приєднання є вимога достатньо високого ступеня іонізації. Жорсткі обмеження параметрів розряду в парах H_2O утрудняють експериментальну реалізацію розглянутих вище високоефективних режимів розкладання. Тому, наприклад, у тліючому розряді граничний ККД склав 12%. Досягнення необхідного ступеня іонізації вимагає у варіанті помірного й підвищеного тиску, очевидно, застосування несамостійних об'ємних розрядів, що підтримується потужнострумовими релятивістськими електронними пучками, або плазмового радіолізу осколками ядерного розподілу. До теперішнього часу найбільш висока енергетична ефективність плазмохімічного розкладання води (40%) досягнута в нерівноважному НВЧ-розряді. НВЧ-випромінювання потужністю до 1,7 кВт на частоті 2400 МГц надходило в прямокутний хвилевід перетином 72 x 34 мм². Реактором була кварцова трубка діаметром 38 мм, що перетинає хвилевід перпен-

дикулярно широкій стінці. Потужність, електромагнітного поля в плазмі, вимірювалась калориметричним навантаженням, яке відсівало через направлений відгалужувач, відбиті від розряду НВЧ хвилі. Потік пару води, що надходив з випарника в реактор, змінювався в межах від 0,35 до 1,6 л-атм/с. Верхня границя величини цього потоку лімітувалась продуктивністю випарника, а нижня - зливом розряду на виході з реактора. Для зменшення температури продуктів реакції на виході з реактора був установлений водяний теплообмінник. Розряд стабільно горів у діапазоні тиску від 35 до 60 Торр⁴. Вкладена в розряд НВЧ-потужність вимірялася калориметрично за допомогою водяного навантаження й становила 1,2 - 1,7 кВт. Продукти, які утворювались в розряді, аналізувалися маспекторметричним і хроматографічним аналізом. Продукти реакцій – водень і кисень були у стехіометричному стані. Той факт, що досягнутий в описаному експерименті граничний ККД (40%) все-таки нижче теоретично максимального, можна пояснити тим, що ступінь іонізації в системі, очевидно, була недостатньо висока. Пряме розкладання пару H_2O у нерівноважній плазмі стикається з обмеженнями, зв'язаними зі ступенем іонізації та дією радикала OH . Ці обмеження істотно зм'якшуються при додаванні в систему CO_2 і продукту його розкладання C . Наявність у системі окису вуглецю приводить до зниження концентрації вільних радикалів OH за рахунок практично безпорогової реакції $OH + CO > H + CO_2$. З іншого боку, CO і CO_2 мають на два порядки більший перетин коливального збудження електронним ударом, ніж H_2O , що дозволяє істотно знизити вимоги до ступеня іонізації. По суті справи, CO_2 виконує роль фізичного каталізатора для процесу одержання H_2 зі стехіометричним O у плазмі й знімає труднощі, що виникають при розкладанні чистої водяної пари. В експериментах із квазірівноважою плазмою електродугових плазмотронів ефективність процесу не перевищувала 15%, а в НВЧ-плазмі можна одержати істотно кращі результати. Проведені розрахунки дозволили визначити залежність ефективності розкладання CO_2 від ступеня іонізації й від питомого енерговкла-

⁴ Міліметр ртутного стовпа – позасистемна одиниця вимірювання тиску, рівна $101\,325 / 760 \approx 133,322\,368\,4$ Па, міжнародна назва — Торг (Торр)

ду для різних процесів. Виявилося, що ККД дисоціації молекул СО має сильну залежить від ступеня іонізації. Видно, що при фіксованому енерговкладі (0,5 еВ/моль) ККД зростає зі збільшенням ступеня іонізації. При однотемпературному розрахунку, що справедливо для рівноважної плазми, ККД нижче, ніж для двохтемпературного розрахунку. По-друге, ККД залежить від ступеня іонізації. При високому ступені іонізації, ККД виявляється максимальним. При зменшенні ступеня іонізації ККД зменшується й буде зовсім малим при малому ступені іонізації, коли релаксація превалює над коливальним накачуванням. З розрахунків випливає, що найвищу ефективність (80%) можна одержати у НВЧ-разряді. За певних умов відбувається інтенсивне утворення водню. Недоліком коливального збудження суміші $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ є можливість утворення побічних продуктів. В оптимальному режимі ККД може досягати 60% при енерговитратах 5 еВ/моль H_2 .

Найбільш висока ефективність розкладання CO_2 (80%) була досягнута в нерівноважному НВЧ-разряді помірного тиску (50 + 200 Торр), коли енерговитрати становили 3,7 еВ/мол. Необхідно відзначити, що якщо для розкладання CO_2 використати несамостійний розряд, підтримуваний потужнострумним пучком релятивістських електронів, то реакція може йти й при підвищених тисках (735,56 – 2206,68 Торр), але при цьому граничний ККД не перевищує 14%. Таким чином, з погляду ефективності процесу одержання водню найбільш перспективними є плазмохімічні процеси, що протікають селективно через коливально-збуджений стан молекул, і що найкращі результати можна одержати, використовуючи нерівновагу НВЧ-плазми. Ця ж технологія може використатися для руйнування газоподібних залишків, при переробці нафти й попутних газів. За цією технологією відбувається розкладання сірководню, домішок попутного газу й залишків нафтопереробки на сірку й водень.

3.2.3 Порівняльний аналіз плазмохімічних реакторів - плазмотронів

Плазмотрони (генератори низькотемпературної плазми) знайшли широке застосування в різних областях промисловості, завдяки своїм властивостям і можливостям. У плазмотронах одержують потоки плазмоутворюючих речовин

речовини з високою температурою й ентальпією, які не досягаються іншими засобами, одержують плазму практично будь-якої речовини.

Плазма має ряд нових властивостей як, наприклад, електропровідність, високі енергоємність і реакційну властивість, що забезпечують їй широку сферу застосування в різних галузях техніки, в енергетичних установках - МГД-генераторах і котлоагрегатах паросилових установок. Досягнення в розробці космічної техніки, високотемпературних енергетичних і рухових установках, аеродинаміці високих швидкостей нерозривно пов'язані з успіхами плазмової техніки. Плазмові установки використовують у медичній техніці, установках переробки екологічно шкідливих відходів.

Генерація плазми в плазмотронах у порівнянні з іншими видами нагрівання газу, наприклад за допомогою хімічних або ядерних реакцій, має ряд незаперечних переваг. Використовувана для нагрівання електрична енергія – найбільш універсальний, доступний, а в більшості випадків і найбільш дешевий вид енергії. У плазмотронах для одержання плазми можуть бути використані практично будь-які речовини. Плазмотрони мають широкі можливості нагрівання плазми в діапазоні температур до $(1...20) \cdot 10^3$ К. Установки із плазмотронами відносно прості в обслуговуванні, їхнє виробництво базується на розвинених галузях електромашинобудування, що полегшує впровадження плазмових пристроїв у сучасну техніку.

Іонізація газу й утворення плазми вимагають значних витрат енергії. Джерелом цієї енергії може служити теплова енергія, наприклад високотемпературних хімічних реакцій (горіння), електрична енергія, реалізована в різних формах електричних розрядів, енергія електромагнітних випромінювань, кінетична енергія прискорених потоків часток (електронів, іонів і т.п.). Найбільшого поширення як джерела плазми набули електричні розряди, у яких нагрівання плазми здійснюється взаємодією заряджених часток плазми з електромагнітним полем. Залежно від форм електричного розряду, реалізованого в генераторі для одержання плазми, розрізняють електродугові, високочастотні й надвисокочастотні плазмотрони, а також генератори на електромагнітних коливаннях

оптичного діапазону частот - оптичних розрядах і потоках часток високих енергій - пучковий розряд. Зараз найбільш поширені електродугові плазмотрони. Залежно від призначення й області застосування розрізняють такі характерні види плазмотронів:

Плазмові інструменти - пристрої (пальники) для зварювання, різання, напилування тугоплавких матеріалів, буравлення й поверхневої обробки твердих порід та ін. Рівень потужності від одиниць до сотень кіловатів [53].

Плазмохімічні реактори - для здійснення хімічних реакцій у плазмовому середовищі (наприклад, піроліз метану, одержання окису титана, відновлення чистих речовин з їхніх окислів або хлоридів - урану, титана, германія, танталу та ін.). Ці пристрої звичайно великої потужності й промислового застосування рівня від десятків до тисяч кіловатів [54].

Металургійні плазмотрони - для плавлення тугоплавких і особливо чистих матеріалів, відновлення чистих матеріалів, рафінування, одержання монокристалів і дисперсних матеріалів. Це промислові установки середньої й великої потужності [54].

Плазмові нагрівачі в різних процесах - спалювання й переплаву різних відходів, підпалу топок казанів та ін., з рівнем потужності від десятків до сотень кіловатів.

В особливу групу можна виділити генератори плазми науково-дослідного призначення - для різних досліджень при високих температурах і швидкостях потоків, зокрема, для вивчення аеродинамічних, теплофізичних та інших процесів. Плазмотрони цієї групи мають потужності від одиниць кіловатів до десятків мегават [55, 56].

В залежності від області застосування визначаються вимоги до плазми й до генераторів плазми - плазмотронів. Це, у свою чергу, визначає різноманітність схем і типів плазмотронів, що розрізняються по видах джерел плазми (електричного розряду), способам стабілізації розряду, конструктивними та іншими ознаками. При цьому при всій різноманітності плазмотрони містять

ряд загальних функціональних елементів, які визначають їхні властивості, і відповідні їм технічні рішення, способи проектування й застосовувані матеріали.

По встановленій класифікації використовуються такі плазмотрони: електродугові (ЕДП); трансформаторні плазмотрони (ТП); високочастотні індукційні (ВЧІ); ємнісні (ВЧЄ); факельні (ВЧФ); надвисокочастотні (НВЧ). Плазмотрони з оптичним накачуванням не розглядаються.

Для розробки структурної й принципової схем лабораторного макета формувача напруги живлення плазмотрона необхідно обґрунтувати вибір генератора плазми, що є найбільш прийнятним для виконання необхідного технологічного процесу. Порівняльний аналіз виконується на підставі використання таких критеріїв:

1. Максимум енергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД) плазмохімічного реактора.
2. Максимальна ефективність протікання плазмохімічної реакції.
3. Максимально досяжний строк безперервної роботи.
4. Мінімальна вартість витрат на виготовлення й експлуатацію встаткування.

Четвертий критерій є узагальнюючим, оскільки три перших критерії є визначальними для розрахунку експлуатаційних витрат. Тому надалі три перших критерії використовуються як частки для виконання попередніх оцінок для того, щоб прийняти або відхилити досліджуваний варіант технічної реалізації на етапі попереднього аналізу.

Вибір генератора плазми для здійснення необхідного плазмохімічного процесу визначається термодинамічними й кінетичними особливостями цього процесу. Через велику різноманітність можливих плазмохімічних процесів для їхнього здійснення потрібні генератори плазми найрізноманітніших типів. З погляду організації промислових багатотоннажних плазмохімічних процесів найкращими вважаються електродугові плазмотрони постійного та змінного токів (промислової частоти). Досягнутий рівень потужності таких плазмотронів становить 10 мВт при ресурсі роботи 200–300 год і ККД – 80%. Конструкція цих

плазмотронів допускає роботу декількох плазмотронів на загальний канал плазмохімічного реактора з відповідним збільшенням вкладеної в плазму потужності. У тому випадку, коли неприпустиме забруднення плазми матеріалами ерозії електродів, що має місце в електродних дугових плазмотронах, перспективними генераторами плазми можуть служити безелектродні ВЧ- і НВЧ-плазмотрони. ВЧ і НВЧ плазмотрони успішно конкурують із дуговими плазмотронами в тих виробництвах, де технологічною вимогою є відсутність речовин в плазми. Крім того, слід зазначити, що ресурс роботи таких плазмотронів у принципі завжди перевищує ресурс роботи дугових плазмотронів [57].

