

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут нафти і газу та енергетики
Кафедра прикладної екології та хімії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи бакалавра

**на тему: «Розробка проєкту впровадження цифрових технологій моніторингу
ТПВ в систему управління відходами Диканської громади»**

401-СЕ 10292643 ПЗ

Виконав студент групи 401-СЕ
спеціальності 101 Екологія

А.Д. Соколянська

Керівник:

.т.н., .

В. .

Рецензент:

доцент закладу вищої освіти
кафедра автомобільного транспорту
та транспортних технологій
Філії Класичного приватного університету
у місті Кременчук, к.т.н. за спеціальністю
21.06.01 «Екологічна безпека»

Д.В. Поліщук

ЗАТВЕРДЖЕНО
Наказ Міністерства освіти і
науки, молоді та спорту України
29 березня 2012 року № 384

Форма № Н-9.01

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут нафти і газу та енергетики
Кафедра прикладної екології та хімії
Освітній рівень бакалавр
Спеціальність 101 Екологія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри прикладної
екології та хімії

О.Е. Ілляш
“ _____ ” _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

Соколянській Анастасії Дмитрівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка проєкту впровадження цифрових технологій моніторингу
ТПВ в систему управління відходами Диканської громади

керівник роботи Фролов Валерій Федорович, д.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом вищого навчального закладу

від “ _____ ” _____ 2026 року № _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____ Регіональний план управління відходами у
Полтавській області до 2030 року, статистичні дані щодо кількості населення та
обсягів утворення ТПВ у Диканській громаді, дані про існуючу системц збирання
ТПВ у Диканській ТГ, картографічний матеріал по населеним пунктам Диканської
ТГ _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз сучасного стану системи поводження з побутовими відходами Диканської територіальної громади, теоретико-методологічні основи цифровізації моніторингу ТПВ, аналіз показників технологічної ефективності системи поводження з відходами Диканської громади, проектні рішення щодо впровадження цифрової системи моніторингу в Диканській громаді

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Титульний лист; 2. Опис роботи; 3. Структурно-логічна схема дослідження; 4. Характеристика Диканської громади; 5. Проблемні аспекти управління відходами в громаді; 6. Цифрові технології у сфері ТПВ; 7. Методика аналітичних досліджень; 8. Ефективність використання контейнерного парку; 9. Логістична ефективність маршрутів Диканської громади; 10. Трирівнева архітектура цифрової системи моніторингу; 11. Загальні висновки.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Характеристика Диканської ТГ як суб'єкта утворення відходів (склад та населення громади, житловий фонд, стан транспортних зв'язків та вулично-шляхової мережі).	27.04-03.05.2026	
2	Аналіз існуючого стану очищення території населених пунктів Диканської ТГ від твердих побутових відходів.	04.05-10.05.2026	
3	Теоретико-методологічні основи цифровізації моніторингу ТПВ	11.05-17.05.2026	
4	Аналіз показників технологічної ефективності системи поводження з відходами Диканської громади	18.05-31.05.2026	
5	Розробка проектних рішень і пропозицій по цифровізації системи управління відходами громади	01.06-07.06.2026	
6	Оформлення графічного матеріалу	08.06-21.06.2026	

Студент _____ Соколянська А.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Бредун В.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ПОВУТОВИМИ ВІДХОДАМИ ДИКАНСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ.....	8
1.1. Соціально-економічна характеристика громади та існуюча інфраструктура житлового фонду.....	8
1.2 Характеристика діючої системи збирання, транспортування та видалення твердих побутових відходів.....	13
1.3. Оцінка технічного парку комунальних підприємств та логістичних маршрутів вивезення відходів.....	18
1.3.1. Техніко-технологічна оцінка парку спеціалізованого автотранспорту та контейнерного господарства.....	18
1.3.2. Композиційний аналіз логістичних маршрутів та показників транспортної ефективності.....	21
1.4. Проблемні аспекти управління відходами в умовах сільської та селищної забудови громади.....	24
Висновки до розділу 1.....	28
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ ТПВ.....	31
2.1. Принципи функціонування сучасних цифрових технологій у сфері ТПВ.	31
2.1.1. Акустичні та оптичні методи детермінації стану накопичення відходів	31
2.1.2. Мережеві протоколи передачі даних та енергоефективність IoT-вузлів	32
2.1.3. Радіочастотна ідентифікація як метод юридичної та операційної верифікації.....	33

					401-СЕ №10292643		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробила	Соколянська				Літ.	Арк.	Акрушіє
Керівник	Бредун В.І					5	70
Н. Контр.					НУПП ім. Ю.Кондратюка Кафедра прикладної екології та природокористування		
Зав. кафедри	Ілляш О.Е.						
					Розробка проєкту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади		

2.1.4. Супутникова телематика та алгоритми динамічної оптимізації траєкторій.....	34
2.1.5. Кібербезпека та цілісність даних у цифрових екосистемах ТПВ.....	35
2.1.6. Системний синтез та формування Big Data у стратегічному управлінні	36
2.2. Світовий та український досвід використання інтелектуальних систем управління відходами.....	36
2.3. Методика визначення критеріїв доцільності впровадження систем цифрового моніторингу	41
2.3.1. Основна концепція.....	41
2.3.2. Кількісна оцінка критеріїв доцільності	43
Висновки до розділу 2.....	47
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ ДИКАНСЬКОЇ ГРОМАДИ....	49
3.1. Аналіз об'єктів із низькою інтенсивністю накопичення відходів.....	49
3.2. Аналіз логістичної ефективності маршрутів.....	50
3.3. Аналіз коефіцієнту технологічної доцільності впровадження цифрових технологій.....	52
Висновки до розділу 3.....	54
РОЗДІЛ 4. ПРОЄКТНІ РІШЕННЯ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ В ДИКАНСЬКІЙ ГРОМАДІ.....	56
4.1. Обґрунтування вибору технологічних рішень	56
4.2. Рекомендації щодо цифровізації.....	61
4.3. Розрахунок необхідної кількості обладнання.....	61
Висновки до розділу 4.....	63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

									Арк.
									5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	401-СЕ №10292643				

ВСТУП

Актуальність теми. Умови сучасного екологічного стану територіальних громад України потребують докорінної зміни підходів до управління твердими побутовими відходами (ТПВ). Традиційні методи збирання відходів, що базуються на фіксованих графіках, демонструють низьку економічну та екологічну ефективність, особливо в сільських громадах із низькою щільністю розселення. Впровадження цифрових технологій моніторингу (IoT, LoRaWAN, RFID) є критично необхідним для оптимізації логістичних процесів, зниження експлуатаційних витрат комунальних підприємств та забезпечення сталого розвитку території у межах концепції циркулярної економіки.

Об'єкт дослідження – система поводження з твердими побутовими відходами Диканської територіальної громади.

Предмет дослідження – теоретико-методологічні засади та практичні інструменти цифровізації моніторингу процесів накопичення та транспортування ТПВ.

Мета роботи – обґрунтування доцільності та розробка проєктних рішень щодо впровадження інтелектуальної системи моніторингу ТПВ для підвищення технологічної та екологічної ефективності управління відходами в громаді.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан системи поводження з ТПВ у Диканській громаді та виявити основні інфраструктурні проблеми.
2. Дослідити теоретичні основи функціонування цифрових технологій (IoT, RFID, GNSS) у сфері екологічного моніторингу.
3. Розробити методику оцінки доцільності цифровізації на основі інтегрального індексу технологічної доцільності.
4. Провести аналіз ефективності існуючих маршрутів та використання контейнерного парку громади.
5. Обґрунтувати вибір технологічних рішень та розрахувати економічну ефективність впровадження цифрової системи.

Наукова новизна полягає у розробці авторської методики визначення Індексу цифрової доцільності Ітд, який дозволяє кількісно оцінити рівень операційних втрат системи через поєднання коефіцієнтів логістичної неефективності та недозавантаженості контейнерного парку.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці конкретного інженерного проєкту цифровізації для Диканської громади (специфікація обладнання, архітектура мережі LoRaWAN), впровадження якого дозволить скоротити витрати на вивезення відходів на 12–36% залежно від морфологічного складу ТПВ.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ ДИКАНСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

1.1. Соціально-економічна характеристика громади та існуюча інфраструктура житлового фонду

Диканська територіальна громада Полтавської області є адміністративно-територіальним утворенням, яке характеризується переважно сільським типом розселення населення та значною часткою приватного житлового сектору. Соціально-економічні особливості розвитку громади безпосередньо впливають на формування системи поводження з побутовими відходами, оскільки структура населення, тип житлової забудови, рівень благоустрою та інфраструктурне забезпечення визначають обсяги утворення відходів, їхній морфологічний склад та організаційні підходи до збирання й транспортування.

За статистичними даними станом на 1 січня 2024 року [1, 2] загальна чисельність населення Диканської територіальної громади становить 19 397 осіб. При цьому найбільша частка населення проживає в адміністративному центрі громади – селищі міського типу Диканька, де зосереджено 7 894 жителі, що становить близько 40,7% від загальної чисельності. Решта населення – 11 503 особи (59,3%) – проживає у сільських населених пунктах. Така структура розселення визначає специфіку формування системи управління відходами, оскільки значна частка населення проживає у малих населених пунктах із низькою щільністю забудови, що зумовлює значні логістичні витрати на організацію централізованого збирання та транспортування відходів.

Аналіз демографічної ситуації свідчить про наявність значної кількості малочисельних населених пунктів. У ряді сіл чисельність постійного населення становить лише декілька десятків або навіть одиниць осіб. Наприклад, у таких населених пунктах, як Андренки, Горбатівка, Міжгір'я, Онацьки та інших,

кількість мешканців не перевищує 1–5 осіб. У деяких селах (Кардашівка, Кокозівка, Кононенки, Кучерівка, Тополівка) постійне населення взагалі відсутнє. Наявність таких малозаселених територій створює додаткові труднощі при плануванні системи поводження з відходами, оскільки організація регулярного вивезення відходів з таких населених пунктів є економічно малоефективною. У зв'язку з цим при розробленні схем санітарного очищення території громади визначаються перспективні та неперспективні населені пункти щодо включення до централізованої системи збирання та вивезення побутових відходів.

Важливим фактором соціально-економічного розвитку громади є стан транспортної інфраструктури. Вулично-дорожня мережа населених пунктів у цілому забезпечує можливість організації маршрутів вивезення побутових відходів. Проте значна частина дорожнього покриття перебуває у незадовільному стані, що ускладнює рух спеціалізованої техніки, особливо в період несприятливих погодних умов, та призводить до збільшення експлуатаційних витрат комунальних підприємств.

Соціальна інфраструктура громади включає адміністративні установи, заклади освіти, культури, охорони здоров'я, підприємства торгівлі та громадського харчування. Усі ці об'єкти є додатковими джерелами утворення побутових відходів. Розрахункова частка таких відходів у загальному обсязі утворення становить приблизно 12% у сільських населених пунктах громади.

З точки зору формування потоків побутових відходів, житловий фонд є основним джерелом їх утворення. На основі розрахунків встановлено, що потенційний обсяг утворення побутових відходів у житловому фонді сільських населених пунктів Диканської територіальної громади становить близько 22 990 м³ на рік, тоді як у закладах обслуговування та соціальній сфері формується близько 3 163 м³ відходів на рік. Таким чином, загальний розрахунковий обсяг утворення побутових відходів у сільських населених пунктах громади становить приблизно 26 153 м³ на рік, а сумарний обсяг утворення відходів на території всієї громади оцінюється на рівні 44 080 м³ на рік.

Для оцінки інтенсивності утворення відходів використовується питомий показник накопичення побутових відходів на одного мешканця. Узагальнений розрахунковий показник для території громади становить приблизно 1,78 м³ відходів на одну особу на рік. Значення цього показника є інтегральним і залежить від типу житлової забудови, рівня благоустрою житла, соціально-економічного розвитку території та рівня споживання населення. Особливістю формування потоків побутових відходів у громаді є значний вплив приватної забудови, де частина відходів (органічні рештки, папір) може утилізуватися на місці, що зменшує обсяги, які надходять до системи централізованого збирання.

Таким чином, аналіз соціально-економічних умов функціонування Диканської територіальної громади дозволяє визначити ключові фактори, що впливають на систему поводження з відходами:

1. Переважання сільського типу розселення та наявність значної кількості малозаселених пунктів.
2. Домінування приватної житлової забудови, що визначає специфічну структуру утворення відходів.
3. Нерівномірність рівня інженерного благоустрою житлового фонду.
4. Обмежений рівень інфраструктурного забезпечення та незадовільний стан дорожньої мережі у сільській місцевості.

Житловий фонд є ключовим елементом просторової та соціально-економічної структури Диканської територіальної громади [2]. Він формує основні умови проживання населення, визначає рівень благоустрою територій та безпосередньо впливає на формування інфраструктурних потреб, зокрема у сфері житлово-комунального господарства, розвитку інженерних мереж та організації системи поводження з побутовими відходами. Структура житлового фонду, типи забудови та ступінь їх благоустрою мають визначальне значення для планування санітарного очищення, прогнозування обсягів утворення ТПВ та вибору організаційних схем їх збору.

Житловий фонд громади сформувався історично, переважно у другій половині ХХ століття, та характеризується значною територіальною

диференціацією. Основна частина житлової забудови зосереджена в адміністративному центрі — смт Диканька, а також у найбільших сільських населених пунктах: Стасі (2 444 особи), Великі Будища (1 235 осіб), Балясне (912 осіб), Водяна Балка (712 осіб), Орданівка (586 осіб) та Діброва (535 осіб). Саме ці населені пункти характеризуються відносно розвиненою інженерною та соціальною інфраструктурою.

Характерною особливістю житлового фонду є значне переважання індивідуальної садибної забудови, що є типовим для сільських територій України. Індивідуальні будинки, як правило, мають присадибні земельні ділянки, що створює специфічні умови проживання, впливає на структуру відходів (частина органічних відходів компостується або використовується як корм) та ускладнює організацію централізованих комунальних послуг через низьку щільність і розосереджений характер забудови. Багатоквартирна житлова забудова представлена переважно у смт Диканька, де сформувалися окремі квартали багатоповерхових та малоповерхових будинків. У деяких великих селах наявні поодинокі багатоквартирні будинки, однак їх частка у загальній структурі є незначною. З точки зору рівня інженерного благоустрою житловий фонд громади є неоднорідним. У смт Диканька присутні як багатоквартирні будинки з повним набором комунальних зручностей (централізоване водопостачання, водовідведення, опалення), так і індивідуальні будинки з різним рівнем забезпечення. Натомість, у сільських населених пунктах переважна більшість індивідуальних будинків має значно нижчий рівень благоустрою. У них часто відсутні централізовані системи каналізації та теплопостачання. Водопостачання здійснюється з індивідуальних джерел (колодязів, свердловин), а опалення — за рахунок індивідуальних систем (печей, котлів на твердому паливі).

Виходячи з цього, типологічно житловий фонд громади можна поділити на чотири основні категорії:

1. Багатоквартирні житлові будинки з повним рівнем благоустрою.
2. Багатоквартирні будинки з частковим рівнем благоустрою (наприклад, без централізованого опалення або каналізації).

3. Індивідуальні житлові будинки з присадибними ділянками та повним (або відносно повним) інженерним забезпеченням.

4. Індивідуальні житлові будинки з частковим або мінімальним рівнем благоустрою (з індивідуальним водопостачанням, локальними системами водовідведення та індивідуальним опаленням). Остання категорія є найбільш характерною для сільської місцевості.

Рівень благоустрою безпосередньо впливає на питомі показники утворення ТПВ:

- для багатоквартирних будинків з повним благоустроєм характерний високий рівень утворення відходів — близько $1,77 \text{ м}^3/\text{особу}/\text{рік}$,

- у будинках з частковим благоустроєм цей показник дещо нижчий — приблизно $1,66 \text{ м}^3/\text{особу}/\text{рік}$,

- в індивідуальних будинках з присадибними ділянками загальний показник накопичення може становити близько $1,82 \text{ м}^3/\text{особу}/\text{рік}$, але фактичний обсяг відходів, що потрапляє на полігон, є меншим через самостійну утилізацію частини з них,

- у сільській місцевості, де переважають будинки з мінімальним рівнем благоустрою, середній показник є вищим і становить приблизно $2,08\text{--}2,13 \text{ м}^3/\text{особу}/\text{рік}$ (усереднений показник для сільських населених пунктів — близько $2,12 \text{ м}^3/\text{особу}/\text{рік}$).

Загалом для всієї Диканської громади усереднений питомий показник утворення побутових відходів, з урахуванням співвідношення різних типів забудови, становить близько $1,923 \text{ м}^3$ на одну людину на рік, що дещо вище за узагальнений показник $1,78 \text{ м}^3$, наведений у підрозділі 1.1, і свідчить про необхідність деталізації розрахунків за типами забудови.

Важливим фактором, що впливає на використання житлового фонду, є демографічні процеси, описані вище. У багатьох малих населених пунктах з критично низькою чисельністю населення (Андренки, Горбатівка, Міжгір'я, Нова Василівка та ін.) частина будинків використовується сезонно або перебуває в занедбаному стані. Це призводить до часткової втрати житлового фонду та створює

додаткові труднощі для планування та утримання інженерної інфраструктури, роблячи централізоване надання послуг економічно неефективним.

Підсумовуючи, житловий фонд Диканської територіальної громади — це складна система, яка характеризується:

- домінуванням індивідуальної житлової забудови садибного типу;
- значною диференціацією рівня благоустрою — від повного інженерного забезпечення в центрі до мінімального у віддалених селах;
- наявністю невеликої кількості багатоквартирних будинків, зосереджених переважно у смт Диканька;
- нерівномірним територіальним розподілом та концентрацією в найбільших населених пунктах;
- суттєвим впливом демографічних процесів, що призводить до утворення малозаселених територій.

Ці особливості є визначальними для перспективного планування. Вони вимагають диференційованих підходів до організації системи санітарного очищення: застосування контейнерної системи в зонах багатоквартирної забудови та планово-подвірного або змішаного збору — у приватному секторі, з обов'язковим урахуванням низької щільності населення, відстаней та стану доріг у сільській місцевості.

1.2 Характеристика діючої системи збирання, транспортування та видалення твердих побутових відходів

Система поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) є важливим елементом забезпечення санітарного благополуччя населення, екологічної безпеки територій та раціонального використання природних ресурсів. Вона являє собою сукупність організаційних, технічних та технологічних заходів, спрямованих на своєчасне збирання, накопичення, транспортування та подальше видалення або оброблення відходів. Ефективність функціонування такої системи значною мірою залежить від узгодженості роботи її основних складових елементів: джерел

утворення, системи контейнерного накопичення, спеціалізованого транспорту, маршрутної схеми обслуговування та об'єктів кінцевого видалення.

Нормативно-правове регулювання діяльності у сфері поводження з побутовими відходами базується на положеннях законодавчих і нормативних актів України [3-16], а також державних санітарних правил і норм щодо утримання територій населених пунктів. Ці документи визначають вимоги до організації систем збирання, транспортування, оброблення та захоронення відходів, встановлюють санітарні вимоги до розміщення контейнерних майданчиків і місць видалення відходів, а також принципи планування систем санітарного очищення.

У Диканській територіальній громаді функції збирання та вивезення ТПВ виконує комунальне підприємство – Диканський комбінат комунальних підприємств [17]. Основними напрямками діяльності підприємства є водопостачання та водовідведення, утримання житлового фонду і прибудинкових територій, а також організація збирання та транспортування побутових відходів. Підприємство розташоване в центральній частині смт Диканька та забезпечує обслуговування території, де зосереджена основна частина системи збирання відходів.

