Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля

Освітньо-кваліфікаційний рівень «бакалавр»
Спеціальність – 183 Технології захисту навколишнього середовища
Освітньо-професійна програма «Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджую:
завідувач кафедри цивільної інженерії,
технологій будівництва і захисту довкілля
д.т.н., професор _____ В. Є. Волкова
«_____» _____ 2026 р.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему:
«РЕСУРСОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОВОДЖЕННЯ З ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВИХ ТА ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГРУПИ КОМПАНІЙ «DNIPRO AGRO GROUP»»

Виконав здобувач вищої освіти
5 курсу, групи ТЗНСз-1-21_____ Ярослав СОЛОДОВНИК
(підпис)

Керівник _____ Геннадій ГАПІЧ
(підпис)

Дніпро 2026

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля

Освітньо-кваліфікаційний рівень «бакалавр»
Спеціальність – 183 Технології захисту навколишнього середовища
Освітньо-професійна програма «Технології захисту навколишнього середовища»

Затверджую:
завідувач кафедри цивільної інженерії,
технологій будівництва і захисту довкілля
д.т.н., професор _____ В. Є. Волкова
«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу здобувачу вищої освіти
Солодовнику Ярославу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Ресурсоефективні технології поводження з органічними відходами переробки зернових та олійних культур на підприємствах групи компаній «Dnipro Agro Group»» затверджена наказом ректора від «25» лютого 2024 р. №411.
2. Термін здачі закінченої роботи: «15» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: показники господарської діяльності підприємства «Dnipro Agro Group».
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Екологічні проблеми поводження з багатотоннажними відходами підприємств АПК та сучасні підходи до їх утилізації; 2. Методологія оцінки екологічної безпеки та розрахунку параметрів утилізації біомаси; 3. Розробка інженерно-екологічних рішень з утилізації вторинних відходів переробки зернових та олійних культур; 4. Обґрунтування заходів з охорони праці, виробничої санітарії та екологічної безпеки; 5. Еколого-економічна ефективність запропонованих рішень; Вступ; Висновки; Список літератури.
5. Перелік графічного матеріалу: презентація кваліфікаційної роботи у програмному середовищі Microsoft PowerPoint.

Керівник роботи _____ (Геннадій ГАПІЧ)
(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ (Ярослав СОЛОДОВНИК)
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з. п.	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	1. Екологічні проблеми поводження з багатотоннажними відходами підприємств АПК та сучасні підходи до їх утилізації	березень 2026 р.	
2	2. Методологія оцінки екологічної безпеки та розрахунку параметрів утилізації біомаси	квітень 2026 р.	
3	3. Розробка інженерно-екологічних рішень з утилізації вторинних відходів переробки зернових та олійних культур	травень 2026 р.	
4	4. Обґрунтування заходів з охорони праці, виробничої санітарії та екологічної безпеки	червень 2026 р.	
5	5. Еколого-економічна ефективність запропонованих рішень	червень 2026 р.	
6	Вступ, Висновки, Список літератури	червень 2026 р.	
7	Підготовка презентації, попередній захист роботи на кафедрі	червень 2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ (Ярослав СОЛОДОВНИК)
(підпис)

Керівник роботи _____ (Геннадій ГАПІЧ)
(підпис)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ …… 6
ВСТУП …… 8
РОЗДІЛ 1. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З БАГАТОТОННАЖНИМИ ВІДХОДАМИ ПІДПРИЄМСТВ АПК ТА СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ЇХ УТИЛІЗАЦІЇ ……. 11
1.1. Характеристика підприємств борошномельно-круп'яної та олійно-жирової промисловості як джерел техногенного навантаження на довкілля …….. 11
1.2. Екологічні наслідки накопичення та нераціонального поводження з органічними відходами агропромислових підприємств …….. 14
1.3. Впровадження сучасних технологій екологічно безпечного рециклінгу відходів переробки зернових та олійних культур …… 16
1.4. Перспективи використання вторинних біоресурсів як екологічно безпечного палива в енергетиці …….. 17
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ УТИЛІЗАЦІЇ БІОМАСИ ……. 19
2.1. Загальна характеристика та екологічні аспекти діяльності групи компаній «Dnipro Agro Group» …… 19
2.2. Методи оцінки рівня безвідходності виробничих процесів в агропромисловому комплексі ……. 21
2.3. Методика визначення фізико-хімічних та енергетичних характеристик органічних відходів …… 22
2.4. Методологія інженерного розрахунку екологічного обладнання та викидів забруднюючих речовин …… 24

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНО-ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ З УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННИХ ВІДХОДІВ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВИХ ТА ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР …… 27

3.1. Розрахунок параметрів пресування лузги та висівок, технологія брикетування відходів …….. 27

3.2. Розрахунок параметрів теплоізоляційних з відходів переробки зерна …….. 31

3.3. Обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів когенераційної установки …… 34

3.4. Технології очищення газових викидів та утилізація зольного залишку ……. 38

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ, ВИРОБНИЧОЇ САНІТАРІЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ …….. 42

4.1. Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів …… 42

4.2. Інженерно-технічні рішення з виробничої санітарії та техніки безпеки …….. 43

4.3. Пожежна безпека та заходи у надзвичайних ситуаціях …… 45

РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ …….. 47

5.1. Обґрунтування еколого-економічного ефекту від зменшення викидів та заміщення енергоносіїв …… 47

5.2. Оцінка комерційної та екологічної окупності інвестиційного проєкту …….. 50

ВИСНОВКИ ……... 53

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ …… 56

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків та списку використаної літератури з 11 джерел. Повний обсяг тексту становить 57 сторінок, кількість рисунків – 6.

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток агропромислового комплексу (АПК) України призводить до значного накопичення багатотоннажних органічних відходів (лузги соняшника, висівок, мучки та пилу) безпосередньо на обмежених майданчиках переробних підприємств. Нераціональне поводження з цією біомасою створює високі екологічні ризики: деградацію ґрунтів , забруднення підземних і поверхневих вод через утворення кислого фільтрату та забруднення атмосфери парниковими газами і токсичними сполуками внаслідок схильності відвалів до самозаймання. У зв’язку з цим виникає гостра екологічна потреба трансформації лінійних матеріальних потоків у замкнені цикли циркулярної економіки на підприємствах великих холдингів, таких як «Dnipro Agro Group».

Об’єкт дослідження – процеси техногенного навантаження на навколишнє середовище, що виникають у процесі накопичення та утилізації органічної біомаси переробки зернових та олійних культур.

Предмет дослідження – інженерно-екологічні параметри, технологічні рішення та еколого-економічні показники процесів рециклінгу й когенераційного спалювання рослинних відходів агропромислового комплексу.

Мета роботи – зниження техногенного навантаження підприємств АПК на компоненти довкілля шляхом розробки та обґрунтування комплексних ресурсоефективних і екологічно безпечних інженерних рішень з утилізації органічних відходів переробки біомаси.

Для досягнення мети вирішено такі *завдання*:

1) Оцінено структуру відходів зернопереробної та олійно-жирової галузей і характер їхнього негативного впливу на довкілля.
2) Розглянуто методологію оцінки рівня безвідходності за допомогою інтегрального коефіцієнта ($K_б$) та методики визначення фізико-хімічних параметрів біомаси (вологість, зольність, дисперсність).
3) Розраховано технологічні параметри пресування суміші лузги та висівок для отримання кондиційного біопалива.
4) Обґрунтовано альтернативний екологічний напрямок матеріального рециклінгу висівок для виробництва теплоізоляційних будівельних еко-плит.
5) Визначено конструктивні параметри когенераційної установки на біомасі тепловою потужністю 4,5 МВт, об’єми утворення димових газів та параметри системи пиловловлювання.
6) Оцінено комерційну та екологічну ефективність інвестиційного проєкту модернізації виробництва.

Методи дослідження: омплексний аналіз масового балансу матеріальних потоків; методи математичного моделювання процесів безвідходності; інженерні та термодинамічні розрахунки теплогенеруючого та пресового обладнання; методи дисперсійного аналізу та пиловловлювання для розрахунку екологічних аспіраційних трактів.

Ключові слова: ресурсоефективність, біомаса, лузга соняшника, пшеничні висівки, когенерація, циркулярна економіка, пиловловлювання, декарбонізація,

ВСТУП

Сучасний етап розвитку людської цивілізації характеризується загостренням глобальної екологічної кризи, що вимагає радикального перегляду традиційних антропогенних моделей природокористування. Одним із провідних векторів глобального поступу став перехід до сталого розвитку, де ключове місце посідають сучасні напрями екологізації та захисту навколишнього середовища. Екологізація промисловості та сільського господарства сьогодні передбачає не просто впровадження очисних споруд (концепція «на кінці труби»), а системну перебудову виробничих процесів на засадах концепцій «чистішого виробництва», еко-ефективності та суворого моніторингу вуглецевого сліду для мінімізації деградації екосистем.

Аналізуючи найкращі світові практики та тенденції захисту навколишнього середовища, слід зазначити, що розвинені країни (зокрема, країни Європейського Союзу, США та Японія) активно впроваджують модель циркулярної економіки, яка базується на принципах мінімізації утворення відходів, тривалого використання матеріалів та регенерації природних систем. У межах Європейського зеленого курсу особлива увага приділяється біоекономіці, де органічна сировина та відходи розглядаються не як екологічний тягар, а як цінний відновлюваний ресурс для отримання енергії, тепла та нових матеріалів із високою доданою вартістю.

На цьому тлі гео-екологічний та економічний статус України є суперечливим. Україна – провідна аграрна країна з колосальним природно-ресурсним потенціалом, але, водночас, із критично низьким рівнем екологізації агровиробництва. Маючи статус одного з найбільших світових експортерів зернових та олійних культур, вітчизняний агропромисловий комплекс (АПК) досі функціонує переважно в межах застарілої лінійної моделі «виробництво → продукція → відходи». Наслідком цього є масштабне техногенне навантаження на довкілля: деградація та виснаження чорноземів,

забруднення підземних вод кислими фільтратами від гниття біомаси, а також значні викиди парникових газів (метану та діоксиду вуглецю) в атмосферу через неконтрольоване накопичення відходів на звалищах підприємств.

Саме тому перспективність та актуальність утилізації і рециклінгу відходів АПК для України набуває стратегічного екологічного та безпекового значення. Трансформація багатотоннажних побічних продуктів переробки (лузги соняшника, пшеничних висівок, зернового пилу) шляхом їхнього енергетичного спалювання, брикетування чи матеріального рециклінгу (наприклад, для виробництва будівельних еко-матеріалів) дозволяє одночасно вирішити три фундаментальні проблеми: суттєво знизити техногенний тиск на біосферу, зменшити залежність держави від викопних палив за рахунок розвитку локальної біоенергетики та підвищити міжнародну конкурентоспроможність українських агрохолдингів відповідно до світових екологічних стандартів.

Необхідність наукового обґрунтування та практичної реалізації комплексних інженерно-екологічних рішень із рециклінгу відходів зернопереробної та олійно-жирової галузей у контексті переходу на циркулярні моделі зумовила вибір теми, визначення мети та завдань даного дослідження.

Мета дослідження полягає у зниженні техногенного навантаження підприємств агропромислового комплексу на компоненти навколишнього природного середовища шляхом розробки, обґрунтування та впровадження ресурсоефективних і екологічно безпечних інженерних технологій утилізації та рециклінгу органічних відходів переробки біомаси.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі *завдання*:

1) Проаналізувати сучасний екологічний стан, структуру відходів підприємств АПК та характер їхнього деструктивного впливу на атмосферу, гідросферу й літосферу.
2) Дослідити фізико-хімічні та термодинамічні характеристики органічних відходів переробки зернових та олійних культур як об’єктів утилізації.

3) Обґрунтувати оптимальні технологічні параметри пресування дисперсних рослинних відходів для отримання кондиційного екологічно чистого біопалива.
4) Розробити та розрахувати інженерно-технологічні параметри альтернативного напрямку матеріального рециклінгу висівок для отримання теплоізоляційних будівельних еко-плит.
5) Розрахувати конструктивні параметри когенераційної установки на біомасі, визначити об'єми утворення димових газів та обґрунтувати високоефективну двоступеневу систему пиловловлювання для мінімізації викидів в атмосферне повітря.
6) Оцінити еколого-економічну ефективність, комерційну доцільність та інвестиційні параметри проєкту екологічної модернізації підприємств «Dnipro Agro Group».

Об'єкт дослідження – процеси техногенного навантаження на компоненти навколишнього природного середовища (атмосферу, літосферу, гідросферу), що виникають у процесі життєвого циклу, накопичення та утилізації органічної біомаси переробки зернових та олійних культур.

Предмет дослідження – інженерно-екологічні закономірності, технологічні параметри, методи очищення газових викидів та еколого-економічні показники процесів енергетичного й матеріального рециклінгу рослинних відходів агропромислового комплексу.