Таблиця 3.1 – Порівняльні характеристики плазмотронів

Тип плазмотрона	ЕДП	ВЧ	ТП	ВЧС	НВЧ
ККД плазмотворення	90...95...95%	90%	95%	98-99%	Більше 90%
ККД установки	80...90...90%	50...60...60%	90%	60...70...70%	Порядку 90%
Вид плазми	рівноважна	рівноважна	н/д	нерівноважна	нерівноважна
Ефективність розкладання H_2O	15%	Немає даних	н/д	Немає даних	80%
Наробіток на відмову	300-400 година.	5-10 тис. година.	н/о	5-10 тис. година.	Немає даних
Досяжна потужність	Десятки МВт	10 МВт	н/д	1 МВт	0,5 МВт

З порівняльного аналізу даних, наведених у табл. 3.1, можна зробити висновок:

1. Установки на базі ЕДП є найбільш простими в розробці й експлуатації, тому що не містять високовольтних джерел живлення й спеціальних радіоелектронних приладів. ЕДП одержали найбільш широке застосування. Мала тривалість безвідмовної роботи обумовлена вигорянням електродів, що долається застосуванням рідких (змочуваних) електродів на основі електролітичних розчинів. Проте при цьому продукти плазмохімічного процесу будуть забруднюватися електролітом. Варто звернути увагу на низьку ефективність роботи ЕДП при роботі на водяній парі.

2. ВЧІ- і ВЧЄ-плазмотрони подібні по характеристиках, схемам електроживлення та умовам експлуатації. Істотним розходженням є те, що ВЧЄ-плазмотрон формує нерівноважну плазму, що може бути визначальним для проведення плазмохімічних реакцій. До різновиду ВЧІ можна віднести ТП, який є найбільш простим але досить ефективним плазмоутворювачем. Проте немає відомостей в літературі щодо створення ТП великої потужності, а також використання ТП у плазмохімії.

3. НВЧ діапазон недостатньо висвітлений у плазмотехніці. Наведені в літературі експериментальні дані в основному отримані за допомогою магнетронних генераторів побутових НВЧ-печей потужністю до 1 кВт. Потужні генераторні й підсилювальні НВЧ-прилади застосовуються у військовій техніці, тому дані щодо їхніх характеристик, вартості та ін. обмежені. Однак заслуговує на увагу той факт, що в нерівноважній НВЧ-плазмі отримана максимальна ефективність реакції прямого розкладання води – біля 80%.

Таким чином, з розглянутих плазмотронів найбільш перспективним для плазмохімічних процесів представляється ВЧЄ-плазмотрон. Він є джерелом хімічно чистої нерівноважної плазми й може бути найбільш придатна для обробки паровугільної суміші. Для підвищення ККД установки доцільна розробка комбінованого (гібридного) плазмотрона на основі ЕДП і ВЧЄ- або НВЧ-плазмоутворювачей. При цьому основна роль в одержанні плазми повинна приділятися ЕДП, а за допомогою ВЧ- або НВЧ-генераторів накачування можна здійснювати модуляцію рівноважної плазми ВЧ- або НВЧ-полем і одержувати квазінерівновжну плазму.

Збільшення вмісту в синтезі-газі водяної пари приводить до підвищення співвідношення $H_2:CO$. Це робить доцільним його використання в якості сировини для синтезу метанолу. Економічна ефективність виробництва метанолу з вугілля й природного газу практично однакова.

Отже, плазмохімічна газифікація вугілля доцільна для промислового застосування, вона дозволяє одержувати екологічно чисте паливо й сировину для виробництва метанолу.

Слід зазначити, що економічна ефективність плазмової газифікації може бути істотно підвищена за умови раціонального використання не тільки газоподібних продуктів переробки вугілля, але й твердого залишку. Наприклад, можливість його застосування як наповнювач для гумовотехнічних виробів, адсорбенту для очищення питної води або одержання на його основі таких коштовних матеріалів, як ферросиліцій, карбосиліцій, технічний кремній та ін.

3.3 Технологічна установка для одержання синтезу-газу

Плазмова технологія може знайти застосування для переробки бурих вугіль із одержанням синтетичного газу або вуглеводневого рідкого палива. Є й інші можливості її використання. Це газифікація низькосортних місцевих вугіль і сланців – виробництво висококалорійного газу для електростанцій з парогазовими блоками або газовими турбінами, які можуть працювати при змінному навантаженні й завдяки цьому виконувати роль "напівпікових" і "пікових"; це газифікація вугіль та інших палив у газогенераторах малої потужності - для задоволення потреб підприємств у газовому паливі.

У всіх випадках у кожній з названих схем спочатку необхідно одержати так званий синтез-газ - суміш окису вуглецю й водню, по можливості вільну від баластних газів: азоту, двоокису вуглецю, кисню, водяної пари. Тому процес повинен іти практично без доступу повітря, тобто на парокисневому дутті.

Ця вимога до плазмової газифікації твердого палива. Що ж стосується небажаного баласту, то в синтезі-газі домішок CO_2 , O_2 , H_2O практично немає завдяки високій температурі процесу – не нижче $1100\text{--}1200^\circ\text{C}$. За умовами термодинамічної рівноваги системи вугілля–газ концентрації домішок близькі до нуля вже при температурі близько 1000°C , цей важливий результат був теоретично отриманий Е. И. Самуйловим в ЕНІН ім. Г. М. Кржижановського й експериментально підтверджений Г. Н. Худяковим на лабораторному плазмотроні потужністю 50 кВт.

Таким чином, застосування плазми для газифікації твердого палива, у тому числі бурих вугіль, принципово можливе, тим паче, що плазмова технологія

з високим ККД характеризується великою продуктивністю, високою якістю продуктів, що одержуються.

Розглянемо роботу плазмового генератора для газифікації вугілля [58].

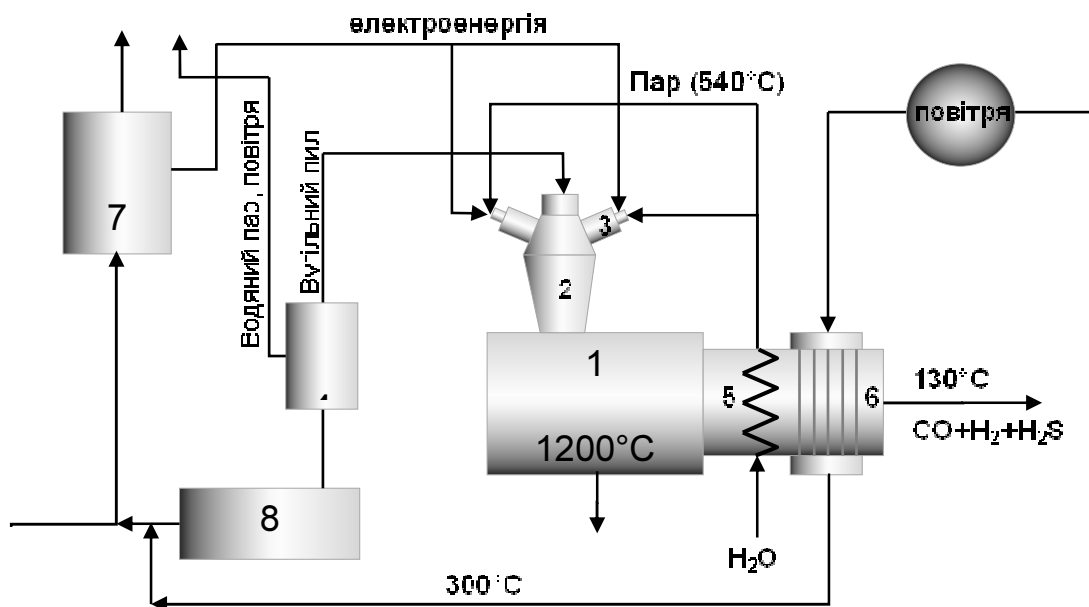
Плазмовий генератор для газифікації вугілля являє собою звичайну топкову камеру. Тільки замість пальників на стінках камери встановлені плазмові реактори із плазмотронами.

У кожному із плазмотронів суміш водяної пари й кисню нагрівається за допомогою електричного газового розряду до температури в середньому біля 3000°C . Гарячі газові струмені в реакторі зливаються в факел. У цьому факелі вугільний пил, що надходить у реактор, з великою швидкістю газифікується з утворенням синтез-газ ($\text{CO} + \text{H}_2$), що виходить у топкову камеру із середньою температурою $1100\text{--}1200^{\circ}\text{C}$. Як і у звичайній котельній установці, у камері й газоходах газ охолоджується приблизно до 100°C , уловлюються частинки шлаку та золи.

Потужність плазмотронів легко регулювати, змінюючи силу струму в ланцюзі живлення. Тому в газогенераторі можна автоматично підтримувати температурний режим на заданому оптимальному рівні навіть при зміні якості палива, що переробляється. За допомогою плазмотронів досить просто змінювати потужність газогенератора, запускати його в роботу після планових або вимушених зупинок. У цьому сенсі плазмовий газогенератор незрівнянно зручніший в експлуатації, ніж класичне пиловугільна топка. Можна стверджувати, що потужність по вугіллю плазмового генератора буде не нижче потужності сучасних пиловугільних топок – до 500 т/год. Для масової переробки вугілля у висококалорійний метан або вуглеводневе рідке паливо, вигідніше використати плазмові газогенератори великої потужності.

Структурна схема такого плазмового газогенератора зображена на рис. 3.2. Плазмовий газогенератор являє собою топкову камеру 1, на стінках якої встановлені плазмові реактори 2 із плазмотронами 3. У плазмотронах за допомогою електричного газового розряду розігрівається суміш водяної пари й кисню. Гарячі газові струмені плазмотронів вдуваються в реактор, зливаючись

у розпечений факел. У реактори надходить вугільний пил. Тут він газифікується, а гази виводяться з камери газогенератора на охолодження й очищення. 4 - сепаратор вугільного пилу, 5 - пароперегрівник, 6 - підігрівник повітря, 7 - енергоустановка живлення плазмотронів, 8 - підготовка палива.



- | | |
|-------------------------------|---|
| 1— топкова камера; | 5— пароперегрівник; |
| 2— плазмові реактори; | 6— нагрівач повітря; |
| 3— плазмотрон; | 7— енергоустановка живлення плазмотронів; |
| 4— сепаратор вугільного пилу; | 8— підготовка палива. |

Рисунок 3.2 – Плазмовий газогенератор

Для живлення плазмотронів такого високопродуктивного газогенератора буде потрібно електрична потужність 100-150 МВт. Якщо використати плазмові реактори потужністю близько 1500 кВт, на стінках камери доведеться встановити близько 80 таких реакторів. На відміну від ЕДП-плазмотронів, в яких через ерозію електродів плазмотрони необхідно періодично ремонтувати із зупинкою роботи газогенератора, але коли реакторів десятки, їх можна ремонтувати по черзі, не зупиняючи газогенератор і навіть не змінюючи його потужності.

Виникає питання – наскільки значні переваги плазмової технології в порівнянні з існуючою?

Отриманий синтез-газ необхідно очищати від сірководню. Але це значно простіше, ніж від окислів сірки, неодмінної складової газів, що відходять, пилувугільних котелень. Технологія видалення сірководню з газових сумішей

освоєна й застосовується у промисловості. Крім того, пиловугільні котельні дають приблизно в п'ять разів більше газів, що відходять, ніж плазмові газогенератори.

Більша одинична потужність плазмового газогенератора й можливість простого очищення газу від сірчистих з'єднань визначають перспективність плазмової газифікації для масової переробки бурих вугіль. Це головні переваги плазмової технології.

