Додаток В

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
(назва кафедри)

_____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(підпис) (ПІБ)

"___" _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА) на тему РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОМПЛЕКСУ СОРТУВАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Гарант освітньої програми
д.т.н., професор _____ Володимир БУЛГАКОВ
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи
Ph.D _____ Олександр СПОДОБА
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ Андрій КУЗЬМЕНКО
(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

Додаток Д

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Конструювання машин і обладнання
д.т.н., професор _____Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
“____” _____2026 р.

З А В Д А Н Н Я
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту (на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту)

Кузьменко Андрій Ярославович
(прізвище, ім’я, по батькові)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування
(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра) **РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОМПЛЕКСУ СОРТУВАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ**
затверджена наказом ректора НУБіП України від “15” квітня 2026 р. №1044 «С»
Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 2026 червня 01
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проекту бакалавра)
Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій сортування побутових відходів
2. Розглянути перспективи створення нових конструкцій сортування побутових відходів
3. Провести розрахунки для розробки конструкції сортування побутових відходів
4. Розглянути питання охорони праці
5. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Перелік графічних документів (за потреби)

1. Загальний вид
2. Складальне креслення
3. Деталі

Дата видачі завдання “16”квітня 2026 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи
(Керівник дипломного проєкту бакалавра) _____ Олександр СПОДОБА
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Андрій КУЗЬМЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ 6
ВСТУП 7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ СОРТУВАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ … 9
1.1 Характеристика побутових відходів та їх класифікація ……..…... 9
1.1.1. Види та морфологічний склад побутових відходів……. 9
1.1.2 Вплив небезпечних відходів на працездатність обладнання та якість продукції…… 10
1.2. Огляд сучасних технологій сортування відходів……. 11
1.3. Аналіз існуючих сортувальних комплексів…….. 12
1.3.1. Технологічна класифікація та показники ефективності……. 12
1.3.2. Світовий досвід……... 13
1.3.3. Аналіз українських реалій (станом на 2026 рік)…….. 13
1.4. Проблеми та перспективи розвитку систем сортування…….. 14
1.4.1. Ключові проблеми галузі……... 14
1.4.2. Перспективи та інноваційні шляхи розвитку…….. 15
РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОМПЛЕКСУ…… 16
2.1. Формування технічного завдання…….. 16
2.1.1. Вихідні фізико-механічні характеристики злежаних ТПВ…. 16
2.1.2. Гранулометричний склад матеріалу та масовий баланс……. 17
2.1.3. Продуктивність та режим роботи комплексу…….. 18
2.2. Вибір технологічної схеми сортування та переробки…….. 19
2.2.1. Етап механічної підготовки та фракціонування…….. 19
2.2.2. Автоматизована та фізична сепарація…….. 20
2.3. Загальна просторово-кінематична структура комплексу ……. 21
2.4. Вибір основного обладнання (конвеєри, сепаратори, преси)…….. 23
2.4.1. Транспортувальне обладнання (Стрічкові конвеєри) …… 23
2.4.2. Обладнання механічної та високотехнологічної сепарації… 23
2.4.3. Лінія компактування (тюкування) вторинної сировини……. 24
2.4.4. Обладнання лінії RDF…… 24
2.5. Опис принципу роботи комплексу……. 25
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА ...…….. 27

3.1. Розрахунок продуктивності комплексу……. 27
3.1.1. Розрахунок теоретичної та фактичної продуктивності комбінованого барабанного сита з розривачем……..… 27
3.1.2. Вибір та технічні характеристики супутнього сортувального обладнання…….. 29
3.2. Розрахунок параметрів транспортувальних систем……. 34
3.2.1. Розрахунок та обґрунтування параметрів подавального конвеєра барабанного сита…….. 34
3.2.2. Обґрунтування параметрів та швидкості стрічки сортувального конвеєра……... 36
3.3. Вибір та розрахунок приводів транспортувальних систем…….. 38
3.3.1. Тяговий розрахунок подавального стрічкового конвеєра….. 38
3.3.2. Визначення потужності та вибір приводної станції…… 39
3.4. Розрахунок міцності основних елементів конструкції сита…… 41
3.4.1. Визначення та перевірка товщини обичайки сита…….. 41
3.5. Моделювання роботи та алгоритм керування комплексом……. 43
3.5.1. Алгоритм каскадного запуску лінії…….. 43
3.5.2. Алгоритм штатної зупинки та очищення……..… 44
3.5.3. Система аварійного блокування…… 44
РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ……..... 46
4.1. Вибір засобів автоматизації…… 46
4.1.1. Центральний керуючий пристрій (Контролерний рівень)….. 46
4.1.2. Силова електроніка та регульований привод……... 47
4.1.3. Промислова мережа передачі даних……. 47
4.2. Розробка алгоритму роботи комплексу……. 48
4.2.1. Алгоритм каскадного пуску (Проти ходу потоку)…….. 48
4.2.2. Алгоритм штатної зупинки (За ходом потоку)…… 48
4.2.3. Алгоритм аварійного блокування (Interlock System)…….. 49
4.3. Система датчиків і виконавчих механізмів……... 49
4.3.1. Система контролю токсичності повітря та газової безпеки .. 50
4.3.2. Система виявлення та локалізації загорянь у технологічних агрегатах…… 50
4.4. Програмне забезпечення та візуалізація процесів…… 52
4.4.1. Інструменти розробки програмного забезпечення…….. 53
4.4.2. Концепція інтерфейсу користувача та відображення менмосхеми……... 53
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА……... 55
5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів…….. 55

5.1.1. Фізичні небезпечні та шкідливі фактори…….. 55
5.1.2. Хімічні небезпечні та шкідливі фактори…….. 56
5.1.3. Біологічні шкідливі фактори……. 56
5.1.4. Психофізіологічні фактори…… 57
5.2. Заходи з охорони праці……... 57
5.2.1. Технічні засоби безпеки механічного обладнання…….. 57
5.2.2. Розрахунок та організація вентиляції робочих зон……. 57
5.2.3. Захист від шуму, вібрації та нормалізація освітлення…… 58
5.3. Пожежна безпека……. 58
5.3.1. Системи автоматичного виявлення та гасіння пожеж…… 59
5.3.2. Первинні засоби та шляхи евакуації……. 59
5.4. Оцінка впливу на навколишнє середовище (ОВНС)…… 59
5.4.1. Вплив на атмосферне повітря…… 60
5.4.2. Вплив на гідросферу…….. 60
5.4.3. Вплив на літосферу та утворення відходів…….. 60
5.5. Заходи з мінімізації екологічного впливу……. 61
5.5.1. Очищення атмосферних викидів…….. 61
5.5.2. Раціональне поводження з відсівом (гумусом)…… 61
РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ…….. 63
6.1. Визначення витрат на створення комплексу……. 63
6.2. Аналітичне обґрунтування структури капіталу…… 66
6.3. Розрахунок експлуатаційних витрат…….. 66
6.4. Оцінка економічної ефективності та окупності…… 67
6.4.1. Формування дохідної частини підприємства……... 67
6.4.2. Розрахунок показників прибутковості підприємства……. 68
6.4.3. Розрахунок терміну окупності проєкту…… 69
6.4.4. Аналіз чутливості проєкту (Стрес-тест економічної моделі) 70
ВИСНОВКИ…… 71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 73
ДОДАТКИ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра, тема якої: “РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОМПЛЕКСУ СОРТУВАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ” складається з шести (6) розділів, що розміщені на семидесяти семи (77) сторінках друкованого тексту, тринадцяти (13) таблиць, висновків, тридцяти дев’яти (39) літературних джерел і додатків до графічної частини.

В першому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено аналіз систем сортування побутових відходів. Наведена характеристика побутових відходів та їх класифікація. Проведено огляд сучасних технологій сортування відходів та сучасних сортувальних комплексів.

В другому розділі роботи проведено обґрунтування та розробка конструкції комплексу.

В третьому розділі роботи проведено розрахунок продуктивності комплексу, розрахунок параметрів транспортувальних систем, вибір та розрахунок приводів транспортувальних систем, розрахунок міцності основних елементів конструкції сита та проведено моделювання роботи і наведено алгоритм керування комплексом.

В четвертому розділі проведено вибір засобів автоматизації. Розроблено алгоритм роботи комплексу. Проведено вибір датчиків і виконавчих механізмів.

В п’ятому розділі розглянуто питання щодо охорони праці та екологічної безпеки.

В шостому розділі наведено економічне обґрунтування проєкту.

Ключові слова: сортування, побутові відходи, комплекс, автоматизація, масовий баланс переробка.

ВСТУП

Проблема накопичення побутових відходів на полігонах та стихійних звалищах в України вимагає радикальних інженерних рішень, що виходять за межі простого захоронення. У сучасній світовій практиці особливої актуальності набуває концепція landfill mining — рекультивації існуючих тіл полігонів із вилученням злежаного матеріалу для його подальшого корисного використання [5,18]. Головним завданням при цьому є вилучення горючої фракції та її часткова переробка у тверде відновлюване паливо (RDF) низької якості для потреб енергоємних галузей промисловості (зокрема, цементної індустрії) [5,18].

Проте реалізація цього процесу стикається з серйозними машинобудівними та технологічними викликами. Злежане звалищне сміття є суцільною, сильно забрудненою, вологою та гомогенізованою масою, де корисні компоненти вкриті шаром ґрунту, глини та фільтрату. Застосування в таких умовах високотехнологічних оптичних (NIR) сепараторів або систем штучного інтелекту є технічно неефективним через суцільне поверхневе забруднення матеріалу (ефект «чорного тіла»). Будь-які прецизійні хімічні лінії переробки чи екструзії також нездатні працювати через екстремальний рівень пилового та бактеріологічного забруднення.

За таких обставин центральним і визначальним етапом стає грубе механічне сортування. Надійність усього комплексу залежить від стійкості його механічної частини до ударних та абразивних навантажень. Проєктування та розрахунок просторово-кінематичних параметрів важкого обладнання (комбінованих барабанних грохотів із функцією деагломерації, аеродинамічних сепараторів та потужних транспортувальних систем) є актуальним і практично значущим інженерним завданням у галузі галузевого машинобудування.

Метою дипломної роботи є розробка та інженерне обґрунтування

конструкції комплексу грубого сортування злежаних побутових відходів в умовах полігонів із розрахунком параметрів механічного фракціонування та тягових характеристик конвеєрних систем для отримання низькоякісного RDF-палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Проаналізувати специфіку морфологічного складу та фізико-механічних властивостей злежаного сміття (насипну щільність, вологість, коефіцієнти тертя, гранулометрію конгломератів) як вихідних даних для проєктування механізмів.

2. Розробити просторово-компонувальну та кінематичну схему комплексу, виключивши оптичні вузли та зосередившись на важкій механічній, магнітній та аеродинамічній сепарації.

3. Виконати інженерний кінематичний розрахунок комбінованого барабанного грохота (троммеля) з обґрунтуванням його геометричних параметрів та робочої швидкості для забезпечення каскадного режиму руйнування конгломератів.

4. Провести обов’язковий тяговий розрахунок головних стрічкових конвеєрів методом обходу за контуром з урахуванням підвищеного абразивного опору та пікових дискретних навантажень.

5. Обґрунтувати вибір енергоефективних приводів, редукторів та допоміжного механічного обладнання комплексу (шредерів, прес-пакувальників).

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні надійної конструкторської бази для будівництва мобільних або стаціонарних комплексів рекультивації полігонів. Розраховані параметри та запропоновані машинобудівні рішення дозволять забезпечити стабільну роботу ліній в агресивному експлуатаційному середовищі, мінімізувати аварійні зупинки через затори вологої маси та оптимізувати енерговитрати на первинне вилучення горючої фракції.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ СОРТУВАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

1.1. Характеристика побутових відходів та їх класифікація.

Побутові відходи - це сукупність матеріалів і предметів, що утворюються в процесі життєдіяльності населення, промисловості та сфери обслуговування [1]. В Україні щорічно утворюється понад 10 млн тон побутових відходів, з яких близько 94% захороняється на полігонах або стихійних звалищах [2,3]. Класифікація відходів здійснюється за морфологічним складом, фізико-хімічними властивостями та рівнем небезпеки для довкілля [1,4].

Основна проблема в Україні з сортуванням і переробкою побутових відходів - це екстремальна висока вологість та вміст органіки (близько 40-44%) [17,20], яка діє як в'яжучий агент. Це напряму впливає на працездатність обладнання шляхом налипання абразивного матеріалу (скло, пісок, мінеральний відсів) на робочі органи механізмів, що викликає їх інтенсивне зношування та ускладнює подальшу балістичну і оптичну сепарацію.

1.1.1. Види та морфологічний склад побутових відходів

Морфологічний склад побутових відходів на території України має специфічні відмінності, що безпосередньо впливають на кінематику та міцність сортувального обладнання. Згідно з актуальними дослідженнями, українські відходи характеризуються екстремальною високою часткою вологої органічної речовини, яка становить від 35% до 44% від загальної маси [17]. Інші компоненти розподіляються орієнтовно так: пластик (9–13%), скло та кераміка (8–16%), папір та картон (6–15%), метали (1,2–2%), а також значна частка

мінерального відсіву та будівельних залишків (до 15–20% в умовах відбудови).

З точки зору механіки твердого тіла, висока вологість органіки (кухонні залишки) діє як в'яжучий агент. Під час пресування у сміттєвозах волога вивільняється, просочуючи картон і налипаючи на полімери. Це утворює щільні конгломерати, де абразивні матеріали (скло, пісок) прилипають до інших фракцій, що кардинально змінює їхні балістичні властивості та спричиняє інтенсивне абразивне зношування механізмів та їх компонентів. Саме тому першим етапом механічної обробки має бути інтенсивне барабанне грохочення для відділення цієї в'язкої маси.

1.1.2. Вплив небезпечних відходів на працездатність обладнання та якість продукції

Відповідно до законодавства, відходи поділяються на класи небезпеки [1], однак для проєктування сортувального комплексу найбільше значення має їхній деструктивний вплив на технологічний ланцюг. Небезпечні компоненти (батарейки, акумулятори, залишки лакофарбових матеріалів) часто потрапляють у загальний потік побутових відходів.

Присутність небезпечних компонентів створює два критичні ризики:

Хімічна корозія та псування RDF-палива: Потрапляння небезпечних пластиків (зокрема полівінілхлориду - ПВХ) у фракцію для виробництва твердого відновлюваного палива (RDF) є недопустимим [5]. Під час термічної утилізації ПВХ утворює соляну кислоту, що викликає катастрофічну корозію вогнетривкої футеровки печей та металевих деталей.

Забруднення землі: Важкі метали з батарейок (свинець, кадмій), що розчавлюються під час механічного сортування, потрапляють у дрібну органічну фракцію, роблячи її небезпечною для повторного захоронення на полігонах.

Для нівелювання цих факторів конструкція комплексу повинна передбачати встановлення інтелектуальних оптичних сканерів на фінальних

етапах лінії, а також локальні аспіраційні системи для захисту персоналу від токсичного пилу.

1.2. Огляд сучасних технологій сортування відходів

Сучасні технологічні процеси сортування побутових відходів включають механічне, ручне, магнітне, вихрострумове, аеродинамічне, балістичне та оптичне розділення. Ручне сортування здійснюється на конвеєрних стрічках, де працівники візуально відбирають великі фракції або цільові матеріали (PET, картон).