РОЗДІЛ 1. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З БАГАТОТОННАЖНИМИ ВІДХОДАМИ ПІДПРИЄМСТВ АПК ТА СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ЇХ УТИЛІЗАЦІЇ

1.1. Характеристика підприємств борошномельно-круп'яної та олійно-жирової промисловості як джерел техногенного навантаження на довкілля

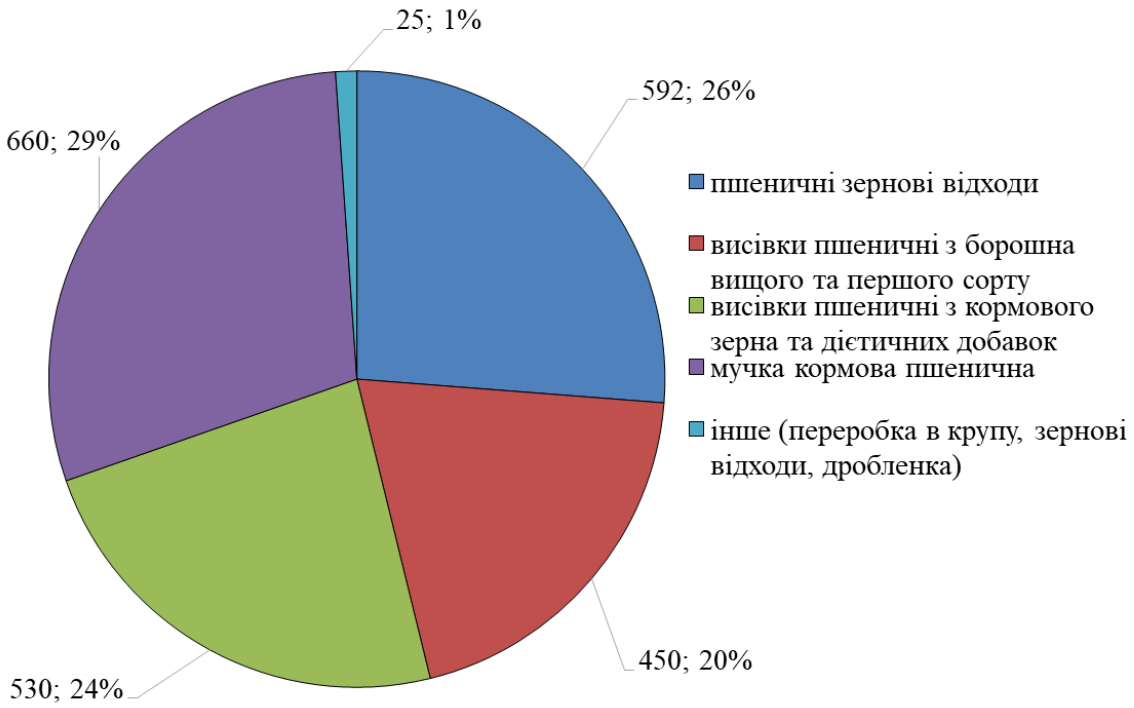
Сьогодні агропромисловий комплекс (АПК) України інтенсивно розвивається, що є позитивним економічним фактором, але водночас призводить до зростання техногенного навантаження на навколишнє середовище. Серед усіх переробних галузей найбільші обсяги відходів та побічних продуктів генерують борошномельно-круп'яна та олійно-жирова промисловість. Для Дніпропетровської області ця проблема є надзвичайно актуальною, оскільки великі виробничі потужності часто зосереджені в межах великих міст або поблизу них. У контексті спеціальності «Технології захисту навколишнього середовища» важливо розглядати ці підприємства як специфічні джерела екологічної небезпеки, щоб обґрунтувати ефективні інженерні рішення для їхньої утилізації.

Борошномельно-круп'яні підприємства переробляють значні обсяги зернової сировини. Переважно це пшениця, жито та ячмінь. Проте існуючі технологічні схеми не дозволяють повністю перетворити вихідну біомасу на цільовий продукт (борошно чи крупу вищих сортів). Масовий баланс виробництва показує, що від 20% до 28% від загальної ваги зерна трансформується у побічні продукти та відходи. Основними органічними потоками тут є зернові висівки, кормова мучка, дрібний зерновий пил та пшеничний зародок. Оскільки ці відходи містять багато біологічно активних речовин, вони швидко піддаються мікробіологічному розкладанню та псуванню. Через обмежені терміни зберігання та сезонність попиту на корми,

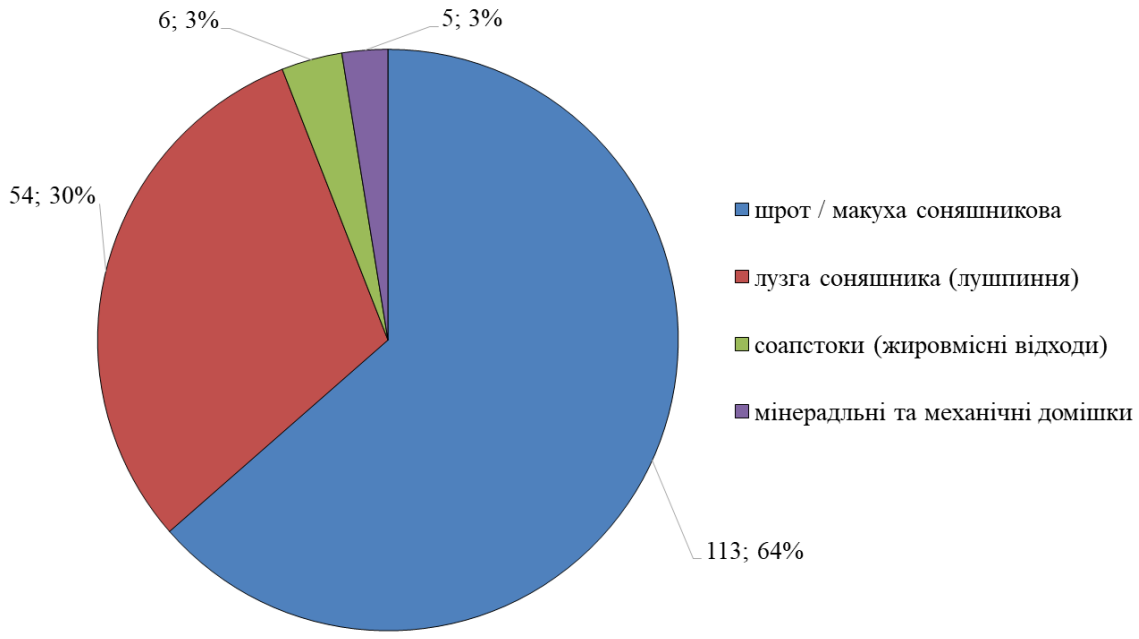
на складах підприємств накопичуються великі обсяги біомаси, що створює постійні екологічні ризики для прилеглих територій.

Паралельно з цим, олійно-жирова промисловість характеризується ще вищим рівнем локальної концентрації багатотоннажних відходів на одному майданчику. Технологічний процес вилучення рослинних олій обов'язково включає етап обрушування та сепарації насіння соняшника з метою відокремлення ядра від плодової оболонки. В результаті цього процесу утворюється лузга соняшника, питома вага якої становить від 14% до 22% від загальної маси сировини. Окрім лузги, на заводах накопичуються шрот, макуха та жировмісні соапстоки. Висока дисперсність твердих часток лузги та наявність залишків ліпідів у відходах роблять їх потенційними джерелами забруднення атмосферного повітря та водних об'єктів у разі порушення правил поводження з ними.

Основна екологічна проблема сучасних переробних підприємств полягає в тому, що вони продовжують працювати за лінійною моделлю: «сировина → продукт → відходи». Концентрація великих потужностей призводить до щоденного накопичення тисяч тон органічної біомаси на обмежених промислових майданчиках (рис. 1.1). Накопичення висівок та лузги потребують великих площ для депонування, що вилучає землі з господарського обігу та створює загрозу біологічного забруднення. З точки зору технологій захисту навколишнього середовища, знизити цей техногенний тиск на довкілля можна лише шляхом трансформації лінійних потоків у замкнені цикли, тобто через впровадження технологій утилізації та рециклінгу відходів безпосередньо у місцях їхнього утворення.



а)



б)

Рисунок 1.1. Структура відходів зернопереробної (а) та олійно-жирової (б) галузей України (тис. тон, %).

1.2. Екологічні наслідки накопичення та нераціонального поводження з органічними відходами агропромислових підприємств

Накопичення великої кількості органічних відходів на відкритих майданчиках підприємств агропромислового комплексу створює серйозну загрозу для навколишнього середовища. На відміну від мінеральних або будівельних відходів, біомаса у вигляді лузги соняшника, висівок та мучки є біологічно активним субстратом. Це означає, що під впливом вологи, кисню та мікроорганізмів у цих відходах швидко запускаються процеси розкладання. Нераціональне поводження з ними призводить до забруднення всіх компонентів довкілля, включаючи атмосферне повітря, ґрунти, а також підземні та поверхневі води.

Першим очевидним наслідком є негативний вплив на земельні ресурси. Для відкритого зберігання або захоронення тисяч тон лузги та висівок потрібні великі площі, що призводить до відчуження земель з господарського або аграрного обігу. Під багатолітніми завалами такої органіки ґрунтовий покрив зазнає серйозної деградації. Через відсутність доступу кисню у ґрунті розвиваються анаеробні процеси, руйнується його природна структура, знижується родючість та змінюється рівень кислотності (*pH*). Крім того, легка лузга соняшника та дрібний зерновий пил легко розносяться вітром, викликаючи механічне засмічення прилеглих територій.

Суттєву небезпеку накопичення біомаси становить для атмосферного повітря. Найбільш критичною проблемою для відвалів соняшникової лузги та інших рослинних залишків є їхня висока схильність до самозаймання. Всередині великих куп через мікробіологічні процеси температура може підніматися до критичних значень. При стихійному горінні або тривалому тлінні лузги в атмосферу виділяється велика кількість небезпечних речовин, серед яких оксиди вуглецю, оксиди азоту, діоксид сірки, сажа та дрібнодисперсний попіл. Навіть без горіння, під час звичайного загнивання висівок та лузги виділяються метан (CH_4) та вуглекислий газ (CO_2), які є потужними парниковими газами і

посилюють глобальне потепління. Цей процес також супроводжується неприємними запахами через виділення аміаку та сірководню, що значно погіршує якість життя населення у прилеглих районах.

Не менш важливим є негативний вплив на гідросферу. Атмосферні опади у вигляді дощу чи снігу проходять крізь відкриті відвали органічних відходів і вимивають з них токсичні сполуки. У результаті утворюється висококонцентрований кислий фільтрат. Ця рідина містить велику кількість розчиненої органіки, що різко підвищує показники хімічного (ХСК) та біохімічного (БСК) споживання кисню у воді. Просочуючись крізь ґрунт, цей фільтрат потрапляє у підземні водоносні горизонти, роблячи воду в навколишніх колодязях та свердловинах непридатною для пиття. Якщо такий стік потрапляє у відкриті річки чи ставки, відбувається їхня евтрофікація, тобто водойми починають активно «цвісти» і заростати водоростями. Це призводить до дефіциту кисню у воді та масової загибелі риби. Таким чином, просте накопичення або вивезення відходів переробки зерна та олійних культур на звалища викликає серйозний екологічний дисбаланс, що підтверджує необхідність розробки ефективних інженерно-екологічних методів утилізації біомаси (рис. 1.2).