Газогенератор великої одиничної потужності на чисто кисневому дутті, без плазмотронів не зможе ефективно працювати через нерівномірність температурного поля, у результаті якої знижується якість одержуваного газу. Більше баластних домішок CO_2 , O_2 , N_2 , більше окислів сірки.

Правда, за літературними даними, у газогенераторах з киплячим шаром і кисневим дуттям температурне поле досить однорідне. Але при цьому з'являються інші проблеми, що істотно обмежують потужність агрегату. Одна з них полягає в тому, що в ньому досить важко форсувати режим – через віднесення дрібних часточок палива потоком газу, що рухається через киплячий шар знизу нагору. Складно рівномірно розподілити паливо, що проступає, по кип'ячому шару, вивести шлаки й золу. Ці труднощі й проблеми відомі з досвіду роботи котельних топок із кусковим спалюванням палива в киплячому шарі. Їхня потужність по паливу обмежена низькою межею – близько 15 т/год. А в сучасних запал-вугільних топках парових котлів спалюється, як ми вже знаємо, до 500 т вугілля в годину. Приблизно на такий же або навіть удвічі більший стрибок продуктивності можна розраховувати при переході до плазмової газифікації вугільного пилу. Важливий факт, що завдяки високій температурі плазми газифікація вугільного пилу закінчується в основному в самому реакторі, тому віднесення практично виключене. Інша ситуація при використанні для газифікації сланців і окислених вугіль. У цьому випадку необхідна для проведення процесу температура 1200°C недосяжна – що пов'язано з витратами великої кількості тепла на розкладання CO_2 і на нагрівання золи. Необхідне додаткове підведення тепла від зовнішнього джерела. Таким джерелом може бути плазмотрон.

З огляду на те, що плазмова технологія дає можливість переробляти низькосортне паливо, а також багатозольне паливо, аж до відходів вуглерозробок, і одержувати при цьому очищені від сірки висококалорійний газ або рідке паливо, такі витрати енергії на роботу плазмотронів ніяк не можна вважати надмірними.

Таким чином, ККД плазмової газифікації наближається до 90%. Його можна ще підвищити, якщо живити плазмотрони енергією атомних електростанцій.

Ефективність плазмової газифікації може бути ще вище, якщо повністю перейти на чисто парове дуття. При розкладанні водяного пару на кисень і водень синтез-газ збагачується воднем, у результаті росте його теплотворна здатність. Зрозуміло, плазмова газифікація палива на електроенергії АЕС можлива лише в випадку, якщо ця енергія в надлишку. Інакше кажучи, процес вигідніше всього вести вночі та неробочі дні. А плазмові газогенератори, з їхньою гнучкістю, здатністю працювати періодично з різним навантаженням, як не можна краще підходять для цього.

3.4 Оцінка економічної ефективності плазмохімічної газифікації бурих вугіль

Для оцінки економічної ефективності плазмохімічної газифікації вугіль необхідні дані по матеріальних і теплових балансах.

Приведемо результати досліджень по матеріальних і теплових балансах, проведених у ДП «Гіпрококс» (м. Харків) для вугілля марки «Вугілля Правобережної України» при його використанні для роботи ТЕЦ. Для розрахунку прийнятий склад бурого вугілля, що використовується на брикетних фабриках ДХК «Олександріввугілля» відповідно до сертифіката, а саме:

МАРКА «Вугілля Правобережної України» Б - бурий

1. ТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ, %

Волога (загальна) 23,5

Зольність (сухий стан) Ad 23,1

Вихід летучих речовин (сухий беззольний стан) Vdaf 60

Загальний вміст сірки (сухий стан палива)	4,0
Вміст хлору Cl	0,16

2. ТЕПЛОТА ЗГОРЯННЯ, Мдж/кг (Ккал/кг)

Вища (сухий беззольний стан)	29,3 (7000)
Нижча (робоча)	17,2 (4100)

3. МАЦЕРАЛЬНИЙ СКЛАД (без мінімальних домішок),%

Гумініт	95
Інтертініт	5

4. ЕЛЕМЕНТНИЙ СКЛАД на сухий беззольний стан палива, %

вуглець, C ^d	50,9
водень, H ^d	5,6
сірка, S ^d	4,0
зола, A ^d	23,1
азот, N ^d	0,3
кисень, O ^d	16,1

5. ХІМІЧНИЙ СКЛАД ЗОЛИ, %

діоксид кремнію Si ₂	52,94
оксид заліза Fe ₂ O ₃	8,90
оксид алюмінію Al ₂ O ₃	14,62
оксид магнію Mg	2,13
оксид кальцію Ca	9,84
оксид натрію Na ₂ O	0,25
оксид калію K ₂ O	0,25
діоксид титана Ti ₂	0,73
триоксид сірки SO ₃	10,31
пентаоксид фосфору P ₂ O ₅	0,03

6. ПЛАВКІСТЬ ЗОЛИ (робоча – окисне середовище), °C

момент розм'якшення, t	1060
момент півкулі, t	1120
момент рідкого стану, t ₀	1260

1. Транспортування сировини

З кар'єру надходить вугілля з вологістю 55 % у кількості 533,4 тис.т/рік (або 74,08 т/год при 7200 робочих годин у році).

Ціна сировини з вологістю 55 % з доставкою на місце переробки 12 дол. США за тону. Витрата оборотних коштів для придбання вихідного вугілля на годину роботи технологічного комплексу складе 888,96 дол. США.

2. Дроблення сировини (фр. 0 – 10 мм)

Для дроблення сировини до часток з розмірами менше 10 мм може знадобитися електроенергії до 1,5 кВт на тону продукту або 111,1 кВт/год.

$$N_2 = 111,1 \text{ кВт/год.}$$

3. Сушіння бурого вугілля до вологості 20 %

Для сушіння 74,08 т вугілля 55% вологості до залишкової вологості 20% необхідно випарувати 32,41 т води ($74,08 \times 0,55 - 33336/4 = 40,744 - 8,334 = 32,41$) і витратити низько-потенційної теплової енергії 22211,1 Мкал/год, у тому числі:

- на нагрівання до 120°C АСВ вугілля – $Q_{3.1.} = (74089 \text{ кг} - 74080 \text{ кг} \times 0,55) \times C_p \times \Delta t = (74080 \text{ кг} - 40744 \text{ кг} \text{ води}) \times C_p \times \Delta t = 33336 \text{ кг} \text{ вугілля АСВ} \times 0,21 \text{ Ккал/кг} \cdot \text{К} \times 100 \text{ }^\circ\text{C} = 700056 \text{ Ккал} = 700,1 \text{ Мкал.}$

- на нагрівання до 100 °С води в куті – $Q_{3.2.} = 40744 \text{ кг} \text{ води} \times 1 \text{ Ккал/кг} \cdot \text{К} \times 100 \text{ }^\circ\text{C} = 4074400 \text{ Ккал} = 4074,4 \text{ Мкал.}$

- на випар частини води в куті – $Q_{3.3.} = 32410 \text{ кг} \times 538 \text{ Ккал/кг} = 17436580 \text{ Ккал} = 17436,6 \text{ Мкал.}$

Витрата електроенергії на роботу встаткування блоку складе приблизно 60 кВт/год.

$$N_3 = 60 \text{ кВт/год.}$$

$$-Q_3 = 22211,1 \text{ Мкал/год}$$

Після підсушування вугілля буде надходити на подальшу переробку 41,67 т/год вугілля із залишковою вологістю 20 %. (33336 кг/год по АСВ)

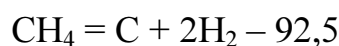
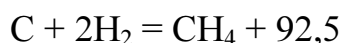
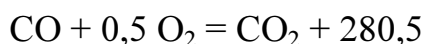
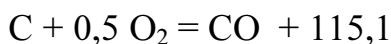
4. Помел вугілля до фракцій менш 40 мкм.

Для тонкого здрібнювання дробленої й підсушеної сировини до часток з розмірами менш 40 мкм може знадобитися електроенергії до 30 кВт на тонну продукту або 1250,1 кВт/год. ($41,67 \times 30 = 1250,1$).

$$N_4 = 1250,1 \text{ кВт/год.}$$

5. Високотемпературна парокиснева газифікація бурого вугілля.

У реакторі парокисневої газифікації бурого вугілля проходять такі реакції:



Теплові ефекти реакцій дані для температури 1500К у кдж/моль

У реактор подається 33336 кг/год АСВ бурого вугілля, 8334 кг оклюдованої вугіллям води.

У цих 33336 кг АСВ утримується:

вуглецю 16968,024 кг або 1414,00 к-моля

водню 1866,816 кг або 933,41 к-моля

сірки 1333,44 кг або 41,67 к-моля

азоту 100,01 кг або 3,57 к-моля

кисню 5367,10 кг або 167,72 к-моля

золи 7700,61 кг

Перша стадія термічних перетворень органічної маси вугілля проходить у діапазоні 250 ÷ 300 С и супроводжується виділенням зв'язаного кисню у вигляді діоксиду вуглецю й парів води. Розподіл кисню між цими з'єднаннями 1:1.

На утворення діоксиду вуглецю буде витрачене

$$167,72/2 \times 12 = 1006,32 \text{ кг вуглецю,}$$

а на утворення води -

$$167,72/2 \times 2 \times 2 = 335,44 \text{ кг водню.}$$

При подальшому підвищенні температури йдуть процеси виділення сірки у вигляді сірководню й азоту у вигляді аміаку.

Для їхнього утворення буде витрачено 204,72 кг водню, у тому числі:

$$\text{- на утворення сірководню: } 41,67 \times 2 = 83,34 \text{ кг;}$$

$$\text{- на утворення аміаку: } 3,57 \times 2 \times 17 = 121,38 \text{ кг.}$$

Таким чином, для виробництва водню залишиться вуглецю

$$16968,024 - 1006,32 = 15961,704 \text{ кг}$$

$$\text{і водню } 1866,816 - 335,44 - 204,72 = 1326,656 \text{ кг.}$$

Для проведення автотермічної парокисневої конверсії 15961,704 кг вуглецю (1330,142 Кмоля) з нульовим тепловим ефектом відповідно до реакції



буде потрібно 362,766 кмоля (8126 нм^3) кисню й 604,61 кмоля (10883 кг) води.

Води з вугіллям надійде 8334 кг + пірогенетичної $167,72/2 \times 2 \times 18 = 3019$ кг - усього 11353 кг, а для газифікації до СО потрібно $10883 \times 1,2 = 13060$ кг.

$$13060 - 11353 = 1707 \text{ кг.}$$

Тобто для сталої роботи газогенератора буде потрібно вводити 1707 кг водяного пару (2124 нм³/год), який одночасно буде служити транспортуючим вугільний пил агентом.

Для нагрівання від температури 1200С до 12000С вугілля, технологічного кисню й пару води буде потрібно затратити 21319460 ккал теплової енергії.

Якщо нагрівання проводити на 100% за рахунок реакції парціального окислювання вуглецю, то буде потрібно 4,9 т/год вуглеці й додатково 4,6 тис. нм³/год кисню.

Для виділення $8126 + 4573 = 12699$ нм³/год кисню з повітря буде потрібно затратити $12699 \text{ нм}^3 \times 0,9 \text{ кВт/нм}^3 = 11429$ кВт електроенергії.

У результаті парокисневої високотемпературної газифікації 41,67 т/год вугілля з вологістю 20 % буде отримувати 47017,1 нм³ продуктів конверсії, у тому числі:

- монооксиду вуглецю 1064,1 кмоля (23836,1 нм³) 50,70 % об.
- диоксиду вуглецю 253,6 кмоля (5680,6 нм³) 12,10 % об.
- водню 663,3 кмоля (14858,5 нм³) 31,60 % об.
- сірководню 41,67 кмоля (933,4 нм³) 1,98 % об.
- аміаку 7,14 кмоля (159,9 нм³) 0,34 % об.
- метану 12,4 кмоля (278,6 нм³) 0,58 % об.
- азоту й аргону (1:1) 56,7 кмоля (1270 нм³) 2,70 % об.