Механічне грохочення - це процес розділення відходів за розміром за допомогою барабанних сепараторів (троммелів) чи вібросит, що дозволяє відокремити дрібну органіку для подальшої біологічної обробки.

Магнітна сепарація передбачає встановлення підвісних магнітів або магнітних шківів на конвеєрах для автоматичного вилучення чорних металів. Вихрострумова сепарація створює змінне магнітне поле, яке "відстрілює" кольорові метали з потоку відходів.

Аеродинамічна сепарація використовує потік повітря для відділення легких фракцій (плівка, папір) від важких (каміння, пластикова тара, скло).

Оптична сепарація (NIR): Принцип роботи інфрачервоних датчиків полягає у скануванні потоку відходів за допомогою ближнього інфрачервоного спектру. Датчик розпізнає тип полімеру (наприклад, PET, HDPE) за характерною спектральною відбивною здатністю матеріалу. Після ідентифікації система керує пневматичними форсунками, які видувають потрібний пластик із загального потоку у відповідний контейнер. Серед провідних виробників обладнання для оптичної сепарації - TOMRA, Pellenc ST, STEINERT [24], а в Україні такі системи встановлені на сортувальних лініях підприємств «Україна ЕКО», «Грін Еко», та на вітчизняних промислових фотосепараторів від фірми «Продекологія» у Києві. Ефективність таких систем дозволяє досягати чистоти відсортованого полімеру понад 92%.

Балістична сепарація застосовує похилі вібруючі поверхні для розділення об’ємних (пляшки, банки) і плоских (картон, плівка) предметів [22].

1.3. Аналіз існуючих сортувальних комплексів

Сучасна парадигма поводження з побутовими відходами базується на переході до циклічної економіки, де сортувальний комплекс є центральним вузлом технологічного ланцюга. Для розробки ефективної конструкції комплексу необхідно розмежувати типи систем за рівнем автоматизації та реальною продуктивністю.

1.3.1. Технологічна класифікація та показники ефективності

Історично галузь поділяється на три типи комплексів. Проте важливо розрізняти «технічну чистоту фракції» та «реальну частку вилучення» з загальної маси змішаних побутових відходів. Порівняльна характеристика сортувальних комплексів (дані 2024–2026 рр.):

Таблиця. 1.1.

Середньостатистичним показник сучасних сміттєсортувальних комплексів

Тип комплексу	**Продуктивність (т/добу)**	**Вилучення**	**Вилучення (роздільний збір)**	**Чистота фракції**
Ручний	20–40	5–12%	25–40%	70–82%
Напівавтоматизований	70–150	15–25%	50–70%	85–92%
Автоматизований (NIR/AI)	200–400+	45–55% (з RDF)	80–95%	95–98%

1.3.2. Світовий досвід

Технологічні еталони та енергоефективність. Для проєктування конструкції важливо орієнтуватися на успішні кейси модернізації:

1. Центр Лас-Дехесас (Мадрид, Іспанія): Входить до складу Технологічного парку Вальдемінгомес. Об'єкт використовує каскадну сепарацію (блоки AUTOSORT), де чистота вилучених фракцій PET та HDPE на окремих оптичних сепараторів перевищує 95%, що відповідає регламентам ЄС [4]. Продуктивність лінії змішаних відходів сягає 408 000 тон на рік.

2. Southern Nevada Recycling Center (Лас-Вегас, США): Кейс Republic Services демонструє боротьбу з «ефектом Amazon», що створив різке зростання кількості картону в потоці. Для інженера-конструктора цей кейс показовий тим, як вирішується проблема перевантаження шляхом:

Швидкодія механізмів: Оптичні сепаратори MSS FiberMax сортують папір у 40 разів швидше за людей, що вимагає розрахунку високошвидкісних розгінних конвеєрів (зі швидкістю стрічки до 2,5-3,0 м/с) для правильного дистанціювання матеріалу перед скануванням.

1.3.3. Аналіз українських реалій (станом на 2026 рік)

Впровадження європейських стандартів в Україні стикається з серйозними юридичними та економічними викликами, які необхідно враховувати при розрахунку життєздатності конструкції:

Львівський сміттєпереробний завод: Попри 85% готовності, 23 березня 2026 року місто оголосило про розірвання контракту з генпідрядником Control Process S.A. [37]. Основні причини - відсутність підключення зовнішніх мереж та заборгованість у 70 млн грн, що відкладає запуск на невизначений термін.

Житомирський МСЗ: Станом на березень 2026 року перебуває під загрозою закриття (з 1 липня 2026 року) через «тарифну пастку» [38]. Хоча завод досяг 45% глибини переробки завдяки лініям компостування, встановлені

тарифи не покривають зростання вартості електроенергії та підвищення зарплат у промисловості до 31 тис. грн.

При розробці конструкції сортувального комплексу необхідно закладати наступні параметри:

Економічна стійкість: Враховувати щорічне зростання тарифів на електроенергію на 10–20% (прогноз НКРЕКП на 2026 рік) та необхідність інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Механіко-біологічне оброблення (МБО): Орієнтуватися на вилучення металів, скла та виробництво RDF, оскільки ці фракції мають стабільний ринок збуту.

1.4. Проблеми та перспективи розвитку систем сортування

1.4.1. Ключові проблеми галузі

Енергетична вразливість та тарифний тиск:

Вартість енергії стала визначальним фактором собівартості. Якщо у 2024 році тариф на передачу електроенергії становив ~528 грн/МВт-год, то станом на 2025 рік він зріс до 686,23 грн/МВт-год, а прогноз на 2026 рік передбачає підвищення до 742,91 грн/МВт-год [39]. Це створює критичне навантаження на великі автоматизовані лінії потужністю понад 110 кВт.

Хімічна крос-контамінація при ручному сортуванні:

Людина не здатна візуально розрізнити полімери PET та PVC. Попадання PVC у потік PET при нагріванні до $270°C$ викликає виділення хлороводню (HCl), що руйнує полімерні ланцюги та викликає корозію обладнання.

Логістична неефективність:

Транспортування тюкованої сировини на відстані понад 200–300 км є економічно недоцільним через її низьку щільність. Без цехів глибокої переробки на місці підприємства залишаються лише «пунктами перевалки» з низькою маржинальністю.Забруднення біовідходами: Відсутність сепарації

органіки на ранніх етапах унеможливлює рециклінг паперу. Додатково виникає проблема впровадження цеху глибокої переробки – це є високі вимоги до розміщення, комунікації та екологічної безпеки.

1.4.2. Перспективи та інноваційні шляхи розвитку

Для досягнення встановленої державою цілі щодо рециклінгу 10% від маси відходів до 2025 року [3], необхідне впровадження наступних технологій:

Технологічна модернізація та Штучний Інтелект (AI) Впровадження роботизованих систем (наприклад, ZenRobotics) дозволяє досягти чистоти фракцій до 98–99%. Такі системи мають продуктивність до 2300 піків/год і здатні ідентифікувати об’єкти вагою до 40 кг. Для ідентифікації використовується NIR-спектроскопія (ближній інфрачервоний діапазон) на довжинах хвиль 1600–1800 нм.

Перехід на енергоефективні електродвигуни класів IE4 та IE5. Впровадження частотних перетворювачів (VFD) із тензодатчиками на конвеєрах (для автоматичного зниження швидкості стрічки, коли сміття подається менше).Просторове компонування траси конвеєрів для мінімізації кутів підйому та максимального використання безкоштовного гравітаційного пересипання матеріалу по тічках.

РОЗДІЛ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ КОМПЛЕКСУ

2.1. Формування технічного завдання

Метою проєктування є розробка механічної частини комплексу грубого сортування для реалізації технології *landfill mining* — видобутку та первинної переробки злежаних побутових відходів з існуючих полігонів[17,21]. Враховуючи агресивність середовища та специфіку матеріалу, технічне завдання фокусується виключно на фізико-механічному фракціонуванні потоку, підготовці вторинної горючої фракції (RDF-палива) та вилученні інертного ґрунтоподібного баласту.

2.1.1. Вихідні фізико-механічні характеристики злежаних ТПВ

Для виконання кінематичних та тягових розрахунків обладнання встановлено базові фізико-механічні властивості вхідного матеріалу. Злежане полігонне сміття кардинально відрізняється від свіжих побутових відходів: воно має високу щільність, значну вологість та високу концентрацію абразивного ґрунтоподібного баласту. Відповідні розрахункові параметри, які є базисом для конструювання, наведено в Таблиці 2.1 [6,9].

Таблиця 2.1.

Розрахункові фізико-механічні властивості злежаних побутових відходів (полігонна маса)

Параметр	Значення	Інженерне значення для проєктування
Середня насипна щільність (ρ)	850 – 1100 кг/м³	Визначає екстремальні масові навантаження на стрічкові конвеєри та потребу в потужних приводах.

Продовження таблиці 2.1.

Параметр	Значення	Інженерне значення для проєктування
Вологість матеріалу (W)	35 – 45 %	Створює ефект липкості (когезії), що унеможливлює використання дрібних сит віброгрохотів (забивання вічок).
Кут природного укосу у спокої (α)	38° – 45°	Визначає мінімально допустимі кути нахилу стінок приймальних бункерів та тічок для запобігання «зависанню» маси.
Коефіцієнт тертя ковзання по гумі (f1)	0,65 – 0,75	Використовується у тяговому розрахунку конвеєра для визначення опору на роликоопорах і вибору тягового зусилля.
Коефіцієнт тертя ковзання по сталі (f2)	0,55 – 0,65	Враховується при розрахунку місцевих опорів тертя об борти лотків та бункерів (високий ризик заторів).
Абразивність (вміст піску/скла)	15 – 25 %	Вимагає використання зносостійкої сталі (типу Hardox) для зубів троммеля та ножів шредерів.

2.1.2. Гранулометричний склад матеріалу та масовий баланс

Аналіз полігонних мас свідчить про глибоку зміну розмірів частинок через процеси анаеробного розпаду. Для розрахунку пропускної здатності барабанного грохота (троммеля) прийнято наступний розрахунковий гранулометричний склад:

1. Дрібна фракція (< 60 мм) – до 50-60% маси. Це перегній, ґрунт, пісок та склобій (Soil-like material). Має бути негайно відсіяна в першій секції троммеля для запобігання абразивному зношуванню наступних механізмів. Використовується як технічний рекультивант.

2. Середня фракція (60 – 200 мм) – 30-35% маси. Основна горюча фракція (забруднений пластик, текстиль, шкіра, дерево), яка після

аеродинамічної сепарації та магнітного відбору спрямовується на подрібнення (шредери) для виготовлення низькоякісного RDF-палива.

3. Велика фракція (> 200 мм) – 10-15% маси. Великогабаритні плівки, шини, фрагменти меблів. Потребує використання важкого первинного шредера-розривача перед подачею на основну лінію.

2.1.3. Продуктивність та режим роботи комплексу

Базовим параметром для проєктування кінематичних та транспортних систем комплексу є його теоретична річна пропускна здатність. З огляду на необхідність переробки значних масивів злежаних відходів, технічним завданням встановлено наступні показники:

- Номінальна річна продуктивність ($Q_{\text{рік}}$): 100 000 тонн/рік.
- Режим роботи підприємства: Двозмінний (по 8 годин кожна зміна). З урахуванням часу на щозмінне технічне обслуговування (очищення стрічок, змащування підшипникових вузлів, що є критично важливим при роботі з абразивним матеріалом), ефективний добовий фонд робочого часу ($t_{\text{доб}}$) приймається рівним 14 годин.
- Річний фонд робочого часу: Комплекс працює 260 днів на рік ($D_{\text{рік}}$), решта часу відводиться на планово-попереджувальні ремонти (ППР) важкого обладнання (шредерів та троммелів).

На основі цих даних визначається номінальна годинна продуктивність ($Q_{\text{год}}$), яка слугує базою для розрахунку масового балансу потоків:

$$Q_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{рік}}}{D_{\text{рік}} \cdot t_{\text{доб}}} \quad (1)$$

При підстановці значень отримуємо середню номінальну продуктивність на рівні 27,5 т/год.

Розрахункове (максимальне) навантаження для проєктування обладнання:

Оскільки живлення приймального бункера здійснюється грейферним краном або фронтальним навантажувачем, вантажопотік має дискретний

(пульсуючий) характер. Для того, щоб приводи конвеєрів та барабанного грохота не зупинялися від перевантаження у моменти скидання великих порцій сміття, тяговий розрахунок транспортувальних систем має виконуватися не за номінальною, а за максимальною (піковою) продуктивністю (Q_{max}).

Для цього вводиться коефіцієнт нерівномірності вантажопотоку ($K_{\text{нер}}$), який для злежаних ТПВ приймається рівним 1,5.

$$Q_{max} = Q_{\text{год}} \cdot K_{\text{нер}} = 27{,}5 \cdot 1{,}5 = 41{,}25 \text{ т/год} \quad (2)$$

Саме показник 41,25 т/год буде використовуватися як вихідний параметр у Розділі 3 для визначення погонної маси вантажу на стрічкових конвеєрах, вибору ширини стрічки та розрахунку потужності приводних станцій.

2.2. Вибір технологічної схеми сортування та переробки

На основі сформованого технічного завдання обрано схему автоматизованого сміттєсортувального комплексу (АСК). Це інтегроване рішення поєднує механічну сепарацію та виробництва твердого палива (RDF) низької якості. Схема відповідає Національному плану управління відходами до 2033 року, забезпечуючи підготовку до рециклінгу на рівні понад 35% [3].

2.2.1. Етап механічної підготовки та фракціонування

Для оптимізації капітальних витрат та просторового компонування комплексу етапи розкриття пакетів та первинного механічного просіювання об'єднано в одному агрегаті - комбінованому барабанному грохоті (троммелі) з функцією розривання пакетів. Це класичне машинобудівне рішення, яке дозволяє ефективно підготувати злежані відходи до подальшої сепарації.

Технологічно та кінематично агрегат розділений на дві функціональні ділянки:

1. Глуха секція (Зона розривання): Неперфорована початкова частина барабана з ножами або зубами-розірвачами на внутрішній поверхні. Її

обертання створює каскадний рух матеріалу, завдяки чому пакети розкриваються, а злежане сміття деагломерується без значного руйнування крихких компонентів, зокрема скла.

Робоча швидкість цієї секції визначається розрахунком як 25–50% критичної кутової швидкості барабана, щоб забезпечити правильний режим падіння матеріалу[16]. Водночас частина скла неминуче розбивається ще у сміттєвозах, тому перед біологічним етапом потрібна гідромеханічна сепарація інертних домішок.