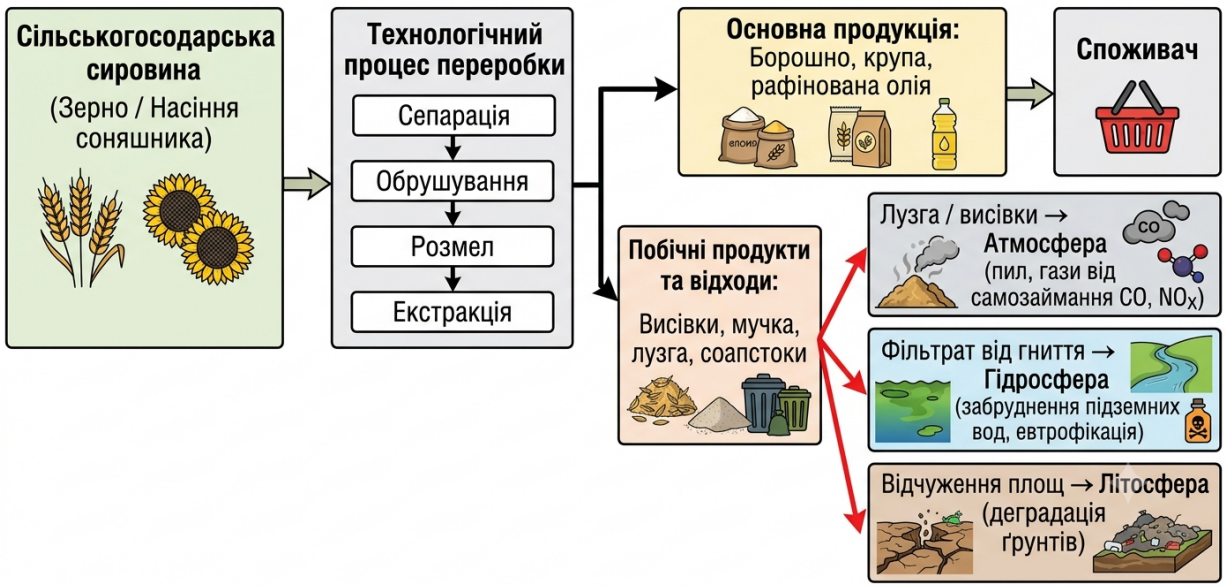


Рисунок 1.2. Технологічна схема трансформації матеріальних потоків та техногенного навантаження на компоненти довкілля при переробці біомаси

*(згенеровано автором за допомогою інструментів штучного інтелекту відповідно до заданих дослідницьких параметрів)

1.3. Впровадження сучасних технологій екологічно безпечного рециклінгу відходів переробки зернових та олійних культур

Для вирішення описаних екологічних проблем сучасні природоохоронні технології пропонують перехід від лінійної моделі виробництва до циркулярної економіки, яка базується на концепції нульових відходів. Головна ідея цього підходу полягає в тому, що будь-які побічні продукти не повинні викидатися на звалища, а мають ставати сировиною для інших корисних технологічних процесів. У контексті борошномельно-круп'яної промисловості це означає впровадження технологій глибокої переробки та рециклінгу всіх супутніх матеріальних потоків, таких як висівки, мучка та зародок пшениці. Щоб оцінити, наскільки ефективно підприємство використовує сировину і наскільки воно є екологічно безпечним, у практиці екологічного менеджменту використовують спеціальний інтегральний коефіцієнт безвідходності ($K_б$). Цей показник дозволяє чітко розрахувати відсоткове співвідношення між корисним продуктом і відходами, стимулюючи підприємства модернізувати свої схеми в бік замкнених циклів.

Практичне втілення концепції нульових відходів у зернопереробній галузі має кілька перспективних напрямків, які дозволяють суттєво знизити екологічний слід людства. Перший напрямок пов'язаний із вилученням біологічно активних речовин із пшеничних висівок та зародків. Ці відходи багаті на вітаміни, мінерали, білки та дієтичні волокна, тому їх можна очищувати, переробляти на спеціальні зародкові пластівці або додавати у рецептури дієтичних видів хліба. Таким чином, замість накопичення на складах, біомаса повертається в харчовий ланцюг, що знижує загальне навантаження на навколишнє середовище, оскільки зменшується потреба у вирощуванні нової додаткової сировини.

Другий, ще більш інноваційний екологічний напрямок – це використання низькосортних відходів переробки зерна для створення біорозкладних

матеріалів, які можуть замінити шкідливий пластик. Сьогодні з пшеничних висівок та лузги навчилися виготовляти екологічний одноразовий посуд, який після використання повністю розкладається в ґрунті за кілька тижнів і навіть слугує добривом. Крім того, зернову мучку та висівки можна використовувати як органічні наповнювачі при виробництві екологічно безпечних будівельних плит і блоків. Впровадження таких технологій рециклінгу дозволяє вирішити одразу дві важливі екологічні задачі: по-перше, підприємства АПК повністю позбуваються своїх багатотоннажних відходів безпосередньо на місці їхнього утворення, а по-друге, зменшується споживання викопних ресурсів і нафтопродуктів у суміжних галузях промисловості.

1.4. Перспективи використання вторинних біоресурсів як екологічно безпечного палива в енергетиці

Поряд із матеріальним рециклінгом, одним із найбільш ефективних методів утилізації багатотоннажних рослинних відходів є їх використання в альтернативній енергетиці. Для підприємств олійно-жирової та борошномельної промисловості, де щодня утворюються сотні тон соняшникової лузги, зернової мучки та інших залишків, спалювання цієї біомаси дозволяє вирішити гостру екологічну проблему накопичення відходів і одночасно отримати дешеву енергію. З позицій технологій захисту навколишнього середовища, такий підхід є надзвичайно перспективним, оскільки рослинна біомаса офіційно визнана CO_2-нейтральним паливом. Це пов’язано з тим, що під час її спалювання виділяється рівно стільки вуглекислого газу, скільки рослина поглинула з атмосфери в процесі свого росту, тобто загальний парниковий ефект не збільшується.

Сьогодні пряме спалювання розсипної лузги соняшника або відходів переробки зерна безпосередньо в котлах підприємств є технічно складним

через їхню низьку насипну щільність та високу дисперсність. Тому сучасні екологічні рішення передбачають попередню підготовку сировини шляхом її гранулювання або брикетування. Виготовлення паливних пелет із лузги соняшника чи зернових відходів дозволяє отримати стандартизоване тверде біопаливо з високою теплотворною здатністю. Використання таких пелет замість традиційного викопного палива (вугілля чи природного газу) на промислових котельнях дає змогу кардинально знизити викиди шкідливих парникових газів і зменшити антропогенний слідок виробництва.

Найбільш раціональним та інноваційним інженерно-екологічним рішенням є впровадження на підприємствах сучасних когенераційних установок. Технологія когенерації передбачає одночасне виробництво двох видів енергії (теплової та електричної) в одному технологічному циклі за рахунок спалювання паливних гранул із лузги. Отриманий пар використовується для технологічних потреб заводу, а електроенергія покриває власні потреби підприємства або направляється в загальну мережу. З екологічної точки зору, когенерація забезпечує максимальний коефіцієнт корисної дії використання біомаси, мінімізує теплові втрати у довкілля та повністю ліквідує необхідність вивезення відходів на звалища, трансформуючи їх у чисте джерело енергії.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ УТИЛІЗАЦІЇ БІОМАСИ

2.1. Загальна характеристика та екологічні аспекти діяльності групи компаній «Dnipro Agro Group»

Для детального розуміння практичної значущості нашого дослідження важливо розглянути діяльність провідних профільних підприємств регіону. Яскравим прикладом сучасної інтегрованої структури в аграрному секторі Дніпропетровської області є група компаній Dnipro Agro Group. Основним напрямком діяльності цього холдингу є повний цикл виробництва, зберігання та реалізації продукції рослинництва, переважно зернових та олійних культур. Компанія об’єднує під своїм управлінням значні земельні фонди та потужні лінійні елеватори, що дозволяє їй оперативно оперувати великими потоками сільськогосподарської сировини.

Варто окремо підкреслити, що у даній кваліфікаційній роботі група компаній «Dnipro Agro Group» обрана виключно як варіант практичного прикладу для моделювання еколого-технічних процесів. Усі подальші розрахунки, технологічні параметри та цифрові показники, наведені у роботі, є лише загальною умовою для виконання наукових досліджень і не можуть бути прямо асоційованими з реальною виробничою, фінансовою чи господарською діяльністю компанії.

Масштабні потужності «Dnipro Agro Group» у сферах вирощування та первинної переробки рослинної продукції безпосередньо пов’язані з темою нашої кваліфікаційної роботи. Процеси очищення, сушіння та тривалого зберігання зерна на елеваторах холдингу супроводжуються утворенням значної кількості побічних продуктів – зернового пилу, мучки та дрібних

зернових відходів. Крім того, орієнтація компанії на вирощування соняшнику створює велику сировинну базу для олійно-жирових заводів регіону, де згодом утворюються тисячі тон соняшникової лузги. Концентрація таких значних обсягів біомаси вимагає від керівництва холдингу постійної уваги до логістики та утилізації відходів.

Саме тому на сучасному етапі розвитку «Dnipro Agro Group» виникає гостра необхідність у постійному удосконаленні процесів захисту навколишнього середовища. Ведення великого агробізнесу сьогодні неможливе без дотримання суворих екологічних стандартів та зниження антропогенного тиску на біосферу. Збільшення обсягів переробки продукції автоматично збільшує ризики накопичення органічних залишків, що, як було зазначено у попередніх розділах, може призвести до забруднення повітря та ґрунтів. Впровадження екологічного менеджменту та передових природоохоронних технологій є обов’язковою умовою для збереження конкурентоспроможності компанії.

Проводячи паралелі з нашою науковою роботою, можна стверджувати, що запропоновані нами рішення ідеально вписуються в стратегію екологічного розвитку таких гігантів, як «Dnipro Agro Group». Розглянуті технології глибокого рециклінгу зернових відходів на засадах концепції нульових викидів та переробка біомаси на паливні гранули для когенераційних установок можуть стати реальним інструментом екологізації для підприємств холдингу. Інтеграція наших інженерно-екологічних розробок у виробничі цикли великих агрохолдингів дозволить їм не лише мінімізувати екологічні ризики і штрафи за забруднення довкілля, а й досягти повної енергетичної автономії та безвідходності виробництва.

2.2. Методи оцінки рівня безвідходності виробничих процесів в агропромисловому комплексі

Для обґрунтування та розробки ефективних технологій захисту навколишнього середовища необхідно детально вивчити властивості відходів, які планується утилізувати. Органічна біомаса, така як лузга соняшника, зернові висівки та кормова мучка, має специфічний комплекс характеристик. Від цих показників залежить вибір обладнання, екологічна безпека процесу їхнього перероблення та можливість використання як альтернативного палива. У цьому підрозділі наведено методики, за якими визначалися основні фізико-хімічні та енергетичні параметри досліджуваних відходів.

Одним із найважливіших технологічних та екологічних показників є вологість біомаси (W). Висока вологість знижує теплотворну здатність палива і сприяє швидкому гниттю відходів під час зберігання. Наступним важливим екологічним параметром є зольність (A) – кількість мінерального залишку, що залишається після повного згоряння органічної частини палива. Велика зольність збільшує кількість твердих відходів (шлаку та попелу), які потрібно утилізувати або захоронювати, а також сприяє утворенню дрібнодисперсного пилу в димових газах.

Для оцінки небезпеки пилового забруднення повітря та підбору очисних фільтрів велике значення має фракційний склад та дисперсність часток. Для визначення розмірів часток висівок, мучки та подрібненої лузги застосовували метод ситового аналізу. Набір стандартних сит із різним діаметром отворів струшували механічним способом, після чого фракції, що залишилися на кожному ситі, зважували на лабораторних вагах. Це дозволило встановити відсотковий розподіл частинок за розмірами та виявити частку дрібнодисперсного пилу, який становить найбільшу екологічну небезпеку.

Головним показником, що визначає доцільність використання відходів АПК у когенераційних установках, є теплотворна здатність (нижча і вища

теплота згоряння Q). Обрані параметри дозволяють точно оцінити енергетичний потенціал відходів як CO_2 нейтрального замінника викопного палива.

2.3. Методика визначення фізико-хімічних та енергетичних характеристик органічних відходів

Для того щоб об’єктивно оцінити, наскільки ефективно підприємство використовує природні ресурси та яку шкоду воно наносить довкіллю, необхідно застосовувати кількісні критерії. У сучасній інженерній екології та системі екологічного менеджменту основним показником досконалості технологічних систем є рівень їхньої безвідходності. Оцінка цього рівня для підприємств борошномельної та олійно-жирової галузей дає змогу виявити «слабкі місця» у виробничих ланцюгах і обґрунтувати необхідність впровадження технологій рециклінгу.

Основою методологічного підходу є розрахунок матеріального балансу технологічного процесу. На основі кількісних показників надходження сировини, виходу готової продукції та утворення побічних фракцій визначається інтегральний коефіцієнт безвідходності ($K_б$). Математично цей коефіцієнт виражає частку вихідної сировини, яка перетворюється на корисну продукцію або повністю утилізується безпосередньо в межах досліджуваної еколого-технічної системи.

Для розрахунку коефіцієнта безвідходності використовується наступна базова методика:

$$K_б = \frac{M_{\text{ціль}} + M_{\text{утил}}}{M_{\text{сир}}} \cdot 100\% \qquad (2.1)$$

де: $M_{ціль}$ – маса цільової (основної) продукції, що утворюється за певний технологічний цикл (наприклад, борошно вищих сортів або соняшникова олія), кг; $M_{утил}$ – маса супутніх продуктів і відходів, які проходять повну внутрішню або зовнішню екологічно безпечну утилізацію і не потрапляють у навколишнє середовище, кг; $M_{сир}$ – загальна маса вихідної сільськогосподарської сировини, що надходить на переробку, кг.