Джерела утворення відходів. Формування потоків ТПВ у межах громади відбувається за рахунок діяльності різних категорій утворювачів: населення (житловий сектор), підприємств торгівлі та громадського харчування, закладів освіти, культури, охорони здоров'я, адміністративних установ та інших об'єктів соціальної інфраструктури. Основним джерелом є житловий сектор, на який припадає переважна частка загального обсягу відходів. Обсяги утворення мають певну нерівномірність і залежать від щільності населення, типу житлової забудови, рівня благоустрою та сезонних факторів. Як правило, у районах приватної забудови спостерігається менша щільність населення та менші обсяги утворення в розрахунку на один контейнерний майданчик, тоді як у районах багатоквартирної забудови потоки відходів мають значно більшу інтенсивність.

Розрахунки обсягів утворення відходів виконуються окремо для кожного джерела. Сумарний добовий обсяг визначається як сума відходів від приватного та

багатоквартирного житлового секторів, а також від об'єктів громадського призначення. Відповідні розрахунки наведені у додатках до проекту.

Система збирання та накопичення відходів. Первинне накопичення відходів у громаді здійснюється переважно за планово-подвірною системою з використанням контейнерного обладнання [18]. Для цього на спеціально обладнаних майданчиках встановлюються контейнери. Розміщення майданчиків виконується з урахуванням санітарних, експлуатаційних та містобудівних вимог (відстані до житлових будинків, наявність твердого покриття, можливість під'їзду транспорту).

Контейнерне обладнання представлене ємностями різної місткості. Згідно з даними, у системі використовуються контейнери об'ємом 0,12 м³, 0,24 м³, 0,75 м³, 0,77 м³ та 1,1 м³. Це дозволяє адаптувати систему до конкретних умов: контейнери меншої місткості застосовуються на майданчиках з невеликим обсягом утворення (приватний сектор), більшої – у районах багатоквартирної забудови. Станом на кінець 2023 року на території громади функціонувало 54 контейнерних майданчики, на яких було встановлено 109 контейнерів. Розрахунок необхідної кількості контейнерів для кожного майданчика, з урахуванням добових обсягів та періоду накопичення, наведено в додатку 7.

Важливою особливістю є те, що контейнерне обладнання розміщене переважно лише на території адміністративного центру – смт Диканька. Інші населені пункти громади фактично не забезпечені контейнерними майданчиками для централізованого збору, що призводить до відсутності організованої системи на більшій частині території.

Вивезення відходів здійснюється за вивізною системою із застосуванням незмінюваних контейнерів, коли сміттєвоз спорожняє контейнери безпосередньо на майданчику, після чого вони повертаються на місце.

Окремим напрямом, передбаченим проектними рішеннями, є впровадження роздільного збирання окремих компонентів ТПВ (скло, папір, пластик). Для цього на майданчиках мають бути встановлені окремі контейнери, що дозволить зменшити обсяги змішаних відходів, які підлягають захороненню. Наразі в громаді

відсутня розвинена інфраструктура для сортування, пункти прийому вторинної сировини, а також централізований збір великогабаритних, будівельних, небезпечних або медичних відходів, які фактично потрапляють до загального потоку.

Транспортування відходів. Для транспортування використовуються спеціалізовані транспортні засоби – сміттевози з механізованою системою завантаження та ущільнення відходів. У межах системи застосовуються автомобілі типу КРАЗ-5401Н2 з кузовом місткістю 16 м³. Застосування пресування дозволяє суттєво підвищити ефективність перевезень за рахунок ущільнення відходів.

Організація транспортування базується на маршрутній системі. Територія обслуговування поділяється на окремі маршрути, кожен з яких включає групу контейнерних майданчиків. Формування маршрутів здійснюється з урахуванням їх розташування, обсягів утворення відходів та технічних характеристик транспорту. Відповідно до даних (додаток 17), сформовано декілька маршрутів, для кожного з яких визначено сумарні обсяги відходів, кількість контейнерів та технологічні показники. Періодичність обслуговування контейнерних майданчиків визначається інтенсивністю утворення відходів та місткістю контейнерів, зазвичай становлячи кілька днів. Важливими показниками є довжина маршруту та час його виконання, які включають час під'їзду, завантаження, переміщення між майданчиками та транспортування до місця видалення. Сумарна тривалість маршруту, як правило, наближається до тривалості робочої зміни, що забезпечує ефективне використання техніки. Витрати пального залежать від довжини маршруту, режиму руху та технічних характеристик автомобіля.

Видалення відходів. Завершальним етапом є видалення відходів на спеціалізованих об'єктах. Після збирання та транспортування відходи доставляються на полігон твердих побутових відходів для захоронення.

Аналіз ефективності системи. Рівень охоплення населення послугами з централізованого збирання становить приблизно 70%. При цьому в багатоквартирній забудові охоплення сягає 100% завдяки наявності контейнерних майданчиків та укладених договорів. У приватному секторі, особливо в сільській

місцевості, договори укладені лише частково через організаційні труднощі та низьку економічну ефективність в малих селах.

Аналіз динаміки вивезення свідчить про поступове зростання обсягів: 2021 рік – 6 833,89 м³; 2022 рік – 7 972,20 м³; 2023 рік – 14 447,71 м³; перші 4 місяці 2024 року – 4 792,35 м³.

Суттєве збільшення у 2023 році може бути пов'язане з розширенням кількості абонентів та покращенням обліку. Однак порівняння фактичних обсягів вивезення з розрахунковими (понад 44 тис. м³ на рік) демонструє значну різницю, що свідчить про самостійну утилізацію значної частини відходів населенням або їх потрапляння до несанкціонованих звалищ.

Висновки. Існуюча система збирання, транспортування та видалення ТПВ у Диканській територіальній громаді характеризується:

- обмеженим територіальним охопленням (лише смт Диканька);
- концентрацією контейнерної інфраструктури переважно в адміністративному центрі;
- недостатнім рівнем охоплення населення договорами, особливо в приватному секторі;
- відсутністю системи роздільного збирання, сортування та перероблення відходів;
- наявністю розрахунково-маршрутної основи для оптимізації логістики.

Водночас наявна система забезпечує базове санітарне очищення території селища та створює передумови для подальшого розвитку. Подальше вдосконалення потребує розширення інфраструктури на сільські території, збільшення рівня охоплення населення, модернізації технічного парку, впровадження роздільного збирання та сортування, а також вирішення проблеми несанкціонованих звалищ. Реалізація цих заходів сприятиме підвищенню ефективності системи та зменшенню негативного впливу на довкілля.

1.3. Оцінка технічного парку комунальних підприємств та логістичних маршрутів вивезення відходів.

1.3.1. Техніко-технологічна оцінка парку спеціалізованого автотранспорту та контейнерного господарства

Ефективність системи санітарного очищення Диканської територіальної громади безпосередньо корелює з інженерно-технічним станом рухомого складу та характеристиками первинних засобів накопичення відходів. Аналіз поточної ситуації дозволяє стверджувати, що логістична модель громади перебуває на етапі трансформації від застарілих методів збору до сучасних європейських стандартів, що потребує детальної верифікації наявних потужностей.

Згідно з інвентаризаційними даними «Диканського комбінату комунальних підприємств» (ККП) [18], технічний парк представлений спецмашинами, що класифікуються за типом шасі, способом завантаження та коефіцієнтом ущільнення. Основним критерієм оцінки парку є його здатність забезпечувати безперебійне вивезення розрахункових обсягів відходів, які для Диканської ТГ мають виражену нерівномірність утворення.

Малотоннажний сегмент (на базі ГАЗ-3307). Ці сміттєвози з боковим завантаженням (серія КО-413) складають значну частину активного парку. Їхня експлуатація обумовлена специфікою дорожньої мережі приватного сектору та вузькими проїздами в сільських населених пунктах. Об'єм кузова у 8 м³ при низькому коефіцієнті пресування (2.2) обмежує радіус ефективного обслуговування. З наукової точки зору, використання такої техніки на довгих плечах доставки (понад 15-20 км до полігону) є економічно неефективним через високі питомі витрати палива на одиницю маси відходів. Проте, вони залишаються критично важливими для обслуговування важкодоступних точок збору, де великогабаритна техніка не має можливості маневрування.

Середньотоннажний сегмент (на базі МАЗ та іноземних аналогів). Техніка із заднім завантаженням та об'ємом кузова 11–15 м³ представляє сучасніший технологічний уклад. Ключовою перевагою є використання гідравлічних пресувальних механізмів з коефіцієнтом ущільнення до 4.0. Це дозволяє в одному рейсі транспортувати обсяги відходів, що у 2.5 рази перевищують можливості

застарілих моделей. Такі машини орієнтовані на обслуговування євроконтейнерів об'ємом 1.1 м³, що мінімізує ручну працю та час простою на кожній локації.

Спеціалізована та допоміжна техніка. Окрему роль у логістиці відіграють трактори МТЗ-82 з причепами. Їхнє залучення є виправданим у періоди пікових навантажень (весняно-осінні прибирання) та для вивезення великогабаритних відходів (ВГВ), які не підлягають пресуванню у звичайних сміттевозах. Проте, відсутність герметичності причепів створює ризики вторинного забруднення територій під час транспортування.

Контейнерне господарство громади є первинною ланкою в ланцюгу управління відходами. На основі аналізу «Додатку б», де зафіксовано 412 точок обліку, можна виділити структурну невідповідність між типами накопичувачів та обсягами генерації сміття.

Контейнери типу 0,75 м³ (металеві). Встановлені переважно у смт Диканька (59 одиниць). Аналіз свідчить про їх високу амортизацію. З точки зору санітарних норм, дані ємності не відповідають сучасним вимогам: відсутність кришок призводить до розвіювання легкої фракції (паперу, поліетилену) та наповнення контейнерів атмосферними опадами, що збільшує вагу відходів та прискорює процеси гниття органіки.

Євроконтейнери типу 1,1 м³ (пластикові/оцинковані). Впровадження 50 одиниць таких контейнерів стало кроком до оптимізації логістики. Вони оснащені щільними кришками та дренажними отворами. Аналіз «Додатку б» показує, що ці контейнери зосереджені на майданчиках багатоквартирної забудови (БК) та біля великих громадських установ. Наприклад, майданчики №31 та №38, де добовий обсяг перевищує 1.2 м³, вимагають саме такої місткості для дотримання графіка вивезення один раз на добу.

Аналіз даних «Додатку б» дозволяє виявити закономірності в розподілі відходів за фракціями (змішані, скло, пластик, папір), що є критичним для підбору типу контейнерів.

Для більшості точок збору (зокрема приватного сектору - ПС) характерним є домінування змішаних відходів. Проте, розрахункові показники вторсировини

(пластик, скло) вказують на потенційну можливість впровадження роздільного збору. Наприклад, у точках збору №10-25 спостерігається стабільна генерація паперу та пластику в обсягах, що дозволяють встановлювати окремі сітчасті контейнери.

Таблиця 1.3.1.

Порівняльна характеристика ефективності збору залежно від типу обладнання
(авторська розробка на основі наданих даних)

Параметр порівняння	Система "Бокове завантаження + 0,75 м ³ "	Система "Заднє завантаження + 1,1 м ³ "
Ефективний об'єм кузова (з пресуванням)	16–18 м ³	45–60 м ³
Час обслуговування однієї точки	3.5 – 5.0 хв	1.5 – 2.5 хв
Санітарна безпека	Низька (відкриті баки)	Висока (герметичні євроконтейнери)
Доцільність використання	Вузькі вулиці, малий обсяг генерації	Щільна забудова, висока генерація

Інтеграція рухомого складу в логістичні маршрути Диканської ТГ ускладнена географічною розрізненістю населених пунктів. Застосування методу математичного моделювання на основі даних про 412 точок генерації дозволяє зробити висновок про необхідність зонування технічного обслуговування.

Зона інтенсивного обслуговування (Центральна). Потребує використання виключно сміттєвозів із заднім завантаженням та повної заміни металевих баків на євроконтейнери. Це дозволить скоротити час маршруту на 25% за рахунок швидкої механізації.

Зона екстенсивного обслуговування (Периферійна). Тут доцільно зберігати комбіновану систему. Оскільки обсяги утворення відходів у селах (наприклад, Петро-Давидівка) розпорошені, використання великогабаритних сміттєвозів призводить до великих "пробігів порожняком". Тут пріоритетом має стати

уніфікація тари — перехід на індивідуальні пластикові контейнери об'ємом 120/240 літрів для кожного домогосподарства, що обслуговуватимуться сміттєвозами з функцією захвату для індивідуальних баків.

На основі проведеного аналізу структури збору та технічного забезпечення, можна сформулювати наступні висновки.

По-перше, існуючий парк сміттєвозів Диканського ККП характеризується технологічною застарілістю (понад 50% одиниць). Це веде до перевитрат палива, що підтверджується порівнянням обсягів утворення в Додатку 6 та фактичних витрат ресурсів підприємства. По-друге, контейнерна мережа потребує не просто розширення, а якісної зміни — переходу на закриті типи ємностей, що дозволить знизити рівень інфільтрації та поширення неприємних запахів, особливо в зонах високої концентрації (БК).

Слід наголосити, що будь-яка зміна логістичних маршрутів буде неефективною без синхронного оновлення парку спецтехніки до рівня, що дозволяє працювати з різними фракціями відходів без їх змішування на етапі транспортування.

1.3.2. Композиційний аналіз логістичних маршрутів та показників транспортної ефективності

Транспортна логістика у сфері поводження з побутовими відходами (ПВ) Диканської територіальної громади є складною ієрархічною системою [18], ефективність якої визначається просторовим розподілом точок генерації, станом дорожньої інфраструктури та експлуатаційними параметрами спецтехніки. На основі опрацювання «Зведеної пояснювальної записки» та емпіричних даних «Додатку 6», встановлено, що маршрутизація вивезення відходів підпорядкована радіально-кільцевому принципу з центром у смт Диканька, де розташована основна виробнича база комунального підприємства.

Логістична мережа громади диференціюється за декількома ключовими ознаками, що обумовлено морфологією забудови та щільністю розселення населення. У ході дослідження виділено три основні типи маршрутів.

Магістральні маршрути високої інтенсивності (урбанізовані). Обслуговують багатоквартирну забудову (БК) та центральну частину смт Диканька. Характеризуються мінімальною відстанню між точками збору (50–150 м) та високим питомим обсягом вилучення відходів на один кілометр пробігу. Згідно з розрахунками для майданчиків №31-40, добова концентрація ПВ тут є найвищою, що дозволяє максимізувати коефіцієнт корисного використання вантажопідйомності сміттєвозів із заднім завантаженням.

Розгалужені маршрути приватного сектору (ПС). Охоплюють територію селища та прилеглі села. Логістична складність цих маршрутів полягає у великій кількості зупинок при відносно малих обсягах накопичення в кожній точці. Аналіз даних щодо 412 об'єктів показує, що середня генерація в ПС складає від 0,16 до 0,3 м³/день на домогосподарство, що вимагає значних часових витрат на маневрування.

Трансферні маршрути (міжсільські). Забезпечують сполучення між віддаленими населеними пунктами (наприклад, Петро-Давидівка, Водяна Балка) та місцем видалення відходів. Головним показником тут є «плече доставки» — відстань від останньої точки збору до полігону. Для північних територій громади цей показник перевищує 20 км, що згідно з нормативами ДБН Б.2.2-6:2013 наближається до межі економічної доцільності без використання сміттєперевантажувальних станцій.

Для оцінки ефективності маршрутів використано метод аналізу транспортної роботи, вираженої через співвідношення фактичного та планового пробігу. На основі даних Додатку 6 щодо сумарних обсягів утворення (Всього по населених пунктах), проведено параметризацію логістичних потоків.

Коефіцієнт нерівномірності завантаження. Аналіз виявив значні коливання обсягів між точками (від 0,08 м³/день до 2,5 м³/день). Це створює ризики недовантаження техніки на початку маршруту та перевантаження на завершальних етапах.

Часовий регламент обслуговування. Встановлено, що в межах Диканьки час навантаження одного контейнера об'ємом 1,1 м³ становить 2,5–3 хвилини, тоді як у сільській місцевості через відсутність контейнерних майданчиків та

використання «бестарного» методу (збір мішків) час обслуговування одиниці об'єму зростає на 40-50%.

Енергоємність логістики. Через зношеність дорожнього покриття (п. 1.5 Зведеної ПЗ) фактичні витрати палива перевищують лінійні норми на 12–18%. Це критичний показник, який прямо впливає на формування тарифу для населення.

Стан вулично-шляхової мережі (ВШМ) є обмежуючим фактором для вибору типу рухомого складу. Дослідження структури дорожніх зв'язків громади дозволило встановити наступне.

Наявність асфальтобетонного покриття на основних магістралях (наприклад, напрямок на Стасі) дозволяє використовувати сміттєвози з повною масою понад 18 тонн.

Вузькі вулиці в історичній частині забудови та ґрунтові дороги в периферійних селах (Петро-Давидівка) обмежують використання техніки з великою колісною базою, що змушує ККП утримувати в парку менш ефективні одиниці типу ГАЗ-3307.

Застосовуючи системний аналіз до табличних даних Додатку 6 [18], можна вивести інтегральний показник ефективності логістики (К_{лн}) [19] для кожного маршруту:

$$K_{лн} = \sum L / \sum Q \quad (1)$$

де $\sum L$ — сумарна довжина маршрутів збору твердих побутових відходів (км);
 $\sum Q$ — сумарна маса зібраних відходів (т).

Найнижчий показник К_{лн} характерний для маршрутів, що охоплюють розрізнені точки приватного сектору (наприклад, блоки точок №398-410 у Петро-Давидівці), де сумарний обсяг 158 м³/місяць розпорошений на великій площі. Найвищий показник спостерігається на маршрутах, що обслуговують багатоквартирні будинки та промислові зони (наприклад, точки №1-10), де концентрація відходів дозволяє мінімізувати пробіг між зупинками.

Наведений вище аналіз показав, що поточна логістична система громади характеризується високим ступенем адаптивності до складних умов сільської місцевості, проте має низьку економічну ефективність на транзитних ділянках. Оптимізація маршрутів шляхом впровадження вузлових точок збору та цифровізації графіків руху є необхідною умовою для сталого розвитку системи санітарного очищення Диканської ТГ.

1.4. Проблемні аспекти управління відходами в умовах сільської та селищної забудови громади.

Стан системи поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) у Диканській територіальній громаді є відображенням загальнодержавних тенденцій децентралізації, де відповідальність за санітарний стан територій покладено на органи місцевого самоврядування. Однак, незважаючи на впровадження організаційних заходів, система стикається з низкою фундаментальних проблем, які зумовлені специфікою просторової організації громади, низьким рівнем цифровізації та застарілістю технологічного базису.

Аналіз існуючого стану дозволяє ідентифікувати ключові проблемні вузли, що різняться залежно від архітектурно-планувальної структури населених пунктів.

Проблеми селищної забудови (сmt Диканька). Перевантаження майданчиків: У районах багатоповерхової забудови спостерігається невідповідність між кількістю контейнерів та фактичним обсягом генерації ТПВ. Як свідчать дані Додатку 6 [18], пікові навантаження в окремі дні перевищують місткість контейнерного парку, що веде до переповнення баків і, як наслідок, виникнення антисанітарних зон навколо майданчиків.

Моральний знос контейнерного парку: Наявність металевих контейнерів старого зразка ($0,75 \text{ м}^3$) без герметичних кришок є джерелом вторинного забруднення. В умовах щільної забудови це спричиняє поширення неприємних запахів та створює сприятливе середовище для розмноження синантропних видів тварин.

Неефективна логістика «останньої милі»: Маршрути руху спецтехніки не враховують поточну наповненість ємностей, що призводить до «холостих» заїздів до напівпорожніх майданчиків та, навпаки, не вчасного обслуговування переповнених.

Проблеми сільської місцевості. Відсутність інфраструктури збору: У віддалених населених пунктах (Петро-Давидівка та ін.) система збору побудована за «бестарним» або хаотичним принципом. Це стимулює мешканців до несанкціонованого скидання відходів у лісосмуги, яри або на прилеглі території, що є прямою загрозою екологічній безпеці регіону.