2. Секція грохочення (Зона просіювання): Перфорована частина барабана здійснює фізичний розподіл потоку на стандартизовані фракції:

- 80 мм (Підрешітна дрібна фракція): Концентрує в'язку біорозкладну органіку, пісок та дрібне скло. Використання отворів сита саме на рівні 60–80 мм є критично важливою вимогою для українських відходів, оскільки габаритна органіка (харчові залишки, овочі) не здатна пройти крізь менші отвори (40–50 мм). Нерозділена органіка перетворюватиметься на липкий слиз під час подальшого руху барабаном, що неминуче забруднить усю вторинну сировину.
- 80–300 мм (Середня фракція): Основний потік цінних об'ємних 3D-компонентів (пластикові пляшки, ціле скло, бляшанки) та плоских 2D-матеріалів (папір, плівки). Цей потік направляється на подальшу лінію магнітної, балістичної та автоматизованої оптичної сепарації.
- >300 мм (Надрешітна велика фракція): Великогабаритні плівки, картон та інші об'єкти, що виходять з торця барабана і потребують первинного шредерування (подрібнення) перед подальшою обробкою.

2.2.2. Автоматизована та фізична сепарація

- Магнітний сепаратор: Вилучає феромагнітні метали (чорний брухт) з ефективністю 98–99%.
- Вихрострумовий сепаратор: Встановлюється для вилучення кольорових

металів (алюміній, мідь) шляхом створення індукованих струмів.

- Повітряний сепаратор: Розділяє матеріали за допомогою їхньої вагою та парусністю. Потік відходів продувається потужним струменем повітря. Важкі матеріали (каміння, товстий пластик, шматки дерева) падають вниз, а легка 2D-фракція (плівка, папір, картон, текстиль) здувається у спеціальну камеру. Саме ця легка фракція і формує основу низькоякісного RDF.
- Прес-пакувальник: Пресування готового пухкого палива в щільні тюки.

Переваги та екологічна ефективність

- Скорочення захоронення відходів: частка відходів, що спрямовуються на полігон, зменшується до 10–15%, що відповідає цілям Директиви ЄС на 2035 рік [4].

2.3. Загальна просторово-кінематична структура комплексу

Проєктне рішення комплексу базується на принципах галузевого машинобудування, де головним критерієм ефективності є оптимізація просторового компонування та раціональне управління потоками мас в умовах екстремальних навантажень

Просторово-компонувальне рішення та потоки мас Траса транспортування спроєктована з мінімальними кутами підйому конвеєрів і максимальним використанням гравітаційного пересипання. Особливу увагу приділено тічкам і пересипним бункерам, де виникає понад 90% заторів вологого та в’язкого сміття, тому їхні радіуси переходів і кути нахилу перевищують кут тертя матеріалу по сталі. Для зниження енергоспоживання застосовано циліндро-конічні редуктори, двигуни класів IE4/IE5 та частотні перетворювачі для регулювання швидкості конвеєрів залежно від навантаження.

2. Зона приймання та попереднього механічного оброблення

Живлення лінії: Подача змішаного матеріалу здійснюється грейферним краном. Оскільки така подача має яскраво виражений пульсуючий, дискретний характер, конвеєрне обладнання приймальної зони розраховане на максимальну

пікову подачу з обов'язковим урахуванням коефіцієнта нерівномірності вантажопотоку. Це запобігає перевантаженню та зупинці приводів.

Комбінований барабанний грохот (Троммель): Виконує каскадне розривання пакетів та відсів дрібної органіки крізь вічка 60–80 мм. Швидкість обертання барабана не призначається довільно; вона буде розрахована в конструкторській частині як функція від діаметра (25–50% від критичної кутової швидкості) для забезпечення правильної траєкторії падіння матеріалу.

3. Зона механічної та високотехнологічної сепарації Послідовність обладнання на цій ділянці строго підпорядкована законам кінематики та аеродинаміки твердих тіл:

Металосепарація: Потік проходить через підвісні магнітні системи (чорний брухт) та сепаратори вихрових струмів (кольорові метали).

Аеродинамічний (повітряний) сепаратор: Встановлюється для фракціонування матеріалу за допомогою різниці маси та парусності (аеродинамічного опору). Потік відходів продувається потужним поперечним струменем повітря. Важкі матеріали (каміння, товстий пластик, шматки дерева) під дією гравітації падають вниз на основний конвеєр, тоді як легка 2D-фракція (плівка, папір, картон, текстиль) здувається у спеціальну осадову камеру. Саме ця відібрана легка фракція спрямовується до Енергоблоку і формує основу низькоякісного RDF-палива.

Балістична сепарація: Встановлюється після повітряного сепаратора для обробки важкої фракції. Дека з кутом нахилу 12°–18° та кривошипно-шатунним механізмом фізично розділяє потік на жорсткі 3D-предмети (які підстрибують і скочуються вниз) та залишкові плоскі 2D-матеріали (які транспортуються вгору).

4. Зона компактування (тюкування) Процеси прецизійної флотації та гарячої хімічної екструзії полімерів повністю виключені з просторової схеми через високу запиленість середовища та загрозу руйнування шнеків екструдерів. Завершальним етапом сортування є автоматичні горизонтальні гідравлічні канальні преси, що виконують пресування відібраного картону та полімерів у

щільні тюки.

2.4. Вибір основного обладнання (конвеєри, сепаратори, преси)

Ефективність функціонування комплексу базується на правильному підборі кінематичних, тягових та міцнісних параметрів обладнання, що працюватиме в умовах екстремальних абразивних та ударних навантажень.

2.4.1. Транспортувальне обладнання (Стрічкові конвеєри)

Стрічкові конвеєри становлять до 70% всього обладнання сортувального заводу за масою та кількістю приводів. Їхня безперебійна робота є критичною для всього технологічного ланцюга. Для вибору приводів головних стрічкових конвеєрів у розрахунково-конструкторській частині роботи буде виконано обов'язковий тяговий розрахунок методом обходу контуром [10,11]. Будуть визначені лінійна щільність транспортованого сміття, розподілена маса стрічки та роликових упор, а також сили опору руху стрічки на вантажній та порожній гілках. Для мінімізації енергоспоживання приводи оснащуватимуться частотними перетворювачами (VFD) із тензодатчиками для регулювання швидкості стрічки залежно від навантаження.

2.4.2. Обладнання механічної та високотехнологічної сепарації

- Комбінований барабанний грохот (Троммель): Швидкість обертання цього механізму не може призначатися довільно. Для забезпечення оптимального каскадного режиму розривання пакетів та просіювання сміття робоча частота обертання буде розрахована як частка (25–50%) від критичної кутової швидкості барабана.
- Повітряний (аеродинамічний) сепаратор: Встановлюється для первинного розділення матеріалів за вагою та парусністю. Обладнання

продуває потік відходів поперечним струменем повітря, де легка 2D-фракція (плівка, папір) здувається в осадову камеру для RDF-палива, а важка (каміння, товстий пластик) падає на основний конвеєр.

- Балістичний сепаратор: Робочий орган сепаратора є складною динамічною системою. Його кінематичні параметри (амплітуда та частота обертання ексцентриків кривошипно-шатунного механізму) будуть розраховані для забезпечення правильної траєкторії балістичного польоту (підстрибування) об'ємних 3D-предметів та зворотного транспортування плоских 2D-матеріалів на деці з кутом нахилу 12°–18°.

2.4.3. Лінія компактування (тюкування) вторинної сировини.

Враховуючи екстремальний рівень пилового та бактеріологічного забруднення комплексу, впровадження прецизійних ліній гарячої хімічної мийки та екструзії полімерів є технічно неможливим через загрозу швидкого абразивного зносу шнекових пар. Замість цього завершальним етапом підготовки вторинної сировини (ПЕТ, ПНТ, картону) є застосування автоматичних горизонтальних гідравлічних канальних пресів.

2.4.4. Обладнання лінії RDF

- Лінія підготовки RDF: Включає промислові шредери для агресивного подрібнення горючої фракції та низькотемпературні стрічкові сушарки (LTBD). Сушіння матеріалу здійснюється завдяки використанню скидного тепла від газопоршневих когенераторів (75–90°C), що дозволяє радикально знизити вологість (до <15%) та підвищити калорійність палива без додаткових енергозатрат [18].

2.5. Опис принципу роботи комплексу

В основі роботи комплексу лежить технологія грубого сортування побутових відходів, яка концептуально адаптована до морфології українських відходів. Згідно з дослідженнями 2024 року, вітчизняне сміття характеризується надзвичайно високою часткою вологої органічної речовини - в середньому близько 44%. Технологічний процес вилучення ресурсів розділений на чотири послідовні інтегровані етапи.

Етап 1: Приймання відходів та первинна гомогенізація

1. Контроль та безпека: Сміттєвози проходять автоматичний ваговий комплекс для обліку масового балансу та портали радіаційного моніторингу для виявлення небезпечних медичних чи промислових відходів до їх вивантаження.

2. Розвантаження та аспірація: Відходи скидаються у приймальний бункер. приймальний бункер Відповідно до європейських вимог BAT-AELs, зона обладнана потужною системою аспірації, що створює негативний тиск і направляє забруднене леткими сполуками повітря на біофільтри.

3. Подача: Важкий грейферний кран здійснює первинну гомогенізацію (змішування сухих і вологих партій сміття) і дозує матеріал на сталевий пластинчатий живильник. Пластинчасті конвеєри використовуються спеціально для того, щоб витримувати колосальні ударні навантаження й також виконує функцію згладжування пульсуючого вантажопотоку, перетворюючи його на рівномірний потік для наступних конвеєрів від падіння злежаного сміття.

Етап 2: Комбіноване подрібнення та фракційне калібрування

Центральним елементом етапу є комбінований барабан-розривач (троммель).

1. Зона розривання: У глухій секції барабана обертання створює каскадний рух матеріалу (ефект галтовки), що розриває пакети з мінімальним пошкодження цілісності більшості скляної та пластикової тари.

2. Перший ступінь фільтрації (Підрешітна фракція 80 мм): З огляду на те, що українська харчова органіка часто має розміри понад 50 мм, розмір вічка барабана збільшено до 80 мм. Це дозволяє ефективно відсіяти вологу органіку, пісок та склобій, запобігаючи перетиранню органіки у слиз, який інакше забруднював би вторинну сировину та блокував оптичні сканери на наступних етапах.

3. Другий ступінь (Середня фракція 80–300 мм): Концентрує основну масу цінних 3D (пляшки) та 2D (папір, плівки) компонентів.

4. Надрешітна фракція (>300 мм): Великогабаритний картон та плівки виходять з торця барабана і направляються на первинний шредер.

Етап 3: Автоматизоване сортування корисних компонентів

1. Металосепарація: Потік проходить підвісні магніти (вилучення чорних металів) та вихрострумові сепаратори (вилучення алюмінієвих банок).

2. Балістична сепарація: Система ексцентрикових лопатей розділяє потік на жорсткі об'ємні 3D-предмети (ПЕТ-пляшки, флакони), які скочуються вниз, та гнучкі плоскі 2D-матеріали (плівки, папір), що повзуть вгору.

3. Контроль якості: Фінальний пост ручного або роботизованого контролю.

Етап 4: Виробництво RDF-палива

1. Виготовлення RDF-палива: Неліквідні горючі залишки подрібнюються для цементних заводів. Оскільки заводи вимагають RDF класу 3 або 4 з нижчою теплотою згоряння 17–19 МДж/кг і жорстким лімітом хлору (<1.0%) [5].

2. Захоронення: Близько 15–20% маси відправляється на полігон, за умови повної та успішної реалізації виробленого якісного RDF-палива.

Напрямки модернізації комплексу (Індустрія 4.0) Інтеграція ШІ (Deep Learning): Сучасний софт розпізнає не лише хімічний склад матеріалу, а і його просторову форму (дизайн пляшки), що дозволяє відокремити цільовий пластик навіть якщо він частково забруднений

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Розрахунок продуктивності комплексу

Розрахунково-конструкторська частина є ключовим етапом проєктування комплексу, оскільки вона визначає технологічну спроможність лінії, геометричні параметри обладнання та енергетичні витрати на процес сепарації. Основним завданням цього підрозділу є узгодження продуктивності всіх послідовних ланок сортувального ланцюга для забезпечення безперебійної переробки 100 000 тонн злежених побутових відходів на рік.

3.1.1. Розрахунок теоретичної та фактичної продуктивності комбінованого барабанного сита з розривачем

Комбіноване барабанне сито з інтегрованою секцією розривання пакетів є головною технологічною одиницею комплексу, яка задає темп роботи всієї лінії. Оскільки комплекс переробляє вологі, щільні та злежені полігонні відходи, розрахунок геометрії барабана виконується із закладанням конструктивного запасу для запобігання заторам матеріалу.

Вихідні параметри для розрахунку теоретичної продуктивності сита:

- Внутрішній діаметр барабана, $D = 2.5$ м;
- Частота обертання барабана, $n = 12$ об/хв;
- Кут нахилу барабана до горизонту, $\alpha = 3°$ (в залежності від пори року кут буде мінятися до 5-7 гпадусів);
- Коефіцієнт заповнення барабана матеріалом, $\phi = 0.2$ (20% від поперечного перерізу);
- Насипна щільність злежених відходів, $\rho = 0.35$ т/м³.

Теоретична об'ємна продуктивність барабанного сита (Q_v , м³/год) визначається за формулою, що враховує площу живого перерізу потоку та швидкість його осьового переміщення [9,14]:

$$Q_v = 3600 \cdot F \cdot \phi \cdot v_{\text{осьова}} \quad (3)$$

де F - площа поперечного перерізу барабана, м², $v_{\text{осьова}}$ - швидкість повздовжнього (осьового) руху відходів всередині барабана під дією сили тяжіння та нахилу корпусу, м/с:

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3.14 \cdot 2.5^2}{4} \approx 4.91 \text{ м}^2 \quad (4)$$

$$v_{\text{осьова}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n \cdot \tan(\alpha)}{60} = \frac{3.14 \cdot 2.5 \cdot 12 \cdot \tan(3°)}{60} = \frac{94.2 \cdot 0.0524}{60} \approx 0.082 \text{ м/с} \quad (5)$$

Підставляємо значення у базову формулу об'ємної продуктивності:

$$Q_v = 3600 \cdot 4.91 \cdot 0.2 \cdot 0.082 \approx 290 \text{ м}^3/\text{год} \quad (6)$$

Для переходу до масової теоретичної продуктивності (Q_m , т/год) використовуємо значення насипної щільності сировини:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = 290 \cdot 0.35 \approx 101.5 \text{ т/год} \quad (7)$$

Обґрунтування невідповідності теоретичної та фактичної продуктивності:

Номінальна (фактична) годинна продуктивність комплексу, необхідна для освоєння річної програми у 100 000 тонн при двозмінному режимі роботи (16 годин на добу, 250 робочих днів на рік), становить:

$$Q_{\text{факт}} = \frac{100000}{250 \cdot 16 \cdot 0.8} \approx 31.25 \text{ т/год} \quad (8)$$

(де 0.8 — коефіцієнт використання робочого часу лінії).

Отримане розрахункове значення теоретичної продуктивності барабана ($Q_m = 101.5$ т/год) перевищує фактичну потребу лінії ($Q_{\text{факт}} \approx 31.25$ т/год) більш ніж у 3 рази. Такий високий показник теоретичної продуктивності є обґрунтованим конструктивним рішенням для ліній грубого механічного сортування. Злежене полігонне сміття надходить на лінію нерівномірно (порціями з бункера-живильника), має властивість злипатися у великі конгломерати та містить велику кількість довгомірних полімерних плівок. Трикратний запас гарантує, що навіть при пікових короткочасних

навантаженнях або високій вологості матеріалу барабан не переповниться, а коефіцієнт заповнення не перевищить критичну межу, за якої розривач пакетів втрачає ефективність.