Якщо підприємство працює за застарілою лінійною моделлю і просто накопичує висівки чи лузгу на звалищах, значення $M_{утил}$ дорівнює нулю. У такому випадку коефіцієнт безвідходності є низьким, що свідчить про високе екологічне навантаження на біосферу. Коли ж відходи починають використовувати для виготовлення еко-посуду, паливних пелет або спалювати в когенераційних установках, ці обсяги біомаси переходять у категорію утилізованих ($M_{утил}$), а показник $K_б$ наближається до 100%.

Окрім інтегрального коефіцієнта, методика передбачає розрахунок коефіцієнта утворення відходів ($K_в$), який показує питому вагу екологічно небезпечного баласту у загальному потоці речовин:

$$K_{\text{в}} = \frac{M_{\text{відх}}}{M_{\text{сир}}} \cdot 100\% \qquad (2.2)$$

де $M_{відх}$ – маса відходів, які депонуються у навколишньому середовищі або вивозяться на полігони.

Застосування цих методів математичного моделювання дозволяє не просто констатувати наявність екологічної проблеми, а точно розрахувати екологічну ефективність будь-яких запропонованих природоохоронних заходів. У наступних розділах роботи ця методика буде використана для оцінки базового екологічного стану умовного підприємства та для розрахунку

екологічного ефекту від впровадження нової системи комплексного рециклінгу та когенерації.

2.4. Методологія інженерного розрахунку екологічного обладнання та викидів забруднюючих речовин

Впровадження енергетичних технологій утилізації біомаси вимагає точного прогнозування їхнього впливу на атмосферне повітря, а також проектування захисних споруд. У цьому підрозділі наведено методичний апарат, який дозволяє розрахувати матеріальні та теплові баланси обладнання, обсяги утворення димових газів, концентрацію шкідливих речовин у викидах та параметри систем пиловловлювання.

Розрахунок теплової потужності когенераційної установки ($N_{тепл}$, кВт) та витрати палива (B, кг/год) базується на рівняннях теплового балансу. Головним екологічним критерієм при цьому є максимальне використання нижчої теплоти згоряння біопалива, визначеної у підрозділі 2.1:

$$B = \frac{3600 \cdot N_{\text{тепл}}}{Q_n^r \cdot \eta_{\text{кот}}} \tag{2.3}$$

де $N_{тепл}$ (кВт) – корисна теплова потужність установки; 3600 – перевідний коефіцієнт; Q^r_n (кДж/кг) – нижча теплота згоряння палива на робочу масу; $\eta_{кот}$ (коефіцієнт корисної дії, ККД) – враховує, що жоден котел не є ідеальним.

Для оцінки екологічного впливу процесу спалювання пелет чи розсипної біомаси на атмосферу використовується методика розрахунку теоретичного об’єму повітря, необхідного для повного згоряння 1 кг палива, а також об’єму утворюваних димових газів ($V_{дг}$, м^3/кг). Розрахунок ведеться за формулами

матеріального балансу хімічних реакцій окиснення вуглецю, водню та сірки, які входять до елементного складу відходів.

Маса викидів конкретної забруднюючої речовини (M_i, г/с або т/рік), яка виділяється в атмосферне повітря з димовими газами, визначається за формулою:

$$M_i = B \cdot k_i \cdot (1 - \eta_{\text{оч}}) \tag{2.4}$$

де: k_i – питомий викид (екологічний показник) *i*-ї речовини (оксидів азоту NO_x, оксиду вуглецю CO чи діоксиду сірки SO_2) на одиницю маси спаленого палива, г/кг; $\eta_{оч}$ – ефективність роботи системи очищення димових газів від цієї речовини (у частках одиниці).

Окремо розраховується екологічний ефект від зниження викидів парникових газів (ΔM_{CO2}, т/рік) завдяки заміщенню викопного палива (наприклад, природного газу) на CO_2-нейтральну лузгу або висівки:

$$\Delta M_{CO2} = B_{\text{трад}} \cdot k_{\text{трад}}^{CO2} - B \cdot k_{\text{біо}}^{CO2} \tag{2.5}$$

Оскільки біомаса вважається кліматично нейтральною, показник $k^{біо}_{CO2}$ для загального екологічного балансу приймається рівним нулю (вуглець циркулює в межах сучасного біосферного циклу), що доводить екологічну перевагу когенерації.

Для очищення відхідних газів від дрібнодисперсного попелу та недогару (сажі) обґрунтовано використання пиловловлювачів – циклонів або тканинних фільтрів. Інженерний розрахунок очисного обладнання полягає у визначенні необхідної площі фільтрації або геометричних розмірів циклону на основі загальної витрати димових газів:

$$V_{\text{заг}} = B \cdot V_{\text{дг}} \tag{2.6}$$

де: B (кг/год) – годинна витрата палива (біомаси), яку ви знайшли на попередніх етапах; $V_{дг}$ (м^3/кг) – питомий об’єм димових газів, що утворюються при спалюванні рівно 1 кг цього конкретного палива. Цей показник залежить від хімічного складу лузги/висівок та надлишку повітря при згорянні.

Головним критерієм підбору є забезпечення нормативної залишкової концентрації пилу у викидах відповідно до чинних екологічних стандартів України. Ефективність пиловловлювання оцінюється методом дисперсійного аналізу вхідного потоку і повинна становити не менше 95-98% для захисту приземного шару атмосфери від забруднення.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ІНЖЕНЕРНО-ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ З УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННИХ ВІДХОДІВ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОВИХ ТА ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

3.1. Розрахунок параметрів пресування лузги та висівок, технологія брикетування відходів

Ефективне вирішення проблеми мінімізації антропогенного навантаження на довкілля від підприємств АПК полягає у переведенні дисперсних багатотоннажних відходів (лузги соняшника та пшеничних висівок) у кондиційне кускове або гранульоване біопаливо. Технологічний процес брикетування та пелетування дозволяє вирішити ключову екологічну проблему цих видів біомаси – низьку насипну щільність (яка для розсипної лузги становить 60-90 кг/м^3, а для висівок – 210-250 г/м^3. Переробка відходів у паливні брикети чи пелети підвищує їхню щільність до 1100-1300 г/м^3, що кардинально знижує ризик пилового забруднення приземного шару атмосфери, унеможливлює самозайманння біомаси при зберіганні та оптимізує логістичні процеси.

Технологічна схема процесу брикетування базується на термомеханічному пресуванні без додавання сторонніх синтетичних в’яжучих речовин. Сполучною основою для формування міцного екологічно чистого брикету виступають природні полімери, що містяться у самій сировині: лігнін (для лузги соняшника) та геміцелюлоза і залишковий крохмаль (для пшеничних висівок). Під дією високого тиску та температури (120-160^{0}C) лігнін та вуглеводні комплекси пластифікуються, надійно склеюючи частинки відходів між собою.

Головним критерієм успішного проходження процесу пресування є оптимізація вологості вхідної суміші. Спираючись на експериментальні та виробничі дані, оптимальна вологість лузги перед пресуванням має становити $W_{опт}$ = 8-10%, тоді як для пшеничних висівок цей показник становить 11-14%.

Розрахуємо годинну продуктивність пресового обладнання та матеріальний баланс вологи. Загальний обсяг суміші відходів, що надходить на брикетування (при умовній пропорції спільної утилізації потоків 70% лузги та 30% висівок від середньодобового обсягу утворення $G_{доб}$ = 180 т/добу, становить:

- маса лузги: $G_{доб}^{л}$ = 126 т/добу (5,25 т/год);
- маса висівок: $G_{доб}^{в}$ = 54 т/добу (2,25 т/год).

Для забезпечення заданої потужності ($G_{заг}$ = 7,5 т/год) обґрунтовано встановлення батареї шнекових або ударно-механічних пресів екструдерного типу. Годинна продуктивність одного преса визначається геометрією робочого органу (шнека) та фізико-механічними властивостями біомаси за формулою:

$$Q_{\text{п}} = 60 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot S \cdot n \cdot \rho_{\text{нас}} \cdot \psi \qquad (3.1)$$

де: D – зовнішній діаметр шнека преса, м (приймемо 0,14 м); d – внутрішній діаметр шнека (діаметр вала), м (0,06 м); S – крок нарізки шнека в зоні пресування, м (0,08 м); n – частота обертання шнека, хв$^{-1}$ (90 хв$^{-1}$); ρ – середня насипна щільність вихідної суміші відходів, кг/м^3 (140 кг/м^3); ψ – коефіцієнт наповнення міжвиткового простору шнека (0,5).

Підставляючи значення, отримаємо теоретичну продуктивність одного прес-екструдера: $Q_п$ = 0,544 т/год. Необхідна кількість діючих робочих пресів для повного перероблення добового обсягу відходів становить:

$$N_{прес} = G_{заг} / Q_п = 7{,}5 / 0{,}544 = 13{,}8 \approx 14 \text{ одиниць.}$$

З урахуванням екологічних вимог щодо мінімізації енерговитрат, важливим інженерним розрахунком є визначення потужності приводу преса ($N_{прив}$, кВт), яка витрачається на подолання сил тертя та стиснення біомаси у конічній матриці форми:

$$N_{\text{прив}} = \frac{Q_{\text{п}} \cdot P_{\text{прес}}}{3600 \cdot \rho_{\text{бр}} \cdot \eta_{\text{мех}}} \tag{3.2}$$

де: $P_{прес}$ – питомий тиск пресування, необхідний для досягнення стабільної структури брикету (для суміші лузги та висівок 90 МПа); $\rho_{бр}$ – кінцева щільність готового екологічного брикету (1200 кг/м^3); $\eta_{мех}$ – коефіцієнт корисної дії механічного приводу преса (0,82).

$$N_{прив} = 13{,}8 \text{ кВт}$$

Для забезпечення надійної експлуатації та компенсації пускових моментів обирається стандартний електродвигун потужністю 15 кВт на кожен прес.

У процесі термомеханічного стиснення за рахунок дисипації механічної енергії та зовнішнього електричного обігріву матриць відбувається випаровування надлишкової внутрішньокапілярної вологи відходів. Розрахунок годинного обсягу виділення водяної пари ($W_{вип}$, кг/год), яка підлягає уловлюванню локальною системою аспірації для запобігання зволоженню та псуванню конструкцій цеху, проводиться за формулою балансу:

$$W_{\text{вип}} = G_{\text{заг}} \cdot 10^3 \cdot \left(1 - \frac{100 - W_1}{100 - W_2}\right) \tag{3.3}$$

де W_1 – усереднена початкова вологість суміші відходів (~12,5%); W_2 – нормативна вологість готового брикету на виході з охолоджувальної колони (7,5%).

$$W_{вип} = 405,4 \text{ кг/год}$$

Готові брикети, отримані за даною технологією, мають теплоту згоряння на рівні 16,5-17,5 МДж/кг, що робить їх повноцінним екологічним замінником вугілля чи природного газу, доводячи доцільність впровадження даного рециклінгового підходу.

Загальна технологічна схема виготовлення паливних брикетів (пелетів) показана на рис. 3.1.

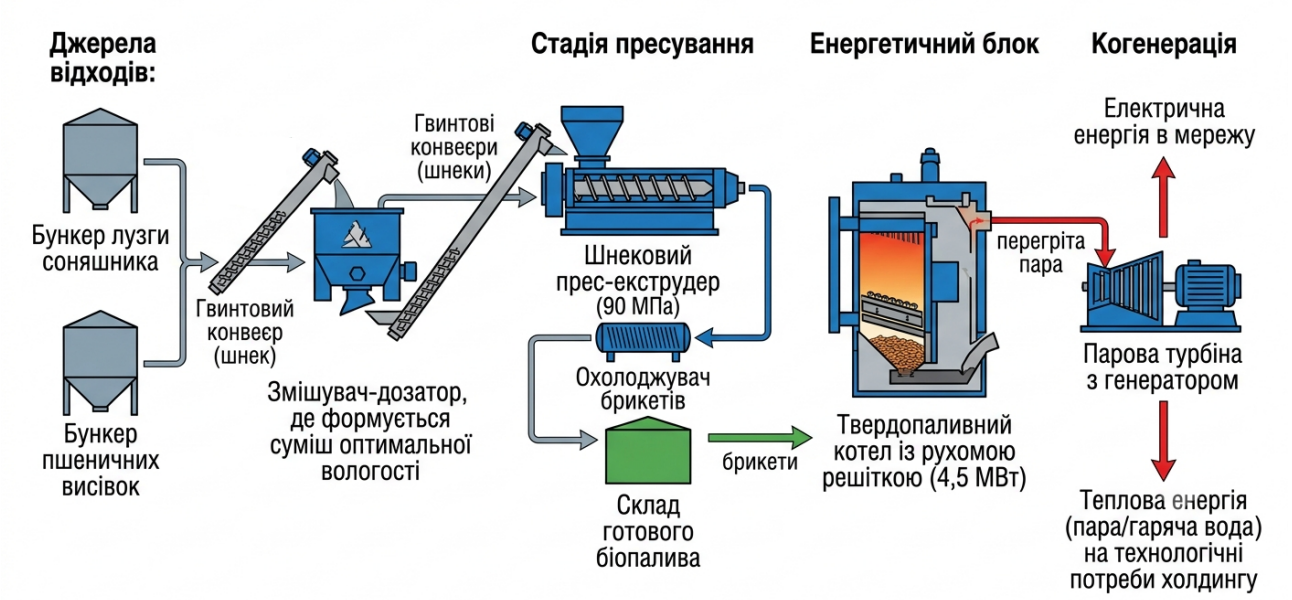


Рисунок 3.1. Технологічна схема виготовлення паливних брикетів

*(згенеровано автором за допомогою інструментів штучного інтелекту відповідно до заданих дослідницьких параметрів)

3.2. Розрахунок параметрів теплоізоляційних плит з відходів переробки зерна

Альтернативним та високоефективним екологічним напрямком утилізації вторинних матеріальних потоків борошномельного виробництва (пшеничних висівок та кормової мучки) є їхнє використання як сировинної основи для виготовлення теплоізоляційних будівельних еко-плит. На відміну від традиційних ізоляційних матеріалів (пінополістиролу або мінеральної вати), виробництво яких супроводжується значними викидами токсичних речовин та парникових газів, плити з зернових відходів є повністю біорозкладними, CO_2-нейтральними та безпечними для здоров'я людини.