Транспортне «плече»: Значна віддаленість сіл від центрального полігону робить вивезення відходів економічно збитковим для Диканського ККП. Використання застарілих малотоннажних сміттєвозів на цих дистанціях генерує високу собівартість послуги, яка часто не покривається чинними тарифами.

Низька культура сортування: Відсутність просвітницької роботи та інфраструктури для роздільного збору (сітчасті контейнери для ПЕТ-пляшки, скла, паперу) унеможлиблює впровадження концепції циклічної економіки на рівні громади.

Окрім локальних проблем, виділяється низка системних недоліків.

Відсутність оперативного моніторингу. Управління відходами базується на «жорстких» графіках вивозу, що не корелюють з реальними потребами. Відсутність цифрових інструментів (ІоТ-датчиків) не дозволяє диспетчерській службі оперативно реагувати на зміни в інтенсивності накопичення ТПВ.

Інформаційна асиметрія. Комунальне підприємство не володіє точними даними про обсяги відходів, що генеруються окремими суб'єктами господарювання, що призводить до дисбалансу в системі нарахування платежів та недонадходження коштів до місцевого бюджету.

Відсутність цифровізації звітності. Паперовий документообіг у сфері логістики (маршрутні листи, акти виконаних робіт) сповільнює процес аналізу ефективності підприємства, не даючи можливості впроваджувати елементи предиктивної аналітики.

Означені проблеми формують суть нашого дослідження, структурно-логічна схема якого наведена на рис.1.

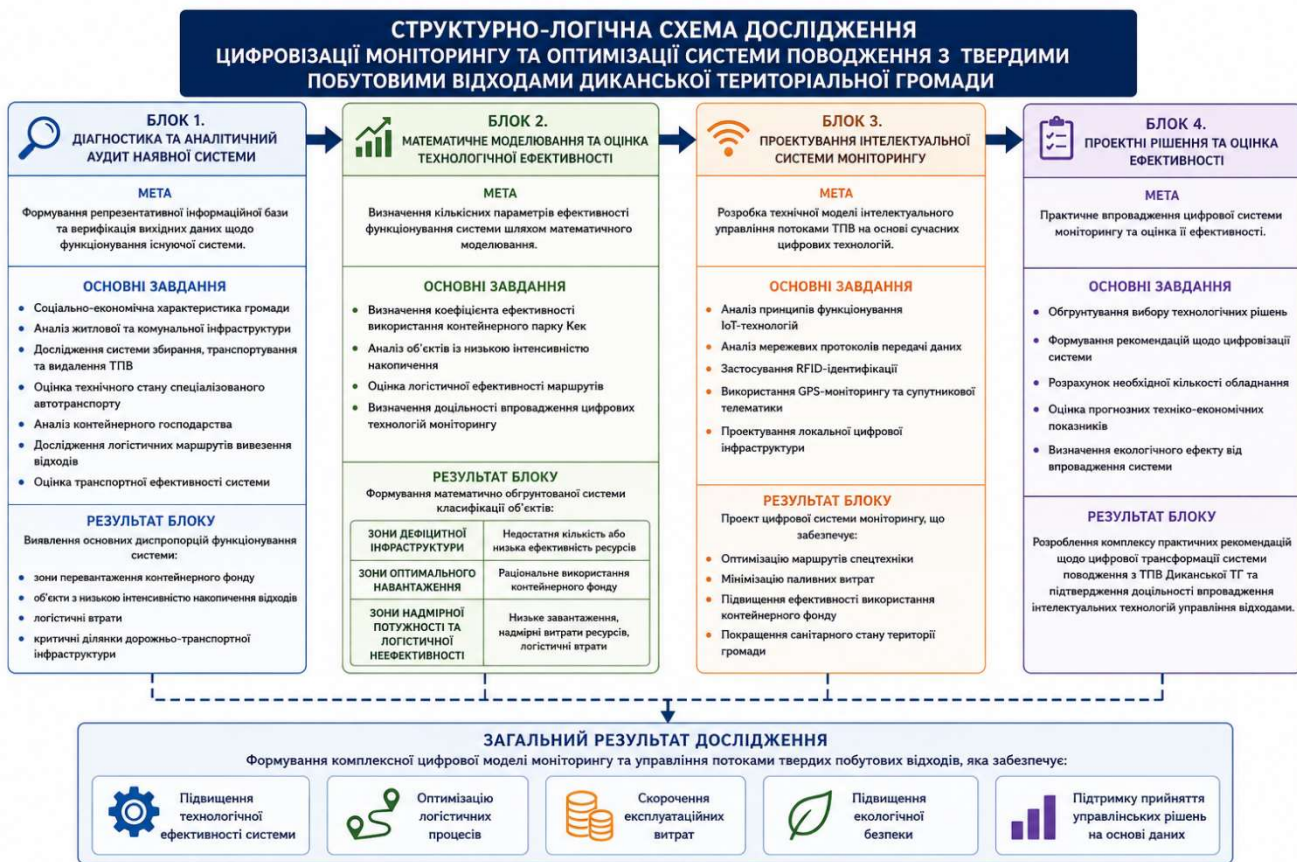


Рис.1 – Структурно-логічна схема дослідження.

Перший блок дослідження присвячений діагностиці та аналітичному аудиту наявної системи поводження з твердими побутовими відходами Диканської територіальної громади. Метою цього етапу є верифікація первинних даних та формування репрезентативної інформаційної бази. У межах даного блоку здійснюється комплексна інвентаризація об'єктів утворення відходів, що включає 412 точок обліку, аналіз технічного стану спеціалізованого автотранспорту та оцінку існуючих логістичних маршрутів. Результатом виконання цього блоку є масив даних, який ідентифікує ключові диспропорції в системі, а саме: локації хронічних перевантажень контейнерного фонду, зони неефективного використання ресурсів через низьку інтенсивність заповнення ємностей та ділянки з найбільш критичним зносом дорожньо-транспортної мережі.

Другий блок дослідження спрямований на математичне моделювання та сегментацію контейнерного фонду, що дозволяє виявити закономірності функціонування системи через призму кількісних показників. Пріоритетним завданням є визначення коефіцієнта інтервального наповнення для кожного майданчика, що забезпечує наукове обґрунтування ефективності використання матеріальних активів громади. Методологія передбачає застосування економіко-математичного апарату для кластеризації об'єктів за рівнем інтенсивності накопичення відходів, що дає змогу виділити зони дефіцитної інфраструктури, оптимального завантаження та надмірної потужності. Реалізація цього етапу дає можливість отримати математично валідовану матрицю ефективності, яка слугує основою для подальшого прийняття управлінських рішень. Результатом блоку є перехід від загального аудиту до цільової класифікації об'єктів, що необхідно для впровадження системних заходів з оптимізації без залучення надлишкових інвестицій.

Третій блок дослідження фокусується на проектуванні інтелектуальної системи моніторингу та еколого-економічній валідації запропонованих рішень. Метою етапу є розробка архітектури цифрового сегмента «Громада–Регіон», що базується на інтеграції сенсорних технологій (IoT) та GPS-моніторингу, та доведення її соціально-економічної доцільності. Методологічний апарат включає алгоритмізацію процесів динамічної маршрутизації сміттєвозів, проектування локальних баз даних та розрахунок прогностичних показників окупності проекту. Результатом цього етапу є розроблена технічна модель інтелектуального управління потоками відходів, яка забезпечує мінімізацію паливних витрат, оптимізацію використання спецтехніки та підвищення санітарної безпеки території. Заключним аспектом блоку є підтвердження сталості системи через оцінку очікуваного екологічного ефекту, що дозволяє оцінити комплексний вплив цифрової трансформації на сталий розвиток Диканської територіальної громади.

Для забезпечення повноти аналізу системи поводження з відходами в Диканській територіальній громаді, необхідно розглянути протилежну ситуацію — об'єкти з низьким коефіцієнтом наповнення ($K_n < 0,5$). Такі майданчики є

«індикаторами» логістичної неефективності [20], оскільки обслуговування цих точок із повною частотою призводить до нераціонального використання паливних ресурсів та амортизації спецтехніки.

Висновки до розділу 1

Проведений у розділі 1 комплексний аналіз сучасного стану системи поводження з побутовими відходами Диканської територіальної громади дозволяє сформулювати цілісне уявлення про структурні, організаційні та техніко-технологічні особливості її функціонування, а також ідентифікувати ключові дисбаланси, що стримують підвищення ефективності системи.

Насамперед встановлено, що визначальним фактором формування системи поводження з відходами є соціально-економічна та просторово-планувальна структура громади. Переважання сільського типу розселення, значна частка малозаселених і депресивних населених пунктів, а також домінування індивідуальної садибної забудови формують специфічну модель генерації відходів із низькою щільністю та високою територіальною дисперсією. Це об'єктивно ускладнює впровадження класичних централізованих схем санітарного очищення та зумовлює підвищені логістичні витрати.

Аналіз житлового фонду показав його значну диференціацію за рівнем благоустрою, що безпосередньо впливає на питомі показники утворення побутових відходів. Встановлено, що середній інтегральний показник накопичення ТПВ у громаді становить близько $1,9 \text{ м}^3/\text{особу}/\text{рік}$ із тенденцією до зростання у сільській місцевості. Водночас фактичні обсяги відходів, що надходять до системи централізованого збирання, є суттєво нижчими за розрахункові, що свідчить про наявність альтернативних (неформалізованих) каналів поводження з відходами — самостійної утилізації або несанкціонованого видалення.

Дослідження існуючої системи збирання, транспортування та видалення відходів засвідчило її фрагментарний характер. Контейнерна інфраструктура зосереджена переважно в адміністративному центрі громади, тоді як значна частина сільських населених пунктів фактично залишається поза межами

організованої системи. Рівень охоплення населення послугами є недостатнім, особливо в приватному секторі, що прямо корелює з проблемою утворення несанкціонованих сміттєзвалищ.

Окрему увагу приділено техніко-технологічній оцінці парку спеціалізованого автотранспорту та контейнерного господарства. Встановлено, що існуючий парк характеризується високим рівнем фізичного та морального зносу, а також технологічною неоднорідністю. Використання застарілих малотоннажних сміттєвозів із низьким коефіцієнтом ущільнення призводить до підвищення питомих експлуатаційних витрат, особливо на маршрутах із великим «плечем доставки». Водночас впровадження сучасних сміттєвозів із заднім завантаженням та євроконтейнерів демонструє значно вищу ефективність, що підтверджує доцільність поступової модернізації технічного парку.

Логістичний аналіз маршрутів вивезення відходів показав, що існуюча система побудована за радіально-кільцевим принципом, однак характеризується низькою адаптивністю до реальної інтенсивності накопичення відходів. Виявлено значну нерівномірність завантаження маршрутів, перевищення нормативних витрат пального, а також неефективність обслуговування розрізаних точок у сільській місцевості. Це свідчить про необхідність переходу від статичних графіків до динамічних моделей управління логістикою.

У результаті системного аналізу ідентифіковано комплекс ключових проблем, які мають як локальний, так і системний характер. До них належать: обмежене територіальне охоплення послугами, відсутність розвиненої інфраструктури роздільного збирання та сортування відходів, застарілість контейнерного господарства, неефективність логістичних маршрутів, низький рівень цифровізації управлінських процесів та недостатня інформаційна прозорість системи.

Таким чином, існуюча система поводження з побутовими відходами в Диканській територіальній громаді забезпечує базовий рівень санітарного очищення лише в межах найбільш урбанізованих територій, однак не відповідає сучасним вимогам ефективності, екологічної безпеки та сталого розвитку.

Виявлені недоліки мають комплексний характер і потребують системного вирішення, що передбачає не лише модернізацію матеріально-технічної бази, а й впровадження інноваційних підходів до управління, зокрема цифровізації процесів моніторингу та оптимізації логістики. Отримані результати аналізу формують науково-методичне підґрунтя для розроблення проєктних рішень у наступних розділах дослідження.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВІЗАЦІЇ МОНІТОРИНГУ ТПВ

2.1. Принципи функціонування сучасних цифрових технологій у сфері ТПВ.

У сучасних умовах управління твердими побутовими відходами (ТПВ) здійснюється перехід від традиційних моделей, заснованих на фіксованих графіках та суб'єктивній оцінці наповнюваності контейнерів, до інтелектуальних систем моніторингу в режимі реального часу. Впровадження цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), радіочастотна ідентифікація (RFID) та глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS/GPS), дозволяє трансформувати поводження з відходами на високоефективну кіберфізичну систему, що мінімізує експлуатаційні витрати та антропогенне навантаження на довкілля.

2.1.1. Акустичні та оптичні методи детермінації стану накопичення відходів

Фундаментальним елементом цифровізації є використання сенсорів Інтернету речей (IoT), які забезпечують дистанційний контроль рівня заповнення контейнерів [21-23]. Типовим рішенням є встановлення ультразвукових датчиків, які використовують принцип ехолокації для вимірювання відстані від кришки контейнера до поверхні відходів. Фізичний процес базується на випромінюванні сонарних хвиль та реєстрації часу їх відбиття, що дозволяє з високою точністю визначити ступінь наповнення.

Найбільш поширеним технологічним рішенням у цьому сегменті є ультразвукове зондування. Принцип роботи таких пристроїв базується на вимірюванні часу проходження акустичної хвилі від випромінювача до поверхні середовища та у зворотному напрямку. У науковому аспекті важливо враховувати, що внутрішній об'єм сміттєвого контейнера є складним акустичним середовищем

з високим рівнем реверберації та зміною щільності повітря. Математична інтерпретація відстані до об'єкта потребує врахування коефіцієнта затухання звуку в газовому середовищі, що безпосередньо залежить від вологості та температури, які всередині бака можуть суттєво відрізнятися від параметрів зовнішнього середовища.

Альтернативним, більш прогресивним методом є застосування оптичних датчиків на основі технології Time-of-Flight (ToF). На відміну від ультразвуку, ToF-сенсори використовують інфрачервоне випромінювання, що дозволяє досягти вищої просторової роздільної здатності. Це критично важливо при моніторингу великогабаритних контейнерів, де відходи розподіляються нерівномірно. Використання багатоточкового лазерного сканування дозволяє системі будувати апроксимовану модель поверхні заповнення, що нівелює похибки, викликані наявністю випадкових об'ємних предметів, які могли б спотворити дані при одноточковому вимірюванні. Інформаційна цінність таких даних полягає у можливості розрахунку не лише лінійного рівня заповнення, а й орієнтовного об'єму відходів у кубічних метрах, що є базовим параметром для подальшого логістичного планування.

2.1.2. Мережеві протоколи передачі даних та енергоефективність IoT-вузлів

Ефективність функціонування IoT-датчиків у сфері ТПВ лімітується двома основними факторами: дальністю зв'язку в умовах щільної забудови та автономністю джерел живлення. У зв'язку з цим архітектура систем будується на базі енергоефективних мереж дальнього радіусу дії (LPWAN). Найбільш валідним протоколом для муніципальної інфраструктури є LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [24], що використовує метод розширення спектра (Chirp Spread Spectrum). Даний фізичний принцип забезпечує високу стійкість до завад та дозволяє декодувати сигнали, потужність яких нижча за рівень шуму.

Математичне моделювання енергоспоживання такого вузла показує, що основна частка енергії витрачається під час активної фази передачі пакета даних.

Для оптимізації цього процесу застосовуються алгоритми адаптивної швидкості передачі (Adaptive Data Rate), які динамічно змінюють потужність передавача залежно від відстані до базової станції. У контексті управління ТПВ це означає, що сенсор, розташований у зоні прямої видимості шлюзу, працюватиме з мінімальним енергоспоживанням, тоді як пристрій у підземному сховищі автоматично підвищить потужність для забезпечення гарантованої доставки інформації. Такий підхід дозволяє досягти терміну експлуатації кінцевого пристрою до десяти років без заміни елемента живлення, що робить технологію економічно доцільною для масштабування на рівні мегаполіса.

2.1.3. Радіочастотна ідентифікація як метод юридичної та операційної верифікації

Технологія RFID у системі поводження з відходами виконує функцію інструменту безконтактної автоматизованої ідентифікації об'єктів обліку. Науково-технічний базис UHF RFID (Ultra-High Frequency) [23] ґрунтується на явищі зворотного розсіювання електромагнітної енергії. Пасивна мітка, інтегрована в корпус контейнера, не містить власного джерела струму, а активується енергією зчитувача, що встановлений на спецтехніці. Важливою особливістю функціонування RFID у цій галузі є необхідність зчитування даних у динаміці під час руху гідравлічних механізмів сміттєвоза.

Процес ідентифікації супроводжується передачею унікального коду EPC (Electronic Product Code), який асоційований у центральній базі даних з конкретним географічним розташуванням, власником контейнера та типом відходів (наприклад, пластик, папір або змішані відходи). Це створює цифрову доказову базу виконання послуг, що є критичним для розрахунків між муніципалітетом та підрядними організаціями. Крім того, на фізичному рівні RFID-системи забезпечують захист від помилкового обслуговування чужих активів. Складна електромагнітна обстановка поблизу металевих частин сміттєвоза вимагає застосування спеціалізованих антен з круговою поляризацією, що гарантує

стабільне зчитування мітки незалежно від її орієнтації у просторі під час підйому бака.

2.1.4. Супутникова телематика та алгоритми динамічної оптимізації траєкторій

Системи глобального позиціонування (GNSS) у сфері ТПВ трансформувалися з інструментів простого трекінгу в інтелектуальні модулі управління транспортною роботою. Функціонування GPS-модулів на борту сміттєвоза дозволяє в режимі реального часу отримувати вектор стану транспортного засобу, що включає координати, швидкість та напрямок руху. Однак науковий інтерес становить не стільки отримання координат, скільки їх поєднання з даними телеметрії з CAN-шини автомобіля.

Системи GPS-моніторингу (глобальні навігаційні супутникові системи) [25] є критично важливими для управління парком спецтехніки. Окрім простого відображення розташування автомобілів на карті, телематичні модулі в поєднанні з бортовими комп'ютерами забезпечують інтелектуальний аналіз операційної діяльності.

Функціонування цієї технології базується на інтеграції даних про:

- Координати руху та дотримання запланованих маршрутів.
- Використання геозон — віртуальних кордонів, при перетині яких система генерує автоматичні звіти про в'їзд на полігон або виїзд з району обслуговування.
- Роботу гідравлічного обладнання (пресувальних механізмів) для підтвердження факту збору сміття саме в місці наявності контейнера, а не в іншому, забороненому місці.

Інтеграція даних про роботу двигуна, витрату палива та активацію гідравлічного обладнання прес-компактора дозволяє системі автоматично ідентифікувати технологічні операції. Наприклад, зупинка автомобіля в межах геозони майданчика збору ТПВ, що супроводжується роботою механізму пресування, ідентифікується як успішний збір сміття. У разі відсутності

спрацювання датчиків обладнання, зупинка трактується як вимушена або непродуктивна.

Використання отриманих масивів даних дозволяє реалізувати математичне вирішення задачі маршрутизації транспортних засобів (VRP — Vehicle Routing Problem) у її динамічній постановці. Традиційні «кільцеві» маршрути замінюються на графіки, що базуються на пріоритетності. Пріоритет кожної точки збору розраховується як функція від поточного рівня заповнення контейнера (дані IoT) та прогнозованого часу до його критичного переповнення. Такий підхід забезпечує скорочення пробігу техніки на 15–20%, що безпосередньо корелює зі зменшенням експлуатаційних витрат та обсягів викидів забруднюючих речовин.

2.1.5. Кібербезпека та цілісність даних у цифрових екосистемах ТПВ

Зі зростанням рівня цифровізації критичності набуває аспект безпеки передачі даних та захисту інфраструктури від несанкціонованого втручання. Оскільки системи управління ТПВ стають частиною критичної міської інфраструктури, будь-яка маніпуляція з даними (наприклад, фальсифікація рівнів заповнення контейнерів або зміна маршрутних листів) може призвести до колапсу системи санітарної очистки міста.