3.1.2. Вибір та технічні характеристики супутнього сортувального обладнання

Відповідно до розрахованої фактичної робочої продуктивності комплексу (30–35 т/год) та з урахуванням специфіки розділення відходів після барабанного сита (де потік ділиться на фракції), підбирається реальне промислове обладнання. Супутні установки повинні чітко відповідати пропускній спроможності головної машини, забезпечуючи безперервність процесу.

Оскільки злежені відходи містять значну кількість великогабаритних компонентів та конгломератів, а також великий об'єм змішаних полімерів і металів, у ланцюг сортування інтегруються такі серійні установки:

1. Балістичний сепаратор STADLER STT2000 (або аналог BRT HARTNER BS)

Встановлюється безпосередньо після барабанного сита для обробки середньої фракції (80–300 мм). Його завдання - розділити потік на плоскі легкі компоненти (2D: плівки, пакети, папір) та об'ємні важкі компоненти (3D: ПЕТ-пляшки, каністри, твердий пластик), одночасно відсіюючи залишковий дрібний мінеральний підсів.

Обґрунтування вибору: Модель підібрана під робочу продуктивність лінії. Завдяки робочій ширині та площі коливальних лопатей сепаратор здатний стабільно приймати до 35–40 т/год змішаного механічного потоку.

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики балістичного сепаратора STADLER STT2000 [22]

Параметр	Значення
Номінальна продуктивність по ТПВ, т/год	до 40

Продовження таблиці 3.1.

Параметр	Значення
Кількість каскадних лопатей (елементів), шт	6
Довжина ситової поверхні лопатей, мм	4500
Корисна ширина робочої зони, мм	2400
Встановлена потужність приводу, кВт	7.5
Кут нахилу лопатей (регульований), град	10 – 25

2. Промисловий підвісний магнітний сепаратор серії МП 100 (або STEINERT UMP)

Призначений для автоматичного вилучення чорних металів (бляшанки, металевий брухт, деталі) з потоку відходів, що рухаються конвеєром середньої фракції після балістичної сепарації. Встановлюється над стрічкою шириною 1000 мм.

Обґрунтування вибору: Ефективна робота магнітного сепаратора можлива лише за умови відповідності швидкості стрічки конвеєра та товщини шару матеріалу. Серія МП 100 розрахована на висоту підвісу до 350 мм, що дозволяє вихоплювати залізовмісні об'єкти з глибокого шару полігонних відходів на швидкостях конвеєра до 1.5 м/с.

Таблиця 3.2.

Технічні характеристики магнітного сепаратора МП 100 [24]

Параметр	Значення
Продуктивність по супутньому потоку, т/год	до 50
Ширина обслуговуваної стрічки конвеєра, мм	1000
Глибина активної магнітної зони (висота вилучення), мм	до 350
Матеріал магнітної системи	Ферит-барій / Неодим
Швидкість руху очисної стрічки сепаратора, м/с	1.2
Потужність приводу очисної стрічки, кВт	3.0

4. Вихрострумовий сепаратор (Eddy Current Separator, тип STEINERT EddyC)

Призначений для вилучення кольорових металів (переважно алюмінієвої тари, залишків міді та латуні). Встановлюється на конвеєрі 3D-фракції після балістичного сепаратора та підвісного магніту (щоб чорні метали не пошкодили барабан). Принцип дії базується на створенні високочастотного змінного магнітного поля, яке індукує вихрові струми в кольорових металах, змушуючи їх «відштовхуватися» від потоку.

Обґрунтування вибору: Для роботи зі злеженими відходами підбирається модель із високочастотним ексцентриковим ротором. Ексцентрикове розташування магнітного вала всередині барабана запобігає налипанню дрібного металевого брухту та пропалюванню обичайки, що є типовою проблемою при обробці брудного полігонного сміття.

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики вихрострумового сепаратора [24]

Параметр	**Значення**
Номінальна продуктивність по супутньому потоку, т/год	15 – 20
Робоча ширина стрічки, мм	1000
Частота обертання магнітного ротора, об/хв	до 3000
Встановлена потужність приводу стрічки, кВт	2.2
Встановлена потужність приводу магнітного ротора, кВт	5.5

5. Низькошвидкісний двовальний шредер первинного подрібнення (тип ARJES Impaktor або аналог)

Встановлюється на технологічній лінії надрешітної фракції (>300 мм), яка виходить з торця барабанного сита. Його мета - подрібнення великогабаритного картону, деревини, текстилю та великих конгломерів відходів для підготовки однорідної маси, придатної для подальшого формування палива RDF або транспортування.

Обґрунтування вибору: Пропускна здатність шредера (до 40 т/год) повністю перекриває максимальний об'єм надрешітного продукту, що виходить з барабана, унеможливлюючи заклинювання лінії великими предметами.

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики первинного шредера [23]

Параметр	**Значення**
Максимальна продуктивність подрібнення, т/год	40
Кількість робочих валів з ножами, шт	2
Довжина робочої зони валів, мм	1500
Частота обертання валів (регульована), об/хв	15 – 40
Встановлена потужність дизельного або електроприводу, кВт	160

6. Повітряний сепаратор (Віндзифтер барабанного типу, наприклад BRT HARTNER BSS)

Зважаючи на специфіку злежених відходів, де застосування високоточних оптичних сенсорів (NIR) є недоцільним через налипання бруду на матеріали, пневматична сепарація виступає основним методом очищення. Повітряний сепаратор використовується для розділення потоку на важку фракцію (каміння, скло, важкий пластик, дерево) та легку фракцію (плівка, папір, текстиль).

Обґрунтування вибору: Барабанний віндзифтер з поперечним потоком повітря є оптимальним для грубого сортування. Матеріал подається розгінним конвеєром, після чого потужний струмінь повітря видуває легкі компоненти (основу для RDF-палива) у камеру осадження, а важкі падають вниз під дією гравітації. Ця установка здатна стабільно обробляти до 25 т/год змішаного матеріалу, не будучи чутливою до поверхневого забруднення відходів.

Таблиця 3.5.

Технічні характеристики повітряного сепаратора [25]

Параметр	**Значення**
Максимальна пропускна здатність, т/год	до 25

Продовження таблиці 3.5.

Параметр	Значення
Робоча ширина розгінного конвеєра, мм	1500
Швидкість стрічки розгінного конвеєра, м/с	2.0 – 2.5
Потужність головного нагнітального вентилятора, кВт	30
Потужність витяжного вентилятора та системи фільтрації, кВт	15

7. Автоматичний горизонтальний прес-пакувальник (тип Macpresse або HSM VK)

Встановлюється наприкінці технологічного ланцюга. Призначений для кіпування відсортованої вторинної сировини (ПЕТ, картон, алюміній), а також ущільнення легкої горючої фракції (RDF) або залишкового баласту перед транспортуванням.

Обґрунтування вибору: Для забезпечення безперервної роботи комплексу потужністю 100 000 т/рік обрано канальний прес із зусиллям пресування 80–100 тонн. Він оснащений системою автоматичної обв'язки дротом. Завдяки високому зусиллю пресування досягається щільність тюків до 500–600 кг/м³, що дозволяє максимально ефективно використовувати вантажний простір фур при вивезенні матеріалів з території заводу.

Таблиця 3.6.

Технічні характеристики горизонтального прес-пакувальника [26,27]

Параметр	Значення
Максимальне зусилля пресування, кН (тонн)	850 (85 т)
Теоретична продуктивність (залежно від матеріалу), т/год	10 – 15
Розмір завантажувального вікна (Д х Ш), мм	1600 х 1000
Переріз пресувального каналу (розмір тюка), мм	1100 х 750
Кількість ниток автоматичної обв'язки, шт	4
Встановлена потужність головного електродвигуна гідростанції, кВт	45

3.2. Розрахунок параметрів транспортувальних систем

Транспортувальні системи є сполучними ланками сортувального комплексу, які об'єднують технологічне обладнання в єдину автоматизовану лінію. Основним типом транспортувальних пристроїв на проєктованому комплексі є стрічкові конвеєри завдяки їхній високій надійності, безперервності дії та відносній простоті конструкції.

Розрахунок транспортувальних систем полягає у визначенні геометричних параметрів стрічки (ширини) та обґрунтуванні оптимальної швидкості її руху. Оскільки комплекс орієнтований на грубе механічне сортування злежених, вологих і неоднорідних за габаритами полігонних відходів, параметри конвеєрів повинні розраховуватися із значним запасом за площею перерізу потоку, щоб унеможливити заклинювання або просипання матеріалу.

На лінії проєктованого комплексу виділяють два основні типи стрічкових конвеєрів:

1. Подавальні та міжвузлові транспортувальні конвеєри - жолобчасті конвеєри, які переміщують загальний масив відходів між агрегатами.
2. Сортувальні конвеєри (для ручного контролю) - плоскі конвеєри, де товщина шару матеріалу та швидкість суворо обмежені вимогами ергономіки та безпеки праці.

3.2.1. Розрахунок та обґрунтування параметрів подавального конвеєра барабанного сита

Подавальний конвеєр транспортує вихідні відходи з приймального бункера-живильника у завантажувальну лійку комбінованого барабанного сита. Розрахунок ведеться за фактичною номінальною годинною продуктивністю комплексу $Q_{\text{факт}} = 35$ т/год.

Вихідні дані для розрахунку:

- Розрахункова масова продуктивність, $Q_m = 35$ т/год;
- Насипна щільність вихідної злеженої маси відходів, $\rho = 0.35$ т/м³;
- Кут нахилу конвеєра до горизонту, $\beta = 15°$ (для підйому матеріалу на висоту завантаження сита);
- Тип ролика - жолобчасті тип роликові з кутом нахилу бічних роликів $\alpha_c = 30°$.

Переходимо до об'ємної годинної продуктивності конвеєра (Q_v, м³/год):

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{35}{0.35} = 100 \text{ м}^3/\text{год} \quad (9)$$

Для забезпечення стабільного транспортування великогабаритних та злежених конгломератів відходів без їхнього розсипання попередньо приймаємо ширину конвеєрної стрічки $B = 1000$ мм (1.0 м).

Площа поперечного перерізу шару матеріалу на жолобчастій стрічці (F, м²) визначається геометрією ролик опори та кутом укосу матеріалу в русі. Для практичних розрахунків конвеєрів, що транспортують побутові відходи, використовується залежність [10,11]:

$$F = C \cdot (B - 0.05)^2 \quad (10)$$

де С - коефіцієнт форми жолоба та відкосу матеріалу (для трироликових опор з $\alpha_c = 30°$ та динамічним кутом укосу сміття орієнтовно $C \approx 0.09$).

$$F = 0.09 \cdot (1.0 - 0.05)^2 = 0.09 \cdot 0.9025 \approx 0.0812 \text{ м}^2$$

Максимальна теоретична об'ємна пропускна здатність конвеєра визначається як:

$$Q_{v.max} = 3600 \cdot F \cdot v \cdot k \quad (11)$$

де: v - швидкість руху конвеєрної стрічки, м/с; k - коефіцієнт зменшення продуктивності, що враховує кут нахилу конвеєра (для $\beta = 15°$ приймається $k = 0.90$).

Для транспортувальних конвеєрів загального призначення оптимальна швидкість руху стрічки лежить у межах $v = 1.0 \ldots 1.2$ м/с. Приймемо робочу швидкість стрічки $v = 1.0$ м/с.

Обчислимо максимальну пропускну здатність при зафіксованих параметрах:

$$Q_{v.max} = 3600 \cdot 0.0812 \cdot 1.0 \cdot 0.90 \approx 263 \text{ м}^3/\text{год} \quad (12)$$

$$Q_{m.max} = Q_{v.max} \cdot \rho = 263 \cdot 0.35 \approx 92 \text{ т/год} \quad (13)$$

Порівняння показує, що максимальна пропускна спроможність конвеєра (92 т/год) значно перевищує номінальний потік лінії (35 т/год). Такий запас є конструктивно необхідним, оскільки щільність і порційність подачі полігонного сміття постійно коливаються. Стрічка шириною 1000 мм гарантує відсутність завалів та падіння великих шматків відходів за межі конвеєрного стана.

3.2.2. Обґрунтування параметрів та швидкості стрічки сортувального конвеєра

Сортувальний конвеєр призначений для візуального контролю та ручного вилучення корисних компонентів або великогабаритних предметів, які не були відділені автоматичними сепараторами. Він встановлюється в сортувальній кабіні. Робоче навантаження на цей конвеєр є меншим, оскільки після барабанного сита з потоку вже виведено близько 55% маси дрібної органічної фракції та гумусу.

Потік матеріалу, що надходить на сортувальний стіл, становить:

$$Q_{\text{сорт}} = 35 \cdot (1 - 0.55) \approx 15.75 \text{ т/год} \quad (14)$$

Через вилучення важкої мінеральної та органічної складової, насипна щільність залишку пластику, картону та текстилю зменшується і становить орієнтовно $\rho_{\text{сорт}} = 0.25$ т/м³. Об'ємний потік:

$$Q_{v.\text{сорт}} = \frac{15.75}{0.25} = 63 \text{ м}^3/\text{год} \quad (15)$$

Ергономічні та інженерні обмеження для сортувальних конвеєрів:

1. Швидкість стрічки ($v_{\text{сорт}}$): Згідно з вимогами охорони праці та технологічними нормами ручного відбору, швидкість стрічки на сортувальних

столах суворо обмежена і повинна становити не більше $0.25 \ldots 0.35$ м/с [14]. При вищій швидкості сортувальники не встигають візуально зафіксувати предмет і якісно його вилучити. Приймемо мінімально стабільну швидкість $v_{\text{сорт}} = 0.25$ м/с.

2. Ширина стрічки ($B_{\text{сорт}}$): Для двостороннього сортування (коли персонал стоїть з обох боків конвеєра) ширина стрічки приймається рівною $B = 1200$ мм. Більша ширина ускладнить дотягування до центру стрічки, менша - звузить корисну площу.

3. Товщина шару матеріалу (h): Щоб корисні компоненти не перекривали один одного, товщина шару сміття на плоскій стрічці сортувального столу не повинна перевищувати $h = 100 \ldots 120$ мм.

Розрахуємо площу перерізу прямокутного шару матеріалу на такій плоскій стрічці з урахуванням вільних бортів шириною 0.1 м з кожного боку ($b = B - 0.2 = 1.0$ м) при граничній товщині шару $h = 0.08$ м:

$$F_{\text{сорт}} = b \cdot h = 1.0 \cdot 0.08 = 0.08 \text{ м}^2 \quad (16)$$

Допустима об'ємна продуктивність за умови збереження тонкого шару для ручного відбору:

$$Q_{v.\text{доп}} = 3600 \cdot F_{\text{сорт}} \cdot v_{\text{сорт}} = 3600 \cdot 0.08 \cdot 0.25 = 72 \text{ м}^3/\text{год} \quad (17)$$

Порівнюючи необхідний об'ємний потік (63 м³/год) із допустимим за ергономікою (72 м³/год), робимо висновок, що обрані параметри конвеєра (B = 1200 мм, v = 0.25 м/с) ідеально забезпечують розстилання відходів тонким шаром, що гарантує високу ефективність ручного контролю.