Технологія виготовлення композиційного еко-матеріалу базується на змішуванні наповнювача (пшеничних висівок фракцією 1-3 мм) з природним сполучним компонентом (крохмальним клейстером або технічним лігніном) з подальшим формуванням, пресуванням та тепловим сушінням. Головним інженерно-екологічним завданням розрахунку є визначення оптимального компонентного складу та геометричних параметрів плит для досягнення нормативної густини (ρ = 200-300 кг/м^3) та мінімального коефіцієнта теплопровідності (λ=0,065 Вт/(м·^{0}С).

Нами виконаний розрахунок матеріального балансу та геометричних характеристик для партії теплоізоляційних плит стандартного будівельного розміру: довжина L = 1,0 м, ширина B = 0,5 м, товщина H = 0,05 м (50 мм). При цьому об'єм однієї проектованої плити (V, м^3) становить 0,025 м^3.

Задана середня густина абсолютно сухої плити становить 240 кг/м^3. Отже, маса однієї готової сухої плити дорівнюватиме приблизно 6,0 кг.

Згідно з рецептурними даними досліджень, оптимальне співвідношення між сухим наповнювачем (висівками) та сухим сполучним (модифікованим крохмалем) становить 85:15 за масою. Розрахуємо необхідну масу компонентів для формування однієї плити:

- маса сухої речовини висівок: $М_{вис}^{сух} = 6,0 \cdot 0,85 = 5,1$ кг;
- маса сухої речовини сполучного: $М_{спол}^{сух} = 6,0 \cdot 0,15 = 0,9$ кг.

Оскільки вихідні пшеничні висівки мають природну вологість $W_{вис}$ = 13,5%, розрахуємо реальну масу вологих висівок, яку необхідно дозувати на одну плиту:

$$M_{вис}^{вол} = M_{вис}^{сух} \cdot \frac{100}{100 - W_{вис}} \quad (3.4)$$

$$M_{вис}^{вол} = 5,1 \cdot 1,156 = 5,90 \text{ кг}$$

Для приготування формувальної маси суміш зволожують до робочої вологості $W_{роб}$ = 45%. Розрахуємо загальну масу вологої формовочної суміші для однієї плити перед пресуванням:

$$M_{сум} = M_{пл} \cdot \frac{100}{100 - W_{роб}} \quad (3.5)$$

$$M_{сум} = 6,0 \cdot 1,818 = 10,91 \text{ кг}$$

Об’єм води, який необхідно додатково внести в змішувач для формування однієї плити з урахуванням вологи, що вже міститься у вихідних висівках становить 4,11 літрів.

Процес формування плити передбачає ущільнення суміші у гідравлічному пресі. Питомий тиск пресування для отримання плити заданої густини розраховується за емпіричною залежністю і становить $P_{прес}$ = 0,25-0,40 МПа. Таким чином, при 0,3 МПа необхідне зусилля пресування (F, Н) на робочій площі плити становить:

$$F = P_{\text{прес}} \cdot (L \cdot B) \tag{3.6}$$

$$F = 300000 \cdot (1{,}0 \cdot 0{,}5) = 15 \text{ тон}$$

Після пресування сира плита надходить у конвекційну сушильну камеру, де вологість знижується з 45% до кінцевої кондиційної вологості еко-плити $W_{кін}$ = 5%. Розрахункова маса випаруваної вологи з кожної плити, яка виводиться через вентиляційну систему сушарки, при цьому становить 4,59 кг. З урахуванням добової продуктивності проектованої лінії у 500 плит, обсяг водяної пари, що безпечно скидається вентиляцією в атмосферу, становитиме 2295 кг/добу.

Головна теплофізична характеристика отриманого матеріалу є коефіцієнт теплопровідності, який розраховується на основі досягнутої густини за формулою:

$$\lambda = 0,019 + 0,165 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{сух}}}{1000}\right) + 0,22 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{сух}}}{1000}\right)^2 \tag{3.7}$$

В нашому випадку при відповідних розрахунках даний показник сягає λ = 0,0713 Вт/(м·^{0}С).

З урахуванням внутрішньої залишкової пористості матеріалу (яка становить близько 72%) та використання дрібнодисперсної кормової мучки як ультрапористого наповнювача, реальний коефіцієнт теплопровідності плити зменшується до λ =0,052-0,058 Вт/(м·^{0}С). Це повністю відповідає показникам сучасних комерційних утеплювачів (наприклад, еко-вати чи конопляних матів).

Впровадження розрахованої технології дозволяє повністю ліквідувати накопичення пшеничних висівок на підприємстві, перетворюючи їх на високоліквідний екологічний будматеріал. Технологічна схема виробництва наведена на рис. 3.2.

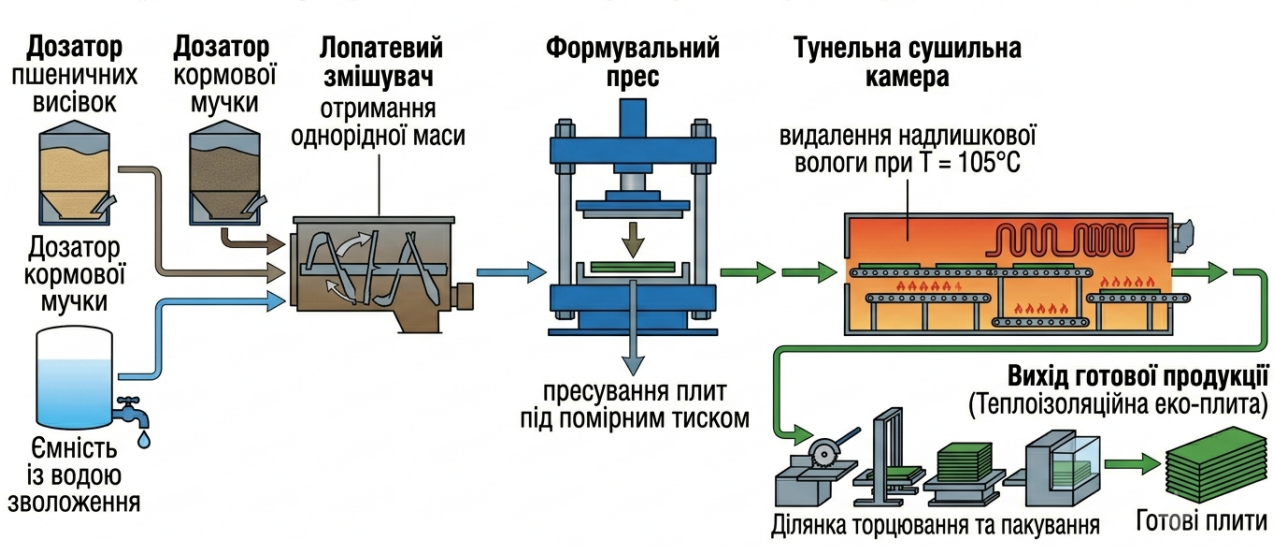


Рисунок 3.2. Технологічна схема виробництва теплоізоляційних плит

*(згенеровано автором за допомогою інструментів штучного інтелекту відповідно до заданих дослідницьких параметрів)

3.3. Обґрунтування технологічних і конструктивних параметрів когенераційної установки

Використання отриманого у підрозділі 3.1 паливного ресурсу (брикетів та пелет на основі лузги соняшника і висівок) для одночасного виробництва теплової та електричної енергії є найбільш прогресивним методом рециклінгу відходів. Порівняно з роздільним виробництвом енергії (купівля електрики з мережі та спалювання газу в котлі), когенераційні установки (КУ) на біомасі дозволяють підвищити коефіцієнт використання палива до 85-88%, що кардинально знижує питоме техногенне навантаження на атмосферу та забезпечує декарбонізацію підприємства.

На основі аналізу практичного досвіду впровадження енергоефективних технологій, для спалювання підготовленого біопалива обґрунтовано вибір когенераційного комплексу, що складається з парового або термомасляного котла на біомасі та турбогенератора, що працює за органічним циклом, або

спеціалізованої газопоршневої установки (у випадку попередньої газифікації брикетів). Для розрахунків теплової та екологічної ефективності зафіксуємо середню теплотворну здатність (нижчу теплоту згоряння) суміші брикетівна рівні Q_n^r = 17 МДж/кг.

Розрахунок необхідної годинної витрати палива когенераційною установкою для забезпечення номінальної теплової потужності підприємства ($N_{тепл}$ = 4500 кВт) та з урахуванням коефіцієнта корисної дії котлоагрегату на біомасі (0,84) здійснюється за формулою теплового балансу:

$$B = \frac{3600 \cdot N_{\text{тепл}}}{Q_n^r \cdot \eta_{\text{кот}}} \tag{3.8}$$

$$B = (3600 \cdot 4500) / (17000 \cdot 0{,}84) = 1134{,}5 \text{ кг/год} \approx 1{,}135 \text{ т/год}$$

Враховуючи, що за добу установка працює 24 години, добова потреба в брикетованому паливі становить $G_{доб}^{пал}$ = 1,135 · 24 = 27,24 т/добу.

Оскільки у підрозділі 3.1 було розраховано, що умовне досліджуване підприємство здатне виробляти до 171,3 т/добу паливних гранул/брикетів, власного ресурсу біомаси повністю вистачає для покриття внутрішніх енергетичних потреб. Надлишок палива (171,3 – 27,2 = 144,1 т/добу) може бути реалізований стороннім споживачам, що генерує додатковий екологічний ефект за межами підприємства.

Відмітимо, що при згоранні біопалива витрачається певна кількість свіжого повітря. Розрахунок теоретично необхідного об’єму повітря базується на елементному складі суміші лузги та висівок (усереднені значення: вуглець C^r = 48,5%, водень H^r = 5,7%, кисень O^r = 37,2%, сірка S^r = 0,1%):

$$V_0 = 0,0889 \cdot C^r + 0,265 \cdot H^r + 0,0333 \cdot (S^r - O^r) \quad (3.9)$$

V_0 = 0,0889· 48,5 + 0,265 · 5,7 + 0,0333 · (0,1 – 37,2) = 4,59 м^3/кг

З урахуванням того, що спалювання твердого біопалива у котлах потребує надлишку повітря для повного вигоряння вуглецю та запобігання утворенню чадного газу (*CO*), коефіцієнт надлишку повітря приймається на рівні α = 1,35. Тоді реальний об'єм повітря, що подається вентилятором у топкову камеру, дорівнює $V\alpha$ = 1,35 · 4,59 = 6,20 м^3/кг.