З реактора з вихідними потоками продуктів конверсії й розплавленої золи буде виноситися 23423,6 Мкал тепла, у тому числі:

- газами - 21390,6 Мкал:

$$Q_{CO} = 23836,1 \text{ нм}^3 \times 0,37065 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 8834850,5 \text{ ккал} = 8834,8 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{CO_2} = 5680,6 \text{ нм}^3 \times 0,5185 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 2945391,1 \text{ ккал} = 2945,4 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{H_2} = 14858,5 \text{ нм}^3 \times 0,3402 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 5054861,7 \text{ ккал} = 5054,9 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{H_2S} = 933,4 \text{ нм}^3 \times 0,3652 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 340858 \text{ ккал} = 340,9 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{NH_3} = 159,9 \text{ нм}^3 \times 0,3805 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 60840 \text{ ккал} = 60,8 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{C_4} = 278,6 \text{ нм}^3 \times 0,4236 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 117959,2 \text{ ккал} = 118,0 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{N_2+Ar} = 1270 \text{ нм}^3 \times 0,37065 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 470741 \text{ ккал} = 470,7 \text{ Мкал.}$$

- розплавом шлаків - 2033 Мкал:

$$Q_{золи} = 7700,6 \text{ кг} \times 0,22 \text{ ккал/кг} \cdot \text{К} \times 1200 \text{ } ^\circ\text{C} = 2032958 \text{ ккал} = 2033 \text{ Мкал.}$$

Із блоку з температурою 1200⁰С будуть виходити газоподібні продукти конверсії в кількості 47017,1 нм³/год і розплавлена зола в кількості 7700,6 кг/год (55,4 тис. т/рік).

Витрата електроенергії на роботу встаткування блоку складе приблизно 80 кВт/год.

$N_5 = 80$ кВт/год.

$Q_{5.1} = 21390,6$ Мкал/год

$+Q_{5.2} = 2033,0$ Мкал/год

6. Охолодження газів конверсії.

У блок приходить $47017,1$ $\text{м}^3/\text{год}$ продуктів конверсії, при охолодженні яких до 35°C виділитися $20766,7$ Мкал/год тепла.

Витрата електроенергії на роботу встаткування блоку складе приблизно 50 кВт/год.

$N_6 = 50$ кВт/год.

$+Q_6 = 20766,7$ Мкал/год

7. Видалення кислих газів і аміаку з одержанням попутної продукції.

При виділенні з газового потоку сірководню й аміаку й наступного перетворення їх у товарні продукти (сульфат амонію й сірчану кислоту) за рахунок окислювання сірки до сірчаного ангідриду буде виділятися 6720 ккал/ м^3 х $933,4$ $\text{м}^3/\text{год} = 6272,4$ Мкал/год тепла.

Як попутна продукція буде вироблятися 471 кг/година ($3,4$ тис. т/рік) сульфату амонію й $3,7$ т/година ($26,9$ тис. т/рік) сірчаної кислоти.

Витрата електроенергії на роботу встаткування блоку складе приблизно 270 кВт/год.

$N_7 = 270$ кВт/год.

$+Q_7 = 6272,4$ Мкал/год

На подальшу переробку буде йти $44036,0$ $\text{м}^3/\text{година}$ очищеної газової суміші.

Кількість експанзерних газів, що виділяються на цьому етапі становить $1887,8$ $\text{м}^3/\text{год}$, у тому числі:

- монооксиду вуглецю	$23,8$ м^3	$1,26$ % об.
- діоксиду вуглецю	$1840,0$ м^3	$97,47$ % об.
- водню	$14,8$ м^3	$0,78$ % об.
- метану	$2,8$ м^3	$0,15$ % об.
- азоту й аргону (1:1)	$6,4$ м^3	$0,34$ % об.

Експанзерні гази направляються в блок компрімування експанзерних газів.

8. Нагрівання газового потоку до 350 °С и фінішне очищення від сірчистих з'єднань.

Для проведення парової конверсії монооксиду вуглецю потрібне глибоке очищення продуктів парокисневої конверсії вугілля від сірчистих з'єднань. Фінішна очистка від сірки проводиться за допомогою хемосорбента на базі оксиду цинку при температурі 350°С.

Для нагрівання 44036,0 нм³/год газової суміші буде потрібно затратити 5758,3 Мкал тепла, у тому числі:

$$Q_{CO} = 23812,3 \text{ нм}^3 \times 0,37065 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 350 \text{ } ^\circ\text{C} = 3089110,1 \text{ ккал} = 3089,1 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{CO_2} = 3840,6 \text{ нм}^3 \times 0,5185 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 350 \text{ } ^\circ\text{C} = 696972,9 \text{ ккал} = 697,0 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{H_2} = 14843,7 \text{ нм}^3 \times 0,3402 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 350 \text{ } ^\circ\text{C} = 1767439,4 \text{ ккал} = 1767,4 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{C_4} = 275,8 \text{ нм}^3 \times 0,4236 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 350 \text{ } ^\circ\text{C} = 40890,1 \text{ ккал} = 40,9 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{N_2+Ar} = 1263,6 \text{ нм}^3 \times 0,37065 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 350 \text{ } ^\circ\text{C} = 163923,7 \text{ ккал} = 163,9 \text{ Мкал.}$$

$$-Q_8 = 5758,3 \text{ Мкал/год}$$

9. Парова конверсія монооксиду вуглецю й охолодження потоку повітряногазової суміші.

Для проведення парової конверсії 23812,3 нм³/год монооксиду вуглеці буде потрібно 38,3 т пару, з якого 18,7 т. буде витрачено на реакцію.

У результаті парової конверсії 1063,05 кмоль монооксиду вуглецю буде виділено 1181,51 кмоль $\times$ 43,1 кдж/кмоль/4,19 = 10935 ккал тепла. При цьому буде отримано 67308,3 нм³ продуктів конверсії, у тому числі:

- монооксиду вуглецю 24,12 кмоль (540 нм³) 0,80 % об.
- діоксиду вуглецю 1210,40 кмоль (27112,9 нм³) 40,28 % об.
- водню 1701,61 кмоль (38116 нм³) 56,63 % об.
- метану 12,31 кмоль (275,8 нм³) 0,41 % об.
- азоту й аргону (1:1) 56,41 кмоль (1263,6 нм³) 1,88 % об.

На охолодження із блоку конверсії буде виводитися 67308,3 нм³/год газової суміші, що містить водень, й 19,6 т пару. Тепломісткість потоку складе 18779,8 Мкал, у тому числі:

$$Q_{CO} = 540,0 \text{ нм}^3 \times 0,37065 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 220 \text{ }^0\text{С} = 44033,2 \text{ ккал} = 44,0 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{CO_2} = 27112,9 \text{ нм}^3 \times 0,5185 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 220 \text{ }^0\text{С} = 3092768,5 \text{ ккал} = 3092,8 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{H_2} = 38116 \text{ нм}^3 \times 0,3402 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 220 \text{ }^0\text{С} = 2852753,9 \text{ ккал} = 2852,7 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{C_4} = 275,8 \text{ нм}^3 \times 0,4236 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 220 \text{ }^0\text{С} = 25702,4 \text{ ккал} = 25,7 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{N_2+Ar} = 1263,6 \text{ нм}^3 \times 0,37065 \text{ ккал/нм}^3 \cdot \text{К} \times 220 \text{ }^0\text{С} = 103037,7 \text{ ккал} = 103,0 \text{ Мкал.}$$

$$Q_{H_2O} = 19600 \text{ кг} \times 0,6 \text{ ккал/кг} \cdot \text{К} \times 180 \text{ }^0\text{С} + 19600 \text{ кг} \times 538 \text{ ккал/кг} = 12661,6 \text{ Мкал.}$$

Сумарна кількість тепла з урахуванням тепла реакції складе 18790,7 Мкал.
 $+Q_9 = 18790,7 \text{ Мкал/год}$

При охолодженні парогазового потоку до 35⁰С виділитися 19600 кг конденсату, з якого при зниженні тиску виділитися 121,7 нм³ розчинених газів, у тому числі:

- монооксиду вуглецю	0,074 нм ³	0,06 % об. ($\alpha=0,0188$)
- діоксиду вуглецю	116,844 нм ³	96,00 % об. ($\alpha=0,592$)
- водню	4,63 нм ³	3,80 % об. ($\alpha=0,0167$)
- метану	0,052 нм ³	0,04 % об. ($\alpha=0,0255$)
- азоту й аргону (1:1)	0,12 нм ³	0,10 % об. ($\alpha=0,0130$)

Що виділилися експанзерні гази в кількості 121,7 нм³/год направляються в блок компримірування експанзерних газів і зрідження діоксиду вуглецю.

10. Декарбонізація.

Для видалення з газового потоку основної кількості діоксиду вуглецю й парів води застосовується метод фізичної абсорбції селективним розчинником з регенерацією абсорбенту зниженням тиску до атмосферного.

У блок декарбонізації буде надходити 67186,6 нм³/год продуктів конверсії, у тому числі:

- монооксида вуглецю	539,926 нм ³	0,80 % об.
- диоксида вуглецю	26996,056 нм ³	40,18 % об.

- водню	38111,370 нм ³	56,72 % об.
- метану	275,748 нм ³	0,41 % об.
- азоту й аргону (1:1)	263,480 нм ³	1,89 % об.

У результаті абсорбції частини діоксиду вуглецю й інших газів селективним розчинником з газового потоку буде вилучено 26698,3 нм³/год газів, у тому числі:

- монооксиду вуглецю	0,516 нм ³	0,002 % об.
- діоксиду вуглецю	26641,456 нм ³	99,787 % об.
- водню	54,451 нм ³	0,204 % об.
- метану	0,748 нм ³	0,003 % об.
- азоту й аргону (1:1)	1,210 нм ³	0,004 % об.

Виділені експанзерні гази в кількості 26698,3 нм³/год направляються в блок компримірування експанзерних газів і зрідження діоксиду вуглецю.

Із блоку декарбонізації виходить 40488,3 нм³/год водородомістної газової суміші, у тому числі:

- монооксиду вуглецю	539,41 нм ³	1,33 % об.
- діоксиду вуглецю	354,60 нм ³	0,88 % об.
- водню	38056,92 нм ³	93,99 % об.
- метану	275,00 нм ³	0,68 % об.
- азоту й аргону (1:1)	1262,37 нм ³	3,12 % об.

Циркуляція селективного розчинника складе приблизно 35 м³/год.

Витрата електроенергії на роботу встаткування блоку складе приблизно 2700 кВт/год.

$N_{10}=2700$ кВт/год.

11. Блок компримірування експанзерних газів і зрідження CO₂.

У блок на компримірування буде надходити три потоки експанзерних газів загальною кількістю 28707,8 нм³/год.

Кількість компонентів і склад об'єднаного газового потоку будуть такими:

- монооксиду вуглецю	24,38 нм ³	0,085 % об.
- діоксиду вуглецю	28598,30 нм ³ (56175 кг)	99,618 % об.

- водню	73,88 нм ³	0,257 % об.
- метану	3,60 нм ³	0,012 % об.
- азоту й аргону (1:1)	7,73 нм ³	0,028 % об.

Витрата електроенергії на компримювання й зрідження CO₂ складе приблизно 11826 кВт/год. Для зрідження приходить зняти й скинути в навколишнє середовище 2084092,5 Ккал низкопотенційного тепла.

$$N_{11}=11826 \text{ кВт/год.}$$

$$Q_{11}=2084,1 \text{ Мкал/год розсіюється через градирню.}$$

Виробництво рідкої вуглекислоти складе майже 56,2 т/год.