Таблиця 3.7.

Розраховані параметри сортувальної лінії

Параметр	**Позначення**	**Значення**	**Одиниці вимірювання**
Ширина стрічки	B	1000	мм
Швидкість руху	v	1.00	м/с
Насипна щільність	ρ	0.35	т/м³

Продовження таблиці 3.7.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання
Кут нахилу	β	15	град
Коефіцієнт нахилу	k	0.899	-
Площа перерізу шару	F	0.0812	м²
Об'ємна продуктивність	Qv	263.02	м³/год
Масова пропускна здатність	Qm	92.06	т/год

3.3. Вибір та розрахунок приводів транспортувальних систем

Для забезпечення безперебійної роботи сміттєсортувального комплексу необхідно правильно підібрати приводні механізми (електродвигуни та редуктори) для транспортувальних систем. Детальний тяговий розрахунок виконаємо для найбільш навантаженого елемента лінії - головного подавального конвеєра, який транспортує загальний масив злежених відходів до комбінованого барабанного сита.

3.3.1. Тяговий розрахунок подавального стрічкового конвеєра

Кінематичні та геометричні параметри подавального конвеєра, обрані на попередньому етапі:

- Масова продуктивність, $Q_m = 35$ т/год;
- Швидкість руху стрічки, $v = 1.0$ м/с;
- Ширина стрічки, $B = 1000$ мм;
- Довжина конвеєра по осях барабанів, $L = 20$ м;
- Кут нахилу конвеєра, $\beta = 15°$;
- Висота підйому матеріалу, $H = L \cdot \sin(15°) = 20 \cdot 0.2588 = 5.17$ м.

Для визначення необхідного тягового зусилля розрахуємо погонні (лінійні) навантаження на конвеєрну стрічку.

Погонна маса матеріалу, що транспортується (q_m, кг/м):

$$q_m = \frac{Q_m \cdot 1000}{3600 \cdot v} = \frac{35000}{3600 \cdot 1.0} \approx 9.72 \text{ кг/м} \quad (18)$$

Погонну масу конвеєрної стрічки ($q_б$) для ширини 1000 мм (гумовотканинна стрічка типу БКНЛ-65 з 4 прокладками) за довідковими даними приймаємо $q_б = 15.0$ кг/м.

Погонну масу обертових частин роликоопор на робочій і холостій гілках ($q_р$) приймаємо $q_р = 25.0$ кг/м.

Загальне тягове зусилля на приводному барабані (W, Н) визначається за наближеним методом, що враховує опір руху на горизонтальній проекції та зусилля на підйом вантажу [10 ,11]:

$$W = \left[C \cdot f \cdot L \cdot \left(q_m + 2q_б + q_р\right) + q_m \cdot H\right] \cdot g \quad (19)$$

де: С - коефіцієнт, що враховує додаткові місцеві опори (для конвеєрів довжиною L = 20 м приймається $C \approx 1.8$); f - зведений коефіцієнт опору руху роликоопор (для умов сильної запиленості та вологості сміттєвого комплексу $f = 0.04$); $g = 9.81$ м/с^2 - прискорення вільного падіння.

Підставляємо значення:

$$W = [1.8 \cdot 0.04 \cdot 20 \cdot (9.72 + 2 \cdot 15.0 + 25.0) + 9.72 \cdot 5.17] \cdot 9.81$$
$$= [1.44 \cdot 64.72 + 50.25] \cdot 9.81 = (93.19 + 50.25) \cdot 9.81$$
$$= 143.44 \cdot 9.81 \approx 1407 \text{ Н}$$

Враховуючи наявність плужкових очищувачів стрічки від налиплого бруду та тертя відходів об напрямні борти в зоні завантаження, вводимо коефіцієнт додаткових опорів $K_{доп} = 1.3$.

Фактичне розрахункове тягове зусилля (F_t):

$$F_t = W \cdot K_{доп} = 1407 \cdot 1.3 = 1829 \text{ Н} \approx 1.83 \text{ кН} \quad (20)$$

3.3.2. Визначення потужності та вибір приводної станції

Потужність, необхідна безпосередньо на валу приводного барабана ($P_{вал}$, кВт):

$$P_{\text{вал}} = \frac{F_t \cdot v}{1000} = \frac{1829 \cdot 1.0}{1000} = 1.83 \text{ кВт} \quad (21)$$

Враховуючи специфіку обробки злежених побутових відходів (можливість пуску конвеєра під завалом матеріалу, замерзання вологи в зимовий період), розрахункова потужність електродвигуна ($P_{\text{дв}}$) визначається з урахуванням високого коефіцієнта запасу пускового моменту ($K_{\text{пуск}} = 1.5$) та загального ККД механічної передачі ($\eta_{\text{мех}} = 0.85$ для редуктора та підшипників):

$$P_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{вал}} \cdot K_{\text{пуск}}}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{1.83 \cdot 1.5}{0.85} = 3.23 \text{ кВт} \quad (22)$$

За каталогом промислових асинхронних електродвигунів змінного струму обираємо найближчий більший за потужністю стандартний двигун серії AIP 100 L4, який має такі характеристики:

- Номінальна потужність: 4.0 кВт;
- Синхронна частота обертання: 1500 об/хв;
- Фактична частота обертання під навантаженням: $n_{\text{дв}} = 1430$ об/хв.

Вибір редуктора:

Для забезпечення стрічці швидкості 1.0 м/с при діаметрі приводного барабана $D_{\text{б}} = 400$ мм (0.4 м), необхідна частота обертання барабана ($n_{\text{б}}$) становить:

$$n_{\text{б}} = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot D_{\text{б}}} = \frac{1.0 \cdot 60}{3.14 \cdot 0.4} = 47.7 \text{ об/хв} \quad (23)$$

Необхідне передаточне число редуктора (u):

$$u = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{б}}} = \frac{1430}{47.7} \approx 29.9 \quad (24)$$

За довідником обираємо циліндричний двоступінчастий редуктор серії Ц2У-160 із фактичним передаточним числом $u_{\text{факт}} = 31.5$ [6].

Перевіримо фактичну швидкість стрічки з обраним редуктором:

$$v_{\text{факт}} = \frac{n_{\text{дв}} \cdot \pi \cdot D_{\text{б}}}{u_{\text{факт}} \cdot 60} = \frac{1430 \cdot 3.14 \cdot 0.4}{31.5 \cdot 60} = \frac{1796.4}{1890} \approx 0.95 \text{ м/с} \quad (25)$$

Відхилення фактичної швидкості (0.95 м/с) від заданої (1.0 м/с) складає 5%, що знаходиться в межах допустимої похибки. Обрана приводна станція (електродвигун 4.0 кВт + редуктор Ц2У-160) забезпечить надійний запуск та експлуатацію подавального конвеєра в умовах високих навантажень.

Для сортувальних столів та відвідних конвеєрів легкої фракції, за аналогічним принципом, застосовуються мотор-редуктори потужністю 1.5 – 2.2 кВт.

Таблиця 3.8.

Розраховані енергетичні параметри сортувальної лінії

Параметр	**Значення**	**Одиниці вимірювання**
Продуктивність	35	т/год
Швидкість	1	м/с
Погонне навантаження	9.72	кг/м
Висота підйому	5.18	м
Тягове зусилля	1830	Н
Розрахункова потужність	3.23	кВт
Стандартний двигун	4	кВт

3.4. Розрахунок міцності основних елементів конструкції сита

3.4.1. Визначення та перевірка товщини обичайки сита

Обичайка барабана (особливо в зоні приймальної секції розривача пакетів) піддається інтенсивному абразивному зносу та локальним динамічним ударам від падіння великогабаритних твердих предметів (каміння, шматків металу тощо), що можуть знаходитися в масі полігонних відходів.

Товщину сталевого листа (s, мм) визначаємо з умови забезпечення місцевої міцності на згин при ударі та необхідного запасу на абразивне зношування:

$$s = s_p + C \tag{26}$$

де: s_p - розрахункова товщина стінки з умови міцності, мм; С - конструктивна прибавка на знос і корозію, мм.

Для розрахунку s_p розглядаємо ділянку сталевого листа як пластину, защемлену між поздовжніми та поперечними ребрами жорсткості каркаса (з кроком орієнтовно $a \times b = 500 \times 500$ мм). Розрахункове навантаження створюється падінням умовного предмета масою $m_y = 15$ кг з висоти діаметра барабана (найгірший випадок - відрив предмета у верхній точці), $h \approx 2.0$ м.

Сила динамічного удару ($P_д$, Н) наближено становить:

$$P_д = m_y \cdot g \cdot K_д \tag{27}$$

де $K_д$ — динамічний коефіцієнт (для падіння на податливу сталеву конструкцію приймаємо $K_д \approx 25$).

$$P_д = 15 \cdot 9.81 \cdot 25 \approx 3678 \text{ Н}$$

Максимальне згинальне напруження (σ_{max}) у центрі квадратної пластини ($a = b$) товщиною s_p від зосередженої сили визначається за формулою [8,12]:

$$\sigma_{max} = \frac{k_1 \cdot P_д}{s_p^2} \leq [\sigma] \tag{28}$$

де: $k_1 \approx 0.42$ - коефіцієнт для квадратної защемленої пластини; $[\sigma]$ - допустиме напруження для сталі марки Ст3 або 09Г2С (для динамічних навантажень приймаємо $[\sigma] = 160$ МПа).

Виражаємо мінімально необхідну товщину s_p:

$$s_p = \sqrt{\frac{k_1 \cdot P_д}{[\sigma]}} = \sqrt{\frac{0.42 \cdot 3678}{160}} = \sqrt{9.65} \approx 3.1 \text{ мм} \tag{29}$$

Враховуючи важкі умови експлуатації та постійний контакт з абразивним середовищем (пісок, скло), конструктивна прибавка на знос (С) протягом 10 років експлуатації приймається не менше 4 ... 5 мм.

Фактична необхідна товщина:

$$s = 3.1 + 4.9 = 8.0 \text{ мм}$$

Для виготовлення "глухої" зони розривача та ситових решіток барабана обираємо листову зносостійку сталь товщиною 8 мм.

3.5. Моделювання роботи та алгоритм керування комплексом

Моделювання роботи сміттєсортувального комплексу полягає у розробці кінематичної та логічної взаємодії всіх одиниць обладнання як єдиної виробничої екосистеми. Оскільки лінія розрахована на переробку злежених побутових відходів із номінальною продуктивністю 35 т/год, ручне керування кожним окремим конвеєром є неефективним і небезпечним.

Керування комплексом здійснюється за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК), який отримує сигнали від датчиків швидкості на стрічках, датчиків заповнення бункерів та теплових реле електродвигунів.

3.5.1. Алгоритм каскадного запуску лінії

Головне правило моделювання потокових транспортних систем: запуск обладнання завжди здійснюється проти ходу руху матеріалу (від кінця до початку). Це гарантує, що кожна наступна машина вже працює і готова прийняти відходи від попередньої.

Послідовність запуску (циклограма) виглядає наступним чином:

1. Етап 1 (Кінцеве обладнання): Вмикається гідростанція горизонтального прес-пакувальника та витяжні вентилятори системи аспірації.
2. Етап 2 (Сепаратори та відвідні конвеєри): Запускаються стрічки балістичного сепаратора, магнітний ротор вихрострумового сепаратора та підвісні електромагніти. Вмикаються конвеєри відведення дрібної фракції та "хвостів".
3. Етап 3 (Сортувальні столи та шредери): Після виходу сепараторів на робочі оберти, вмикаються плоскі сортувальні конвеєри (зі швидкістю 0.25 м/с) та первинний шредер великогабаритних відходів.

4. Етап 4 (Головна машина): Подається живлення на приводну станцію комбінованого барабанного сита. Ролики плавно розганяють барабан до робочої частоти 12 об/хв.

5. Етап 5 (Живлення лінії): Лише після того, як барабан вийшов на номінальний режим, вмикається головний подавальний конвеєр та пластинчастий живильник приймального бункера. Починається подача сміття в систему.

Часова затримка між запусками кожного етапу становить 5–10 секунд для зниження пікових пускових струмів у загальній електромережі підприємства.

3.5.2. Алгоритм штатної зупинки та очищення

Для завершення робочої зміни лінію не можна просто вимкнути, оскільки на стрічках та всередині барабана залишаться тонни сміття, що ускладнить наступний пуск. Зупинка здійснюється за ходом руху матеріалу:

1. Оператор натискає кнопку «Штатна зупинка».

2. Миттєво зупиняється пластинчастий живильник бункера (припиняється подача нових відходів).

3. Комплекс продовжує працювати в холостому режимі протягом 3–5 хвилин. За цей час залишки сміття проходять через барабанне сито, сепаратори та повністю сходять з конвеєрних стрічок у прес або накопичувальні контейнери.

4. Після повного очищення (випорожнення) лінії, ПЛК автоматично по черзі вимикає барабан, конвеєри та сепаратори.

3.5.3. Система аварійного блокування

Найважливішою частиною моделювання є реакція системи на позаштатні ситуації. Логіка аварійного блокування побудована за принципом захисту від завалів:

- Правило «Висхідного блокування»: Якщо будь-який агрегат у ланцюзі аварійно зупиняється, ПЛК миттєво (за 0.1 с) зупиняє все обладнання, що знаходиться перед ним, аж до бункера. Це робиться для того, щоб подавальні конвеєри не накидали сміття на зупинену машину.
- При цьому, обладнання, що знаходиться після аварійної ділянки, продовжує працювати, щоб звільнити стрічки від залишків матеріалу і полегшити доступ ремонтній бригаді.
- По всьому периметру комплексу, вздовж конвеєрів та біля сортувальних кабін, натягнуті тросові вимикачі. У разі небезпеки для персоналу, ривок за трос знеструмлює всю лінію одночасно.

РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ

Сучасні комплекси з переробки та сортування злежених побутових відходів є складними багатовузловими системами з високою інтенсивністю потоків матеріалу. Проєктування автоматизованої системи керування (АСК) для даного комплексу потужністю 100 000 тонн на рік є необхідною умовою для забезпечення стабільності технологічного процесу, захисту обладнання від аварійних режимів (заклинювання, перевантаження), а також для мінімізації впливу людського фактора в умовах підвищеної запиленості та вологості сортувального цеху.

4.1. Вибір засобів автоматизації

Для побудови надійної та гнучкої системи керування лінією механічного сортування прийнято трирівневу архітектуру АСК ТП, яка базується на децентралізованому принципі збору даних та централізованому прийнятті рішень.

4.1.1. Центральний керуючий пристрій (Контролерний рівень)

Як головний обчислювальний та керуючий вузол лінії обрано промисловий програмований логічний контролер (ПЛК) Siemens SIMATIC S7-1500 (модульний процесор CPU 1513-1 PN) [28].

- Обґрунтування вибору: Даний контролер розроблений спеціально для середніх та великих за кількістю сигналів промислових об'єктів. Він володіє високою швидкодією (час виконання логічної команди від 40 нс), вбудованими функціями технологічного захисту та високим рівнем стійкості до

електромагнітних завад [29], що створюються потужними двигунами шредерів та сепараторів. Модульна конструкція дозволяє доукомплектовувати ПЛК необхідною кількістю модулів дискретних та аналогових сигналів (DI/DO, AI/AO).