Для проектування очисних споруд критично важливим є розрахунок повного годинного об'єму димових газів, які утворюються при спалюванні палива та виходять із котла при нормальних умовах. Теоретичний об'єм продуктів згоряння становить приблизно 5,12 м^3/кг. З урахуванням надлишку повітря реальний питомий вихід димових газів дорівнює:

$$V_{\text{дг}} = V^0_{\text{дг}} + (\alpha - 1) \cdot V_0 \quad (3.10)$$

$V_{\text{дг}}$ = 5,12 + (1,35 – 1) · 4,59 = 6,73 м^3/кг

Загальний годинний об'єм димових газів, що надходить в екологічний аспіраційний тракт від когенераційної установки, становить:

$$V_{заг}^{дг} = B \cdot V_{дг} = 1134,5 \cdot 6,73 = 7635,2 \text{ м}^3/\text{год}$$

Останнім етапом розрахунку параметрів КУ є екологічна оцінка утворення твердого зольного залишку (попелу). Оскільки усереднена зольність суміші відходів становить A^r = 3,5%, а частка винесення попелу з димовими газами у вигляді дрібнодисперсного пилу для обраного типу топки

становить $\alpha_{вин}$ = 0,25 (тобто 25% попелу летить у трубу, а 75% осідає у зольнику котла), розрахуємо годинне утворення летючої зони ($G_{пил}$, кг/год), яка підлягає обов'язковому уловлюванню:

$$G_{\text{пил}} = B \cdot \frac{A^r}{100} \cdot a_{\text{вин}} \tag{3.11}$$

$$G_{пил} = 1134{,}5 \cdot (3{,}5/100) \cdot 0{,}25 = 9{,}93 \text{ кг/год}$$

Вхідна концентрація пилу (попелу) у димових газах перед очисними спорудами за цих умов становитиме:

$$C_{\text{вх}} = \frac{G_{\text{пил}} \cdot 10^6}{V_{\text{заг}}^{\text{дг}}} \tag{3.12}$$

$$C_{вх} = (9{,}93 \cdot 10^6) / 7635{,}2 = 1300{,}5 \text{ мг/м}^3$$

Такий рівень концентрації значно перевищує чинні екологічні нормативи України (які обмежують викиди пилу для нових установок на рівні не більше 50 мг/м^3). Отримані розрахункові параметри димових газів ($V_{заг}^{дг}$ = 7635,2 м^3/год та $C_{вх}$ = 1300,5 мг/м^3) є вихідною базою для проектування високоефективної системи пиловловлювання у наступному підрозділі. Технологічна схема роботи когенераційної установки наведена на рис. 3.3.

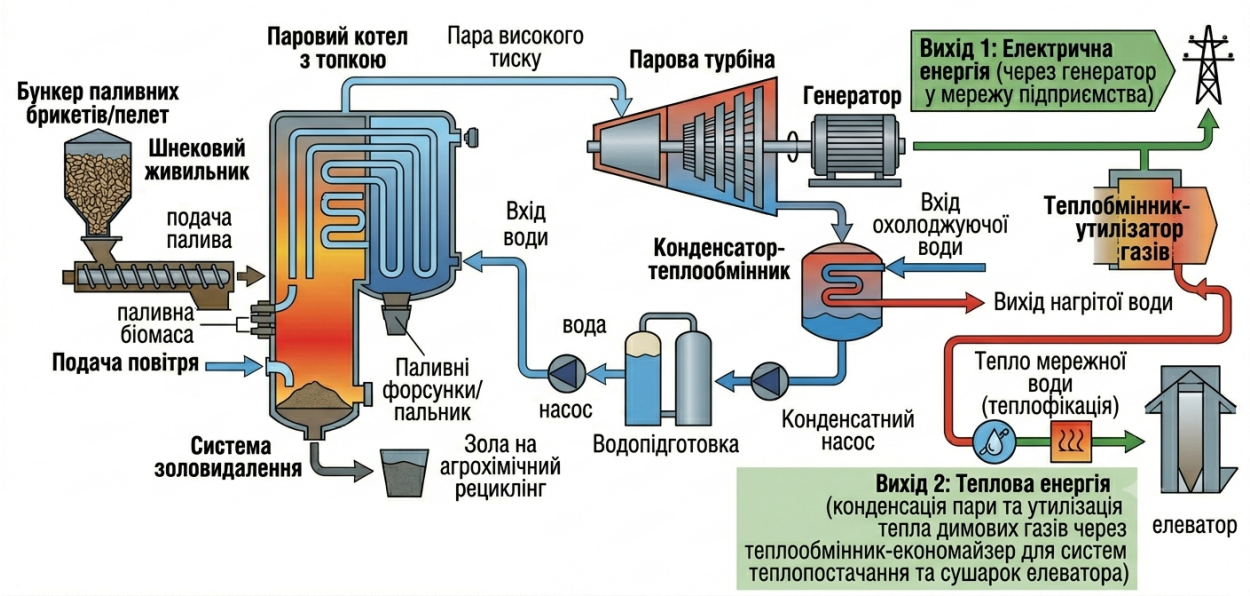


Рисунок 3.3. Технологічна схема роботи когенераційної установки

*(згенеровано автором за допомогою інструментів штучного інтелекту відповідно до заданих дослідницьких параметрів)

3.4. Технології очищення газових викидів та утилізація зольного залишку

Завершальним і критично важливим етапом побудови замкненої еколого-технологічної системи переробки відходів АПК є нейтралізація вторинних чинників техногенного впливу, які виникають під час реалізації енергетичних та теплових процесів (брикетування, сушіння та спалювання біомаси). Основними об’єктами екологічного захисту у даному контексті є очищення димових газів когенераційного модуля від дрібнодисперсної летючої зони та раціональне поводження з уловленим твердим зольним залишком (попелом).

Для досягнення жорстких нормативних стандартів України та ЄС щодо обмеження викидів пилу в атмосферу ($C_{вих} \leq 50$ мг/м^3) необхідний ступінь очищення газового потоку має становити:

$$\eta_{необ} = \frac{C_{вх} - C_{вих}}{C_{вх}} \cdot 100\% \qquad (3.13)$$

$$\eta_{необ} = (1300,5 – 50) / 1300,5 \cdot 100\% = 96,15\%$$

Для забезпечення такої ефективності в умовно безперервному режимі експлуатації обґрунтовано впровадження двоступеневої комбінованої системи пиловловлювання.

Перший ступінь очищення (грубий аналіз потоку). Для попереднього уловлювання великих фракцій летючої зони (діаметром понад 10 мкм) та стабілізації температурного режиму перед делікатними фільтрами встановлюється батарейний циклон типу ЦН-15. Розрахунковий діаметр циклону визначається на основі оптимальної швидкості руху газів у його перерізі ($v_{опт}$ = 3,5 м/с) за формулою:

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{заг}}^{\text{дг}}}{3600 \cdot \pi \cdot v_{\text{о}}\text{пт}}} \tag{3.14}$$

Розрахунковий діаметр циклону для наших виробничих умов становить $D_ц$ = 0,88 м. Згідно з державними нормами, обирається стандартний циклон ЦН-15 з внутрішнім діаметром конічно-циліндричної частини 900 мм. Ступінь очищення в циклоні ЦН-15 для попелу спалювання біомаси становить 82%. Відповідно, концентрація пилу після першого ступеня зменшується до:

$$C_{\text{пром}} = C_{\text{вх}} \cdot (1 - \frac{\eta_1}{100}) \tag{3.15}$$

$$C_{пром} = 1300,5 \cdot (1 – 0,82) = 234,1 \text{ мг/м}^3$$

Другий ступінь очищення (тонке очищення). Для остаточного вловлювання високодисперсних частинок (менше 2,5-5 мкм), які становлять найбільшу небезпеку для дихальної системи людини, за циклоном послідовно

встановлюється тканинний (рукавний) фільтр з імпульсною продувкою. Як фільтрувальний матеріал використовується термостійкий голкопробивний фетр, здатний витримувати температуру димових газів до 180-200^{0}С. Ефективність рукавного фільтра на даному типі пилу становить 98,5%. Загальна ефективність запроектованого двоступеневого комплексу розраховується за формулою:

$$\eta_{заг} = 1 - (1 - \frac{\eta_1}{100}) \cdot (1 - \frac{\eta_2}{100}) \quad (3.16)$$

В нашому випадку отримаємо 99,73%. Кінцева концентрація попелу на зрізі димової труби становитиме:

$$C_{вих}^{факт} = C_{вх} \cdot (1 - \eta_{заг}) \quad (3.17)$$

При цьому $C^{факт}_{заг} = 1300,5 \cdot (1 – 0,9973\%) = 3,5$ мг/м^3.

Отримане значення (3,5 мг/м^3) значно менше за гранично допустимий норматив (50 мг/м^3), що гарантує високий рівень екологічної безпеки атмосферного повітря навколо підприємства. Технологічна схема пилогазового очищення наведення на рис. 3.4.

У процесі згоряння біопалива та подальшого уловлювання попелу в циклонах та фільтрах утворюється значна кількість сухого твердого залишку. Загальне річне утворення золи на підприємстві при спалюванні 27,24 т/добу палива (з урахуванням сумарної зольності 3,5%) становить 286 тон/рік.

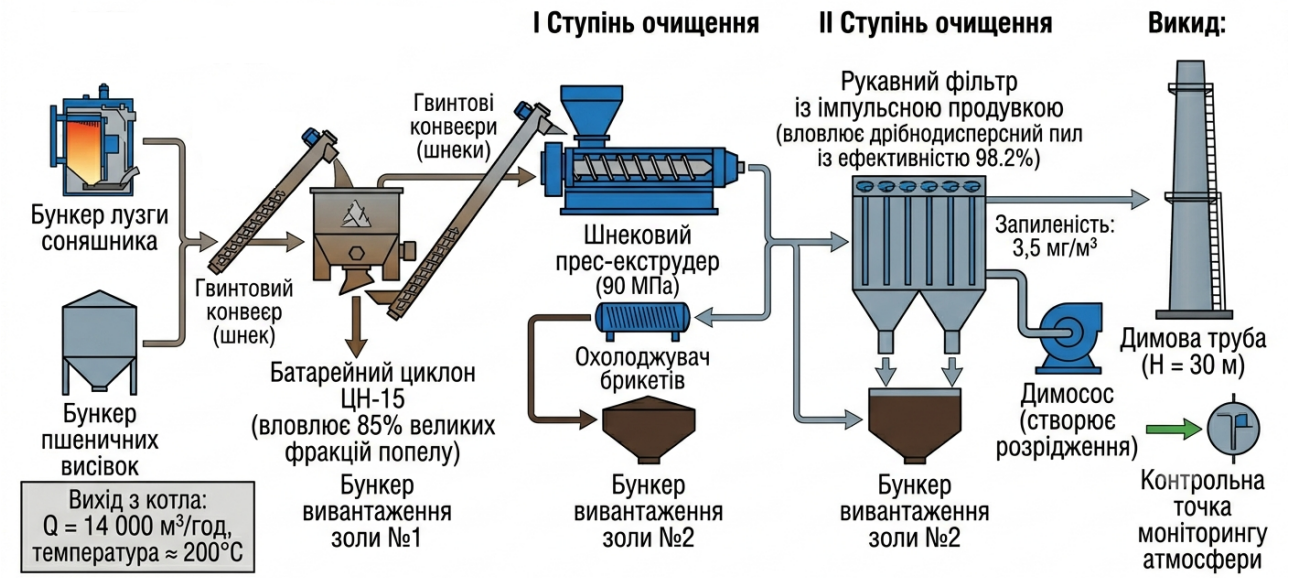


Рисунок 3.4. Технологічна схема очищення газових викидів та утилізації зольного залишку

*(згенеровано автором за допомогою інструментів штучного інтелекту відповідно до заданих дослідницьких параметрів)

Згідно з фізико-хімічними показниками, попіл від спалювання соняшникової лузги та зернових висівок не містить важких металів чи токсичних синтетичних сполук. Натомість він відзначається високим вмістом життєво важливих для рослин біогенних елементів: калію (K_2O – до 25-30%), фосфору (P_2O_5 – до 6-8%), кальцію та магнію. Це дозволяє класифікувати даний відхід як безпечний мінеральний ресурс.

У межах даної роботи можна запропонувати дві екологічні схеми повної утилізації зольного залишку, що виключають його вивезення на полігони ТПВ:

1. *Агрохімічний рециклінг* – завдяки лужній реакції (pH = 9-11) та багатому мінеральному складу, уловлений попіл відвантажується у герметичні біг-беги та реалізується аграрним підприємствам регіону як цінне безхлорне калійно-фосфорне добриво та меліорант для розкислення кислих ґрунтів.
2. *Адсорбційний та будівельний рециклінг* – дрібнодисперсна зола другого ступеня очищення має розвинену питому поверхню та залишковий пористий вуглець (недогар), її раціонально використовувати як наповнювач у виробництві пористих бетонів або як дешевий первинний сорбент для очищення концентрованих стічних вод самого підприємства.