Принципи функціонування безпекових механізмів у цих мережах базуються на наскрізному шифруванні (End-to-End Encryption). У протоколі LoRaWAN це реалізується через використання двох рівнів ключів: мережевого (для аутентифікації пристрою в мережі) та прикладного (для шифрування безпосередньо корисного навантаження датчика). Таким чином, навіть у разі перехоплення радіосигналу злоумисник не зможе отримати доступ до даних про стан активів. Додатковим рівнем захисту є використання технології блокчейн для фіксації транзакцій у ланцюгу поводження з відходами. Кожен акт вивантаження контейнера, зафіксований RFID-зчитувачем та верифікований GPS-координатами, записується як незмінний блок даних, що унеможливорює ретроспективну зміну звітності та забезпечує абсолютну прозорість фінансових взаєморозрахунків.

2.1.6. Системний синтез та формування Big Data у стратегічному управлінні

Завершальним етапом функціонування цифрових технологій є агрегація різнорідних даних у межах єдиної інформаційно-аналітичної платформи. На цьому рівні відбувається перехід від реактивного управління до когнітивного аналізу. Великі масиви даних (Big Data), накопичені протягом тривалого періоду, дозволяють виявляти латентні закономірності у сміттеутворенні залежно від сезону, дня тижня, соціально-демографічного складу районів міста та навіть економічної активності населення.

Математичні методи інтелектуального аналізу даних (Data Mining) дозволяють будувати прогностні моделі розвитку інфраструктури. Наприклад, аналіз динаміки заповнення контейнерів дозволяє муніципалітету обґрунтовано приймати рішення про зміну кількості баків на конкретному майданчику або про необхідність перенесення точок збору для оптимізації логістичного плеча. Таким чином, цифрові технології у сфері ТПВ перестають бути просто інструментами автоматизації, а стають фундаментом для побудови адаптивної самоорганізованої системи, здатної мінімізувати ресурсоспоживання при збереженні високих стандартів екологічної безпеки.

2.2. Світовий та український досвід використання інтелектуальних систем управління відходами

Глобальна практика поводження з твердими побутовими відходами свідчить про докорінну трансформацію підходів до муніципального управління, що зумовлена впровадженням інтелектуальних систем та переходом до концепції циркулярної економіки. Провідні країни світу, зокрема держави Європейського Союзу, розглядають цифровізацію як невід'ємну умову забезпечення екологічної безпеки та економічної ефективності процесів збору, транспортування та утилізації відходів. Технологічна інтеграція сенсорних мереж та хмарних платформ у муніципальну інфраструктуру дозволяє відійти від використання жорстких графіків обслуговування на користь динамічних логістичних моделей. Досвід міст

Італії та Німеччини демонструє, що застосування мереж Інтернету речей разом із супутниковим моніторингом забезпечує не лише оптимізацію маршрутів руху спецтехніки, а й значне скорочення емісії вуглецю, що є критичним фактором для досягнення цілей сталого розвитку.

Особливе місце у світовій практиці посідає впровадження механізмів індивідуального обліку, реалізованих через технології радіочастотної ідентифікації. Концепція прямої фінансової відповідальності за утворення відходів стимулює населення до більш відповідального сортування та мінімізації споживання ресурсів. У розвинених муніципалітетах збір даних про фактичні обсяги утворених відходів безпосередньо в місцях накопичення створює необхідне інформаційне підґрунтя для автоматизації білінгових систем. Це кардинально змінює характер взаємодії між операторами послуг та кінцевими споживачами, перетворюючи управління відходами на прозорий технологічний процес, де кожен етап руху матеріальних потоків піддається верифікації та математичному аналізу.

В Україні, і зокрема у громадах Полтавської області, процес цифровізації сфери поводження з відходами перебуває на етапі інтенсивного пошуку оптимальних моделей адаптації світових технологій до специфічних місцевих умов. Вітчизняні науковці та практики, що займаються питаннями розробки схем санітарної очистки територій, вказують на суттєві виклики, пов'язані з нерівномірною щільністю населення та значною територіальною розосередженістю об'єктів генерації відходів. Досвід впровадження систем цифрового моніторингу в межах Полтавського регіону вказує на нагальну потребу в науковому обґрунтуванні вибору технологічних рішень, оскільки автоматичне копіювання західних моделей без врахування локальних особливостей не завжди демонструє належний рівень економічної ефективності.

Сучасні дослідження, що проводяться на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», акцентують увагу на необхідності комплексного оцінювання доцільності впровадження цифрових технологій через призму інтегральних показників. Одним із таких методологічних інструментів є розробка методики визначення критеріїв, що базуються на

системному синтезі організаційних, технологічних та логістичних факторів. Застосування показника індексу цифрової доцільності дозволяє територіальним громадам об'єктивно оцінювати інвестиційну привабливість проектів з цифровізації, враховуючи наявний технічний потенціал комунальних підприємств та прогнозовані результати оптимізації маршрутних мереж. Це особливо актуально в контексті кластеризації управління відходами, коли об'єднання ресурсів кількох громад дозволяє мінімізувати питомі витрати на впровадження високотехнологічних рішень, таких як геоінформаційні системи та автоматизовані центри диспетчеризації.

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується глибокою трансформацією підходів до муніципального управління, що зумовлена впровадженням інтелектуальних систем та переходом до концепції циркулярного господарства. Цифровізація управління відходами сьогодні виступає не лише інструментом оптимізації витрат, а й базовою умовою екологічної безпеки урбанізованих територій. Світова практика свідчить, що ефективність поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) прямо корелює з рівнем інтеграції кіберфізичних систем у міську інфраструктуру, що дозволяє відійти від використання жорстких графіків обслуговування на користь гнучких логістичних моделей реального часу.

Провідні країни Європейського Союзу, керуючись жорсткими вимогами Директив щодо поводження з відходами, стали піонерами у розгортанні «розумних» систем (Smart Waste Management). Фундаментальним підходом тут є концепція «Pay-as-You-Throw» (PAYT), яка базується на використанні систем радіочастотної ідентифікації (RFID) для індивідуального обліку відходів. Це створює інформаційне підґрунтя для автоматизації білінгових систем, кардинально змінюючи характер взаємодії між операторами послуг та кінцевими споживачами, оскільки кожен етап руху матеріальних потоків піддається верифікації та математичному аналізу.

Зокрема, скандинавські країни, такі як Швеція та Данія, реалізували масштабну інтеграцію сенсорних мереж на базі LPWAN (Low Power Wide Area

Network) та протоколу LoRaWAN. Це дозволяє муніципальним службам відстежувати рівень заповнення контейнерів з мінімальним споживанням енергії датчиками, що забезпечує їх автономну роботу протягом багатьох років. Дані в режимі реального часу передаються на хмарні платформи, де алгоритми машинного навчання формують динамічні маршрути руху спецтехніки. Досвід міст Італії та Німеччини демонструє, що таке поєднання IoT-сенсорів із супутниковим моніторингом забезпечує не лише оптимізацію логістичного плеча, а й радикальне скорочення викидів парникових газів. У німецьких муніципалітетах, що беруть участь у проєктах типу «MatchUp», впровадження таких інфраструктур дозволило суттєво зменшити дорожній трафік у густонаселених районах, що є критичним фактором для досягнення цілей сталого розвитку.

Окремої уваги заслуговує досвід Південної Кореї, де впроваджено систему автоматизованого збору харчових відходів на основі RFID. Мешканці багатоквартирних будинків використовують персональні смарт-карти для доступу до контейнерів, а вбудовані ваги фіксують точну масу відходів, інтегруючи ці дані в централізовану систему оплати. Така технологічна імплементація виявилася надзвичайно ефективним інструментом зміни споживчої поведінки населення, що дозволило Сеулу скоротити обсяги утворення харчових відходів на тридцять відсотків протягом перших років експлуатації. В Сполучених Штатах Америки інновації зосереджені на енергонезалежних рішеннях, таких як інтелектуальні контейнери-преси Bigbelly, що використовують сонячну енергію для ущільнення сміття безпосередньо в баку. Збільшуючи місткість контейнера у п'ять разів, ця технологія дозволяє скоротити частоту вивезення сміття на вісімдесят відсотків, суттєво зменшуючи експлуатаційні навантаження на комунальний автопарк мегаполісів Нью-Йорка та Бостона.

На відміну від розвинених економік, країни, що розвиваються, інтегрують цифрові рішення переважно для легалізації сектору та боротьби з несанкціонованими звалищами. Впровадження GPS-трекінгу на кожній одиниці спецтехніки в Латинській Америці та Південно-Східній Азії дозволяє муніципалітетам контролювати шлях сміттєвозів від точки збору до ліцензованого

полігону, а використання мобільних додатків для краудсорсингу дозволяє громадянам оперативно повідомляти про стихійні звалища, автоматично фіксуючи їх геодані для подальшої ліквідації.

В Україні, і зокрема у громадах Полтавської області, процес цифровізації сфери поводження з відходами перебуває на етапі інтенсивного пошуку оптимальних моделей адаптації світових технологій. Вітчизняна практика, аналізована у роботах науковців Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», базується на розробці схем санітарної очистки для таких громад, як Гадяцька, Лохвицька, Семенівська та Терешківська. Виклики, пов'язані з нерівномірною щільністю населення та значною територіальною розосередженістю об'єктів генерації відходів, вказують на нагальну потребу в науковому обґрунтуванні впровадження систем цифрового моніторингу. Основні бар'єри для впровадження IoT-датчиків в Україні сьогодні пов'язані з високою вартістю обладнання, ризиками вандалізму та специфічним морфологічним складом ТПВ з високим вмістом органіки, що вимагає підвищеної корозійної стійкості сенсорів.

Сучасні дослідження акцентують увагу на необхідності комплексного оцінювання доцільності впровадження цифрових технологій через інтегральні показники. Розроблена на базі університету методика визначення «Індексу цифрової доцільності» (Іцд) дозволяє територіальним громадам об'єктивно оцінювати інвестиційну привабливість проектів цифровізації, враховуючи наявний технічний потенціал комунальних підприємств, складність маршрутних мереж та прогнозовані результати оптимізації. Це особливо актуально в контексті кластеризації управління відходами, коли об'єднання ресурсів кількох громад у межах єдиної регіональної системи дозволяє мінімізувати питомі витрати на впровадження високотехнологічних геоінформаційних систем та автоматизованих центрів диспетчеризації. Отже, успішна трансформація місцевих систем управління відходами вимагає поступового переходу до цифрового формату із створенням єдиного інформаційного простору, який забезпечував би цілісність

управління матеріальними потоками від рівня окремої громади до рівня регіональних систем циркулярної економіки.

2.3. Методика визначення критеріїв доцільності впровадження систем цифрового моніторингу

2.3.1. Основна концепція

Цифрова трансформація систем управління твердими побутовими відходами (ТПВ) у сільських та селищних громадах потребує обґрунтованого підходу до прийняття інвестиційних рішень. Застосування глобальних технологічних стандартів без урахування специфічних локальних умов часто призводить до низької економічної ефективності проєктів або їх повної нежиттєздатності. У зв'язку з цим, критично важливим є розробка та впровадження методики, що дозволяє формалізувати процес оцінки доцільності та технічної можливості цифровізації на рівні окремої громади чи кластера.

В даній роботі ми розглядаємо фактори доцільності. Центральним елементом такої методики є інтегральний показник — Індекс цифрової доцільності (Іцд), який синтезує організаційні, технологічні та логістичні аспекти розвитку інфраструктури поводження з відходами.

Методологічні засади визначення Іцд ґрунтуються на необхідності диференційованого підходу до об'єктів управління. Специфіка територіальних громад Полтавської області, для яких характерна значна територіальна розосередженість об'єктів генерації відходів та нерівномірна щільність населення, вимагає врахування таких факторів як довжина логістичних маршрутів, стан наявної техніки та рівень забезпеченості комунальних підприємств кадровим потенціалом. Методика передбачає розкладання загального інтегрального індексу на дві базові складові: критерії доцільності, які визначають, чи є впровадження системи економічно та екологічно виправданим, та критерії можливості, які оцінюють технічну спроможність громади реалізувати проєкт у заданих умовах.

Критерії доцільності впровадження систем цифрового моніторингу охоплюють комплекс показників, що відображають стратегічну необхідність

переходу до автоматизованого обліку. Організаційний аспект доцільності полягає в оцінці відповідності цифровізації регіональним стратегіям поводження з відходами та можливості інтеграції місцевих систем у кластерні моделі управління. Технологічна доцільність оцінюється через рівень втрат ресурсів при використанні традиційних методів управління, а також через потенціал підвищення прозорості фінансових потоків, що виникає при переході до електронного обліку обсягів збору ТПВ. Логістична доцільність, своєю чергою, впливає з аналізу поточної ефективності використання парку спецтехніки. У громадах, де середня відстань до полігону є великою, а контейнерні майданчики характеризуються низькою або непередбачуваною динамікою заповнення, впровадження цифрового моніторингу стає найбільш виправданим інструментом скорочення транспортних витрат, які традиційно складають лівову частку тарифу на вивезення відходів.

Процес формування Іцд не обмежується лише статичною оцінкою. Методика передбачає періодичний перегляд індексу з огляду на динаміку зміни показників роботи комунальних служб після часткового впровадження систем моніторингу. Це створює механізм адаптивного планування, де отримані дані про заповнюваність контейнерів стають вхідним параметром для коригування стратегії цифровізації в межах всієї регіональної системи управління відходами. Таким чином, кластерна модель, що об'єднує кілька територіальних громад, виступає середовищем для ефективної реалізації цієї методики. Об'єднання ресурсів громад у межах єдиного диспетчерського центру дозволяє використовувати масштаб, необхідний для виправданого впровадження дорогих, але високоефективних технологічних рішень, які були б недоступними для окремих дрібних сільських громад.

Результати розрахунків, отримані за допомогою запропонованої методики, слугують фундаментом для розробки перспективних схем санітарної очистки територій. Впровадження цієї методики дозволяє відмовитися від суб'єктивних підходів при формуванні планів модернізації комунальної сфери, натомість переходячи до практики обґрунтованого технічного планування. У підсумку, методика визначення критеріїв доцільності та можливості впровадження систем

цифрового моніторингу на основі Індексу цифрової доцільності забезпечує системний зв'язок між наявною інфраструктурою, стратегічними цілями громади та доступними технологічними інструментами, що є обов'язковою умовою створення стійких та ефективних систем поводження з відходами в сучасних умовах.

Для обґрунтування інвестиційних рішень у сфері цифровізації поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) у межах територіальних громад Полтавської області, пропонується використання інтегрального Індексу цифрової доцільності (Іцд). Даний індекс дозволяє перевести якісні показники стану інфраструктури у кількісну площину, забезпечуючи математичну верифікацію необхідності впровадження систем цифрового моніторингу.

Індекс цифрової доцільності визначається як зважена сума двох базових груп критеріїв: критеріїв доцільності (Кдоц) та критеріїв можливості (Кмож) [26]. Математично модель записується у вигляді: $I_{цд} = \alpha \cdot K_{доц} + \beta \cdot K_{мож}$ де α та β — вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність оцінки (у загальному випадку $\alpha + \beta = 1$, при чому зазвичай приймається $\alpha = 0.6$ та $\beta = 0.4$, оскільки стратегічна доцільність має вищу вагу при плануванні розвитку).

2.3.2. Кількісна оцінка критеріїв доцільності

Згідно [19, 20] критерій доцільності (Кцд) агрегує показники, що характеризують потребу в цифровізації. Він розраховується як середньозважене значення трьох складових: організаційний аспект, технологічний аспект та логістичний аспект.

Оскільки прорахунок всіх складових індексу доцільності є доволі об'ємною і складною задачею, яка по обсягам робіт може виходити за рамки бакалаврської кваліфікаційної роботи, то в даній роботі ми акцентуємо увагу на визначені саме технологічних та логістичних аспектів доцільності впровадження цифрових систем, які визначаються двома основними складовими - це ефективність використання спеціалізованого транспорту та ефективність використання контейнерного парку.

Спеціалізований транспорт і контейнери є складовими технологічної частини системи поводження з відходами. Тому, для кількісної оцінки доцільності впровадження цифрових технологій у систему збирання та транспортування твердих побутових відходів запропоновано інтегральний індекс технологічної доцільності. Даний показник дозволяє формалізувати сукупний рівень операційної неефективності системи та забезпечити можливість порівняльного аналізу різних територіальних схем організації поводження з відходами.

На відміну від традиційних підходів, що переважно базуються на інфраструктурних характеристиках (таких як щільність контейнерного парку або забезпеченість населення контейнерами), у запропонованій методиці основна увага приділяється саме операційним параметрам функціонування системи. До них віднесено, по-перше, логістичну ефективність маршрутів збору та транспортування відходів, а по-друге — ефективність використання контейнерного парку за ступенем його фактичного завантаження. Такий підхід дозволяє безпосередньо оцінити економічні втрати, що виникають унаслідок холостих пробігів транспортних засобів та недовикористання контейнерної інфраструктури.

Логістична складова системи характеризується коефіцієнтом логістичної неефективності, який є питомим показником транспортних витрат та визначається як відношення сумарної довжини маршрутів до обсягу зібраних відходів:

$$K_{\text{ЛН}} = \sum L / \sum Q \quad (1)$$

де $\sum L$ — сумарна довжина маршрутів збору твердих побутових відходів (км);
 $\sum Q$ — сумарна маса зібраних відходів (т).

Отриманий коефіцієнт відображає, скільки кілометрів пробігу необхідно для збору однієї тони відходів, і таким чином безпосередньо характеризує ефективність логістичної організації системи.

Для забезпечення уніфікованої інтерпретації результатів у різних територіальних умовах у якості нормативного орієнтира прийнято значення 20 км/т, яке розглядається як граничний рівень ефективного функціонування системи

збору ТПВ у сільських і селищних громадах []. Перевищення цього значення свідчить про зростання питомих транспортних витрат і, відповідно, про неефективність маршрутної організації.

У зв'язку з цим здійснюється нормування показника шляхом переходу до безрозмірної функції логістичної неефективності, яка визначається як:

$$f(K_{\text{лн}}) = \max\left(0, 1 - \frac{20}{K_{\text{лн}}}\right) \quad (2)$$

Зазначена функція забезпечує логічну інтерпретацію результатів: при значеннях $K_{\text{лн}} \leq 20$ логістична неефективність приймається рівною нулю, тоді як при зростанні питомих витрат понад норматив значення функції поступово наближається до одиниці.

Другим ключовим елементом моделі є коефіцієнт ефективності використання контейнерного парку $K_{\text{ек}}$, який характеризує середній рівень фактичного заповнення контейнерів у системі збору відходів:

$$K_{\text{ек}} = \frac{\sum V_{\text{роз}}}{\sum V_{\text{факт}}} \quad (4)$$

де $\sum V_{\text{роз}}$ - визначений технологічними розрахунками при проектуванні логістичної схеми необхідний об'єм контейнерів;

$\sum V_{\text{факт}}$ - фактично встановлений об'єм контейнерів.

Даний показник змінюється в межах від 0 до 1, де значення, близькі до одиниці, відповідають високому рівню завантаження контейнерів, а низькі значення свідчать про їх недовикористання та неефективну організацію збору.

У контексті оцінювання втрат у системі доцільно використовувати доповнюючу величину $(1 - K_{\text{ек}})$, яка інтерпретується як рівень неефективності використання контейнерного парку. Таким чином, чим нижче фактичне завантаження контейнерів, тим вищими є потенційні втрати системи.