4.1.2. Силова електроніка та регульований привод

Для керування асинхронними електродвигунами головних агрегатів лінії обрано частотні перетворювачі (ЧП) серії Danfoss VLT AutomationDrive FC 302 [29] (клас захисту корпусу IP66 для встановлення безпосередньо поблизу агрегатів або IP20 для монтажу в силових шафах):

- Для фрикційного приводу комбінованого барабанного сита вибрано ЧП потужністю 22 кВт.
- Для електроприводу первинного двовального шредера надрешітної фракції - ЧП потужністю 160 кВт.

Застосування ЧП дозволяє повністю ліквідувати важкі пускові струми (які при прямому пуску 9-тонного барабана перевищують номінальні у 6 разів), плавно регулювати кутову швидкість робочих органів та реалізувати функцію швидкого автоматичного реверсу при заклинюванні механізмів [29].

4.1.3. Промислова мережа передачі даних

Зв'язок між ПЛК, частотними перетворювачами, інтелектуальними сепараторами (вихрострумовим, балістичним) та верхнім рівнем диспетчеризації здійснюється за допомогою відкритого стандарту промислової мережі Profinet (Industrial Ethernet) [28]. Перевагою використання Profinet є висока швидкість обміну даними (до 100 Мбіт/с) та можливість прокладання ліній зв'язку на великі відстані за допомогою екранованої крученої пари типу FTP, що нівелює вплив завад від силових кабелів.

4.2. Розробка алгоритму роботи комплексу

Ефективність автоматизації безперервного транспортного ланцюга залежить від чіткої часової та логічної послідовності взаємодії обладнання. Програмне забезпечення ПЛК реалізує три основні режими роботи алгоритму: каскадний пуск, штатну зупинку та аварійне блокування.

4.2.1. Алгоритм каскадного пуску (Проти ходу потоку)

Щоб унеможливити завали конвеєрних стрічок та накопичення матеріалу на нерухомих робочих органах машин, запуск лінії сортування виконується суворо проти ходу руху відходів. Кожен наступний агрегат вмикається лише після того, як попередній успішно вийшов на номінальні робочі оберти:

1. Запуск гідростанції прес-пакувальника та конвеєрів видалення залишкового баласту.
2. Ввімкнення магнітних, вихрострумових та повітряних сепараторів.
3. Запуск балістичного сепаратора та плоских сортувальних столів ручного контролю.
4. Плавний запуск (за 15 секунд за допомогою ЧП) комбінованого барабанного сита із частотою обертання 12 об/хв.
5. Ввімкнення первинного шредера великогабаритних матеріалів.
6. Запуск головного подавального конвеєра та пластинчастого живильника приймального бункера. Лінія починає прийом сировини.

4.2.2. Алгоритм штатної зупинки (За ходом потоку)

При завершенні зміни лінію не можна вимикати одночасно. Зупинка відбувається в послідовності за ходом руху відходів для повної евакуації сміття з внутрішніх порожнин машин:

1. Вимикається пластинчастий живильник приймального бункера (припинення подачі сміття).

2. Протягом 4-5 хвилин лінія працює вхолосту. За цей час злежене сміття повністю проходить крізь барабан, просіюється, розділяється сепараторами і надходить до преса.

3. По черзі, по мірі звільнення від матеріалу, вимикаються: шредер → барабанне сито → сепаратори → конвеєри → прес-пакувальник.

4.2.3. Алгоритм аварійного блокування (Interlock System)

У разі виникнення позаштатної ситуації (наприклад, спрацювання теплового захисту двигуна конвеєра середньої фракції), система реалізує правило «Висхідного каскадного вимкнення»:

- Негайно зупиняється обладнання, що здійснює подачу матеріалу на аварійну ділянку (всі конвеєри, що стоять вище за схемою, барабанне сито та бункер-живильник). Це запобігає утворенню гігантських завалів відходів, на ліквідацію яких вручну потрібні години.
- Обладнання, що встановлене після аварійного вузла, продовжує обертатися для того, щоб вивести залишки відходів, які вже пройшли небезпечну зону.

4.3. Система датчиків і виконавчих механізмів

Для отримання первинної інформації про стан лінії та безпосереднього фізичного впливу на технологічний процес розроблено систему, що складається з контрольно-вимірювальних приладів (датчиків) та виконавчих пристроїв. Враховуючи високу вологість злежених відходів та наявність абразивного пилу, всі прилади обрано з високим індустріальним класом захисту (IP67).

4.3.1. Система контролю токсичності повітря та газової безпеки

При розробці та розкритті тіла полігонів (*Landfill Mining*) у повітря робочої зони неминуче виділяються токсичні та вибухонебезпечні гази, які роками накопичувалися в анаеробних умовах звалища [19 ,21]. Найбільшу небезпеку становлять метан (CH_4 - ризик вибуху), сірководень (H_2S - висока токсичність), чадний газ (CO - індикатор тління) та летючі органічні сполуки (ЛОС).

Для забезпечення екологічної та промислової безпеки в цеху (особливо біля завантажувального бункера та в кабіні ручного сортування) інтегрується стаціонарна система газового аналізу:

- Датчики контролю горючих газів (метан): Застосовуються стаціонарні оптичні (інфрачервоні) датчики типу Dräger Polytron 8700 (або Honeywell Sensepoint). Вони вимірюють концентрацію метану в долях від нижньої концентраційної межі поширення полум'я (% НКМ) [31]. При досягненні 10% НКМ система вмикає аварійну вентиляцію, при 20% НКМ — ПЛК знеструмлює силові шафи обладнання.
- Датчики токсичних газів (H_2S та CO): Використовуються електрохімічні детектори серії Honeywell PrimaX IR (або Dräger Polytron 8100). Вони фіксують мікроконцентрації газів у мільйонних долях (ppm) [31] і сигналізують про перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) для захисту здоров'я персоналу.

4.3.2. Система виявлення та локалізації загорянь у технологічних агрегатах

Процес механічного подрібнення та просіювання злеженого сміття супроводжується високим тертям. Потрапляння металевих предметів у шредер або тертя бандажів барабанного сита може викликати іскри, що в умовах

високої запиленості та наявності сухої легкої фракції (плівок, паперу) створює критичний ризик пожежі безпосередньо всередині машин.

Для моніторингу та миттєвого гасіння пожеж у закритих порожнинах машин впроваджуються такі засоби:

- Мультиспектральні інфрачервоні сповіщувачі полум'я: У приймальних зонах шредера та всередині захисного кожуха комбінованого барабанного сита встановлюються оптичні датчики полум'я типу Honeywell Fire Sentry SS4 [30]. На відміну від звичайних теплових або димових датчиків, які неефективні у сильно запиленому середовищі, ІЧ-сповіщувачі за мікросекунди фіксують радіаційне випромінювання відкритого вогню чи іскри [30].
- Виконавчі механізми пожежогасіння: При фіксації спалаху всередині шредера або барабана ПЛК виконує такі дії: миттєво зупиняє привод агрегату та подавального конвеєра, видає сигнал тривоги та відкриває електромагнітний соленоїдний клапан автоматичної системи дренчерного водяного (або порошкового) гасіння, яка за допомогою форсунок, вмонтованих у кожух машини, локалізує вогонь за 2–3 секунди.

Таблиця 4.1.

Зведена специфікація засобів автоматизації комплексу

Найменування вузла	**Тип датчика / приладу**	**Контрольований параметр**	**Модель приладу**	**Кінцева дія системи при спрацюванні**
Приймальний бункер	Ультразвуковий датчик	Рівень заповнення побутовими відходами	SITRANS Probe LU [32]	Регулювання швидкості живильника
Барабанне сито	Індуктивний таходатчик	Частота обертання корпусу	ДКС-1 (IP67)	Блокування подачі при зупинці
Стрічкові конвеєри	Кінцевий вимикач	Бічний зсув стрічки	ДСС-1	Попереджувальний сигнал на SCADA

Продовження таблиці 4.1.

Найменування вузла	**Тип датчика / приладу**	**Контрольований параметр**	**Модель приладу**	**Кінцева дія системи при спрацюванні**
Стрічкові конвеєри	Тросовий вимикач	Безпека персоналу	Серія ZT-2	Миттєва екстрена зупинка вузла
Первинний шредер та сито	Оптичний датчик полум'я	Поява іскри або відкритого вогню	Honeywell Fire Sentry SS4 [30]	Зупинка машини + активація дренчерного гасіння
Зона завантаження та кабіна	Оптичний ІЧ-газоаналізатор	Концентрація метану (CH_4)	Dräger Polytron 8700 [31]	Ввімкнення аварійної витяжної вентиляції
Зона завантаження та кабіна	Електрохімічний сенсор	Вміст сірководню (H_2S), чадного газу (CO)	Honeywell PrimaX IR	Світлозвукова сигналізація Evacuation
Прес-пакувальник	Датчик тиску гідросистеми	Зусилля пресування кіпи	ЕПД-100	Автоматичний реверс плити

4.4. Програмне забезпечення та візуалізація процесів

Верхній рівень системи автоматизації призначений для забезпечення людино-машинного інтерфейсу (HMI), що дозволяє єдиному оператору-

диспетчеру повністю контролювати та коригувати роботу всього заводу з операторської кабіни.

4.4.1. Інструменти розробки програмного забезпечення

- Програмування контролера: Розробка алгоритмів логіки, каскадних запусків, систем взаємних блокувань та обробки сигналів аварійних датчиків здійснюється в інтегрованому інженерному середовищі Siemens TIA Portal V18 (Step 7 Professional) [28]. Програма реалізується на базі структурних блоків із використанням мов графічного програмування LAD (Ladder Diagram) та функціональних блоків FBD.
- Система візуалізації (SCADA): Для проєктування інтерфейсу диспетчера обрано програмний пакет SIMATIC WinCC Professional [28]. SCADA-система встановлюється на промисловий комп'ютер (АРМ Оператора) та зв'язується з ПЛК через мережу Industrial Ethernet.

4.4.2. Концепція інтерфейсу користувача та відображення мнемосхеми

На моніторі диспетчера відображається детальна динамічна мнемосхема сортувального комплексу. Усі елементи (бункер, барабан, шредер, 2D/3D сепаратори, конвеєрні стрічки) мають колірну індикацію стану, що змінюється в реальному часі:

- Сірий колір агрегату: Обладнання знеструмлене, знаходиться в резерві або на технічному обслуговуванні.
- Зелений колір (миготливий або постійний): Агрегат успішно запущений, частотний перетворювач вийшов на номінальну частоту, відбувається стабільний рух стрічки або обертання барабана.
- Жовтий колір: Попереджувальний режим (наприклад, зафіксовано некритичний зсув конвеєрної стрічки вбік або рівень сміття в бункері преса

наблизився до 85%).

- Червоний колір (з подачею звукового сигналу): Аварійна подія. Агрегат зупинено через перевантаження за струмом, спрацював датчик обриву стрічки або натиснуто кнопку екстреної зупинки.

У нижній частині SCADA-екрана інтегровано «Вікно тривог та подій» (Alarm Log), де фіксується точний час виникнення будь-якої несправності із зазначенням конкретного датчика, що полегшує роботу чергового інженера-електрика.

Також система автоматично веде облік мотогодин кожного двигуна для своєчасного планування планово-попереджувальних ремонтів (ППР) підшипникових вузлів та роликів.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Проєктування сміттєсортувального комплексу потужністю 100 000 тонн на рік, що спеціалізується на переробці злежених полігонних відходів (*Landfill Mining*), вимагає комплексного підходу до забезпечення безпечних умов праці та мінімізації антропогенного навантаження на довкілля. Специфіка обробки старого, частково декомпонованого сміття пов'язана з додатковими ризиками виділення токсичних газів, високою концентрацією біоаерозолів та дрібнодисперсного абразивного пилу [19 ,21].

5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Відповідно до ДСТУ EN ISO 12100 [33]та класифікації небезпечних і шкідливих виробничих факторів, на персонал сортувального комплексу діє комплекс чинників, які за своїм походженням поділяються на чотири основні групи.

5.1.1. Фізичні небезпечні та шкідливі фактори

Рухомі машини та механізми, незахищені рухомі елементи обладнання: Найбільшу небезпеку становить відкритий обертовий корпус комбінованого барабанного сита, зони контакту опорних приводних роликів, рухомі стрічки та конвеєри, а також робочі вали первинного шредера. Потрапляння одягу або кінцівок у ці зони призводить до важкого травмування.

Підвищений рівень шуму та вібрації: Основними джерелами акустичного навантаження є низько швидкісний шредер під час руйнування великих предметів, робота вузлів балістичного сепаратора, вентилятори систем

аспірації та гідростанція прес-пакувальника. Рівень шуму в зоні подрібнення може досягати 90–95 дБА (при нормі 80 дБА).

Підвищена запиленість повітря робочої зони: Пересипання злеженого сміття з конвеєра в барабан та відсіювання дрібної фракції супроводжується виділенням великої кількості мінерального (кварцового, скляного) та органічного пилу.

Небезпека від літаючих предметів: При роботі шредера та розривача пакетів у барабані можливе викидання твердих уламків (каміння, металу) через завантажувальні лійки.

5.1.2. Хімічні небезпечні та шкідливі фактори

Розкриття тіла полігону призводить до вивільнення затиснених газів анаеробної деструкції. У повітря сортувального цеху потрапляють:

- **Метан (CH_4):** Безбарвний газ, який у концентраціях 5–15% в об'ємі повітря утворює вибухонебезпечну суміш.
- **Сірководень (H_2S):** Високотоксичний газ із характерним запахом, який викликає ураження нервової та дихальної систем (ГДК у повітрі робочої зони становить 10 мг/м³).
- **Чадний газ (CO):** Виділяється при прихованих процесах тління в глибинних шарах відходів, блокує транспортування кисню кров'ю [19 ,31].

5.1.3. Біологічні шкідливі фактори

Злежені відходи є сприятливим середовищем для патогенних мікроорганізмів. При механічному струшуванні в барабанному ситі утворюються біоаерозолі, що містять спори грибів (зокрема, *Aspergillus fumigatus*), бактерії та ендотоксини, які викликають хронічні захворювання дихальних шляхів [21] (мікози, токсичні альвеоліти) у сортувальників.

5.1.4. Психофізіологічні фактори

Робота на посту ручного контролю якості відсортованого пластику характеризується значним фізичним перевантаженням (тривале перебування в положенні стоячи), високою монотонністю праці та напруженням зорових аналізаторів.

5.2. Заходи з охорони праці

Для нейтралізації виявлених факторів на підприємстві реалізується система інженерно-технічних та організаційних заходів.

5.2.1. Технічні засоби безпеки механічного обладнання

Огородження робочих зон: Зони контакту зовнішніх опорних роликів та бандажів барабанного сита закриваються суцільнометалевими знімними кожухами. Усі конвеєри оснащуються бічними бортами заввишки не менше 200 мм для запобігання випаданню відходів.

Засоби екстреної зупинки: Вздовж кожного конвеєрного стана натягується аварійний тросовий вимикач (серії ZT-2). У зонах завантаження та біля шредера встановлюються кнопкові пости «Stop-Emergency».

Світлозвукова сигналізація: Перед автоматичним запуском лінії ПЛК Siemens вмикає попереджувальний звуковий сигнал тривалістю 10–15 секунд по всьому цеху.