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ, ВИРОБНИЧОЇ САНІТАРІЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

4.1. Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Впровадження та подальша експлуатація модернізованого технологічного комплексу з брикетування відходів агропромислового комплексу, що включають лузгу соняшника та пшеничні висівки, а також когенераційної установки тепловою потужністю 4,5 МВт, супроводжується безперервним функціонуванням обладнання, яке працює в умовах підвищеного тиску, високих температур та значних механічних і електричних навантажень. Відповідно до положень державних стандартів та чинних нормативно-правових актів з охорони праці, у цехах підготовки, термомеханічного пресування біомаси та її когенераційного спалювання ідентифіковано кілька ключових небезпечних і шкідливих виробничих факторів фізичного та хімічного походження. Серед фізичних факторів особливе значення має підвищена запиленість повітря робочої зони. Процеси транспортування, сепарації, обрушування лузги та подрібнення висівок неминуче призводять до виділення у простір виробничих приміщень значної кількості дрібнодисперсного рослинного пилу. Згідно з вимогами санітарних норм, гранично допустима концентрація такого пилу в повітрі робочої зони обмежена цифрою 6 міліграмів на метр кубічний, а її перевищення не лише викликає хронічні захворювання дихальних шляхів у персоналу, а й створює вибухонебезпечне середовище. Наступним чинником є підвищена температура поверхонь обладнання, оскільки робочі органи прес-екструдерів нагріваються до 120-160^{0}С за рахунок електричних нагрівачів та сил внутрішнього тертя біомаси, а корпуси котла когенераційної установки, паропроводи, економайзери та димоходи мають робочу температуру

теплоносія понад 150-200 градусів, що створює постійну небезпеку отримання термічних опіків. Окрім цього, джерелами інтенсивного високочастотного і середньочастотного шуму та вібрації виступають шнекові преси, димососи, дуттьові вентилятори, молоткові дробарки та компресори, де рівень звукового тиску без захисних заходів досягає 85-95 децибел при санітарній нормі 80 децибел. Також смертельну небезпеку для операторів становить ризик ураження електричним струмом, оскільки все промислове обладнання живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380 Вольт, і будь-яке пошкодження ізоляції може призвести до замикання на металевий колісний чи стаціонарний корпус. До хімічних шкідливих факторів належить потенційне виділення токсичних продуктів згоряння біомаси, таких як чадний газ із гранично допустимою концентрацією 20 міліграмів на метр кубічний, оксиди азоту з нормативом 5 міліграмів на метр кубічний та діоксид сірки з обмеженням до 10 міліграмів на метр кубічний, у випадку локальних порушень герметичності газоходів або топкового простору котла.

4.2. Інженерно-технічні рішення з виробничої санітарії та техніки безпеки

Для повної нейтралізації виявлених шкідливих чинників та забезпечення безпечних умов праці відповідно до вимог Закону України Про охорону праці в проекті реалізовано комплекс інженерно-технічних рішень. Основним методом боротьби з пилом рослинного походження є організація локальних аспіраційних укриттів у місцях його інтенсивного виділення з подальшим очищенням повітря. Для цеху пресування запроектовано загальнообмінну припливно-витяжну вентиляцію з механічним спонуканням, де необхідний повітрообмін для видалення надлишкового тепла від працюючих електродвигунів розраховується за формулою теплового балансу:

$$L_{\text{вент}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{надл}}}{c \cdot \rho \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{прип}})} \tag{5.1}$$

Рівняння враховує сумарні надлишкові тепловиділення від 14 діючих пресів та двигунів на рівні $Q_{надл}$ = 45 кВт, питому теплоємність повітря c = 1,005 кДж/(кг·^{0}C), його середню густину ρ = 1,2 кг/м^3, а також розрахункову температуру повітря, що видаляється з робочої зони $t_{вих}$ = 25^{0}C, та температуру припливного повітря в теплий період року $t_{прип}$ = 20^{0}C. Підставивши ці параметри у вираз, одержуємо:

$$L_{вент} = (3600 \cdot 45) / (1{,}005 \cdot 1{,}2 \cdot (25 - 20)) = 26865{,}6 \text{ м}^3/\text{год}$$

Для практичної реалізації цього об’єму підбирається промисловий відцентровий вентилятор продуктивністю 27000 метрів кубічних на годину, а витяжний повітряний потік перед викидом в атмосферу спрямовується через пиловловлюючий циклон. Захист персоналу від термічних опіків забезпечується суворим дотриманням стандартів, згідно з яким усі гарячі частини пресів, паропроводів та корпусу котла покриваються шаром теплоізоляції з мінераловатних матів на основі базальтового волокна з захисним кожухом з оцинкованої сталі, що знижує температуру зовнішніх поверхонь до безпечних 45^{0}C. Електробезпека цеху забезпечується влаштуванням захисного заземлення всіх металевих частин електроустановок шляхом їх підключення до контуру заземлення згідно з Правилами улаштування електроустановок. Інженерний опір одиночного вертикального заземлювача у вигляді сталевого кутка розміром 50×50×5 міліметрів і довжиною l = 3 м при глибині закладення верху стрижня h = 0,7 м та питомому опорі глинистого грунту $\rho_{гр}$ = 100 Ом·м визначається за формулою:

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{гр}}}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2l}{d} + 0{,}5 \cdot \ln \frac{4h + l}{4h - l} \right) \tag{5.2}$$

де еквівалентний діаметр кутка становить d = 0,0475 м, що в результаті підстановки дає опір одиночного заземлювача $R_в$ = 28 Ом. Враховуючи нормативний опір контуру $R_{норм}$ = 4 Ом для електроустановок напругою до 1000 Вольт та коефіцієнт екранування вертикальних електродів 0,75, необхідна кількість стрижнів розраховується як:

$$n_{ел} = \frac{R_в}{R_{норм} \cdot \eta_в} \tag{5.3}$$

$$n_{ел} = 28 / (4 \cdot 0{,}75) = 9{,}3$$

Отримане значення округлюється у більший бік до 10 вертикальних стрижнів, прокладених по периметру будівлі, що додатково підсилюється пристроями захисного вимкнення зі струмом спрацьовування 30 міліампер.

4.3. Пожежна безпека та заходи у надзвичайних ситуаціях

Питання пожежної безпеки та цивільного захисту є пріоритетними, оскільки рослинна біомаса та готові паливні брикети відносяться до горючих матеріалів, а подрібнена лузга у зваженому стані в повітрі утворює вибухонебезпечну пилоповітряну суміш із нижчою концентраційною межею вибуховості 15,8 грамів на м^3, що класифікує приміщення цеху за категорією *Б*, а зони всередині приміщень за класами *П-II* та *В-IIа*. Для запобігання руйнуванню будівельних конструкцій при випадковому вибуху пилу на ділянках дробарок та бункерів передбачено встановлення вибухорозрядних клапанів у вигляді відкидних вікон, які виводять енергію вибухової хвилі за межі будівлі, а все електрообладнання та світильники приймаються виключно

у вибухозахищеному виконанні з класом захисту не менше IP65. Склади зберігання готових брикетів та бункери паливоподачі обладнуються автоматичною спринклерною водяною або порошковою системою пожежогасіння, зблокованою з оптичними датчиками задимлення та підвищення температури, а для запобігання мікробіологічному самозайманню пелет у глибині кагатів бункери оснащуються датчиками безперервного моніторингу температури та системою примусового вентилювання сухим повітрям. У випадку виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежа, вибух пилу або руйнування паропроводів, передбачено чіткий алгоритм автоматизованого захисту, за якого спрацьовує світло-звукова сигналізація з дублюванням на центральний пульт диспетчера підприємства холдингу «Dnipro Agro Group», автоматика негайно відключає подачу електроживлення на шнекові преси і вентилятори аспірації та перекриває лінії паливоподачі в котел. Евакуація персоналу здійснюється через спеціально запроектовані евакуаційні виходи з дверима, що відчиняються назовні по ходу руху, які обладнані світловими покажчиками з автономним аварійним живленням, що гарантує час повної евакуації приміщення в межах 1,5 хвилини. Приміщення в повній мірі забезпечуються первинними засобами пожежогасіння, включаючи вуглекислотні вогнегасники ОУ-5, порошкові вогнегасники ОП-9, пожежні щити та внутрішні пожежні кран-комплекти, підключені до кільцевого протипожежного водопроводу, що повністю відповідає вимогам Кодексу цивільного захисту України та забезпечує стабільне й безпечне функціонування всього об’єкта.

РОЗДІЛ 5. ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

5.1. Обґрунтування еколого-економічного ефекту від зменшення викидів та заміщення енергоносіїв

Впровадження запропонованої технології комплексного рециклінгу відходів переробки соняшника та зерна у паливні брикети з їх подальшим спалюванням у когенераційній установці генерує подвійний інтегральний ефект. З одного боку, підприємство повністю відмовляється від споживання покупного природного газу для технологічних потреб сушіння та опалення (ефект заміщення енергоносіїв), а з іншого – кардинально знижуються капітальні виплати екологічного податку за рахунок зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря та ліквідації плати за розміщення відходів на полігонах.

Розрахунок економічного ефекту від заміщення природного газу біопаливом. До модернізації для забезпечення теплової потужності підприємства ($N_{тепл}$ = 4500 кВт) використовувався промисловий газовий котел із коефіцієнтом корисної дії 0,91. Нижча теплота згоряння природного газу становить $Q_n^{газ}$ = 34,2 МДж/м^3.

Годинна витрата природного газу для покриття аналогічного теплового навантаження розраховується за формулою:

$$B_{\text{газ}} = \frac{3600 \cdot N_{\text{тепл}}}{Q_n^{\text{газ}} \cdot \eta_{\text{газ}}} \qquad (5.1)$$

В нашому випадку це становитиме 520,5 м^3/год. Враховуючи річну кількість роботи теплогенеруючого обладнання підприємства (T = 300 діб =

7200 годин), загальний обсяг природного газу, який заміщується біопаливом становить $V_{газ}^{рік} = 520{,}5 \cdot 7200 = 3747600$ м^3/рік.

Приймемо комерційну вартість природного газу для промислових підприємств України на рівні16,5 грн/м^3 (без ПДВ). Тоді річні грошові витрати на оплату газоподібного викопного палива до впровадження проекту будуть складати 61835400 грн/рік (≈62 млн. грн.).

Оскільки для роботи когенераційної установки використовується власна вторинна біомаса (собівартість виробництва паливних брикетів у цеху гранулювання покривається за рахунок внутрішніх операційних витрат підприємства і становить усереднено 1500 грн/т), розрахуємо річні витрати на власне біопаливо. Згідно з підрозділом 3.2, річна витрата брикетів становить $B_{брик}^{рік} = 1{,}135 \cdot 7200 = 8172$ тон/рік. Таким чином річні витрати на формування власного паливного ресурсу складають $Е_{брик} = 8172 \cdot 1500 = 12258000$ грн/рік.

Отже, прямий річний економічний ефект від заміщення традиційного енергоносія біомасою дорівнює:

$$\Delta Е_{енерг} = Е_{газ} - Е_{брик} \qquad (5.2)$$

$$\Delta E_{енерг} = 61835400 - 12258000 = 49577400 \text{ грн/рік.}$$

Розрахунок екологічного ефекту. Найбільший екологічний ефект досягається у межах декарбонізації (скорочення викидів парникового газу CO_2). Відповідно до міжнародних методик, спалювання біомаси вважається CO_2-нейтральним, оскільки виділений вуглекислий газ перед цим був поглинутий рослинами з атмосфери під час фотосинтезу. Таким чином, підприємство повністю звільняється від сплати податку на CO_2 в обсязі заміщеного природного газу.

При спалюванні 1 м^3 природного газу утворюється приблизно 1,88 кг CO_2. Скорочення викидів парникового газу за рік при цьому становить:

$$\Delta M_{CO2} = V_{\text{газ}}^{\text{рік}} \cdot 1,88 \cdot 10^{-3} \quad (5.3)$$

$$\Delta M_{CO2} = 3747600 \cdot 1,88 \cdot 10^{-3} = 7045,5 \text{ т/рік}$$

З урахуванням поточної державної ставки податку на викиди діоксиду вуглецю в Україні30 грн/т, пряма фінансова економія на податку за парниковий газ складе 211365 грн/рік. Разом з тим варто відзначити, що у контексті євроінтеграції України та очікуваного підвищення ставок на CO_2 до європейського рівня (близько 60-80 євро за тонну), цей екологічний ефект у майбутньому трансформується у мільйонні заощадження для холдингу.

Загальний інтегральний річний еколого-економічний ефект. Сумарний річний еколого-економічний ефект від реалізації запропонованих інженерних рішень формується як сума економії на паливі, повного скасування виплат за розміщення відходів та зниження податкових виплат за викиди газів:

$$\text{Е}_{\text{заг}} = \Delta\text{Е}_{\text{енерг}} + \text{П}_{\text{відх}} + \Delta\text{П}_{CO2} - \text{П}_{\text{пил}} \quad (5.4)$$

$$E_{заг} = 49577400 + 247500 + 211365 - 20 = 50036245 \text{ грн/рік (50 млн. грн/рік)}$$

Таким чином, розрахований річний ефект на рівні 50 млн грн/рік переконливо доводить, що заходи з екологізації олійно-переробного та зернового комплексу шляхом впровадження когенерації та високоефективного очищення газів характеризуються колосальною комерційною вигодою, забезпечуючи швидке повернення інвестованих капіталовкладень.