Якщо не доводити якість вуглекислоти до норм ДСТУ, то всі супутні компоненти будуть розчинені в рідкому діоксиді вуглецю. Якщо потрібна чиста вуглекислота, то необхідно буде дробовою сепарацією відокремлювати розчинені гази й рециркулювати частину вуглекислоти, що випаровується, (до 20 % від сконденсованого діоксиду вуглецю).

12. Одержання технологічного кисню.

Для одержання 13970 нм³/год технологічні кисні (сумарний вміст азоту й аргону в кисні 10 %) під тиском 4 МПа буде потрібно затратити приблизно 13000 кВт/год.

$$N_{12}=13000 \text{ кВт/год.}$$

$$Q_{12}=6705,6 \text{ Мкал/год розсіюється через градирню.}$$

13. Блок одержання демінералізованої води.

Для одержання 1,7 + 38,3 = 40 т/год демінералізованої води, із природних джерел буде потрібно брати 62 т/год води.

Витрата електроенергії на роботу встаткування блоків складе приблизно 154 кВт/год.

$$N_{13}=154 \text{ кВт/год.}$$

14. Парогенератор

Для одержання 40 т/год перегрітої пари з тиском 4 МПа буде потрібно затратити приблизно 30168,9 Мкал тепла, у тому числі:

- для одержання 1,7 т перегрітого до 750 °С пари – 1635,4 Мкал;

- для одержання 38,3 т перегрітого до 350 °С пари – 28533,5 Мкал;

$-Q_{14}=30168,9$ Мкал/год

15. Перекачування рідкого CO₂ по трубопроводу.

16. Одержання повітря КВП і А.

$N_{16}=104$ кВт/год.

17. Хімлабораторія.

$N_{17}=20$ кВт/год.

18. Блок АСУ ТП.

$N_{18}=20$ кВт/год.

19. Ремонтно-механічний цех.

$N_{19}=300$ кВт/год.

20. Блок оборотного водопостачання (градирня).

$N_{10}=140$ кВт/год.

21. Газофакельний пристрій.

22. Енергосиловий блок.

Загальне споживання електроенергії складе приблизно 20 Мвт-ч, у тому числі:

Дроблення вугілля $N_2=111,1$ кВт/год.

Сушіння до 20 % вологості $N_3=60$ кВт/год.

Млино вугілля $N_4=1250,1$ кВт/год.

Парокиснева конверсія $N_5=80$ кВт/год.

Охолодження продуктів конверсії вугілля $N_6=50$ кВт/год.

Видалення кислих газів і одержання попутної продукції $N_7=270$ кВт/год.

Декарбонізація $N_{10}=2700$ кВт/год.

Компримірування й зрідження CO₂ $N_{11}=11826$ кВт/год.

Одержання технологічного кисню $N_{12}=13000$ кВт/год.

Одержання демінералізованої води $N_{13}=154$ кВт/год.

Одержання повітря КВП і А $N_{16}=104$ кВт/год.

Хімлабораторія $N_{17}=20$ кВт/год.

Блок АСУ ТП $N_{18}=20$ кВт/год.

Ремонтно-механічний цех $N_{19}=300$ кВт/год.

Блок оборотного водопостачання (градирня) $N_{20}=140$ кВт/год.

Для одержання 19445,2 МВт електроенергії із ККД 50% буде потрібно використати як паливо приблизно 13 тис. нм^3 товарного водню. При цьому попутно виділитися утилізуемого тепла 16707,1 Мкал.

$$Q_{22}=20650 \text{ Мкал/год}$$

Загальний баланс по теплу:

Сушіння до 20 % вологості $-Q_3=22211,1$ Мкал/год сушіння вугілля

Парокиснева конверсія (тепло розплаву шлаків) $+Q_{5,2}=2033,0$ Мкал/год

Охолодження продуктів конверсії вугілля $+Q_6=20766,7$ Мкал/год

Тепло від спалювання сірки. Видалення кислих газів і одержання попутної продукції $+Q_7=6272,4$ Мкал/год

Нагрівання для фінішної очистки від сірки $-Q_8=5758,3$ Мкал/год

Парова конверсія й охолодження водородсодержащей суміші газів $+Q_9=18790,7$ Мкал/год

Парогенератор $-Q_{14}=30168,9$ Мкал/год

Підсумок по енергетичному балансі:

$$16707,1 - 22211,1 + 2033 + 20766,7 + 6272,4 - 5758,3 + 18790,7 - 30168,9 = 6431,6 \text{ Мкал/год}$$

У цілому баланс тепла позитивний з перевищенням приблизно на 6,4 Гкал. Навіть якщо врахувати неминучі 7 – 10 % втрат тепла в навколишнє середовище через неідеальність теплоізоляції, то все одно надлишок тепла складе приблизно 10 % від виробленої на всіх етапах кількості.

Низкопотенціальне тепло, що викидається в навколишнє середовище на градирні й відноситься парами води при сушінні сировини може бути використане для забезпечення гарячою водою для господарсько-побутових цілей жителів населеного пункту, а при установці теплових насосів для підвищення температури теплоносія до 110°C навіть на обігрів житла й виробничих будівель.

Таким чином, товарного водню зі змістом основної речовини приблизно 94 % об'єму буде вироблятися $38 \text{ тис. нм}^3 - 13 \text{ тис. нм}^3 = 25 \text{ тис. нм}^3/\text{год}$, або приблизно 180 млн. $\text{нм}^3/\text{рік}$. (16 тис. т/рік).

Слід зазначити, що оцінка економічної ефективності плазмохімічного виробництва повинна виконуватися з урахуванням особливостей і алгоритму виконання конкретного технологічного процесу.

3.5 Результати експериментальних досліджень лабораторного макета високочастотного плазмотрона

У ході виконання НДР був виготовлений діючий макет високочастотного генератора для одержання низькотемпературної плазми.

Основні технічні характеристики пристрою:

Живлення.....	3-х фазне, 380В, 50 Гц
Встановлена потужність.....	30 кВт
Робоча частота генератора	35 МГц
Потужність, що віддається в навантаження....	13 кВт

Генератор зібраний за двотактною схемою із симетричним виходом. В якості навантаження використаний LC-контур.

На рис. 3.2 і 3.3 показаний зовнішній вигляд макета високочастотного генератора для одержання низькотемпературної плазми. З рис. 1 видно, що макет пристрою конструктивно розміщений у трьох відсіках апаратурної шафи. У верхньому відсіку змонтована система управління, блокування й сигналізації. У середньому відсіку знаходиться генераторний блок. У нижньому відсіку розміщуються елементи анодного й накалиювального електричного живлення.

Проведені експерименти з одержанням плазми підтвердили відповідність експериментальних результатів розрахунковим даним. Була експериментально продемонстрована можливість технічної реалізації плазмового реактора та одержання низькотемпературної плазми без використання плазмоутворюючого газу при атмосферному тиску.



Рисунок 3.2 – Фронтальний вид макета ВЧ генератора



Рисунок 3.3 – Вид макета з боку охолоджувальної системи

Таким чином, у ході проведеного експерименту продемонстрована можливість технічної реалізації плазмового реактора та одержання низькотемпературної плазми без використання плазмоутворюючого газу при атмосферному тиску.

Висновки по розділу 3

Наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень показують можливість розробки плазмотронів як для безмазутного розпалювання пиловугільних котлів в енергетиці, так і для одержання плазми, вільної від домішок продуктів ерозії, необхідної для інших технологічних цілей, наприклад, плазмохімії.

З погляду ефективності процесу одержання водню для подальшого його використання в процесі одержання синтетичного моторного палива найбільш перспективними є плазмохімічні процеси, що протікають селективно через ко-

леально-збудений стан молекул, і що найкращі результати можна одержати, використовуючи нерівноважну НВЧ-плазму. Важливо, що одержати нерівноважну плазму можна при використанні значних імпульсних НВЧ-потужностей. Та обставина, що тривалість НВЧ-імпульсу (0,1—1 мкс) набагато менша часу деіонізації та розпаду плазмового утворення, при тривалості паузи між імпульсами рівної часу розпаду плазми, дозволяє одержати нерівноважну плазму при малій температурі газу.

Ефективність процесу одержання водню при використанні НВЧ енергії в кілька разів (теоретично в 4-5 разів) перевищує ефективність електродугових плазмотронів. ККД плазмотронів ВЧІ й ВЧЄ не перевищує 50-60%, а для НВЧ-плазмотрона він може становити й більше 80%. Крім того, НВЧ-плазмотрони відрізняються компактністю, простотою налаштування, їхні характеристики в меншому ступені залежать від впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Наявні технічні характеристики встаткування, яке випускається серійно, свідчать про наявність широкої номенклатури мікрохвильових приладів, які дозволяють реалізувати більші виробничі потужності одержання синтезу-газу з подальшим виробництвом синтетичного моторного палива з використанням НВЧ-енергії.

Висновки

1. Розроблені технології на основі використання стимулюючої дії фізичних полів є екологічними та енергозберігаючими.

2. Включення в установку одержання альтернативного біопалива пристрою магніто-акустичної обробки скорочує час технологічного циклу на 15-25%.

3. Проведені дослідження резонансної магніто-акустичної обробки показали наявність таких змін в робочому середовищі:

3.1. Резонансна магніто-акустична обробка створює передумови для зміни структури води та інших функціональних речовин в робочому середовищі за рахунок предисоціації і підвищення активності радикалів та іон-радикалів при незмінній температурі.

3.2. Магніто-акустична обробка робочого середовища змінює електрофізичні параметри, теплоємність, активність іонів водню (pH) та ін.

3.3. Залежності змін параметрів робочого середовища від температури нелінійні, зі збільшенням температури швидкість змін параметрів зростає.

3.4. Резонансні властивості рідких робочих середовищ, що піддаються магніто-акустичній обробці, залежать від напруженості геомагнітного поля, тому їй потрібно враховувати при конструюванні та налаштуванні пристрою магніто-акустичної обробки.

3.5. Для спрощення узгодження пристрою по частоті при комплексній резонансній магніто-акустичній обробці робочого середовища доцільно використовувати широкосмугові шумові сигнали звукових і ультразвукових частот на частотах, що перекривають резонансні частоти.

3.6. Найбільш ефективним видом резонансної магніто-акустичної обробки є комплексний вплив акустичних і електромагнітних хвиль у діапазонах звукових і ультразвукових частот.

3.7. Максимальний ефект впливу обробки досягається при тривалості експозиції 5–15 хвилин.

4. Технологія одержання альтернативного біопалива з використанням біогенних відходів та модифікованого вугільного пилу експериментально підтверджена з дослідженням зразків біопалива в профільній акредитованій лабораторії.

5. Для виготовлення модифікованого вугільного пилу розроблена енергозберігаюча технологія з використанням в процесі модифікації енергії електромагнітного поля НВЧ діапазону.

6. Результати випробувань в профільній акредитованій лабораторії одержаних зразків альтернативного біопалива підтвердили високу теплотворну здатність цих зразків та відповідність параметрів до параметрів, що пред'являються котельним видам палива. По свої споживчим характеристикам воно близьке до мазуту М100, проте його зольність вища.

7. Аналіз економічних показників виробництва альтернативних видів палива підтвердив його рентабельність.

8. На основі порівняльного аналізу конвективного та мікрохвильового способів регенерації молекулярних сит, що використовуються в технологічному процесі одержання абсолютного спирту, підтверджені економічні та екологічні переваги використання мікрохвильового способу.

9. Показана перевага використання імпульсного перед безперервним режимом подачі електромагнітної енергії в адсорбер.

10. Обґрунтована оптимальна питома щільність потоку енергії в адсорбері.

11. Для целіту 4Å визначені параметри НВЧ-регенерації:

- імпульсний режим роботи адсорбера;
- температура нагрівання цеоліту $200 \pm 10^{\circ}\text{C}$;
- питома щільність потоку енергії в адсорбері - 2,4 кВт/кг;
- при зниженні тиску в адсорбері до 25 кПа зменшується час регенерації на 10-20%.