5.2.2. Розрахунок та організація вентиляції робочих зон

Для забезпечення нормативного стану повітряного середовища в кабіні ручного сортування та в зонах виділення пилу проєктується система загально обмінної та місцевої витяжної вентиляції (аспірації).

Об'єм повітря, який необхідно видаляти місцевою аспірацією від завантажувальної лійки барабанного сита ($L_{\text{асп}}$, м³/год), розраховується за формулою [14,21]:

$$L_{\text{асп}} = 3600 \cdot F_{\text{отв}} \cdot v_{\text{всмокт}} \quad (30)$$

де: $F_{\text{отв}}$ - площа відкритих прорізів завантажувального бункера, через які можливе вибивання пилу (приймаємо $F_{\text{отв}} \approx 1.2$ м²);

$v_{\text{всмокт}}$ - мінімальна швидкість руху повітря в прорізі, що запобігає поширенню пилу назовні (для дрібнодисперсного пилу побутових відходів приймається $v_{\text{всмокт}} = 0.7$ м/с).

$$L_{\text{асп}} = 3600 \cdot 1.2 \cdot 0.7 = 3024 \text{ м}^3/\text{год}$$

Для кабіни ручного сортування передбачається подача очищеного та кондиційованого повітря з надлишковим тиском (підпором), що унеможливлює проникнення пилу та запахів із загального технологічного цеху. Кратність повітрообміну в кабіні приймається рівною $K = 12$ обмінів на годину.

5.2.3. Захист від шуму, вібрації та нормалізація освітлення

- **Віброізоляція:** Важкий первинний шредер (160 кВт) та балістичний сепаратор встановлюються на індивідуальні залізобетонні фундаменти через спеціальні еластомірні віброізолюючі опори, що знижує передачу структурного шуму на робочі майданчики.
- **Освітлення:** Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [34], на робочих столах кабіни ручного відбору пластику встановлюється комбіноване світлодіодне освітлення, що забезпечує рівень освітленості не менше **300 лк** із коефіцієнтом пульсації до 10%.

5.3. Пожежна безпека

За класифікацією вибухопожежної та пожежної небезпеки (ДСТУ Б В.1.1-36) [35], будівля головного сортувального цеху відноситься до **категорії В**.

Сортувальний комплекс оснащується автоматичними системами пожежної безпеки відповідно до ДБН В.2.5-56:2014 [36].

5.3.1. Системи автоматичного виявлення та гасіння пожеж

Оскільки тертя у шредері або іскроутворення в барабані від випадкових металевих предметів є основними джерелами запалювання, захист реалізується безпосередньо всередині технологічних об'ємів:

- Як зазначено в розділі автоматизації, захисні кожухи барабанного сита та приймальна камера шредера обладнуються оптичними ІЧ-сповіщувачами полум'я **Honeywell Fire Sentry SS4**.
- Всередині кожухів прокладаються трубопроводи автоматичної дренчерної системи водяного гасіння. При отриманні сигналу про іскру, ПЛК за 0.1 с зупиняє рух стрічок і відкриває соленоїдний клапан подачі води під тиском 0.4 МПа. Дренчерні форсунки створюють суцільну завісу тонко розпиленої води, ліквідуючи спалах у зародку [28,30].

5.3.2. Первинні засоби та шляхи евакуації

Приміщення цеху комплектується вуглекислотними (ВВ-5) та порошковими (ВП-9) вогнегасниками з розрахунку один вогнегасник на 100 м² площі.

Ширина евакуаційних проходів із сортувальної кабіни проєктується не менше 1.2 м, а двері відкриваються назовні за ходом евакуації в напрямку сходових кліток. На стінах встановлюються світлові покажчики «Вихід» з автономними акумуляторами на 3 години роботи.

5.4. Оцінка впливу на навколишнє середовище (ОВНС)

Експлуатація комплексу механіко-біологічної обробки потужністю

100000 т/рік супроводжується локальним впливом на три основні складові навколишнього середовища.

5.4.1. Вплив на атмосферне повітря

Без впровадження очисних систем комплекс викидав би в атмосферу значні об'єми забруднюючих речовин. Основними джерелами є повітряний сепаратор (віндзифтер) та аспіраційні парасолі конвеєрів пересипання [21,25]. Річний валовий викид неорганічного пилу від переробки 100 000 тонн відходів за відсутності фільтрів може становити до 12–15 тонн на рік [21], супроводжуючись емісією ЛОС та неприємних запахів (меркаптанів) від старих органічних залишків.

5.4.2. Вплив на гідросферу

Технологічні стічні води: Утворюються в процесі регулярного вологого прибирання цеху, миття конвеєрних стрічок та внутрішніх поверхонь барабанного сита від налиплого бруду. Ці стоки характеризуються екстремально високим хімічним (ХСК до 2000 мг/л) та біологічним ($ПКК_5$ до 1200 мг/л) споживанням кисню, високим вмістом зважених часток (земля, пісок) та нафтопродуктів від мастил.

Поверхневі стоки: Дощові та талі води з території підприємства містять зважені речовини та залишки паливно-мастильних матеріалів.

5.4.3. Вплив на літосферу та утворення відходів

Сам комплекс є природоохоронним об'єктом, оскільки вилучає 97% корисних компонентів зі злеженого масиву. Проте в результаті сортування утворюється 3% (3000 тонн/рік) неутилізованого баласту (залишки сильно деградованих композитів, гуми, забрудненого текстилю), який підлягає

остаточному санітарному захороненню.

5.5. Заходи з мінімізації екологічного впливу

Для зниження екологічних ризиків до нормативних рівнів (згідно з вимогами Директиви ЄС про промислові викиди) у проєкті комплексу впроваджена системи екозахисту.

5.5.1. Очищення атмосферних викидів

Запилене повітря від аспіраційних систем барабана, шредера та конвеєрів перед викидом в атмосферу проходить двоступеневу систему очищення:

Перший ступінь (Грубе очищення): Високоефективні циклони типу ЦН-15, які вловлюють до 85–90% великих та середніх часток пилу (пісок, шматочки пластику).

Другий ступінь (Тонке очищення): Промислові рукавні фільтри з імпульсною продувкою стисненим повітрям (серії ФРІ). Ефективність вловлювання дрібнодисперсного пилу становить **99.8%**, що забезпечує залишкову концентрацію пилу у викиді не більше 10 мг/м³ (при нормі 50 мг/м³).

Дезодорація: Повітря після рукавних фільтрів перед викидом пропускається крізь адсорбційні вугільні фільтри або насипні біофільтри з деревної кори для повної нейтралізації запахів та летючих органічних сполук.

5.5.2. Раціональне поводження з відсівом (гумусом)

Найбільша за масою фракція, що відсіюється крізь 80-мм отвори спроєктованого барабанного сита (55% або 55 000 тонн на рік), являє собою органо-мінеральну суміш (стабілізований гумус із землею). Направлення її на повторне захоронення є економічно та екологічно недоцільним.

У проєкті передбачено спрямування цієї маси на майданчики біостабілізації (аеробне компостування в тунелях). Після 4-6 тижнів термічної

стабілізації матеріал перетворюється на абсолютно інертний технічний ґрунт (CLO) [17]. Цей ґрунт використовується безпосередньо на цьому ж полігоні як технологічний пересипний шар для ізоляції нових карт або для рекультивації та благоустрою закритих сміттєвих схилів, що повністю виключає необхідність закупівлі та завезення чистого кар'єрного ґрунту.

РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

Сучасна парадигма управління твердими побутовими відходами, особливо в контексті реалізації технологій рекультивації полігонів (landfill mining), вимагає безпрецедентного рівня технічної підготовки. Проєктування сміттєсортувального комплексу є складним багатокритеріальним завданням, де номінальна ринкова вартість обладнання є лише одним із багатьох факторів, що визначають загальні капітальні витрати.

Оскільки вітчизняне злежане сміття характеризується екстремальною вологістю (35-44% органіки) та діє як потужний в'яжучий агент , застосування дорогих високоточних оптичних сепараторів (NIR-сканерів) є технічно неефективним через ефект «чорного тіла». Тому основний бюджет проєкту свідомо зміщений у бік надійного механічного обладнання, стійкого до колосальних ударних та абразивних навантажень.

6.1. Визначення витрат на створення комплексу

Капітальні інвестиції формуються за рахунок придбання відновленого обладнання на європейських аукціонних платформах та дилерських мережах, що дозволяє суттєво оптимізувати бюджет без втрати надійності.

Таблиця 6.1.

Зведений кошторис вартості основного технологічного обладнання

Назва обладнання	**Середня ринкова ціна (EUR)**	**Інженерне обґрунтування вартості**
Барабанне сито з розривачем пакетів (D=2.5, L=8.0)	65,000	Раціональна ціна за установку з товщиною обичайки 8 мм для компенсації абразивного зносу.

Продовження таблиці 6.1.

Назва обладнання	Середня ринкова ціна (EUR)	Інженерне обґрунтування вартості
Двовальний шредер великогабаритних відходів (≈160 кВт)	170,000	Оптимальний вибір - вживані моделі (типу ARJES VZ 750 / Hammel VB 750) після повної реновації валів на заводі-виробнику.
Балістичний сепаратор (аналог STADLER STT2000)	60,000	Ціна за агрегат із прийнятним залишковим ресурсом кривошипно-шатунного механізму.
Електромагнітні сепаратори (тип МП-100)	4,000	Середня ціна за 2 одиниці вітчизняних підвісних самоочисних плит.
Вихрострумовий сепаратор (Eddy Current)	20,000	Необхідний високочастотний ексцентриковий ротор для захисту стрічки від пропалювання металевим пилом.
Повітряний сепаратор (Віндзифтер)	65,000	Надійний агрегат для аеродинамічного продукування низькоякісного RDF-палива (до 25 т/год).
Прес-пакувальник (85 т)	65,000	Якісно відновлений європейський канальний прес для забезпечення безперебійної логістики.
Конвеєрні та живильні системи	110,000	Бюджет враховує необхідність важкого сталевого пластинчастого живильника для прийому ударів від грейфера.

Продовження таблиці 6.1.

Назва обладнання	Середня ринкова ціна (EUR)	Інженерне обґрунтування вартості
Системи очищення (Аспірація та ЛОС)	80,000	Капітальні витрати на екологічну відповідність стандартам промислових викидів (циклони, рукавні фільтри).
Автоматизація (ПЛК + SCADA)	70,000	Інтелектуальне управління Siemens S7-1500 та частотні перетворювачі Danfoss.
Системи безпеки (ІЧ-сповіщувачі + Дренчери)	25,000	Складна система фіксації іскор (Honeywell) всередині барабана та шредера з миттєвим гасінням.
Разом базова вартість обладнання:	**734,000**	

Відповідно до інженерної практики будівництва об'єктів механіко-біологічної обробки, загальна вартість комплексу включає нормативні коефіцієнти супутніх витрат:

- **Монтажні та будівельні роботи (15%):** 110,100 EUR. Витрати обумовлені необхідністю облаштування глибоких віброізоляційних залізобетонних фундаментів під важкий 20-тонний шредер.
- **Логістика та митне очищення (8%):** 58,720 EUR. Включає оренду низькорамних тралів для негабаритного барабанного сита та митні платежі.
- **Пусконалагоджувальні роботи (5%):** 36,700 EUR. Витрати на програмування логіки ПЛК, параметризацію частотних перетворювачів та налаштування віндзифтерів під місцеву насипну щільність сміття.
- **Резервний фонд (10%):** 73,400 EUR. Закладається на непередбачувані витрати (кабельні траси, посилення перекриттів).

Консолідований бюджет проєкту (Капітальні інвестиції, K): 1,012,920 EUR. [6]

6.2. Аналітичне обґрунтування структури капіталу

Глибокий аналіз бюджетоутворюючих центрів виявляє чіткі акценти, продиктовані роботою зі злежаними відходами:

Захист від «Тарифної пастки»: Стрімке зростання тарифів на електроенергію робить інтеграцію частотних перетворювачів технічною та економічною необхідністю. Прямий запуск 9-тонного барабана створює пускові струми, що перевищують номінальні в 6 разів. Плавний розгін запобігає колосальним штрафам за перевищення дозволеної приєднаної потужності.

Механічна стійкість замість оптичної прецизійності: Через ефект «чорного тіла» (налипання бруду) бюджет свідомо зосереджений на посиленій грубій механіці. Проєктування отворів 80 мм у ситі та використання балістичної сепарації гарантує стабільне виведення вологої органіки до її перетворення на липкий слиз.

Логістична рентабельність: Транспортування неякісного пухкого RDF на відстані понад 200 км є глибоко збитковим. Інвестиція в індустріальний прес (65,000 EUR) дозволяє формувати надщільні кіпи (500-600 кг/м³), кардинально знижуючи питомі транспортні витрати.

Математичне хеджування пожежних ризиків: Потрапляння літій-іонних акумуляторів у 160-кіловатний шредер гарантовано викликає термічний спалах (Thermal runaway). Вартість системи ІЧ-сповіщувачів (25,000 EUR) становить лише 14% від вартості шредера, але рятує ключовий вузол від термічного знищення.

6.3. Розрахунок експлуатаційних витрат

Щорічні поточні витрати ($C_{\text{експ}}$) підприємства (при продуктивності 100

000 т/рік, 4000 робочих годин):

1. **Електроенергія:** При середній споживаній потужності 220 кВт та тарифі 0.15 EUR/кВт·год — 132,000 EUR/рік.
2. **Фонд оплати праці:** Штат із 27 осіб (брутто-зарплата 600 EUR/міс) — 194,400 EUR/рік.
3. **Амортизація (10% від К):** 101,292 EUR/рік.
4. **Ремонт і ТО (5% від вартості обладнання 734k EUR):** 36,700 EUR/рік.
5. **Інші витрати (15% від ФОП):** 29,160 EUR/рік.

Загальні щорічні експлуатаційні витрати: ≈ 493,552 EUR/рік.

6.4. Оцінка економічної ефективності та окупності

Оцінка економічної ефективності проєкту є фінальним етапом фінансового планування, який синтезує технічні параметри комплексу та ринкові реалії. Аналіз базується на консервативному підході: доходи від тарифу на прийом сміття приймаються рівними нулю, а розрахунок ведеться виключно на основі комерційної цінності вилучених матеріалів.

6.4.1. Формування дохідної частини підприємства

Вітчизняне злежане сміття характеризується екстремальною вологістю (до 35–44% органіки) та значним поверхневим забрудненням. Відповідно, вилучена вторинна сировина не може конкурувати за ціною з матеріалами, отриманими з жовтих контейнерів роздільного збору. Окремим напрямком є виробництво RDF-палива: враховуючи наявність мінерального пилу, на даному комплексі продукується низькоякісне RDF-паливо для потреб цементної промисловості [5,18].

Для забезпечення логістичної рентабельності реалізації продукції (запобігання транспортуванню «повітря»), весь об'єм полімерів, картону та

RDF підлягає обов'язковому ущільненню в автоматичному канальному пресі до щільності 500–600 кг/м³. Це дозволяє знизити питомі логістичні витрати та реалізувати продукцію за гуртовими цінами.

Таблиця 6.2.