Для більш детальної інтерпретації отриманих значень використовується градація коефіцієнта ефективності (табл. 1), яка дозволяє виділити якісні стани функціонування системи:

Таблиця 1

Градація коефіцієнта $K_{ек}$

Діапазон $K_{ек}$	Інтерпретація	Характеристика стану системи
0.90 – 1.00	дуже висока ефективність	система близька до оптимальної
0.80 – 0.90	висока ефективність	стабільне функціонування
0.65 – 0.80	задовільна ефективність	допустимі втрати
0.50 – 0.65	середня ефективність	потребує оптимізації
0.35 – 0.50	низька ефективність	значні втрати
0.00 – 0.35	критично низька ефективність	неефективна система

Виділення зазначених інтервалів обумовлене наявністю функціональних меж переходу системи від ефективного до неефективного режиму роботи. Зокрема, значення 0.8 розглядається як межа стабільного функціонування, тоді як рівень 0.5 є критичною межею, нижче якої система втрачає здатність забезпечувати раціональне використання ресурсів без впровадження додаткових заходів оптимізації.

Інтегральна оцінка доцільності впровадження цифрових технологій у систему поводження з ТПВ здійснюється на основі поєднання двох наведених вище складових — логістичної та контейнерної неефективності. Формально індекс визначається як середньозважене значення цих компонентів:

$$I_{тд} = 0,5 \cdot \max(0, 1 - 20/K_{лн}) + 0,5 \cdot (1 - K_{ек}), \quad (5)$$

де $I_{тд}$ — інтегральний індекс технологічної доцільності цифровізації.

Рівність вагових коефіцієнтів (0,5 та 0,5) обґрунтовується рівнозначним впливом транспортно-логістичної та контейнерної складових на загальну

ефективність функціонування системи збору відходів. У такій постановці індекс набуває інтерпретації як узагальнена міра втрат ефективності системи.

Отриманий показник Ітд є нормованою величиною, що змінюється в діапазоні від 0 до 1, що забезпечує можливість його використання для порівняння різних систем поводження з ТПВ незалежно від їх масштабу.

З метою інтерпретації результатів запропоновано наступну градацію:

- 0.00 – 0.15 — висока ефективність системи, цифровізація не є критично необхідною;
- 0.15 – 0.30 — незначні операційні втрати, доцільна точкова оптимізація;
- 0.30 – 0.50 — середній рівень неефективності, доцільне впровадження цифрових рішень;
- 0.50 – 1,00 — високий рівень неефективності, цифровізація є економічно обґрунтованою.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено комплексне теоретико-методологічне дослідження основ цифровізації систем моніторингу твердих побутових відходів (ТПВ). За результатами аналізу зроблено такі висновки:

1. Трансформація парадигми управління. Доведено, що сучасна сфера поводження з ТПВ перебуває в стані переходу від статичних моделей до інтелектуальних кіберфізичних систем. Використання технологій IoT, RFID та GNSS дозволяє мінімізувати антропогенний вплив на довкілля через оптимізацію логістичних процесів та зниження викидів транспортних засобів.

2. Технологічний базис моніторингу. Визначено, що найбільш ефективними інструментами детермінації стану накопичення відходів є ультразвукові та оптичні (ToF) сенсори. Встановлено, що для забезпечення автономності таких пристроїв в умовах міської забудови оптимальним є використання енергоефективних мереж LPWAN (зокрема протоколу LoRaWAN), що дозволяє пристроям функціонувати до десяти років без заміни джерела живлення.

3. Верифікація та безпека даних. Обґрунтовано роль технології RFID як інструменту юридичної та операційної верифікації наданих послуг. У поєднанні з методами наскрізного шифрування та перспективним використанням блокчейну це забезпечує цілісність даних і прозорість фінансових взаєморрахунків у ланцюгу поводження з відходами.

4. Глобальний та регіональний досвід. Аналіз світових практик (досвід країн ЄС, Південної Кореї, США) підтвердив, що цифровізація є ключовим фактором циркулярної економіки. Для України, зокрема Полтавського регіону, виявлено необхідність адаптації цих технологій до умов низької щільності населення та значної територіальної розосередженості об'єктів генерації відходів.

5. Методологія оцінки доцільності. Розроблено та математично обґрунтовано методику визначення Індексу цифрової доцільності (Ітд). Запропонований показник базується на синтезі двох ключових чинників:

- Коефіцієнта логістичної неефективності (Клн), який відображає питомі транспортні витрати на збір однієї тонни відходів;
- Коефіцієнта ефективності використання контейнерного парку (Кек), що характеризує фактичне заповнення ємностей.

6. Практичне значення інтегральної оцінки. Встановлено граничне значення логістичної ефективності на рівні 20 км/т. Математична модель інтегрального індексу (Ітд), що змінюється в діапазоні від 0 до 1, дозволяє громадам об'єктивно оцінювати інвестиційну привабливість цифрових рішень. Значення індексу понад 0.30–0.50 свідчить про доцільність, а понад 0.50 — про критичну необхідність впровадження систем цифрового моніторингу для подолання операційної неефективності.

Запропонований підхід створює наукове підґрунтя для переходу від суб'єктивного планування до обґрунтованого проектування схем санітарної очистки територій у межах кластерних моделей управління відходами.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ ДИКАНСЬКОЇ ГРОМАДИ

3.1. Аналіз об'єктів із низькою інтенсивністю накопичення відходів

Аналіз даних Додатку 6 дозволяє виділити групу майданчиків, де фактичний обсяг генерації ТПВ є суттєво меншим за місткість встановлених контейнерів. Точки з найменшими показниками — це зони, де ресурс контейнерів використовується неефективно.

В додатку А наведено аналіз майданчиків, де коефіцієнт Кек є нижчим 0,5 (на основі розрахункового періоду обслуговування 3 доби для змішаних відходів та 6 діб для скла та пластику).

За результатами аналізу можемо констатувати, що по категорії змішаних ТПВ до зони неефективного використання потрапляють 55 з 435 майданчиків (41 майданчики з контейнерами об'ємом 0,77 м³ та 14 майданчики з контейнерами об'ємом 0,12м³). По категорії відходів скла до зони неефективного використання потрапляють 158 з 435 майданчиків (18 майданчики з контейнерами об'ємом 0,77 м³ та 140 майданчики з контейнерами об'ємом 0,12м³). По категорії відходів пластику до зони неефективного використання потрапляють 147 з 435 майданчиків (103 майданчики з контейнерами об'ємом 0,77 м³ та 44 майданчики з контейнерами об'ємом 0,12м³).

Низький коефіцієнт ефективності використання контейнерів ($K_{ек} < 0,5$) свідчить про наступні проблеми в системі управління:

1. Надлишковість інфраструктури. Дані майданчики є об'єктами нерационального використання коштів на придбання технологічного обладнання. Рекомендовано або зменшити об'єм контейнера (наприклад з 0,77 до 0,6м³), або збільшити інтервал вивезення. Збільшення інтервалу вивезення для змішаних ТПВ обмежується вимогами нормативних документів []. З урахуванням прийнятого в схемі періоду 3 дні таке збільшення є неможливим.

2. Логістичні втрати. Сміттєвоз здійснює зупинку, виконує маневр під'їзду та процес підйому/вивантаження для збору мізерної кількості відходів. Це підвищує собівартість вивезення 1 м³ сміття на таких майданчиках порівняно з високонавантаженими зонами. Рішенням проблеми може бути перепланування маршрутів із збільшенням площі покриття одного майданчику або динамічне планування маршрутів на основі впровадження цифрових систем.

3.2. Аналіз логістичної ефективності маршрутів

Оцінювання логістичної складової системи поводження з твердими побутовими відходами здійснюється на основі коефіцієнта логістичної неефективності Клн, який характеризує питомі витрати на транспортування відходів у розрахунку на одну тону зібраної маси. Даний показник визначається як відношення довжини маршруту до обсягу зібраних відходів і дозволяє безпосередньо оцінити раціональність організації маршрутної мережі.

Ключовим критерієм інтерпретації отриманих значень є нормативний рівень 20 км/т, що приймається як гранично допустиме значення ефективної роботи системи збору відходів у територіальних громадах. Значення, що не перевищують зазначений поріг, свідчать про відносно раціональну організацію логістичних процесів, тоді як його перевищення вказує на наявність суттєвих втрат, пов'язаних із надлишковими пробігами транспортних засобів.

В таблиці 2 наведено основні параметри маршрутів та результати аналізу їх ефективності.

Аналіз розрахованих значень коефіцієнта Клн для базових маршрутів (E2M13M – E2M73M) показує, що всі вони функціонують у межах нормативного рівня. Зокрема, найнижчі значення спостерігаються для маршрутів E2M63M (2,83 км/т) та E2M73M (2,84 км/т), що свідчить про високий рівень концентрації відходів та ефективне використання транспортних ресурсів. У цих випадках мінімальні відстані перевезення на одиницю маси досягаються завдяки оптимальному співвідношенню між протяжністю маршруту та обсягом зібраних відходів.

Таблиця 2

Результати аналізу ефективності маршрутів Диканської громади

Маршрут	Обсяг зап період, т	Довжина маршруту, м	Клн = $\frac{\sum L}{\sum Q}$ Клн, т	Кек	Ітд = $0,5 \cdot \max(0, 1 - 20/\text{Клн}) + 0,5 \cdot (1 - \text{Кек}),$
E2M13M	11,57974	92318,6	7,9724	0,7544	0,12281259
E2M23M	6,542251	117388,7	17,943	0,6955	0,152268837
E2M33M	5,433815	90251,8	16,609	0,7004	0,149818731
E2M43M	3,365379	61508,7	18,277	0,6809	0,159525978
E2M53M	4,160943	46161	11,094	0,7274	0,136315488
E2M63M	7,420032	20998,9	2,83	0,8302	0,084914605
E2M73M	13,64794	38768,5	2,8406	0,7833	0,108369067
E2M1СК	4,066725	92318,6	22,701	0,542	0,258729246
E2M1ПЛ	1,781921	92318,6	51,808	0,5924	0,357304095
E2M2СК	2,297595	115323	50,193	0,4997	0,400553716
E2M2ПЛ	1,006739	115323	114,55	0,6262	0,393275678
E2M3СК	1,908318	92525,1	48,485	0,5168	0,388482002
E2M3ПЛ	0,83617	92525,1	110,65	0,6181	0,395784054
E2M4СК	1,181898	61508,7	52,042	0,475	0,416448236
E2M4ПЛ	0,517874	61508,7	118,77	0,5807	0,417559786
E2M5СК	1,461294	46161	31,589	0,5883	0,297584757
E2M5ПЛ	0,640297	46161	72,093	0,6346	0,363353513
E2M6СК	7,398927	52357,4	7,0764	0,6227	0,188648938
E2M6ПЛ	3,241996	52357,4	16,15	0,613	0,193515045

Разом з тим, окремі маршрути, такі як E2M43M (18,28 км/т) та E2M23M (17,94 км/т), хоча й залишаються в межах нормативу, наближаються до граничного значення. Це свідчить про наявність потенційних резервів для оптимізації, оскільки навіть незначне зменшення обсягів зібраних відходів або збільшення довжини маршруту може призвести до переходу в зону неефективності.

Принципово інша ситуація спостерігається для альтернативних маршрутів (СК та ПЛ), для яких характерне значне перевищення нормативного рівня. Так, для маршрутів E2M2ПЛ (114,55 км/т), E2M4ПЛ (118,77 км/т) та E2M3ПЛ (110,65 км/т)

значення коефіцієнта перевищують норматив у кілька разів, що вказує на критично низьку ефективність логістичної організації. Подібні значення свідчать про дисбаланс між довжиною маршруту та фактичним обсягом зібраних відходів, що, у свою чергу, обумовлює значні економічні втрати.

Причини такої ситуації мають комплексний характер і пов'язані, насамперед, із низькою щільністю утворення відходів на окремих територіях, нерівномірним розміщенням контейнерів, а також обслуговуванням значної кількості недозавантажених контейнерів. У результаті транспортні засоби здійснюють значні пробіги при відносно малих обсягах перевезення, що суттєво знижує загальну ефективність системи.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє зробити висновок про наявність структурної неоднорідності системи поводження з ТПВ. Частина маршрутів характеризується високою або задовільною ефективністю, тоді як інша частина формує основний обсяг логістичних втрат. Це свідчить про необхідність диференційованого підходу до управління маршрутною мережею, який має враховувати специфіку окремих територій та рівень їх навантаження.

3.3. Аналіз коефіцієнту технологічної доцільності впровадження цифрових технологій

Комплексна оцінка ефективності функціонування системи поводження з твердими побутовими відходами та визначення доцільності впровадження цифрових технологій здійснюється на основі інтегрального індексу технологічної доцільності Ітд (табл. 2). Даний показник поєднує вплив логістичних витрат і ефективності використання контейнерного парку, що дозволяє оцінити систему з позицій реальних операційних втрат.

Розраховані значення індексу для досліджуваних маршрутів варіюють у межах від 0,0849 до 0,4176, що свідчить про різний рівень технологічної ефективності окремих елементів системи. Відповідно до прийнятої шкали інтерпретації, маршрути з найнижчими значеннями індексу, зокрема E2M63M, E2M73M та E2M13M, характеризуються високою ефективністю функціонування.

Для цих маршрутів властиве поєднання низьких логістичних витрат і достатнього рівня заповнення контейнерів, що забезпечує раціональне використання ресурсів і не потребує негайного впровадження цифрових рішень.

Разом з тим, для частини маршрутів значення індексу знаходяться в інтервалі 0,15–0,30, що свідчить про наявність окремих операційних втрат. У цих випадках система в цілому функціонує задовільно, проте має локальні проблеми, пов'язані або з незначною неефективністю маршрутів, або з недостатнім рівнем завантаження контейнерів. Це обумовлює доцільність застосування точкових заходів оптимізації.

Найбільш проблемною є група маршрутів, для яких значення індексу перевищує 0,30. До неї належать переважно альтернативні маршрути типу СК та ПЛ, де одночасно спостерігаються як високі логістичні витрати, так і низький рівень ефективності використання контейнерного парку. У цих умовах система працює з суттєвими втратами, що робить впровадження цифрових технологій економічно обґрунтованим і доцільним.

Аналіз структури індексу показує, що основними факторами його зростання є перевищення нормативного рівня коефіцієнта Клн, а також зниження коефіцієнта ефективності контейнерів Кек. Особливо несприятливою є ситуація, коли обидва фактори проявляються одночасно, що призводить до різкого зростання інтегрального показника та формування системних втрат.

У цьому контексті впровадження цифрових технологій розглядається як інструмент підвищення ефективності функціонування системи. Зокрема, для маршрутів із низьким рівнем заповнення контейнерів доцільним є застосування датчиків моніторингу наповнення, що дозволяє організувати збір відходів за фактичним станом контейнерів. Це сприяє зменшенню кількості холостих виїздів і підвищенню ефективності використання транспортних засобів.

Для маршрутів із високими логістичними витратами доцільним є впровадження систем супутникового моніторингу транспорту та геоінформаційних систем оптимізації маршрутів. Використання таких технологій дозволяє скоротити

довжину маршрутів, уникнути дублювання та забезпечити більш раціональний розподіл навантаження між транспортними засобами.

У випадках, коли спостерігається одночасна наявність обох типів неефективності, необхідним є комплексне впровадження цифрових рішень, що поєднують моніторинг контейнерного парку та інтелектуальне управління логістикою. Такий підхід дозволяє досягти синергетичного ефекту, зменшуючи як транспортні, так і операційні витрати.

Отже, проведений аналіз підтверджує, що доцільність цифровізації системи поводження з ТПВ має диференційований характер і визначається конкретними умовами функціонування окремих маршрутів. Найбільший ефект від впровадження цифрових технологій очікується у сегментах із середнім рівнем неефективності, де існує значний потенціал для оптимізації без необхідності кардинальної перебудови системи.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено аналіз фактичних показників технологічної та логістичної ефективності системи поводження з ТПВ Диканської громади, за результатами якого встановлено наступне:

1. Ефективність використання контейнерного парку. Встановлено наявність значної кількості точок з низькою інтенсивністю накопичення відходів ($K_{ек} < 0,5$). Найбільш критична ситуація спостерігається у категоріях роздільного збору: до зони неефективного використання потрапляють 158 майданчиків для скла та 147 — для пластику. Це свідчить про надлишковість наявної інфраструктури та значні операційні втрати через обслуговування недозавантажених контейнерів.

2. Неоднорідність логістичних маршрутів. Аналіз засвідчив структурну неоднорідність транспортної системи. Базові маршрути збору змішаних відходів (E2M13M – E2M73M) функціонують у межах нормативу (до 20 км/т), демонструючи високу концентрацію відходів. Натомість альтернативні маршрути (скло та пластик) характеризуються критично низькою ефективністю: для маршрутів E2M4ПЛ та E2M2ПЛ показник $K_{лн}$ перевищує норматив у 5–6 разів

(118,77 км/т та 114,55 км/т відповідно), що вказує на значні фінансові втрати громади.

3. Інтегральна оцінка цифровізації. За допомогою Індексу технологічної доцільності (Ітд) виявлено пріоритетні зони для впровадження цифрових рішень. Маршрути збору змішаних ТПВ мають низькі значення індексу (0,08–0,16), що вказує на відсутність потреби в негайній цифровізації. Проте для сегментів роздільного збору (СК та ПЛ) значення індексу сягають 0,35–0,42, що згідно з розробленою методикою підтверджує економічну обґрунтованість впровадження інтелектуальних систем моніторингу.

4. Прогнозний ефект від впровадження ТТ. Обґрунтовано, що для Диканської громади доцільним є диференційований підхід до цифровізації:

- Для зон із низьким Кек: встановлення IoT-датчиків рівня наповнення для переходу на вивезення відходів за фактичним станом.
- Для маршрутів із високим Клн: впровадження GPS-телематики та ПС-оптимізації для динамічного планування траєкторій руху.

5. Синергетичний вплив. Визначено, що поєднання моніторингу контейнерів із інтелектуальною логістикою дозволить нівелювати «холості» пробіги спецтехніки та оптимізувати графіки обслуговування сільських територій з низькою щільністю утворення відходів. Це забезпечить підвищення загальної рентабельності системи санітарної очистки громади та зниження екологічного навантаження.

РЛЗДІЛ 4

ПРОЄКТНІ РІШЕННЯ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ В ДИКАНСЬКІЙ ГРОМАДІ

4.1. Обґрунтування вибору технологічних рішень

Комплексна оцінка ефективності функціонування системи поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) у Диканській громаді вказує на необхідність переходу від традиційних методів управління до динамічного цифрового моніторингу. Вихідні дані, представлені в результатах інвентаризації точок накопичення (Додаток 6), демонструють екстремальну варіативність добового накопичення відходів, що робить статичне планування маршрутів економічно збитковим. Обґрунтування вибору технологічних рішень має базуватися на принципі функціональної відповідності інструментів моніторингу конкретним параметрам кожного майданчика збору та інтеграції в регіональну стратегію розвитку.

Процес удосконалення муніципальних систем управління відходами на сучасному етапі розвитку потребує впровадження передових цифрових інструментів, що дозволяють мінімізувати логістичні витрати. Актуальність такого підходу зумовлена специфікою сільських і селищних громад Полтавської області, де значні відстані між населеними пунктами та низька щільність накопичення відходів роблять традиційні графіки вивезення малоефективними. Основним концептуальним фундаментом для розбудови таких систем є технологія Інтернету речей (IoT), яка забезпечує створення розгалуженої мережі інтелектуальних пристроїв, здатних передавати дані на серверні платформи для аналітичного опрацювання.

Аналіз структури утворення відходів у розрізі 435 майданчиків Диканської громади виявляє чіткий поділ на зони з інтенсивним та низьким навантаженням. Зокрема, майданчики №34, №38 та №44 характеризуються як зони з інтенсивним навантаженням сумарним обсягом утворення відходів від 1,41 м³/день до 1,51

м³/день. А, наприклад, майданчики №401 та №412 характеризуються сумарним обсягом утворення відходів від 0,0112 м³/день та 0,0022 м³/день і є зонами недозавантаженості. Така концентрація ТПВ потребує пріоритетного впровадження систем безперервного контролю рівня наповненості. Використання ультразвукових датчиків IoT у таких точках дозволить оперативно реагувати на переповнення, яке за поточної норми накопичення може відбуватися швидше за встановлений графік вивезення. Датчики, що працюють за принципом ехолокації, забезпечують високу точність вимірювання навіть при неоднорідному складі відходів, де частка пластику та паперу сукупно становить близько 10-15% від загального об'єму.