12. Запропонована система технічних засобів для НВЧ регенерації молекулярних сит в процесі отримання абсолютного спирту.

13. Теоретичні та експериментальні дослідження плазмової конверсії паровугільної суміші показали, що найбільш перспективними є плазмохімічні процеси, які протікають селективно через коливально-збуджений стан молекул в плазмі, причому найефективнішим є використання нерівноважної НВЧ-плазми.

14. Використання ВЧ і НВЧ-плазмотронів дозволяє одержувати нерівноважну плазму при малій температурі газу, так як тривалість НВЧ-імпульсу (0,1—1 мкс) набагато менша часу деіонізації та розпаду плазмового утворення, при тривалості паузи між імпульсами рівної часу розпаду плазми.

15. Ефективність процесу одержання водню при використанні НВЧ енергії в кілька разів (теоретично в 4-5 разів) перевищує ефективність електродугових плазмотронів.

16. ККД НВЧ-плазмотрона він може становити більше 80% при тому, що ККД електродугових менший в декілька раз (теоретично в 4-5 раз), а високочастотні ємнісні та високочастотні індукційні плазмотрони мають ККД менший 60%.

17. Наявність необхідного устаткування та приладів, що серійно випускаються, дозволяє в досить стислі строки реалізувати виробничі потужності одержання синтезу-газу з використанням НВЧ-енергії в плазмовому реакторі для подальшого виробництва синтетичного моторного палива.

Рекомендації

1. При використанні стимулюючих впливів електромагнітних хвиль НЧ і НВЧ діапазонів, біогенних відходів: мулового осаду стічних вод та сирової спиртової барди, НЧ і НВЧ плазми потрібне обов'язкове виконання умов техніки безпеки.

2. Для практичного впровадження розроблених технологій потрібне виконання ДКР для виготовлення дослідних зразків та їх випробувань в лабораторних умовах та на профільних підприємствах.

3. Доцільно використовувати виробництво альтернативного біопалива для утилізації біогенних відходів, що забруднюють довкілля, наприклад, мулового осаду на комунальних підприємствах з очистки стічних вод або спиртових заводах для утилізації барди з виготовленням корисного продукту – альтернативного біопалива.

4. З врахуванням того факту, що міські комунальні підприємства з очистки стічних вод є великими споживачами електроенергії доцільно на першому етапі впровадження технології одержання альтернативного біопалива використовувати вироблене паливо для виробництва теплової та електричної енергії для власних потреб на базі малих електростанцій.

5. Створення мобільних автоматизованих установок невеликої потужності для виробництва АБП спрямовано на іншу групу цільових споживачів - фермерські господарства, малі комунальні та виробничі підприємства, які мають потребу утилізації відходів органічних стоків або нафтопродуктів, так і в децентралізованому енергозабезпеченні альтернативним дешевим паливом.

Перелік джерел посилання

1. Пат. 83980 Україна, (51) МПК: C10L 1/04 (2006.01), C10L 1/14(2006.01), C10L 1/32 (2006.01). Альтернативне паливо і спосіб його приготування / Дохов О.І. (UA), Толстих О.І., Контар О.Я. та ін. Заявлено 03.12.2007; Опубл. 10.09.2013, бюл. 26.08.2008, бюл. № 16/2008.
2. Пат. 89917 Україна, МПК: C10L 1/04 (2006.01), C10L 1/14(2006.01), C10L 1/32 (2006.01). Спосіб приготування альтернативного палива / Бодаренко М.Ф., Валєвахін Г.М., Дохов О.І. та ін. Заявлено 05.03.2009; Опубл. 10.03.2010, бюл. № 5/2010.
3. Пат. 82856 Україна, МПК (2009): C10L 1/00, C10L 1/32 (2006.01), B01F 3/00, B01J 19/08 (2006.01). Спосіб одержання альтернативного рідкого палива / Зима І.І., Дохов О.І., Толстих О.І., Стрільченко В.Й., Жирнов В.В. Заявлено 30.07.2009; Опубл. 10.12.2010, бюл. № 23/2010.
4. Пат. 95587 Україна, МПК C10L 1/04 (2006.01), C10L 1/14(2006.01), C10L 1/32 (2006.01), B01F 3/12 (2006.01). Спосіб приготування альтернативного палива та пристрій для його реалізації / Бодаренко М.Ф., Дохов О.І., Корінько І.В. та ін. Заявлено 19.11.2011; Опубл. 10.08.2011, бюл. № 15/2011.
5. Пат. 101680 Україна, МПК C10L 1/32 (2006.01), C10L 1/14(2006.01), C10L 1/30 (2006.01). Спосіб приготування альтернативного палива з отриманням легких вуглеводнів / Контар О.Я., Валєвахін Г.М., Дохов О.І. та ін. Заявлено 02.04.2013; Опубл. 25.04.2013, бюл. № 8/2013.
6. Пат. 105707 Україна, МПК F26B 3/347 (2006.01), B01D 61/36(2006.01), C07C 31/08 (2006.01). Спосіб отримання спирту етилового зневодненого / Контар О.Я., Валєвахін Г.М., Галєєв Е.Р., Дохов О.І. Заявлено 02.01.2013; Опубл. 10.06.2014, бюл. № 11/2014.
7. Пат. 83469 Україна, МПК: C01B 39/48 (2006.01). Спосіб регенерації цеолітів / Контар О.Я., Валєвахін Г.М., Галєєв Е.Р., Дохов О.І. Заявлено 02.04.2013; Опубл. 10.09.2013, бюл. № 17/2013.
8. Пат. 109389 Україна, МПК C10L 1/04 (2006.01), C10L 1/14(2006.01), C10L 1/32 (2006.01), B01F 3/12 (2006.01). Пристрій для приготування альтерна-

тивного палива / Дохов О.І., Толстих О.І., Валєвахін Г.М. та ін. Заявлено 02.02.2015; Опубл. 10.08.2015, бюл. № 15/2015.

9. Пат. 113731 Україна, МПК C10L 1/04 (2006.01), C10L 1/14(2006.01), C10L 1/16 (2006.01), C10L 1/32 (2006.01). Альтернативне паливо і спосіб його приготування / Контар О.Я., Валєвахін Г.М., Галєєв Е.Р., Дохов О.І. Заявлено 30.09.2013; Опубл. 10.03.2017, бюл. № 5/2017.

10. Заявка а201607953 Україна, МПК: C10L 1/14 (2006.01), C10L 1/30 (2006.01), C10L 1/04 (2006.01). Альтернативне паливо і спосіб його приготування / Контар О.Я., Валєвахін Г.М., Дохов О.І., Толстих О.І. Заявлено 18.07.2016. Опубл. 25.01.2017, бюл. № 2.

11. Кардашев Г. А., Михайлов П.Е. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. - М.: Машиностроение, 1973. - 223 с.

12. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М. Химия, 1983. 192 с.

13. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2008. Т. 14. № 4. С. 861–869

14. Курочкин А.К., Смородов Е.А., Закиев А.Р. Определение некоторых эмпирических зависимостей энергетических параметров роторных гидроакустических излучателей // Материалы научно-практической конференции "Энергосбережение в химической технологии 2000" 28-30 марта 2000. Казань. 2000. с. 119-120.

15. Курочкин А.К. Кавитационно-акустическое воздействие как энергосберегающий фактор в химической технологии // Материалы научно-практической конференции "Энергосбережение в химической технологии 2000" Казань. 2000. с. 64-68.

16. Зима И.И., Богданов Г.Ф. Основы роторного геомагнетизма. Сборник научных трудов. Вып. 3(25), Харьков: ХВУ, 1999.

17. Яворский Б.И., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике для поступающих в ВУЗы и для самообразования. 4-е издание исправленное. - М.: Наука, 1989.

18. Зима И.И., Григорьева Н.Н., Васильев Н.Д., Кравченко А.В. Исследование населённости геомагнитных энергетических уровней воды с учетом протолитической диссоциации. Проблемы бионики, №55, 2001.

19. Фізичні моделі та інструментарій для 3-d візуалізації взаємодії низькоінтенсивного електромагнітного поля з мікро- та нанооб'єктами різної фізичної природи та біосередовищами (кров). Розділ 6. Дослідження змін властивостей об'єктів під впливом комбінованих полів різної фізичної природи та їх практичне застосування : звіт про НДР/ Харківський національний університет радіоелектроніки; керівн. Г.І. Чюрюмов; викон.: О.І.Дохов, В.Й. Стрільченко, І.І. Зима та ін. – Харків, 2014 – 86 с. – Інв. № 0112U000208.

20. С.Д. Бесков. Техно-химические расчеты. Гос. Из-во «Высшая школа». М. 1962. С. 127-129, 142-145, 265, 270-292, 307.

21. Г.И. Демалит. Курс технологии коксохимического производства. Коксование углей. Metallurgizdat. Харьков. 1947. С. 87.

22. Физический энциклопедический словарь. М. Из-во «Советская энциклопедия». 1983. С. 551, 553.

23. Большой энциклопедический словарь. Политехнический. Научное издание. Большая российская энциклопедия. М.: 1962. С. 72-74.

24. В.А. Киреев. Краткий курс физической химии. Госхимиздат. М.: 1962. С. 72-74.

25. И.Н. Путилова. Руководство к практическим занятиям по коллоидной химии. Госхимиздат. М.: 1968. С. 104.

26. Л.Д. Глузман, И.И. Эдельман. Лабораторный контроль коксохимического производства. Харьков 1957. С. 14, 49-70, 84-90, 130.

27. Утилізація мулового осаду стічних вод і виробництво на їх основі електричної та теплової енергії. Звіт про НДР / Харківський національний уні-

верситет радіоелектроніки; наук.керівн. О.І. Дохов; виконавці: О.Я.Контар, Г.М. Валевахін, О.І. Толстих та ін. – Харків. 2012, 72 с.

28. Утилізація мулового осаду стічних вод і виробництво на їх основі електричної та теплової енергії. Звіт про НДР / Харківський національний університет радіоелектроніки; наук.керівн. О.І. Дохов; виконавці: О.Я.Контар, Г.М. Валевахін, О.І. Толстих та ін. – Харків. 2012, 72 с. – Інв. № 0112U004769

29. D.M. Ruthven, S. Farooq, K. Knaebel, Pressure Swing Adsorption, VCH Verlag, Weinheim, 1994

30. K. Jacques, T.P. Lyons, D.R. Kelsall, The Alcohol Textbook 4th Edition, ISBN 1-897676-13-1, Nottingham, England 2003, p. 337-342

31. Патент US 4407662, опубл. 04.10.1982.

32. Патент FR 2719039, опубл. 27.10.1995.

33. Патент РФ 2400282, опубл. 27.09.2010.

34. Соколов В.А., Торочешников Н.С., Кельцев Н.В. Молекулярные сита и их применение. - Москва: Химия, 1964. — 156 с.

35. Atwater, J., Holtsnider, J., Wheeler, R., and Luna, B., "Microwave-Powered Thermal Regeneration of Sorbents for CO₂, Water Vapor and Trace Organic Contaminants," SAE Technical Paper 972430, 1997, doi:10.4271/972430.

36. Singh, V.P. Microwave regeneration of molecular sieves. Canadian Fusion Fuels Technology Project, Toronto, Ontario, 1984, p. 33.

37. Шевченко О.А, Сурис А.Л., Шаталов А.Л. Исследование процесса регенерации силикагеля методом его сушки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле // Известия МГТУ «МАМИ» . – 2013 – т. 2, №3(17)/ -с. 159 - 165.

38. Sarbu E. , Calinescu I. Microwave assisted regeneration of 3 A molecular sieves used for ethanol dehydration // U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 76, Iss. 1, 2014 p.95-106.

39. Sarbu E., Calinecku I. , Trifan A. Regeneration of weak and medium absorbing molecular sieves (3A vs 4A) under microwave exposure // REV. CHIM. (Bucharest). -2014 – 65, No.7- p. 762-767.