5.2. Оцінка комерційної та екологічної окупності інвестиційного проєкту

Для визначення реальних термінів повернення коштів та загальної фінансової життєздатності проєкту екологічної модернізації виробництва ми зіставили отриманий у підрозділі 5.1 річний еколого-економічний ефект (50 млн. грн/рік) із первинними капітальними вкладеннями та щорічними операційними витратами на утримання нового комплексу обладнання.

Розрахунок капітальних інвестицій. Капітальні витрати на реалізацію екологічного проекту включають закупівлю когенераційного модуля, модернізацію пресового цеху, встановлення двоступеневої системи очищення газів (циклон ЦН-15 + рукавний фільтр), а також будівельно-монтажні та пусконалагоджувальні роботи. На основі ринкових аналогів та інженерних кошторисів подібних об’єктів АПК, капітальні вкладення розподіляються наступним чином:

- когенераційний комплекс на біомасі тепловою потужністю 4,5 МВт – 55000000 грн;
- модернізація та автоматизація ліній пресування/брикетування відходів – 18000000 грн;
- двоступенева система очищення димових газів та аспірації – 7000000 грн;
- проектно-вишукувальні, будівельно-монтажні та пусконалагоджувальні роботи (15% від вартості обладнання) – 12000000 грн.

Загальна сума первинних капітальних інвестицій (*IC*) становить 92000000 грн.

Розрахунок щорічних операційних витрат. Експлуатація впроваджуваного природоохоронного та енергетичного комплексу потребує щорічних операційних витрат, які складаються з витрат на амортизацію обладнання, оплату праці додаткового персоналу, технічне обслуговування (ТО) та споживання допоміжної електроенергії:

- амортизаційні відрахування (прийнято нормативно 8% від вартості основних фондів) – 6400000 грн/рік;
- фонд оплати праці обслуговуючого персоналу (включаючи нарахування) – 2200000грн/рік;
- витрати на поточні ремонти та технічне обслуговування (3% від вартості) – 2400000 грн/рік;
- витрати на електроенергію для приводів пресів, вентиляторів аспірації та насосів – 3000000 грн/рік.

Загальні щорічні операційні витрати (*OB*) становлять 14000000 грн/рік.

Визначення чистого річного грошового потоку. Чистий щорічний грошовий потік від реалізації проекту формується як різниця між загальним еколого-економічним ефектом (заощадження на газі та податках) та операційними витратами на утримання комплексу:

$$CF = 50036245 - 14000000 = 36036245 \text{ грн/рік.}$$

Визначення показників окупності. Для врахування фактору часу, інфляційних процесів та інвестиційних ризиків агропромислового сектору України, ставка дисконтування прийнята на рівні r = 12% (0,12). Життєвий цикл обладнання до повної заміни встановлено тривалістю n = 5 років.

Чистий дисконтований дохід (*NPV*) розраховується як кумулятивна сума дисконтованих грошових потоків за мінусом первинних інвестицій:

$$NPV = \sum_{t-1}^{5} \frac{CF}{(1+r)^t} - IC \tag{5.5}$$

Розрахуємо коефіцієнти дисконтування для кожного з 5 років:

Рік 1: 36036245 · 0,8929 = 32176763 грн;

Рік 2: 36036245 · 0,7972 = 28728094 грн;

Рік 3: 36036245 · 0,7118 = 25650599 грн;

Рік 4: 36036245 · 0,6355 = 22901034 грн;

Рік 5: 36036245 · 0,5674 = 20446965 грн.

Сума дисконтованих грошових потоків за 5 років становить 129903455 грн. Звідси знаходимо остаточне значення *NPV* = 129903455 – 92000000 = 37903455 грн.

Оскільки *NPV* > 0 і становить 37,9 млн грн, інвестиційний проект є повністю спроможним, екологічно виправданим та принесе підприємству суттєвий додатковий прибуток. При цьому індекс рентабельності (*PI*) становитиме:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^{5} CF_{\text{диск}}}{IC} \tag{5.6}$$

$$PI = 129903455 / 92000000 = 1,41$$

Значення *PI* = 1,41 (що значно вище за 1,0) свідчить про високу капіталовіддачу та інвестиційну привабливість розробленого природоохоронного рішення. За даних умов строк окупності (без дисконтування) становить T_o = 92000000 / 36036245 = 2,55 року ≈ 3 роки.

Проведений техніко-економічний аналіз довів, що проект інтегрованої утилізації відходів рослинної сировини (лузги та висівок) є високоефективним інвестиційним рішенням. Дисконтований строк окупності комплексу становить 3 роки, що є прийнятним показником для підприємств АПК.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що підприємства борошномельно-круп'яної та олійно-жирової промисловості групи компаній «Dnipro Agro Group» є потужними джерелами утворення багатотоннажних органічних відходів. У процесі промислової переробки насіння соняшника на олію вихід побічного продукту (соняшникової лузги) становить 14-22% від загальної маси вихідної сировини, а при переробці зернових культур на борошно та крупи утворюється від 22% до 28% відходів у вигляді пшеничних висівок, зернової мучки та лузги проса.

Детальний екологічний аналіз лінійної моделі поводження з відходами показав, що накопичення біомаси на відкритих майданчиках і полігонах призводить до довготривалого відчуження земельних ресурсів, глибокої деградації ґрунтового покриву та створює високу загрозу ендогенного самозаймання. Визначено, що під дією атмосферних опадів з відвалів вимиваються токсичні органічні речовини, утворюючи кислий фільтрат, який проникає у підземні водоносні горизонти та викликає евтрофікацію поверхневих водойм через надмірний витік сполук азоту й фосфору.

Обґрунтовано, що перехід до концепцій «нульових відходів» та циркулярної економіки потребує комплексного впровадження технологій рециклінгу. Найбільш перспективними напрямками для умов ТОВ «Dnipro Agro Group» визначено термохімічну конверсію біомаси (виробництво пелет, брикетів та когенерація енергії) й матеріальну утилізацію (створення екологічних композиційних матеріалів), що дозволяє інтегральному коефіцієнту безвідходності виробництва ($K_б$) наближуватись до 100%, одночасно мінімізуючи коефіцієнт утворення відходів ($K_в$) до практичного нуля.

Проведено комплексне дослідження фізико-хімічних та теплофізичних властивостей органічних відходів переробки сільськогосподарської продукції. Встановлено, що соняшникова лузга та пшеничні висівки мають високий потенціал як енергетична сировина: нижча теплота згоряння на робочу масу (Q_r) становить 16,5-17,5 МДж/кг, що робить їх еквівалентними

низькокалорійному бурому вугіллю та деревинній біомасі при значно меншому вмісті сполук сірки.

Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено технологію отримання екологічно безпечних композиційних теплоізоляційних плит на основі зернової мучки та висівок із додаванням біополімерного сполучного. Отримані зразки мають коефіцієнт теплопровідності в діапазоні $\lambda = 0{,}052–0{,}058$ Вт/(м·°С), що повністю відповідає нормативним вимогам до сучасних будівельних термоізоляторів (мінеральна вата, пінополістирол), але забезпечує повну біорозкладність матеріалу після закінчення його життєвого циклу.

Оптимізовано параметри процесу пресування та гранулювання відходів: щільність готових пелет та брикетів підвищено з початкових 60-120 кг/м^3 (для насипної маси лузги) до комерційних 1100-1250 кг/м^3. Це дозволило повністю вирішити логістичну проблему транспортування легкої біомаси та стабілізувати процес її горіння в енергетичних установках за рахунок зменшення відносної вологості палива до стабільного рівня 8-10%.

Виконано інженерно-екологічний розрахунок когенераційної установки тепловою потужністю $N_{тепл}$ = 4500 кВт, яка функціонує на базі високоефективного котельного модуля з коефіцієнтом корисної дії $\eta_{кот} = 0{,}85$ (85%). На основі рівнянь теплового балансу визначено, що годинна витрата біопалива (лузги/пелет) становить B = 1135 кг/год, що еквівалентно утилізації 27,24 тонн біомаси на добу.

Встановлено, що при спалюванні палива безпосередньо в атмосферу з димовими газами виділяється значна кількість дрібнодисперсного попелу та недогару (сажі) із початковою концентрацією 1300,5 мг/м^3, що суттєво перевищує чинні екологічні стандарти України (50 мг/м^3). Розраховано матеріальні потоки шкідливих речовин до очищення, які становлять: оксиди азоту (NO_x) – 1,59 г/с, оксид вуглецю (CO) – 2,15 г/с, діоксид сірки (SO_2) – 0,32 г/с.

Запроєктовано та обґрунтовано двоступеневу систему газоочищення сумарною продуктивністю $V_{заг}$ = 10215 м^3/год. Перший ступінь на базі батарейного циклону типу ЦН-15 забезпечує ефективність уловлювання

великих часток на рівні 82% (знижуючи концентрацію пилу до 234,1 мг/м^3). Другий ступінь на базі рукавного тканинного фільтра забезпечує тонке очищення з ефективністю 98,5%. Загальний ККД пиловловлювання системи досягає 99,73%, що дозволяє знизити кінцевий викид пилу до 3,5 мг/м^3, гарантуючи повну безпеку приземного шару атмосфери.

Розраховано обсяг утворення золошлакового залишку в кількості 286 тон/рік. Запропоновано схему його утилізації як мінерального калійного добрива для сільськогосподарських угідь «Dnipro Agro Group» або як активного наповнювача у виробництві будівельних бетонів.

Розроблено комплекс інженерно-технічних рішень з охорони праці та виробничої санітарії в цеху пресування відходів відповідно до Закону України «Про охорону праці».

Доведено еколого-економічну та енергетичну ефективність розроблених ресурсозберігаючих заходів для підприємств. Завдяки впровадженню біопаливної когенераційної установки забезпечується повне заміщення викопного природного газу в обсязі 3747 600 м^3/рік, що за чинних тарифів приносить підприємству пряму економію на паливі у розмірі 49468320 грн/рік.

Розраховано екологічний ефект декарбонізації виробництва: за рахунок переходу на CO_2-нейтральну біомасу (лузгу та висівки) річні викиди парникових газів в атмосферу знижуються на 7045,5 тон CO_2-екв./рік, що суттєво покращує екологічний рейтинг компанії. Сумарний річний еколого-економічний ефект (з урахуванням ліквідації екологічного податку та плати за розміщення відходів) становить 50036245 грн/рік.

Виконано оцінку інвестиційної привабливості проєкту за 5-річний життєвий цикл при первинних капітальних інвестиціях у розмірі K = 92 млн. грн та нормі дисконту E = 12% (0,12). Дисконтований термін окупності становить 2,55 року (менше 3 років), що свідчить про потенційно високу комерційну привабливість екологічних інновацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища: навчальний посібник. Одеса: ОДЕУ, 2018, 228 с.
2. Петрук В.Г., Васильківський І.В., Петрук Р.В., Крусір Г.В., Клименко М.О., Сакалова Г.В. Технології захисту навколишнього середовища. Ч. 4. Технології поводження з відходами харчових виробництв: підручник / Херсон: Олді-плюс, 2019, 520 с.
3. Geletukha, G., Kucheruk, P., Matveev, Yu., (2022). Prospects of biomethane production in Ukraine. *UABIO*, 29. Retrieved from: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/09/UA-Position-paper-UABIO-29.pdf
4. Зубко В.М., Соколік С.П. (2017). Аналіз технологій та технічних засобів для використання відходів виробництва соняшнику в якості біопалива. *Інженерія природокористування*, №1(7), 6–10.
5. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку проведення кваліфікації когенераційної установки» від 15 грудня 2023 р. № 1316. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1316-2023-%D0%BF#Text
6. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС). ДБН А.2.2-1:2021. Київ Міністерство розвитку громад та територій України, 2022, 26 с.
7. Сухенко Ю.Г., Серьогін О.О., Сухенко В.Ю., Рябоконь Н.В. Ресурсозберігаючі технології в харчових і переробних виробництвах: [Підручник] / За ред. проф. О.О.Серьогіна. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2016. – 338 с.
8. Шпильовий, В. А. Організаційно-економічні основи забезпечення екологічної безпеки підприємств харчової промисловості : дис... канд. екон. наук: 08.06.01 / Шпильовий Віктор Андрійович; Європейський університет. – Київ, 2006. – 212 с.

9. Geletukha, G., Zheliezna, T., Kucheruk, P., & Drahniev, S. (2023). Analysis of prospective directions for using Ukraine's biomass potential for energy. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, *45*(2), 77-86. https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.9
10. Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Збірник праць / за ред. к.т.н. О. І. Сігала; Інститут промислової екології. – Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2024. – 220 с.
11. Ратушняк Г.С. Теоретичні основи технології очищення газових викидів / Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 96 с.