Технологічним рішенням для моніторингу наповненості контейнерів у Диканській громаді є використання датчиків, інтегрованих у мережу LoRaWAN. Вибір саме цієї технології обґрунтовується високим ступенем логістичної неефективності при обслуговуванні віддалених точок збору з низьким рівнем накопичення. Дані Додатку 6 показують, що значна частина пунктів збору, наприклад №28, №55 та №57 у Петро-Давидівці, продукують лише від 0,002 до 0,006 м³/день. Включення таких точок у щоденні маршрути без попередньої верифікації стану контейнера призводить до високого коефіцієнта логістичної неефективності та холостих пробігів спецтехніки. Встановлення автономних сенсорів із тривалим циклом роботи батареї дозволяє реалізувати стратегію «вивезення за запитом», коли сміттєвоз відвідує віддалені населені пункти лише за умови накопичення критичної маси відходів (понад 75% об'єму).

Відповідно до проведених розрахунків, значна частка майданчиків характеризується низьким рівнем ефективності використання контейнерів (Кек < 0,5). Зокрема, у сегменті змішаних відходів таких майданчиків налічується 55 із 435, що становить понад 12% загальної кількості. Для скла цей показник зростає до 158 майданчиків (36%), а для пластику — 147 (34%). Така структура свідчить про масштабну проблему надлишковості контейнерного парку, особливо у сегменті роздільного збору.

Аналіз числових значень коефіцієнта Кек показує, що для значної кількості майданчиків він знаходиться у межах 0,35–0,49, що означає використання лише 35–50% потенційного об'єму контейнерів. В окремих випадках, зокрема для майданчиків №55, №324 та №412 (змішані відходи), значення коефіцієнта знижується до 0,076, що вказує на критично низький рівень завантаження. Аналогічна ситуація спостерігається і для вторинних ресурсів, де мінімальні значення Кек для скла та пластику опускаються нижче 0,05.

У цих умовах традиційні підходи до управління, що базуються на фіксованих графіках вивезення, втрачають ефективність. Статичне планування не враховує фактичну динаміку накопичення, що призводить до виконання значної кількості технологічно необґрунтованих рейсів.

Паралельно з контролем контейнерів необхідним є впровадження системи моніторингу руху спецтранспорту на основі GPS-навігації та RFID-ідентифікації. Це дозволить верифікувати факт надання послуги на кожному з ідентифікованих майданчиків громади. Технологічна архітектура системи моніторингу руху базується на використанні GPS-трекерів високої точності, здатних передавати дані про геопозицію з інтервалом не більше 30 секунд. Це необхідно для контролю дотримання графіків та швидкості руху, а також для аналізу витрат палива. Інтеграція GPS-даних із хмарною платформою управління дозволяє порівнювати планові та фактичні пробіги, виявляти випадки відхилень від маршруту, що є критичним для оптимізації витрат пального в умовах громади.

Впровадження технології радіочастотної ідентифікації (RFID) стає ключовим елементом обґрунтування вибору рішень для обліку морфологічного складу відходів. Враховуючи, що в громаді окремо виділяються потоки змішаних відходів, скла, пластику та паперу (наприклад, для майданчика №1 обсяг пластику становить 0,009 м³/день, а паперу — 0,0036 м³/день), автоматизація ідентифікації кожного контейнера під час вивантаження дозволяє вести точний облік вторинної сировини. Встановлення RFID-міток на кожному ємнісному об'єкті та зчитувачів на підйомних механізмах сміттевозів унеможливорює помилки ручного введення даних та забезпечує достовірність інформації для формування звітності. Це

створює підґрунтя для впровадження системи оплати «плати за те, що викидаєш», яка стимулює населення до роздільного збору та зменшення обсягів утворення відходів.

Економічне та технічне обґрунтування обраних рішень безпосередньо корелює з Індексом цифрової доцільності (Іцд). Високий потенціал цифровізації для Диканської громади підтверджується значним розривом між обсягами накопичення в житловому фонді багатоквартирних будинків (БК) та приватного сектору (ПС). Для точок із добовим накопиченням понад 0,5 м³ (майданчики №12, №14, №15, №19) встановлення систем моніторингу є першочерговим завданням. Оптимізація маршрутів на основі даних про наповненість дозволяє скоротити загальний пробіг техніки на 15–22%, що за умови поточних цін на енергоносії забезпечує окупність інвестицій у датчики IoT протягом 18–24 місяців. При цьому слід враховувати стан наявного парку сміттєвозів: для застарілої техніки першочерговим завданням є встановлення базових GPS-модулів, тоді як для сучасних машин можлива повна інтеграція з IoT-платформами.

Організаційний аспект вибору технологій також передбачає оцінку кадрового потенціалу громади. Впровадження складних систем моніторингу потребує наявності фахівців, здатних працювати з геоінформаційними системами (ГІС) та аналізувати великі масиви даних (Big Data). У разі дефіциту таких кадрів доцільним є використання кластерної моделі, де централізована цифрова платформа обслуговує кілька громад одночасно, забезпечуючи економію на масштабі та спільне використання інфраструктури. Така інтеграція даних про наповненість контейнерів та рух транспорту з місцевого рівня в загально регіональну систему моніторингу дозволяє стратегічно планувати розвиток інфраструктури, зокрема будівництво перевантажувальних станцій та сортувальних комплексів, базуючись на реальних даних про потоки відходів.

Технологічна архітектура системи повинна мати багаторівневу структуру «громада – кластер – регіон». Нижній рівень складають кінцеві пристрої (датчики та трекери), середній — мережева інфраструктура (шлюзи LoRaWAN), а верхній — аналітичне програмне забезпечення. Для Диканської громади доцільно

використовувати відкриті протоколи передачі даних, що дозволить у майбутньому масштабувати систему. Використання деталізованої інформації про добове утворення відходів, наданої в Додатку 6, є базовим інструментом для калібрування системи та визначення точок першочергового встановлення обладнання. Для забезпечення стабільного зв'язку в умовах сільської місцевості розгортання власних шлюзів LoRaWAN дозволить мінімізувати операційні витрати на передачу даних порівняно з використанням комерційних мереж мобільного зв'язку.

Розвиток запропонованих рішень у довгостроковій перспективі передбачає інтеграцію з регіональним центром моніторингу, що дозволить використовувати методи машинного навчання для прогнозування пікових навантажень на систему. Аналіз великих масивів даних про динаміку накопичення ТПВ по майданчиках дасть змогу виявити сезонні та тижневі закономірності, що ще більше підвищить точність планування логістичних операцій. Цифровізація виступає не лише як інструмент контролю, а як стратегічний механізм підвищення екологічної безпеки та економічної стійкості громади. Автоматизована фіксація виконання робіт через GPS та RFID змінює систему мотивації працівників комунальних підприємств, переорієнтовуючи її на фактичний результат.

Підсумовуючи обґрунтування, слід зазначити, що вибір на користь поєднання IoT-датчиків рівня, GPS-моніторингу та RFID-ідентифікації є найбільш раціональним для умов Диканської громади. Це дозволяє не лише вирішити поточні проблеми надмірних логістичних витрат, а й створити фундамент для впровадження автоматизованої системи білінгу. Обґрунтовані технологічні рішення дозволяють трансформувати систему поводження з відходами з реактивної у проактивну. Детальний аналіз кожної точки збору підтверджує, що лише комплексний цифровий моніторинг здатний забезпечити необхідну гнучкість управління та раціональне використання бюджетних коштів, створюючи передумови для сталого розвитку муніципальної системи в межах Полтавської області.

4.2. Рекомендації щодо цифровізації

Для маршрутів з низьким Кек (контейнерна проблема) рекомендується впровадження датчиків заповнення контейнерів (IoT-сенсори) (дозволяють відслідковувати фактичний рівень наповнення), RFID або QR-ідентифікації контейнерів (забезпечує облік та контроль використання), аналітичних платформ збору даних для формування статистики заповнення.

Для маршрутів з високим Клн (логістична проблема) доцільне впровадження: GPS-моніторингу транспорту, ГІС-систем оптимізації маршрутів, алгоритмів динамічної маршрутизації (VRP-моделі). Це дозволить скоротити довжину маршрутів, уникнути дублювання, оптимізувати графіки збору.

Для маршрутів із середнім та високим Ітд необхідна комплексна цифровізація: інтеграція датчиків + логістичного ПЗ; створення єдиної диспетчерської системи; використання прогнозних моделей утворення відходів.

4.3. Розрахунок необхідної кількості обладнання

Система має трирівневу архітектуру.

Польовий рівень: ультразвукові датчики заповнення, GPS-трекери, RFID-мітки.

Мережевий рівень: LoRaWAN шлюзи, мобільний зв'язок (резерв).

Аналітичний рівень: сервер обробки даних, GIS-модуль, модуль оптимізації маршрутів, система диспетчеризації.

Заданими розділу 3.1 по всім видам відходів 360 контейнерів потрапляють в зону неефективного використання. Тому, приймається до впровадження 360 датчиків заповнення контейнерів

LoRaWAN інфраструктура. Радіус покриття одного шлюзу в сільській місцевості до 15 км по прямій видимості. Приймаємо з урахуванням рельєфу $R = 10$ км. Площа покриття одного шлюзу становит близько 314 км^2 . Площа громади становить $S \approx 682 \text{ км}^2$. Тоді необхідно 3 шлюзи.

GPS-моніторинг транспорту. Кількість сміттєвозів згідно даних проєкту становить 5 одиниць. Тоді потрібно 5 GPS-трекерів та 5 CAN/паливних датчиків (опційно).

RFID-система. Кількість контейнерів 360. Тоді потрібно 360 RFID-міток та 5 RFID-зчитувачів (по одному на автомобіль).

Програмне забезпечення. Доцільно використовувати комбіновану модель:

1. IoT-платформа – ChirpStack (open-source) або The Things Stack;
2. GIS-аналітика – QGIS / ArcGIS;
3. Логістичне ПЗ – OR-Tools (Google) для оптимізації маршрутів – або спеціалізовані системи (Waste Logistics Software).
4. Диспетчерська система: веб-панель управління, мобільний додаток для водіїв.

Розрахунок орієнтовної вартості системи наведено в таблиці 3.

Таблиця 3.

Орієнтовна вартість цифровізації системи управління відходами
Диканської громади

Компонент	Кількість	Орієнтовна вартість грн
IoT датчики	360	972000
LoRaWAN шлюзи	3	115440
RFID мітки	360	33372
RFID зчитувачі	5	4695
GPS	5	5980
ПЗ та сервер	1	100000
Всього		1226087

Витрати на збір щорічно для громади згідно проєкту [] але з урахуванням сучасних цін на паливо становлять 3476299,6 грн по змішаним ТПВ, 528902,95 грн по склу та 502184,58 грн по пластику. За даними розділу 3 неефективність використання обладнання становить близько 12,6% по змішаним ТПВ, 36,3% по склу, 33,8% по пластику. Прийнята в методиці межа ефективності використання

контейнерного обладнання становить $K_{ек}=0,5$. Це означає, що період обслуговування контейнерів теоретично може бути збільшений у 2 і більше разів. Тоді орієнтовна економія від впровадження цифрової системи може становити до 219006,88 грн по змішаним ТПВ, 95995,89 грн по склу та 84869,2 грн по пластику, що в сумі дає 399872 грн на рік, а період окупності затрат на обладнання складатиме близько 3 років.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі розроблено та обґрунтовано комплексні проєктні рішення щодо впровадження цифрової системи моніторингу поводження з ТПВ у Диканській територіальній громаді. На основі проведених розрахунків зроблено такі висновки:

1. Технологічне обґрунтування. Визначено, що оптимальною архітектурою для умов Диканської громади є трирівнева система моніторингу: польовий рівень (IoT-датчики, GPS-трекери, RFID-мітки), мережевий рівень (інфраструктура LoRaWAN) та аналітичний рівень (ГІС-платформи та диспетчерське ПЗ). Вибір технології LoRaWAN обумовлений необхідністю забезпечення стабільного зв'язку на великій площі громади ($S \approx 682 \text{ км}^2$) при мінімальному енергоспоживанні кінцевих пристроїв.

2. Проєктна специфікація обладнання. Розраховано необхідну кількість технічних засобів для повної цифровізації проблемних ділянок мережі. До впровадження рекомендовано 360 ультразвукових датчиків заповнення та RFID-міток (для майданчиків із критично низьким $K_{ек}$), 3 базові станції (шлюзи) LoRaWAN для повного покриття території громади, а також 5 одиниць бортового обладнання (GPS-трекери та RFID-зчитувачі) для парку спецтехніки.

3. Диференційовані стратегії управління. Сформовано рекомендації залежно від типу операційної неефективності:

- Для сегментів із високим рівнем логістичних втрат (зокрема роздільний збір скла та пластику) передбачено перехід до динамічної маршрутизації (VRP-моделі);

- Для віддалених населених пунктів із низькою інтенсивністю накопичення запропоновано стратегію «вивезення за запитом», що базується на досягненні критичного рівня наповнення контейнера (понад 75%).

4. Економічна ефективність та окупність. Загальна інвестиційна вартість впровадження системи оцінюється у 1 226 087 грн. Враховуючи поточний рівень неефективності (до 36,3% у сегменті збору скла) та потенційне скорочення експлуатаційних витрат на паливо та амортизацію техніки, очікувана річна економія становить близько 399 872 грн.

5. Термін окупності. Встановлено, що період окупності витрат на обладнання та програмне забезпечення складатиме близько 3 років. Враховуючи екологічний ефект від зниження викидів CO₂ та підвищення прозорості ринку комунальних послуг, такий термін є цілком прийнятним для муніципальних інвестиційних проєктів.

6. Екологічна та соціальна значущість. Цифровізація дозволить трансформувати систему поводження з ТПВ Диканської громади з реактивної у проактивну. Це створює підґрунтя для впровадження автоматизованої системи білінгу за принципом «плати за те, що викидаєш» (PAYT), що є стратегічним кроком до виконання вимог європейського екологічного законодавства та сталого розвитку регіону.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано важливу науково-практичну задачу щодо обґрунтування та розробки системи цифрового моніторингу ТПВ для Диканської громади. Основні результати дослідження:

1. Встановлено, що існуюча система управління відходами громади характеризується високим рівнем операційної неефективності, особливо у сегменті роздільного збору вторинної сировини, де понад 30% майданчиків використовуються менш ніж на половину своєї потужності.

2. Доведено переваги використання енергоефективних мереж дальнього радіусу дії (LoRaWAN) для сільської місцевості, що дозволяє забезпечити автономний моніторинг контейнерів протягом 7–10 років без заміни джерел живлення.

3. Апробовано науково-методичний підхід до оцінки доцільності цифровізації через інтегральний індекс $I_{\text{тд}}$. Розрахунки для Диканської громади показали, що для базових маршрутів змішаних відходів цифровізація є допоміжним заходом, тоді як для альтернативних маршрутів (скло, пластик) вона є критично необхідною через перевищення нормативів логістичних витрат у 5–6 разів.

4. Розроблено архітектуру цифрової системи, що включає 360 IoT-датчиків, 3 базові станції LoRaWAN та систему RFID-ідентифікації спецтранспорту. Це дозволить реалізувати перехід до динамічного планування маршрутів та моделі «вивезення за запитом».

5. Прогнозований економічний ефект від реалізації проєкту становить близько 400 тис. грн економії на рік, що забезпечує термін окупності інвестицій протягом 3 років.

6. Екологічна значущість роботи полягає у зменшенні викидів забруднюючих речовин від роботи спецтехніки (через скорочення пробігів на 15–20%) та підвищенні відсотка вилучення вторинної сировини завдяки прозорому контролю за наповненістю контейнерів.

7. Сформовано рекомендації щодо диференційованої стратегії впровадження цифрових технологій в процесі управління відходами громади.

Впровадження запропонованих рішень дозволить Диканській громаді створити підґрунтя для переходу до повної циркулярної моделі управління ресурсами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Диканська громада. Режим доступу: <https://dykanka-gromada.gov.ua/>
2. Соціальний паспорт Диканської селищної територіальної громади станом на 01.11.2023. Селище Диканька, 2023, -40с.
3. Закон України «Про управління відходами» (2320-ІХ, від 09.07.2023).
4. «Національний план управління відходами до 2030 року», затверджений розпорядженням КМУ від 20 лютого 2019 р. № 117-р
5. Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні» (від 21.05.1997, з подальшими доповненнями)
6. Закон України «Про державне регулювання у сфері комунальних послуг» № 3610-VI» від 07.07.2011 року.
7. Закон України «Про основи містобудування»
8. Закон України «Про житлово-комунальні послуги».
9. Закон України «Про благоустрій населених пунктів».
10. Постанова КМ України «Про затвердження Правил надання послуг з вивезення побутових відходів» № 1070 від 10 грудня 2008 року.
11. ДБН Б.2.2-6:2013. Склад та зміст схеми санітарного очищення населеного пункту. Видання офіційне. – Київ, 2013. – 22с.
12. ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій».
13. ДБН Б.2.2-5:2011. Благоустрій територій. Видання офіційне. – Київ, 2012. – 64с.
14. ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування».
15. Наказ № 145 від 17.03.2011 року «Про затвердження Державних санітарних норм та правил утримання територій населених місць».
16. Наказ № 396 від 30.11.06 року «Про затвердження Методики впровадження двоетапного перевезення твердих побутових відходів».
17. Графік вивезення твердих побутових відходів Диканським комбінатом комунальних підприємств Режим доступу: <https://dykanka-gromada.gov.ua/static-pages/grafik-vivezennya-tverdih-pobutovih-vidhodiv-dikanskim-kombinatom->

komunalnih-pidprimstv-

18. Матеріали з розроблення схеми збирання, перевезення та оброблення побутових відходів для населених пунктів Диканської селищної територіальної громади Полтавської області та логістичної схеми маршрутів транспортних перевезень побутових відходів. Договір № 0067/24 від 19.06.2024. Полтава, 2024, 109с.

19. Бредун В.І. Методологія аналізу технологічно-логістичної доцільності цифровізації систем управління відходами місцевого рівня / В.І. Бредун // Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 15 трав. – 22 трав. 2026 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2026. – Т. 1. – С. 331–332.

20. Бредун В.І., Соколянська А.Д., Мякотіна К.О. Аналіз ефективності планування схем збирання ТПВ на прикладі Диканської та Гоголівської громад / В.І. Бредун, А.Д. Соколянська, К.О. Мякотіна // Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 15 трав. – 22 трав. 2026 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2026. – Т. 1. – С. 333–334.

21. Датчик рівня наповнюваності мусорного бака GPSM. Режим доступу: https://gpsm.ua/ru/blog/kontrol-vivoza-musora-i-napolnjaemosti-kontejnerov-sistema-gpsm-eco-track/?srsltid=AfmBOoqeBjvYCbB7P_zjFTOMBcWGiz1hRADGBXyXyYp_mBrBIXDF5M_p

22. RFID зчитувач міток ідентифікаторів тварин Faread PT-180 призначений для зчитування номера ідентифікатора. Режим доступу: <https://prom.ua/ua/p2733881165-rfid-schityvatel-metok.html>

23. UHF мітка Ardix Waste Tag для контейнерів https://idcard.com.ua/ua/uhf-metka-ardix-waste-tag-dlja-kontejnerov/?srsltid=AfmBOooB_qWHEjPfyPhdyryruuitUG895LWEBT2UM17zVhPBGljBsv7zpzA

24. LoRaWAN інфраструктура. Режим доступу: https://shop-gsm.ua/ru/products/Milesight-UG67/?srsltid=AfmBOoqN03hcP_FRF3bfl-pwJ1JEC9r6dyjzJUdGt4c4nQS8N23RQNib .