40. Calinescu I., Sarbu E., Trifan A. Regeneration of 3A Molecular Sieves, Conventional vs. Microwave Heating // Revista de Chimie -Bucharest- Original Edition. – 2013 - 64, №10. – p.1146-1150 ·
41. Polart,I., Ledoux,A., Estol,L., Huyghe,. Thomas, M. Microwave assisted regeneration of zeolite // International Journal of Chemical Reactor Engineering. 5.
42. V.Komarov, S.Wang, J.Tang. Permittivity and measurements // Encyclopedia of RF and microwave engineering. 2005.
43. А.П.Гринев. Технический анализ. Изд. «Химической литературы», М. 1958, с.251-267
44. В.В.Пасынков. Материалы электронной техники. «Высшая школа», М. 1983, с.192.
45. Справочник химика, т.1, Госхимиздат, 1963, с.545-963.
46. Я.Ю.Ахадов. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник. — М.; Издательство стандартов. 1972, с. 10, 11, 13, 52, 59, 161, 338.
47. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диссоциация углекислого газа в неравновесной плазме // Химия плазмы. — М. Энергоатомиздат, 1982. — Вып. 9. — С. 206-236.
48. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. — М.: Наука, 1984 - 416 с.
49. Бутылкин Ю.П., Животов В.К., Крашенинников Е.Г. и др. Плазмохимический процесс диссоциации CO_2 в неравновесном НВЧ-разряде // ЖТФ. — 1981. — Т. 51, № 5. — С. 925-931.
50. Азизов Р.И., Животов В.К., Кротов М.Ф. и др. Диссоциация углекислого газа в сверхзвуковом потоке низкотемпературной плазмы // Вопр. атом. науки и техники. Атомно-водород. энергетика и технология. — 1983. — № 1 (14). — С. 48-50.
51. Азизов Р.И., Вакар А.К., Животов В.К. и др. Неравновесный плазмохимический процесс разложения CO_2 в сверхзвуковом НВЧ-разряде // ДАН СССР. — 1983. — Т. 271, № 1. — С. 94-98.

52. Блинов Л.М., Володько В.В., Гонтарев Г.Г. и др. Сверхвысокочастотные плазмотроны, их характеристики и область применения // Генераторы низкотемпературной плазмы. — М.: Энергия, 1969. — С. 345-358.
53. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура. Киев: Техника, 1971. 164 с.
54. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов / Под ред. Б.Е. Патона. М.: «Наука», 1973. 243 с.
55. Генераторы плазменных струй и сильноточные дуги / Под ред. Ф.Г. Рутберга. Л.: «Наука», 1973. 152 с.
56. Глебов И. А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 153 с.
57. Л. С. Полак, А. А. Овсянников, Д. И. Словецкий, Ф. Б. Вурзель Теоретическая и прикладная плазмохимия. М. «Наука», 1975, стр. 304.
58. Кружилин Г. Н. Топливо, добытое в плазме. Плазменная газификация углей и сланцев – возможности, достоинства, перспективы. Химия и Жизнь №11, 1981. – с. 20-23.
59. Пушкарев А.И. Использование импульсных электронных пучков в плазмохимии // А.И. Пушкарев, Г.Е. Ремнев, Д.В. Пономарев, В.В. Ежов, Д.В. Гончаров. – Известия Томского политехнического университета. Т. 309. № 2. 2006. – с. 103 -108.

ДОДАТОК А

Результати лабораторних досліджень альтернативного
біопалива, одержаного із використанням мулового осаду, що були
проведені в період 2008-2009 р.р.

ДОДАТОК А.1

Результати досліджень мікробіологічних показників альтернативного
біопалива

Міністерство охорони здоров'я
України
Найменування закладу
Харківська ОблСЕС
Бак.лабораторія
Свідцтво про атестацію
100 – 2462/ 2007 від 28.03.07

Код форми за ЗКУД
Код закладу за ЗКПО
Медична документація
Форма № 205 /о
Затверджена наказом МОЗ

04.01.2001 р. № 1

РЕЗУЛЬТАТ № 160

Місце відбору зразка: ХНУРЕ

Мета дослідження : мікробіологічні показники

НД на методи дослідження : МВ 1446 -76

Дата надходження матеріалу в лабораторію: 12. 12. 07 р.

Дата посіву : 12. 12. 07 р.

№ п/п	Реєстра- ційний номер	Назва зразка	Результат
1.	160	Паливо	Титр ЛКП > 0,1 Індекс ЛКП < 1×10^4 ; ентерокок < 10; шигели, сальмонели не виявлені.

/ Відповідає НД, не відповідає НД, НД відсутня /

Дата видачі 17.12.07 р.

Прізвище лікаря:

/ З.І.Яковлева /

ДОДАТОК А.2

Результати досліджень з виділення ентеровірусів альтернативного біопалива

Код форми за ЗКУД _____	
Код закладу за ЗКПО _____	

Міністерство охорони здоров'я України Найменування закладу <u>Одсес</u> Лабораторія <u>вірусологічна</u>	МЕДИЧНА ДОКУМЕНТАЦІЯ ФОРМА № 205/о Затверджена наказом МОЗ України 04.01.2001 р. № 1
--	---

РЕЗУЛЬТАТ № 155

вірусологічного дослідження

Назва лабораторії СЕС, яка проводила дослідження _____
вірусологічна лаборат. одсес

Назва зразка _____
паливо

Місце відбору зразка _____
ХНЧРЕ

Мета дослідження виділення ентеровірусів
на культурі клітин

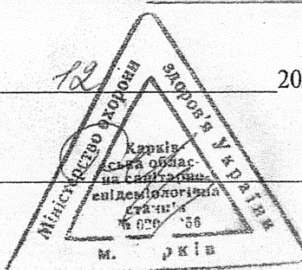
Дата надходження матеріалу в лабораторію 11.12.2007 р.

Результат дослідження на культурі клітин
Нер-2 та RD ентеровіруси
не виділені.

(відповідає НД, не відповідає НД, НД відсутня)

Дата видачі "24" _____ 12 _____ 2007 р.

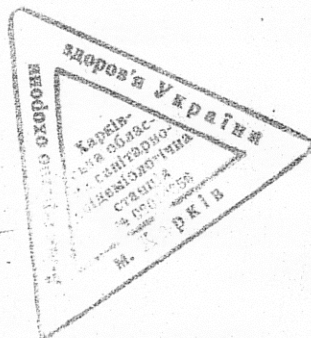
Прізвище лікаря _____



ДОДАТОК А.3

Результати досліджень з виявлення яєць гельмінтів
і членистоногих в альтернативному біопаливі

Міністерство охорони здоров'я України		Код форми за ЗКУД _____ Код закладу за ЗКПО _____
Найменування закладу	Лабораторія	МЕДИЧНА ДОКУМЕНТАЦІЯ ФОРМА № 12.01.51/1.01 Затверджена наказом МОЗ України 10.4.10.1.1 2.01.01.1 р. № 11
РЕЗУЛЬТАТ № <u>396-397</u> санітарно-мікробіологічного дослідження <u>№ 124 (середовище)</u>		
Назва лабораторії СЕС та іншої, яка проводила дослідження <u>ДП "СЕС"</u> <u>на території міста Чортків</u>		
Назва зразка <u>наміло</u>		
Місце відбору зразка <u>ХНУРБ</u>		
Мета дослідження: <u>на наявність</u> <u>гельмінтів та членистоногих</u>		
Дата надходження матеріалу в лабораторію <u>11.04.04</u> число, місяць, рік		
Результат дослідження <u>в намілі зразка</u> <u>гельмінтів -</u> <u>не знайдено</u> <u>членистоногих -</u> <u>не знайдено</u>		
(Відповідає НД, не відповідає НД, НД відсутня) <u>не знайдено</u>		
Дата видачі <u>20.04.04</u> р.		
Прізвище лікаря <u>н. Чортків</u> (підпис) <u>Лаб. З</u>		



ДОДАТОК А.4

Висновок державної санітарно-епідемічної експертизи



МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА САНІТАРНО-ЕПІДЕМІОЛОГІЧНА СЛУЖБА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Харківська обласна санітарно-епідеміологічна
станція

(назва установи)

61070, м. Харків, Помірки

(місцезнаходження)

(057) 315-00-07, ф. 315-11-12



Головний державний санітарний лікар

(посада)

С.В. Сивенков

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи

від 30.01.2009р.

№ 05.03.02-07/3915

Проект ТУУ 23.2-02071197-001:2008 "Біопаливо АБТ альтернативне. Технічні умови."

(об'єкт експертизи, виготовлений у відповідності ТУ, ДСТУ, ГОСТ)

код за ДКПП: 23.20.1; 23.20.18.

(код за ДКПП, артикул)

Нормативний документ на виробництво біопалива, що призначене для спалювання у топках
котлоагрегатів.

(сфера застосування та реалізації об'єкта експертизи)

Харківський Національний університет радіоелектроніки, Україна, м. Харків, пр. Леніна, тел.: 702-18-09,
код ЄДРПОУ: 02071197

(країна, розробник, адреса, місцезнаходження, телефон, факс, E-mail, WWW)

Харківський Національний університет радіоелектроніки, Україна, м. Харків, пр. Леніна, тел.: 702-18-09,
код ЄДРПОУ: 02071197

(заявник експертизи, адреса, місцезнаходження, телефон, факс, E-mail, WWW)

За результатами державної санітарно-епідеміологічної експертизи Проект ТУУ 23.2-02071197-001:2008
"Біопаливо АБТ альтернативне. Технічні умови." відповідає вимогам діючого санітарного законодавства
України і може бути погоджений (затверджений)

Висновок дійсний до: на термін дії ТУУ 23.2-02071197-001:2008 "Біопаливо АБТ альтернативне. Технічні
умови." чи до внесення змін та доповнень.

Відповідальність за дотримання вимог цього висновку несе заявник.

При внесенні змін до нормативного документа щодо сфери застосування, умов застосування об'єкта експертизи
даний висновок втрачає силу.

Харківська обласна санітарно-епідеміологічна
станція61070, м. Харків, Помірки, тел.: (057) 315-00-07,
ф. 315-11-12

(найменування, місцезнаходження, телефон, факс, E-mail, WWW)

Протокол експертизи

№ 73 від 21.01.2009р.

(№ протоколу, дата його затвердження)

Керівник експертного підрозділу

Перцевой Є.О.



ДОДАТОК А.5

Результати вимірювань газоподібних викидів при спалюванні АБП

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫБРОСОВ ГАЗООБРАЗНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
(CO, NO_x, SO₂) В АТМОСФЕРУ ПРИ СЖИГАНИИ СМЕСИ БИОТОПЛИВА
И ИЛОВЫХ ОСАДКОВ**

Как следует из данных таблицы, при сжигании смеси биотоплива и иловых осадков в опытной установке содержание NO_x в отходящих газах находилось в пределах 67,65-82 мг/м³, SO₂ – 2,93-5,86 мг/м³, что значительно ниже нормативных показателей (Приказ №309 от 27.06.2006 г.).

Содержание оксида углерода (CO) составляло 128,75-155мг/м³. Таким образом, экологическая оценка данных экспериментальных исследований показала, что содержание NO_x, SO₂ и CO в уходящих дымовых газах не превышает нормативы гранично-допустимых выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников, утвержденных приказом № 309 от 27.06.2006 г. Минприроды Украины (для NO_x -500 мг/м³, для CO-250 мг/м³, для SO₂-500 мг/м³).

Зам. директора УкрНИИЭП



Жуковский Т.Ф.

Таблица

Результаты измерений концентраций газообразных веществ и параметров уходящих дымовых газов при сжигании смеси биотоплива и иловых осадков.