Розрахунок річного валового доходу від реалізації продукції (з дисконтом на забрудненість)

Найменування продукції	**Річний обсяг вилучення, т**	**Реальна оптова ціна (забруднена сировина), EUR/т**	**Сумарний дохід, EUR/рік**
Вторинні полімери (мікс ПЕТ, ПНД, тюковані)	8 000	100	800 000
Макулатура (вологий картон, тюкований)	5 000	40	200 000
Металобрухт (чорний та кольоровий мікс)	2 000	120	240 000
Низькоякісне RDF-паливо (тюковане)	15 000	10	150 000
Біостабілізований ґрунт (CLO)	55 000	Власне споживання (рекультивація)	0
Неутилізований баласт	5 000	Захоронення	0
Загальний валовий дохід	**100 000**		**1 390 000**

6.4.2. Розрахунок показників прибутковості підприємства

Для визначення фінансового результату діяльності комплексу розраховуються показники валового та чистого прибутку на основі раніше визначених сумарних експлуатаційних витрат ($C_{\text{експ}} \approx 493552$ EUR/рік).

Валовий прибуток комплексу (P_v) - це різниця між виручкою від реалізації продукції та експлуатаційними (операційними) витратами:

$$P_v = D - C_{\text{експ}} \tag{31}$$

$$P_v = 1390000 - 493552 = 896448 \text{ EUR/рік}$$

Чистий прибуток (P_q) розраховується після сплати податку на прибуток підприємств (за базовою ставкою в Україні 18%):

$$P_q = P_v \cdot (1 - 0.18) \tag{32}$$

$$P_q = 896448 \cdot 0.82 \approx 735087 \text{ EUR/рік}$$

Рентабельність інвестицій (ROI — Return on Investment) дозволяє оцінити прибутковість вкладеного капіталу ($K = 1\,012\,920$ EUR):

$$ROI = \frac{P_q}{K} \cdot 100\% \tag{33}$$

$$ROI = \frac{735087}{1012920} \cdot 100\% \approx 72.5\%$$

Показник рентабельності на рівні 72.5% свідчить про надзвичайно високу операційну ефективність, що характерно для проєктів *Landfill Mining*, де сировина надходить на переробку фактично без вартості закупівлі.

6.4.3. Розрахунок терміну окупності проєкту

Простий термін окупності (T) - це час, необхідний для того, щоб грошові потоки, генеровані проєктом, повністю покрили початкові капітальні інвестиції. У фінансовому моделюванні інженерних об'єктів для розрахунку грошового потоку (Cash Flow, CF) до чистого прибутку обов'язково додаються амортизаційні відрахування ($C_{\text{ам}} = 101292$ EUR/рік), оскільки вони не є реальними грошовими виплатами, а акумулюються на рахунках підприємства для майбутнього оновлення фондів.

Щорічний чистий грошовий потік (CF):

$$CF = P_q + C_{\text{ам}} = 735087 + 101292 = 836379 \text{ EUR/рік} \tag{34}$$

Термін окупності капітальних інвестицій:

$$T = \frac{K}{CF} = \frac{1012920}{836379} \approx 1.21 \text{ року} \quad (35)$$

6.4.4. Аналіз чутливості проєкту (Стрес-тест економічної моделі)

Оскільки ринок вторинної сировини є волатильним, а морфологічний склад злежаних відходів може погіршуватися, для підтвердження надійності проєкту необхідно провести аналіз чутливості. Розглянемо песимістичний сценарій: через надмірне забруднення або падіння ринкових цін, загальний валовий дохід зменшується на 30%.

За песимістичного сценарію:

- Знижений валовий дохід: $D_{\text{пес}} = 1390000 \cdot 0.70 = 973000$ EUR/рік.
- Валовий прибуток: $P_{v(\text{пес})} = 973000 - 493552 = 479448$ EUR/рік.
- Чистий прибуток після податків (18%): $P_{q(\text{пес})} = 479448 \cdot 0.82 = 393147$ EUR/рік.
- Грошовий потік: $CF_{\text{пес}} = 393147 + 101292 = 494439$ EUR/рік.

Стресовий термін окупності:

$$L_{\text{асп}} = 3600 \cdot F_{\text{отв}} \cdot v_{\text{всмокт}} \quad (30)$$

$$T_{\text{пес}} = \frac{1012920}{494439} \approx 2.04 \text{ року}$$

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне інженерно-екологічне завдання - розроблено проєкт спеціалізованого комплексу з механічного сортування побутових відходів номінальною потужністю 100 000 тонн на рік відповідно до Стратегії та Національного плану управління відходами в Україні [1,2,3]. Об'єктом переробки виступає специфічна сировина - «брудні», злежані та перезволожені полігонні відходи. Головним технологічним вектором спроєктованого комплексу є виробництво низькоякісного RDF-палива та вилучення базової вторинної сировини, оскільки застосування класичних схем прецизійного оптичного сортування для забруднених відходів є технічно неефективним [4,5,17].

На основі проведених досліджень та розрахунків обґрунтовано відмову від класичних валових механізмів на користь безцентрового комбінованого барабанного сита з розривачем пакетів. Визначені оптимальні габарити головної машини (внутрішній діаметр **2.5 м**, довжина **8.0 м**) та швидкісний режим на рівні ~ **12 об/хв** забезпечують необхідний трикратний запас пропускної здатності (до 100 т/год) для стабільної обробки нерівномірних порцій полігонного сміття [6,14]. Розрахунки на міцність підтвердили високу просторову жорсткість барабана з товщиною обичайки 8 мм [8,12], де максимальний прогин під повним навантаженням не перевищує 0.011 мм. Надійність опорних вузлів при екстремальних динамічних навантаженнях гарантується застосуванням сферичних роликопідшипників та осей діаметром 70 мм.

Для забезпечення повноцінного технологічного циклу підібрано номенклатуру важкого промислового обладнання, адаптованого до агресивних середовищ. Лінія укомплектована первинним двовальним шредером

потужністю **160 кВт** [23], балістичним [22], магнітними та вихрострумовими сепараторами [24], а також барабанним віндзифтером для відділення RDF-палива [25] й індустріальним прес-пакувальником із зусиллям 85 тонн [26,27]. Керування цим комплексом здійснюється за допомогою розробленої багаторівневої автоматизованої системи на базі промислового контролера **Siemens SIMATIC S7-1500** [28] та частотних перетворювачів **Danfoss VLT** [29]. Впроваджені алгоритми каскадного пуску та «висхідного блокування» дозволяють системі миттєво реагувати на перевантаження та ефективно запобігати завалам матеріалу на конвеєрних стрічках.

Особливу увагу в проєкті приділено питанням промислової та екологічної безпеки. Впровадження системи безперервного газового моніторингу та оптичних інфрачервоних сповіщувачів полум'я Honeywell Fire Sentry SS4 з дренчерним водяним гасінням [30] мінімізує ризики пожеж безпосередньо у порожнинах шредера та барабана. Запропоновані екологічні рішення, такі як двоступеневе очищення викидів за допомогою рукавних фільтрів із ефективністю **99.8%**, повністю закритий оборотний цикл водопостачання та переробка **55%** маси відсіву в біостабілізований інертний ґрунт (CLO), забезпечують відповідність підприємства сучасним жорстким природоохоронним нормам [17].

Проведене фінансове моделювання підтвердило високу інвестиційну привабливість розробленого проєкту. Оптимізація капітальних витрат завдяки використанню відновленого європейського обладнання дозволила знизити початкові інвестиції до **1.01 млн євро**. Навіть за умови реалізації низькоякісної вторинної сировини з відповідним дисконтом, очікуваний чистий прибуток перевищує **735 тисяч євро** на рік, що гарантує швидкий термін окупності на рівні **1.21 року** [18].

Таким чином, розроблений проєкт сміттєсортувального комплексу є технічно інноваційним, екологічно безпечним, фінансово рентабельним і повністю готовим до етапу робочого проєктування та практичного впровадження на полігонах твердих побутових відходів в Україні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.Про управління відходами. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text (дата звернення: 30.05.2026).

2.Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p#Text (дата звернення: 30.05.2026).

3.Про затвердження Національного плану управління відходами до 2030 року. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/117-2019-p#Text (дата звернення: 30.05.2026).

4.EUR-Lex - 02008L0098-20180705 - EN - EUR-Lex. *EUR-Lex – Access to European Union law – choose your language*. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&qid=1684563845737 (дата звернення: 30.05.2026).

5.Паливо тверде відновлюване. Технічні характеристики та класи (EN 15359:2011, IDT). Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

6.Анур'єв В. І. Довідник конструктора-машинобудівника: У 3-х т. - М: Машинобудування, 2006.

7.Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: підручник. Львів : Афіша, 2020. 560 с.

8.Писаренко Г. С, Квітка О. Л, Уманський Є. С. Опір матеріалів : підручник для студентів вищих навчальних закладів / ред. академіка Г. С. Писаренка. 2-ге вид. Київ, «Вища школа», 2004. 655 с.

9.Жигулін О. А, Махмудов І. І, Жигуліна Н. О. Підйомно-транспортні машини:

навчальний посібник. Ніжин : Вид. ПП Лисенко М. М., 2020. 304 с.

10. Григоров О. В, Вишневецький Г. В, Петренко Н. О. Розрахунок стрічкового конвеєра. Методичні вказівки до курсового проекту «Машини безперервного транспорту». Харків : Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» (НТУ «ХПІ»), 2010. 24 с

11. Григоров О. В., Ін. Розрахунок стрічкового конвеєра. НТУ "ХПІ", 2010.

12. Довбуш Т. А., Ін. Опір матеріалів. конкурсні задачі з прикладами розв'язування. Ч. 2. Тернопіль, 2023.

13. Курмаз Л. В. Основи конструювання деталей машин. Харків : Вид-во НТУ "ХПІ", 2010.

14. Ловейкін В. С., Ін. Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин: монографія. К., 2019.

15. Поліщук Л. К. Прикладна механіка та матеріалознавство. Вінниця : ВНТУ, 2011.

16. Добрянський С. С., Малафєєв Ю. М. Технологічні основи машинобудування. Київ : КПІ, 2020.

17. Русіна Н. Г., Ін. Еколого-технічні засади рекультивації земель закритих полігонів ТПВ. *Екологічні науки*. 2021. Т. 5.

18. Використання відходів у якості палива в теплоенергетичних системах. *Головна · eNUPPIR · Institutional Repository*. URL: https://reposit.nupp.edu.ua/media/33539 (дата звернення: 30.05.2026).

19. Потенціал видобутку звалищного газу на північному сході України. *Journal of Ecological Engineering*. URL: https://www.jeeng.net/pdf-183827-106733?filename=106733.pdf (дата звернення: 30.05.2026).

20. Power of solid municipal waste. *LnuOpen*. URL: https://open.lnu.se/index.php/eco-tech/article/download/520/459/1560 (дата звернення: 30.05.2026).

21. Evaluation of dust emission rate from landfill mining activities. *DIGITAL DETRITUS - DETRITUS*. URL: https://digital.detritusjournal.com/articles/evaluation-of-dust-emission-rate-from-landfill-mining-activities/4565 (дата звернення: 30.05.2026).

22. Stadler GmbH. STT 2000 Ballistic Separator : Product Brochure. URL: https://w-stadler.de/fileadmin/redaktion/download/Brochure_ProductDigital_2025-09-30_EN.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
23. ARJES GmbH. IMPAKTOR 250 EVO / EVO II : Twin-shaft shredder specifications. URL: https://arjes-impaktor.de/wp-content/uploads/broschures/arjes_broschuere_impaktor_250-en.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
24. STEINERT GmbH. STEINERT EddyC : Non-ferrous metal separation. URL: https://steinertglobal.com/sorting-systems/magnetic-separation/eddy-current-separators/steinert-eddyc/ (дата звернення: 30.05.2026).
25. BRT HARTNER. Stationary Recycling Machines : Air Belt Separator BBS / BSS. URL: https://www.eggersmann-recycling.com/fileadmin/media/Broschueren/2024_BRT_HARTNER_EN_2.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
26. HSM GmbH + Co. KG. Fully Automatic Channel Baling Presses : HSM VK Series. URL: https://www.lfm.cz/images/Ke.stazeni/EN_HSM_Baling_press_systems_06.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
27. Macpresse Europa S.R.L. Baling presses : Technical Data Series MAC 107/2. URL: https://www.macpresse.com/wp-content/uploads/2019/05/Brochure-General-Macpresse-Serie2-MY-10-2022-Web-Eng.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
28. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 CPU 1513-1 PN : Equipment Manual (Doc ID: A5E40881673-AB). URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/842/109752842/att_936139/v4/s71500_cpu1513_1_pn_dtc_manual_en-US_en-US.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
29. Danfoss A/S. VLT® AutomationDrive FC 301/FC 302 : Operating Guide (Doc ID: MG34U422). URL: https://assets.danfoss.com/documents/latest/276086/AQ275530336234en-US0201.pdf (дата звернення: 30.05.2026).

30. Honeywell Analytics. Fire Sentry SS4 : Electro-Optical Digital Fire and Flame Detectors. URL: https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/sps/his/en-us/products/gas-and-flame-detection/documents/ss01143_ss4_specs_flr_8_22_12.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
31. Dräger Safety AG & Co. KGaA. Dräger Polytron 8700 : Stationary gas detector (PIR 7000). URL: https://www.heatingandprocess.com/wp-content/uploads/2016/03/Drager-Polytron-8700-Fixed-Gas-Detector-Spec-Sheet.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
32. Siemens Milltronics. SITRANS Probe LU (HART) – Quick Start Manual. URL: http://cindtechs.ca/unleashd/catalog/sensors/SiemensSITRANS-ProbeLU/SIEMENS-sitrans-probe-lu-qsg-a5e32168031-002-ab-2013-12.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
33. Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT) : ДСТУ EN ISO 12100:2014. [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 94 с.
34. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28:2018. [Чинний від 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.
35. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою : ДСТУ Б В.1.1-36:2016. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 40 с.
36. Системи протипожежного захисту : ДБН В.2.5-56:2014. [Чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 132 с.
37. Львів розриває договір з генпідрядником сміттєпереробного заводу Control Process S.A.: причини затримки. *Zaxid.net: інформаційний портал*. 2026. 24 берез. URL: https://zaxid.net/fakti_proti_feykiv_pravda_pro_lvivskiy_smittyepererobniy_zavod_n1619801 (дата звернення: 30.05.2026).

38. "Ми будемо змушені закрити сміттєпереробний завод у Житомирі, ми не будемо працювати у збиток", — керівник Євгеній Барах. *Суспільне Житомир*. 2026. 27 берез. URL: https://suspilne.media/zhytomyr/1275192-mi-budemo-zmuseni-zakriti-smittepererobnij-zavod-u-zitomiri-mi-ne-budemo-pracuvati-u-zbitok-kerivnik-evgenij-barah/ (дата звернення: 30.05.2026).
39. Про встановлення тарифу на послуги з передачі електричної енергії НЕК «УКРЕНЕРГО» на 2026 рік : Постанова НКРЕКП від 09.12.2025 № 2345. URL: https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-tarifu-na-poslugi-z-peredachi-elektrichnoyi-energiyi-nek-ukrenergo-na-2026-rik (дата звернення: 30.05.2026).

Додатки