25. GPS трекер для авто Sinotrack ST-901 (3 Pin) с аккумулятором. Режим доступу: https://96.com.ua/ru/gps-trekery/gps-treker-dlya-avto-sinotrack-st-901.html?gclid=CjwKCAjwzLHPBhBTEiwABaLsSlzK8xSacIZLKKZofJeBvyZJQyMW7ikh04VxsZsK7XIi2unmvFXAhhoCz8wQAvD_BwE&gad_source=1&gad_campaignid=23634234422

26. Бредун, В., & Бредун, А. (2026). Методика визначення критеріїв доцільності та можливості впровадження систем цифрового моніторингу ТПВ в сільських і селищних громадах. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 365(3), 195-199. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-29>

Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу та енергетики

Кафедра прикладної екології та хімії



Графічна частина

до кваліфікаційної роботи бакалавра

на тему «Розробка проєкту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади»

Виконав студент групи 401-СЕ спеціальність

101 «Екологія»

Соколянська А.Д.

*Керівник д.т.н, професор кафедри прикладної екології
та хімії*

Фролов В.Ф.

РОЗРОБКА ПРОЄКТУ ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ ТПВ В СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ДИКАНСЬКОЇ ГРОМАДИ

Актуальність теми. Умови сучасного екологічного стану територіальних громад України потребують докорінної зміни підходів до управління твердими побутовими відходами (ТПВ). Традиційні методи збирання відходів, що базуються на фіксованих графіках, демонструють низьку економічну та екологічну ефективність, особливо в сільських громадах із низькою щільністю розселення. Впровадження цифрових технологій моніторингу (IoT, LoRaWAN, RFID) є критично необхідним для оптимізації логістичних процесів, зниження експлуатаційних витрат комунальних підприємств та забезпечення сталого розвитку територій у межах концепції циркулярної економіки.

Об’єкт дослідження – система поводження з твердими побутовими відходами Диканської територіальної громади.

Предмет дослідження – теоретико-методологічні засади та практичні інструменти цифровізації моніторингу процесів накопичення та транспортування ТПВ.

Мета роботи – обґрунтування доцільності та розробка проєктних рішень щодо впровадження інтелектуальної системи моніторингу ТПВ для підвищення технологічної та екологічної ефективності управління відходами в громаді.

Завдання дослідження:

Проаналізувати сучасний стан системи поводження з ТПВ у Диканській громаді та виявити основні інфраструктурні проблеми.

Дослідити теоретичні основи функціонування цифрових технологій (IoT, RFID, GNSS) у сфері екологічного моніторингу.

Розробити методику оцінки доцільності цифровізації на основі інтегрального індексу технологічної доцільності.

Провести аналіз ефективності існуючих маршрутів та використання контейнерного парку громади.

Обґрунтувати вибір технологічних рішень та розрахувати економічну ефективність впровадження цифрової системи.

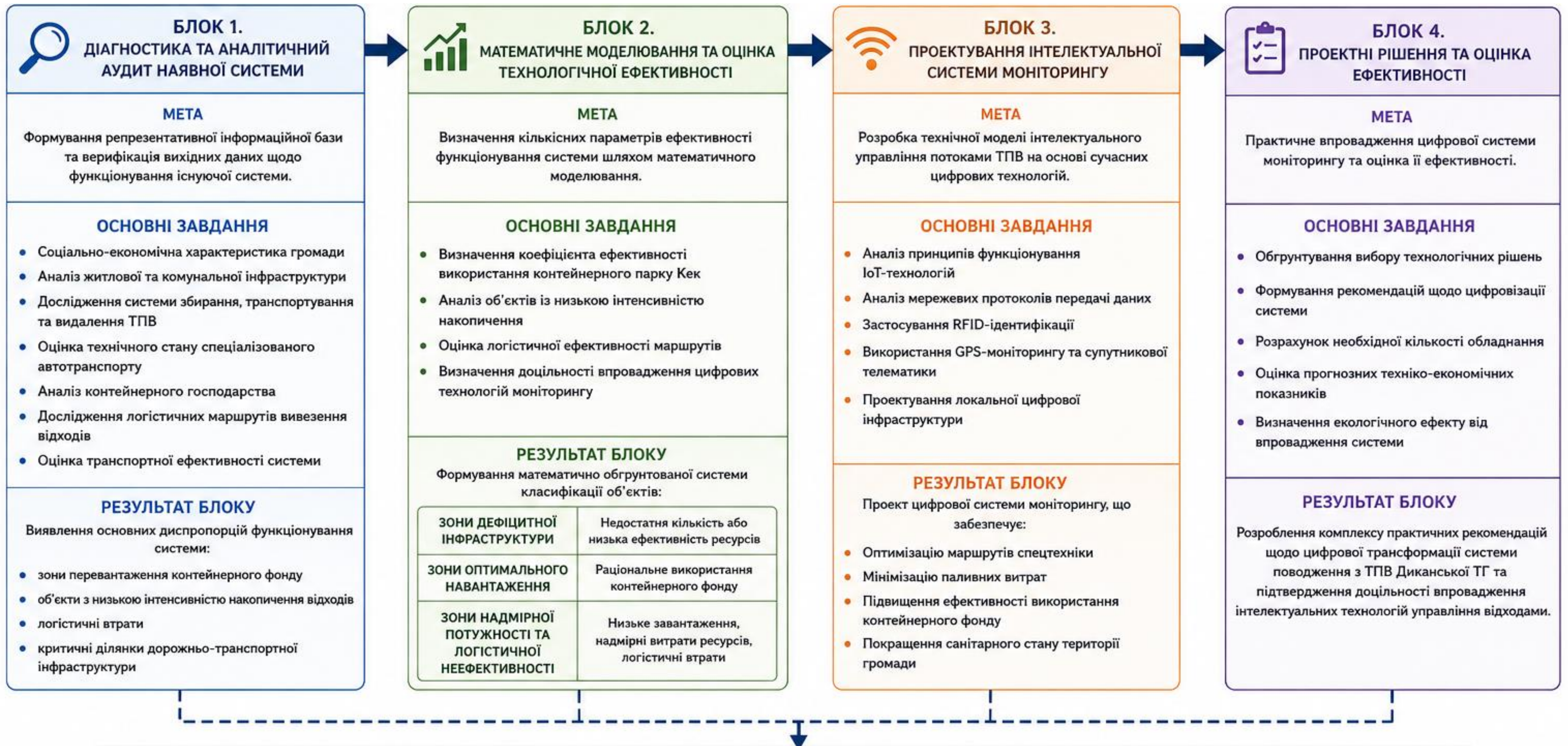
Наукова новизна полягає у розробці авторської методики визначення Індексу цифрової доцільності Ітд, який дозволяє кількісно оцінити рівень операційних втрат системи через поєднання коефіцієнтів логістичної неефективності та недозавантаженості контейнерного парку.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці конкретного інженерного проєкту цифровізації для Диканської громади (специфікація обладнання, архітектура мережі LoRaWAN), впровадження якого дозволить скоротити витрати на вивезення відходів на 12–36% залежно від морфологічного складу ТПВ.

Ідентифікатор
Всесвітній
Лист
№

						401CE 10292643 БР			
						Розробка проєкту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади			
Ім'я	Код	Лист	№	Лист	Дата	Опис роботи	Стандія	Лист	Листів
Розробив	Спеціаліст АІ						2	11	
Керівник	Фролов В.Ф.					Мета, завдання, об'єкт, предмет дослідження			
Зав. кафедрою	Ільїн О.Е.					Мета, завдання, об'єкт, предмет дослідження, наукова новизна, практична цінність			

СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНА СХЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ



ЗАГАЛЬНИЙ РЕЗУЛЬТАТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Формування комплексної цифрової моделі моніторингу та управління потоками твердих побутових відходів, яка забезпечує:

Підвищення технологічної ефективності системи

Оптимізацію логістичних процесів

Скорочення експлуатаційних витрат

Підвищення екологічної безпеки

Підтримку прийняття управлінських рішень на основі даних

					401CE 10292643 БР			
					Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади			
Имя	Колыч	Лист	№Рядок	Подп.	Дата	Страница	Лист	Листов
Розробив	Савченко А.І.					3		11
Керівник	Фролов В.Ф.							
					Структурно-логічна схема дослідження			
					ІНІТ "Інноваційна політехніка ім. І. Кондратюка" Корпорація прикладної екології та хімії			
					Схема дослідження			
Зав. кафедр	Ільчи О.Е.							
					Формат А1			

Селекційна
 Вид. № табл.
 Підп. у діалог.
 Всього ш.б. №

ХАРАКТЕРИСТИКА ДИКАНСЬКОЇ ГРОМАДИ

Населення громади **19 397** Станом на 1 січня 2024 року. **7 894** Мешканців у смт Диканька

44 080 м³ відходів на рік **1,78** м³/особу/рік

Структура розселення

59,3% населення (11 503 особи) проживає у сільських населених пунктах із низькою щільністю забудови. Ряд сіл (Андренки, Горбатівка, Міжгір'я, Онацьки) налічує лише 1–5 мешканців, а в деяких (Кардашівка, Кокозівка, Кононенки, Кучерівка, Тополівка) постійне населення взагалі відсутнє. Це ускладнює організацію централізованого збирання та вивезення відходів і вимагає визначення перспективних і неперспективних населених пунктів для включення до системи.

Транспортна інфраструктура

Вулично-дорожня мережа загалом забезпечує можливість маршрутів вивезення ТПВ, проте значна частина покриття перебуває у незадовільному стані, що ускладнює рух спецтехніки в несприятливих погодних умовах і збільшує експлуатаційні витрати.

Обсяги утворення відходів

Житловий фонд сільських населених пунктів генерує близько **22 990 м³/рік**, заклади обслуговування — **3 163 м³/рік**, разом по сільській місцевості — **26 153 м³/рік**. Розрахунковий питомий показник з урахуванням типів забудови становить **1,923 м³/особу/рік**, що вище за узагальнений показник 1,78 м³ і свідчить про необхідність деталізованих розрахунків за типами забудови.

Ключові фактори впливу на систему ТПВ

Переважання сільського типу розселення та значна кількість малозаселених пунктів
Домінування приватної садибної забудови зі специфічною структурою відходів
Нерівномірний рівень інженерного благоустрою житлового фонду
Незадовільний стан дорожньої мережі у сільській місцевості

Діюча система збирання, транспортування та видалення ТПВ

Оператор та охоплення

Функції збирання та вивезення ТПВ виконує **Диканський комбінат комунальних підприємств**. Рівень охоплення населення централізованими послугами становить близько **70%**: у багатоквартирній забудові — 100%, у приватному секторі сільської місцевості — лише частково через організаційні труднощі та низьку економічну ефективність.

Контейнерна інфраструктура

Станом на кінець 2023 року функціонувало **54 контейнерних майданчики з 109 контейнерами** об'ємом 0,12; 0,24; 0,75; 0,77 та 1,1 м³. Контейнерне обладнання розміщене **переважно лише у смт Диканька**. Інші населені пункти фактично не забезпечені майданчиками для централізованого збору.

Транспортування

Застосовуються сміттєвози КРАЗ-5401Н2 з кузовом місткістю 16 м³ та механізованою системою ущільнення. Маршрутна система поділяє територію на окремі ділянки з урахуванням обсягів відходів і технічних характеристик транспорту.

Динаміка вивезення ТПВ



Суттєве зростання у 2023 році пов'язане з розширенням кількості абонентів.

401CE 10292643 БР					
Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади					
Имя	Колуч	Лист	№зак	Лист	Дата
Розробив	Скопченко А.І.				
Керівник	Фролов В.Ф.				
Характеристика Диканської громади				Стандія	Лист
				4	11
Населення, інфраструктура, система управління відходами				№1 "Платформа поглиблена (т.т. А. Кондратюк)" Корпорація прикладної екології та хімії	
Зав. кафедрою	Ільчи О.Е.				

ПРОБЛЕМНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ В ГРОМАДІ

Перевантаження майданчиків (с/мт Диканька)

У районах багатоповерхової забудови пікові навантаження перевищують місткість контейнерного парку, що веде до переповнення баків та виникнення антисанітарних зон. Металеві контейнери 0,75 м³ без герметичних кришок є джерелом вторинного забруднення, поширення запахів та розмноження синантропних тварин.

Неефективна логістика «останньої милі»

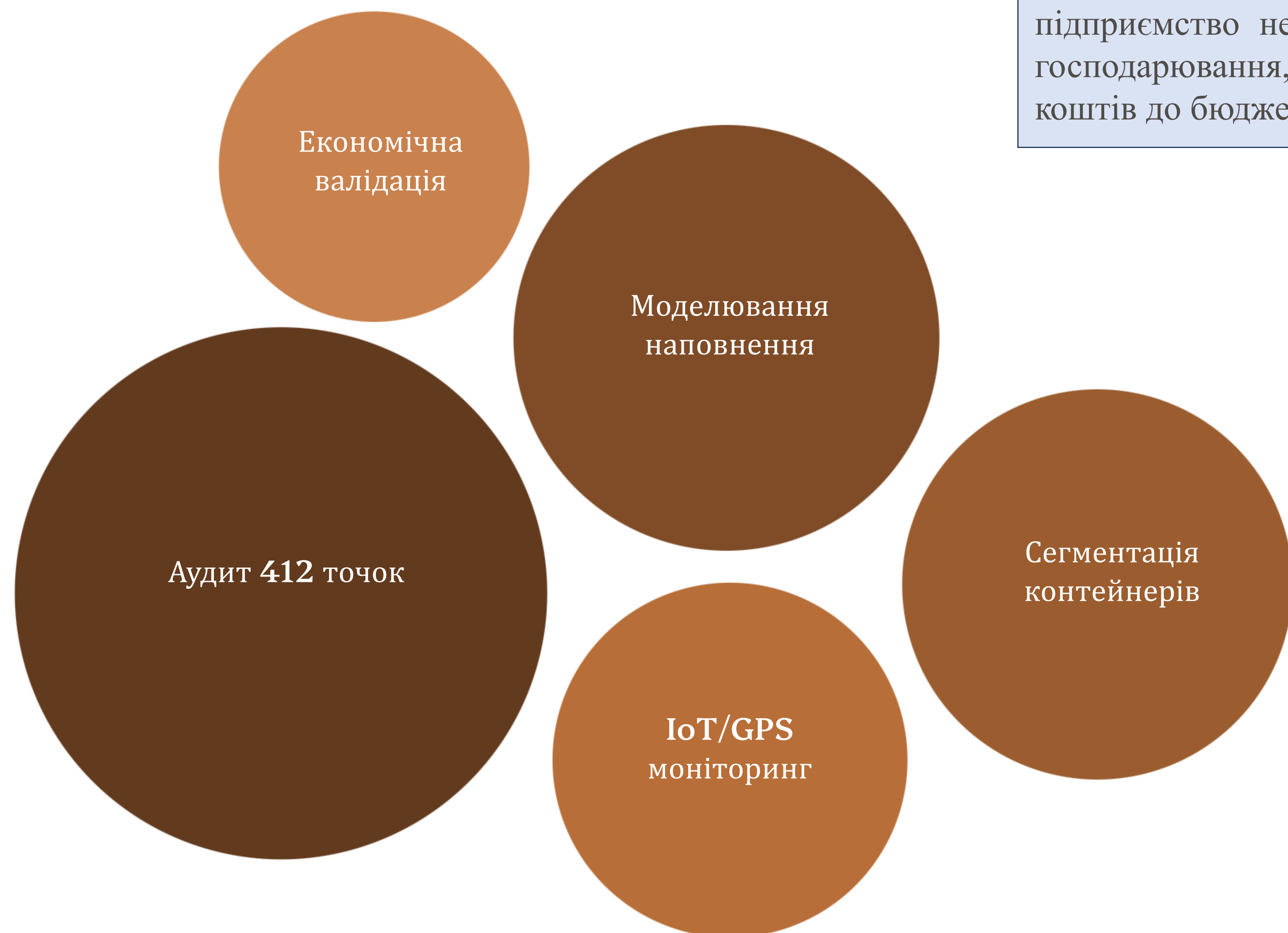
Маршрути руху спецтехніки не враховують поточну наповненість ємностей, що призводить до «холостих» заїздів до напівпорожніх майданчиків та несвоєчасного обслуговування переповнених. Для північних територій громади «плече доставки» перевищує 20 км — межу економічної доцільності без сміттєперевантажувальних станцій.

Відсутність інфраструктури у сільській місцевості

У віддалених населених пунктах (Петро-Давидівка та ін.) система збору побудована за «бестарним» або хаотичним принципом. Це стимулює несанкціоноване скидання відходів у лісосмуги та яри — пряма загроза екологічній безпеці регіону. Відсутня інфраструктура для роздільного збору (ПЕТ, скло, папір).

Системні недоліки: відсутність цифровізації

Управління відходами базується на «жорстких» графіках, що не корелюють з реальними потребами. Відсутність IoT-датчиків унеможливує оперативне реагування диспетчерської служби. Паперовий документообіг сповільнює аналіз ефективності та не дозволяє впроваджувати предиктивну аналітику. Комунальне підприємство не має точних даних про обсяги відходів від окремих суб'єктів господарювання, що призводить до дисбалансу нарахувань і недонадходження коштів до бюджету.



						401CE 10292643 БР			
						Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади			
Имя	Колуч	Лист	№зак	Лист	Дата	Проблемні аспекти управління відходами в громаді	Стандія	Лист	Листов
Розробив	Скопченко А.І.							5	11
Керівник	Фролов В.Ф.								
						Основні проблеми			
						ІНІ "Полтавська політехніка ім. І.Кандида" Корпорація прикладної екології та хімії			
						Формат А1			

Ідентифікаційні дані: Ім'я, Колуч, Лист, №зак, Лист, Дата, Ім'я, Колуч, Лист, №зак, Лист, Дата, Ім'я, Колуч, Лист, №зак, Лист, Дата

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ТПВ



IoT-датчики: акустичні та оптичні методи

Ультразвукові датчики вимірюють відстань від кришки до поверхні відходів методом ехолокації. Більш прогресивні ToF-сенсори (Time-of-Flight) використовують інфрачервоне випромінювання для багатоточкового лазерного сканування, будуючи апроксимовану модель поверхні заповнення. Це дозволяє розраховувати не лише лінійний рівень, а й орієнтовний об'єм відходів у м³ — базовий параметр для логістичного планування.



GNSS/GPS: динамічна оптимізація маршрутів

Телематичні модулі інтегрують координати руху, геозони, роботу гідравлічного обладнання та дані CAN-шини. Зупинка в межах геозони майданчика з активацією пресувального механізму автоматично ідентифікується як успішний збір. Математичне вирішення задачі VRP (Vehicle Routing Problem) на основі пріоритетності точок (рівень заповнення + прогноз переповнення) забезпечує скорочення пробігу на 15–20%.

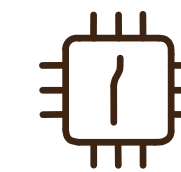
Кібербезпека та цілісність даних

У протоколі LoRaWAN реалізовано наскрізне шифрування (End-to-End Encryption) через два рівні ключів: мережевий (аутентифікація пристрою) та прикладний (шифрування корисного навантаження). Технологія блокчейн фіксує кожен акт вивантаження контейнера як незмінний блок даних, унеможливаючи ретроспективну зміну звітності.



LoRaWAN: енергоефективна мережа передачі даних

Протокол LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) використовує метод Chirp Spread Spectrum, що забезпечує стійкість до завад і декодування сигналів нижче рівня шуму. Алгоритми Adaptive Data Rate динамічно змінюють потужність передавача залежно від відстані до базової станції. Термін експлуатації кінцевого пристрою — до **10 років** без заміни батареї.



RFID: юридична та операційна верифікація

UHF RFID-мітки, інтегровані в корпус контейнера, активуються енергією зчитувача на спецтехніці. Передається унікальний код EPC, асоційований у базі даних з географічним розташуванням, власником та типом відходів. Це створює цифрову доказову базу виконання послуг і захист від помилкового обслуговування чужих активів.