№ п/п	Дата и время замера	t отходящих газов, °C	α коэффи- циент избытка воздуха	CO (k=1,25)		NOx (k=2,05)		SO2 (k=2,93)		Примечание
				ppm	мг/м ³	ppm	мг/м ³	ppm	мг/м ³	
1	26.12.08.11 ³⁵ .	700	2,92	124	155,00	33	67,65	1	2,93	
2	11 ⁴⁵ .	820	2,80	112	140,00	35	71,75	2	5,86	
3	11 ⁵⁵ .	870	2,73	103	128,75	40	82,00	2	5,86	

ДОДАТОК А.6

Протокол випробування сухого мулового осаду з Миських очисних споруд № 2 Комплексу «Харківводовідведення» КП «Харківводоканал»

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ

УКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УГЛЕХИМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

«УХИН»

61023, г. Харьков, ул. Веснина 7, т. (057) 704-13-18

(СТАТУТ. Затверджено Наказом Міністерства промислової політики України «03» 04. 2007 р. № 366. Реєстр № 14-Д)

г. Харьков

06 февраля 2009 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ № 9

Заказчик: Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Договор № 293.2008 от 9.12.08

Проба 1 (сухой продукт)

Массовая доля золы, % 31,7.

Массовая доля серы, % 0,11.

Низшая теплота сгорания на
сухое топлива, ккал/кг

3777. $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \rightarrow 15825 \frac{\text{кдж}}{\text{кг}}$

Проба 2 (влажный продукт)

Массовая доля воды, % 39,65.

Низшая теплота сгорания не определялась

Зав. химическим отделом, д.т.н.



И.Н. Питюлин

ДОДАТОК А.7

Протоколи випробування зразків АБП, одержаних із використанням мулового осаду

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ
УКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УГЛЕХИМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
«УХИН»

61023, г. Харьков, ул. Веснина 7, т. (057) 704-13-18

(СТАТУТ. Затверджено Наказом Міністерства промислової політики України «03» 04. 2007 р. № 366. Ресстр № 14-Д)

г. Харьков

20 января 2009 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ № 6

АБТ (проба № 2. АБТ на основе мазута)

Заказчик: Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Договор № 293.2008 от 9.12.08

№ пп	Наименование показателя	Един. измерения	Полученный результат	НТД на методы испытания
1	Плотность при 20 °С	кг/м ³	911	ГОСТ 3900
2	Массовая доля воды	%	16,0	ГОСТ 2477
3	Массовая доля золы	%	0,7	ГОСТ 1462
4	Вязкость при 80 °С	град ВУ	2,88	ГОСТ 6258
5	Массовая доля механических примесей	%	0,55	ГОСТ 6370
6	Содержание водоростворимых кислот и щелочей	%	Отс.	ГОСТ 6307
7	pH водной вытяжки	-	5,5	ГОСТ 6307
8	Массовая доля серы	%	0,3	ГОСТ 6263
9	Коксуемость:	%		Метод УХИНа
	- I ступень (400 °С)		7,06	
	- II ступень (600 °С)		4,48	
10	Температура вспышки в открытом тигле	°С	185	ГОСТ 6356
11	Температура застывания	°С	+20	ГОСТ 20287
12	Теплота сгорания:	кДж/кг		ГОСТ 21261
	- низшая, в пересчете на сухое топливо (Q_i^d)		39689	
	- рабочая (Q_s^a)		33339	
13	Массовая доля водорода (H^d) на сухое топливо, %		9,18	

Зав. химическим отделом, д.т.н.



И.Н. Питюлин

МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ
УКРАИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УГЛЕХИМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
«УХИН»

61023, г. Харьков, ул. Веснина 7, т. (057) 704-13-18

(СТАТУТ. Затверджено Наказом Міністерства промислової
 політики України «03» 04. 2007 р. № 366. Реєстр № 14-Д)

г. Харьков

16 марта 2009 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ № 10

АБТ (проба № 5. АБТ на основе: масла – 50 %; ил – 50 %)

Заказчик: Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Договор № 293.2008 от 9.12.08

№ пп	Наименование показателя	Един. измерения	Полученный результат	НТД методы испытания
1	Плотность при 20 °С	кг/м ³	921	ГОСТ 3900
2	Массовая доля воды	%	12,2	ГОСТ 2477
3	Массовая доля золы	%	4,1	ГОСТ 1462
4	Вязкость при 80 °С	град ВУ	5,48	ГОСТ 6258
5	Массовая доля механических примесей	%	8,7	ГОСТ 6370
6	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	%	Отс	ГОСТ 6307
7	pH водной вытяжки	-	5,0	ГОСТ 6307
8	Массовая доля серы	%	0,2	ГОСТ 6263
9	Коксуемость:	%		Метод УХИНа
	- I ступень (400 °С)		6,72	
	- II ступень (600 °С)		6,40	
10	Температура вспышки в открытом тигле	°С	185	ГОСТ 6356
11	Температура застывания	°С	-16	ГОСТ 20287
12	Теплота сгорания: ¹	кДж/кг		ГОСТ 21261
	- низшая, в пересчете на сухое топливо (Q_i^d)		40823	
	- рабочая (Q_s^a)		35843	
13	Массовая доля водорода (H^d) на сухое топливо, %		7,62	

Зав. химическим отделом, д.т.н.

И.Н. Питюлин



¹ Смотри приложение

ДОДАТОК Б

Аналіз теплотворної властивості вугільного шламу



МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ
**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)»**

вул. Весніна, 7, м. Харків, 61023, Україна
 тел.: (+38-057) 704-13-18, факс: (+38-057) 700-69-06; 704-13-23
www.ukhin.org.ua e-mail: post@ukhin.org.ua, ukhin@e-mail.ua, ukhin2008@meta.ua
 Розрахунковий рахунок 26008000134486
 Філія АТ «Укресімбанк» м. Харків МФО 351618, ЄДРПОУ 00190443 ІПН 0019044203

№ 07/922 від 13.06.2016

Генеральному директору
 НТЦ АНПРЕ
 Дохову А.І.

На № _____ від _____

Направляємо Вам результати дослідження зразка вугільного пилу (зразок №1)
 наданого співробітниками НТЦ АНПРЕ, за заявленими параметрами.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Найменування показника	Метод випробування		Символ, одиниця вимірювання	Результати аналізу вугілля
Волога робоча	ГОСТ	ISO	$W^t, \%$	19,8
Волога аналітична	27314-91	589-81	$W^a, \%$	6,2
Зольність	ГОСТ	ISO	$A^d, \%$	42,6
	11022-95	1171-97		
Масова частка загальної сірки	ДСТУ	ISO	$S_t^d, \%$	1,25
	3528-97	334-92		
Масова частка водню	ГОСТ	ISO	$H^d, \%$	2,74
	2408.1-95	625-96		
Теплота згорання: найвища	ДСТУ ISO 1928:2006		$Q_s^{daf}, \text{МДж/кг}$	<u>32,92</u>
			Ккал/кг	7863
найнижча			$Q_i^t, \text{МДж/кг}$	<u>14,20</u>
			Ккал/кг	3392

Представлені результати одержані у Випробувальному Центрі «ХарЦис» Державного підприємства «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)» (атестат акредитації НААУ № 2Т728).

Заст. директора з наукової роботи
 к.т.н., с.н.с.

Зав. вугільного відділу,
 к.т.н., с.н.с, керівник ВЦ «ХарЦис»



О. Л. БОРИСЕНКО

І.Д. ДРОЗДНИК



у вугільному шламу
вміст

ДОДАТОК В

Результати випробувань зразка альтернативного біопалива одержаного з мулового осаду та модифікованого вугільного пилю



МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ВУГЛЕХІМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (УХІН)»

вул. Весніна, 7, м. Харків, 61023, Україна
тел.: (+38-057) 704-13-18, факс: (+38-057) 700-69-06; 704-13-23
www.ukhin.org.ua e-mail: post@ukhin.org.ua, ukhin@e-mail.ua, ukhin2008@meta.ua
Розрахунковий рахунок 26007619947928
Обласне відділення ПАТ Промінвестбанку у м. Харків МФО 300012,
свідчення № 200060584 ЄДРПОУ 00190443 ІПН 001904420317

№ 08/1958 від 29.12.2016

Свідчення об атестації № 06544-2-7-59-ВЛ от
23.05.2014

На № _____ від _____

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

Проба альтернативного биотоплива АБТ № 41

Заказчик: Научно-технический центр Академии наук прикладной радиоэлектроники (НТЦ АНПРЭ)

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Полученный результат	НТД на методы испытания
1	Плотность при 20°C	кг/м ³	1010	ГОСТ 3900
2	Массовая доля воды	%	9,5	ГОСТ 2477
3	Массовая доля золы	%	7,7	ГОСТ 1461
4	Вязкость при 80°C	град ВУ	23,0	ГОСТ 6258
5	Массовая доля механических примесей	%	28,2	ТУ У 20.1-00190443-042:2015
6	pH водной вытяжки	-	6,77	ТУ У 20.1-00190443-043-131
7	Массовая доля серы	%	0,14	ГОСТ 6263
8	Коксовое число	%	15,8	ТУ У 23.1-00190443-100:2007 с изм 1, 2
9	Температура вспышки в открытом тигле	°C	215	ГОСТ 4333
10	Температура застывания	°C	ниже (-15)	ГОСТ 20287
11	Теплота сгорания : - низшая, в пересчете на сухое топливо (Q_i^d)	МДж/кг Ккал/кг	39,14 9348	ГОСТ 21261
12	Массовая доля водорода (H^d) сухое топливо	%	8,69	ГОСТ 21261

Зам. директора по научной работе, к.т.н.

А.Л. Борисенко

Ответственный исполнитель с.н.с.

В.В. Карчакова



ДОДАТОК Г

Результати випробувань зразка альтернативного біопалива одержаного з спиртової барди та відпрацьованого мастила

Випробувальна лабораторія «Універсалнафтохім» ТОВ «В Т І І»

61002, м. Харків, вул. Іванова, 32-Б

Атестат атестації № 2Т 495
дійсний до 29 серпня 2018 р.)

м. Харків

02 березня 2016 р.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ № 585

Образец № 1 альтернативного биотоплива АБТ

(состав: отработанное автомобильное масло - 66%, спиртовая барда - 33%)

Заказчик: ХНУРЕ

Таблица 1

№ п/п	Наименование показателя	Фактически полученные результаты испытаний	НТД на методы испытаний
1	Плотность при 20 °С, г/см ³	0,932	ГОСТ 3900
2	Массовая доля воды, %	32,3	ГОСТ 2477
3	Массовая доля золы (на сухую массу), %	0,998	ГОСТ 1462
4	Вязкость при 80 °С, град ВУ	7,13	ГОСТ 6258
5	Массовая доля механических примесей, %	0,914	ГОСТ 6370
6	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отс.	ГОСТ 6307
7	рН водной вытяжки	8,3	ГОСТ 6307
8	Массовая доля серы, %	0,31	ГОСТ 6263
9	Коксуемость, %	1,78	ГОСТ 19932
10	Температура вспышки в открытом тигле, °С	215	ГОСТ 4333
11	Температура застывания, °С	- 4	ГОСТ 20287
12	Теплота сгорания, кДж/кг: - низшая, в пересчете на сухое топливо (Q^d_i) - рабочая (Q^r_s)	41120 27840	ГОСТ 21261
13	Массовая доля водорода (H^d) сухое топлива, %	8,35	-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ № 586

Образец № 2 альтернативного биотоплива АБТ

(состав: спиртовая барда – сухой остаток)

№ п/п	Наименование показателя	Фактически полученные результаты испытаний	НТД на методы испытаний
12	Теплота сгорания, кДж/кг: - низшая, в пересчете на сухое топливо (Q^d_i) - рабочая (Q^r_s)	20550 20550	ГОСТ 21261
13	Массовая доля водорода (H^d) сухое топлива, %	6,0	-

Керівник ВЛ П.В.Карножицький