Big Data та стратегічне управління

Агрегація різномірних даних у єдиній аналітичній платформі дозволяє виявляти латентні закономірності у сміттеутворенні залежно від сезону, дня тижня, соціально-демографічного складу районів. Методи Data Mining будують прогнозні моделі для обґрунтованих рішень щодо зміни кількості баків або перенесення точок збору.

Світовий та український досвід впровадження інтелектуальних систем управління відходами

Скандинавія

Масштабна інтеграція сенсорних мереж LPWAN/LoRaWAN. Алгоритми машинного навчання формують динамічні маршрути спецтехніки на основі даних реального часу з хмарних платформ. Автономна робота датчиків протягом багатьох років без обслуговування.

Південна Корея

Система автоматизованого збору харчових відходів на основі RFID та смарт-карт. Вбудовані ваги фіксують точну масу відходів для автоматичного нарахування оплати. Сеул скоротив обсяги харчових відходів на **30%** протягом перших років.

Концепція PAYT (Pay-as-You-Throw)

Фундаментальний підхід ЄС: RFID-облік відходів кожного домогосподарства створює пряму фінансову відповідальність за утворення відходів. Стимулює відповідальне сортування та мінімізацію споживання. Кожен етап руху матеріальних потоків піддається верифікації та математичному аналізу.

Німеччина та Італія

Поєднання IoT-сенсорів із супутниковим моніторингом забезпечує оптимізацію логістики та радикальне скорочення викидів парникових газів. Проекти типу «MatchUp» суттєво зменшили дорожній трафік у густонаселених районах.

США

Інтелектуальні контейнери-преси Bigbelly на сонячній енергії збільшують місткість у 5 разів, скорочуючи частоту вивезення на **80%**. Активно застосовуються у Нью-Йорку та Бостоні.

Україна та Полтавська область

Процес цифровізації перебуває на етапі пошуку оптимальних моделей адаптації. Досвід громад (Гадяцька, Лохвицька, Семенівська, Терешківська) вказує на нагальну потребу в науковому обґрунтуванні впровадження. Основні бар'єри: висока вартість обладнання, ризики вандалізму, специфічний морфологічний склад ТПВ з високим вмістом органіки, що вимагає підвищеної корозійної стійкості сенсорів. Кластеризація управління відходами кількох громад дозволяє мінімізувати питомі витрати на геоінформаційні системи та автоматизовані центри диспетчеризації.

						401CE 10292643 БР		
						Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в системі управління відходами Диканської громади		
Ім'я	Колір	Лист	№зак.	Лист	Дата	Сторінка	Лист	Листів
Розробив	Скоротив	АД						
Керівник	Фролов	В.Ф.					6	11
						Основні технології, досвід впровадження		
						ІНІ "Полтавська політехнічна ін-т. Кондитерка" Корпорація прикладної екології та хімії		
						Формат А1		

Всього 11 сторінок

МЕТОДИКА АНАЛІТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтегральний індекс технологічної доцільності (Ітд) базується на двох ключових операційних показниках — логістичній неефективності та ефективності використання контейнерного парку.

$$Ітд = 0,5 \cdot \max(0, 1 - 20/Клн) + 0,5 \cdot (1 - Кек)$$

- 0,00 – 0,15 — висока ефективність системи, цифровізація не є критично необхідною;
- 0,15 – 0,30 — незначні операційні втрати, доцільна точкова оптимізація;
- 0,30 – 0,50 — середній рівень неефективності, доцільне впровадження цифрових рішень;
- 0,50 – 1,00 — високий рівень неефективності, цифровізація є економічно обґрунтованою.

Коефіцієнт логістичної неефективності (Клн)

$$Клн = \Sigma L / \Sigma Q$$

ΣL — сумарна довжина маршрутів (км);

ΣQ — сумарна маса відходів (т)

Коефіцієнт ефективності контейнерного парку (Кек)

$$Кек = \Sigma V_{роз} / \Sigma V_{факт}$$

$\Sigma V_{роз}$ — розрахунковий об'єм;

$\Sigma V_{факт}$ — фактично встановлений об'єм

Показує, скільки кілометрів пробігу необхідно для збору 1 тонни відходів. **Нормативний орієнтир: 20 км/т** — граничний рівень ефективного функціонування у сільських громадах. Перевищення свідчить про зростання питомих транспортних витрат. Для нормування застосовується безрозмірна функція: при $Клн \leq 20$ — неефективність = 0; при зростанні понад норматив — значення поступово наближається до 1.

Змінюється від 0 до 1. Значення, близькі до 1 — високе завантаження; низькі значення — недовикористання та неефективна організація збору. Доповнююча величина **(1 – Кек)** інтерпретується як рівень неефективності. Інтегральний індекс:

Діапазон $K_{ек}$	Інтерпретація	Характеристика стану системи
0.90 – 1.00	дуже висока ефективність	система близька до оптимальної
0.80 – 0.90	висока ефективність	стабільне функціонування
0.65 – 0.80	задовільна ефективність	допустимі втрати
0.50 – 0.65	середня ефективність	потребує оптимізації
0.35 – 0.50	низька ефективність	значні втрати
0.00 – 0.35	критично низька ефективність	неефективна система

401CE 10292643 БР					
Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ТПВ в систему управління відходами Диканської громади					
Ім'я	Колір	Лист	№ док.	Лист	Дата
Розробив	Скопійовано	АД			
Керівник	Фролов	В.Ф.			
Методика аналітичних досліджень				Старший	Лист
				7	11
Індекси і коефіцієнти					№ "Платформа патентна (т.т. Кондитерка" Корпорація проєктування екологія та хімія
Зав. кафедрою	Ільїн	О.Е.			

ЛОГІСТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МАРШРУТІВ ДИКАНСЬКОЇ ГРОМАДИ

Маршрут	Обсяг зап період, т	Довжина маршруту, м	Клн = $\sum L / \sum Q$ Клн, т	Кек	Ітд = $0,5 \cdot \max(0, 1 - 20 / \text{Клн}) + 0,5 \cdot (1 - \text{Кек}),$
E2M13M	11,57974	92318,6	7,9724	0,7544	0,12281259
E2M23M	6,542251	117388,7	17,943	0,6955	0,152268837
E2M33M	5,433815	90251,8	16,609	0,7004	0,149818731
E2M43M	3,365379	61508,7	18,277	0,6809	0,159525978
E2M53M	4,160943	46161	11,094	0,7274	0,136315488
E2M63M	7,420032	20998,9	2,83	0,8302	0,084914605
E2M73M	13,64794	38768,5	2,8406	0,7833	0,108369067
E2M1СК	4,066725	92318,6	22,701	0,542	0,258729246
E2M1ПЛ	1,781921	92318,6	51,808	0,5924	0,357304095
E2M2СК	2,297595	115323	50,193	0,4997	0,400553716
E2M2ПЛ	1,006739	115323	114,55	0,6262	0,393275678
E2M3СК	1,908318	92525,1	48,485	0,5168	0,388482002
E2M3ПЛ	0,83617	92525,1	110,65	0,6181	0,395784054
E2M4СК	1,181898	61508,7	52,042	0,475	0,416448236
E2M4ПЛ	0,517874	61508,7	118,77	0,5807	0,417559786
E2M5СК	1,461294	46161	31,589	0,5883	0,297584757
E2M5ПЛ	0,640297	46161	72,093	0,6346	0,363353513
E2M6СК	7,398927	52357,4	7,0764	0,6227	0,188648938
E2M6ПЛ	3,241996	52357,4	16,15	0,613	0,193515045

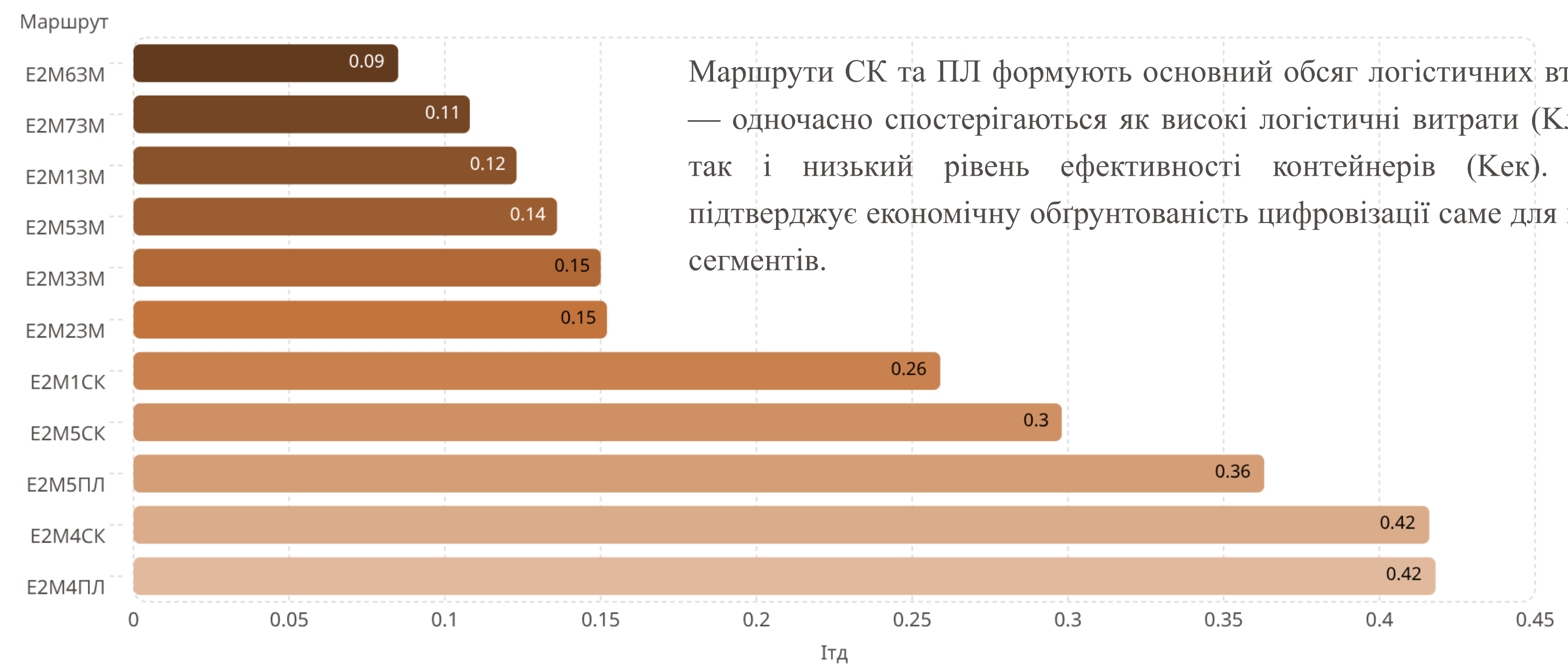
Розраховані значення Ітд для досліджуваних маршрутів варіюють від **0,0849** до **0,4176**, що свідчить про різний рівень технологічної ефективності окремих елементів системи.

0,00 – 0,15 · Висока ефективність
Цифровізація не є критично необхідною. Маршрути E2M63M (0,085), E2M73M (0,108), E2M13M (0,123).

0,15 – 0,30 · Незначні втрати
Доцільна точкова оптимізація. Маршрути E2M23M, E2M33M, E2M43M, E2M53M, E2M1СК.

0,30 – 0,50 · Середній рівень
Доцільне впровадження цифрових рішень. Переважно маршрути СК та ПЛ (0,36–0,42).

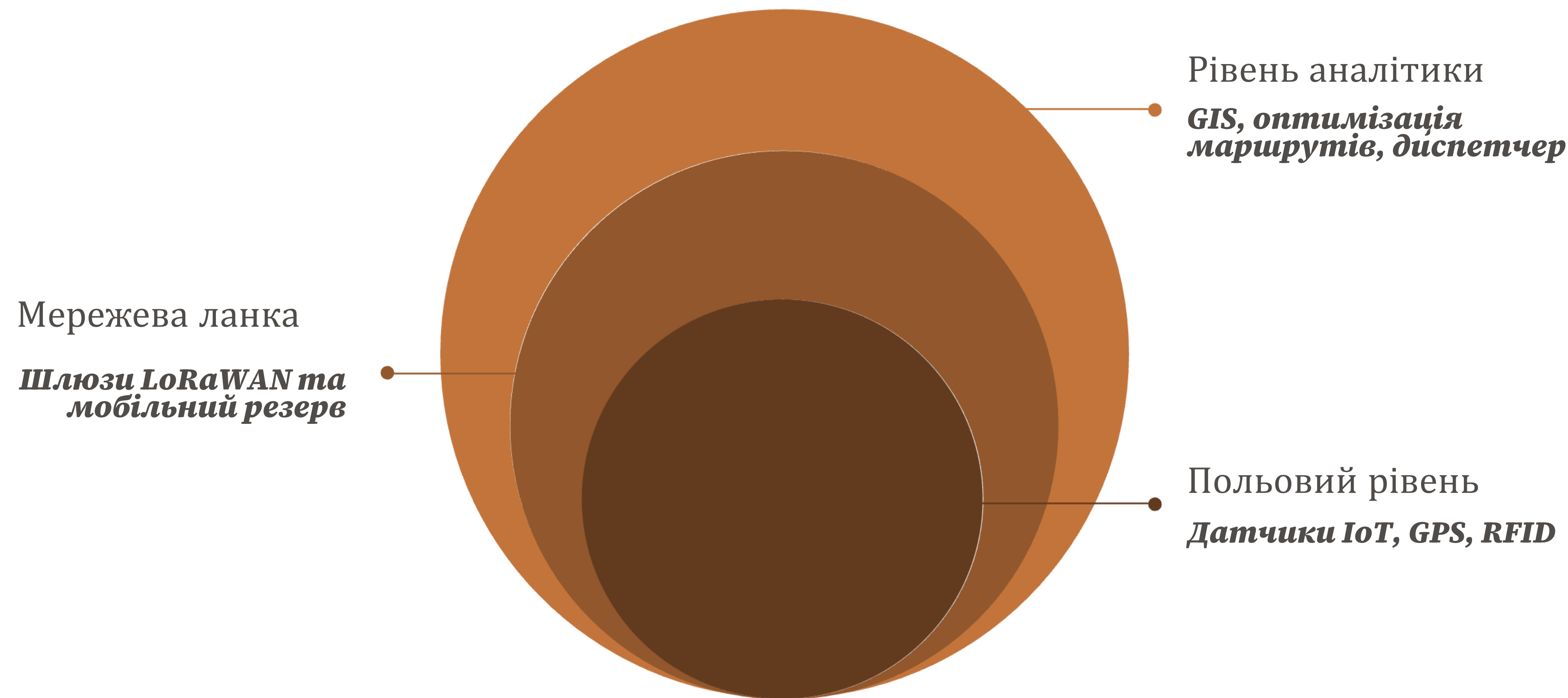
0,50 – 1,00 · Високий рівень
Цифровізація є економічно обґрунтованою. Жоден маршрут не досяг цього рівня.



Маршрути СК та ПЛ формують основний обсяг логістичних втрат — одночасно спостерігаються як високі логістичні витрати (Клн), так і низький рівень ефективності контейнерів (Кек). Це підтверджує економічну обґрунтованість цифровізації саме для цих сегментів.

401CE 10292643 БР					
Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ПТВ в систему управління відходами Диканської громади					
Ім'я	Кваліф.	Лист №	Лист №	Лист №	Лист №
Розробив	Спеціаліст АІ	Фролов В.Ф.			
Керівник	Фролов В.Ф.				
Логістична ефективність маршрутів Диканської громади				Стандія	Лист
				9	11
Основні показники					
ІНІТ "Логістична платформа (т.т. АІ, Кондитерка)" Корпорація прикладної екології та хімії					
Формат А1					

ТРИРІВНЕВА АРХІТЕКТУРА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ



Диференційована стратегія: для маршрутів із низьким Кек — IoT-датчики та стратегія «за запитом»; для маршрутів із високим КЛН — GPS + ГІС-оптимізація; для маршрутів із середнім та високим Ітд — комплексна цифровізація з інтеграцією датчиків і логістичного ПЗ.

Полевий рівень

- 360 ультразвукових датчиків заповнення
- 5 GPS-трекерів (по одному на сміттєвоз)
- 360 RFID-міток на контейнерах
- 5 RFID-зчитувачів на підйомних механізмах

Мережевий рівень

- 3 шлюзи LoRaWAN (покриття 682 км²)
- Мобільний зв'язок як резервний канал
- 5 CAN/паливних датчиків (опційно)

Аналітичний рівень

- IoT-платформа: ChirpStack або The Things Stack
- GIS-аналітика: QGIS / ArcGIS
- Логістичне ПЗ: OR-Tools (Google), VRP-моделі
- Веб-панель управління + мобільний додаток для водіїв

Компонент	Кількість	Орієнтовна вартість грн
IoT датчики	360	972000
LoRaWAN шлюзи	3	115440
RFID мітки	360	33372
RFID зчитувачі	5	4695
GPS	5	5980
ПЗ та сервер	1	100000
Всього		1226087

401CE 10292643 БР					
Розробка проекту впровадження цифрових технологій моніторингу ПЗВ в систему управління відходами Диканської громади					
Ім'я	Кільк.	Лист	№рек.	Підп.	Дата
Розробив	Сколько	№рек.	Фролов	В.Ф.	
Керівник					
Трирівнева архітектура цифрової системи моніторингу				Стандія	Лист
					10
					11
Опис рівнів, орієнтовна вартість				Інформація патентна ін. в. Конфідентна! Корпорація прикладної екології та хімії	
Зав. кафедрою				Ільїн О.Е.	

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Встановлено, що існуюча система управління відходами громади характеризується високим рівнем операційної неефективності, особливо у сегменті роздільного збору вторинної сировини, де понад 30% майданчиків використовуються менш ніж на половину своєї потужності.

Доведено переваги використання енергоефективних мереж дального радіусу дії (LoRaWAN) для сільської місцевості, що дозволяє забезпечити автономний моніторинг контейнерів протягом 7–10 років без заміни джерел живлення.

Апробовано науково-методичний підхід до оцінки доцільності цифровізації через інтегральний індекс $I_{\text{тд}}$. Розрахунки для Диканської громади показали, що для базових маршрутів змішаних відходів цифровізація є допоміжним заходом, тоді як для альтернативних маршрутів (скло, пластик) вона є критично необхідною через перевищення нормативів логістичних витрат у 5–6 разів.

Розроблено архітектуру цифрової системи, що включає 360 IoT-датчиків, 3 базові станції LoRaWAN та систему RFID-ідентифікації спецтранспорту. Це дозволить реалізувати перехід до динамічного планування маршрутів та моделі «вивезення за запитом».

Прогнозований економічний ефект від реалізації проєкту становить близько 400 тис. грн економії на рік, що забезпечує термін окупності інвестицій протягом 3 років.

Екологічна значущість роботи полягає у зменшенні викидів забруднюючих речовин від роботи спецтехніки (через скорочення пробігів на 15–20%) та підвищенні відсотка вилучення вторинної сировини завдяки прозорому контролю за наповненістю контейнерів.

Сформовано рекомендації щодо диференційованої стратегії впровадження цифрових технологій в процесі управління відходами громади.

Впровадження запропонованих рішень дозволить Диканській громаді створити підґрунтя для переходу до повної циркулярної моделі управління ресурсами.

Апробований підхід створює наукове підґрунтя для переходу від суб'єктивного планування до обґрунтованого проектування схем санітарної очистки в межах кластерних моделей управління відходами Полтавської області.

						401CE 10292643 БР			
						Розробка проєкту впровадження цифрових технологій моніторингу ППВ в систему управління відходами Диканської громади			
Ім'я	Кільк.	Лист	№рек.	Лист	Дата	Загальні висновки	Стаття	Лист	Листів
Розробив	Сколько	№рек.	Лист	Дата			11	11	
Керівник	Фролов В.Ф.					Висновки до роботи			
Зав. кафедрою	Ільїн О.Е.								