

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету захисту
рослин, біотехнологій та екології

_____ Юлія КОЛОМІЄЦЬ

«___» _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри екології
агросфери та екологічного контролю

_____ Олена НАУМОВСЬКА

«___» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Розробка програмного комплексу з підтримання процедур якості
екологічного менеджменту на підприємстві»**

Спеціальність «101 Екологія»

Освітня програма «Екологічний контроль та аудит»

Орієнтація освітньої програми «освітньо-професійна»

Гарант освітньої програми

к. с-г. н, доцент _____ Ладика М. М.

Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи

к. с-г. н, доцент _____ Ладика М. М.

Виконав _____ Кралевиц А.В.

КИЇВ-2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри екології
агросфери та екологічного контролю

_____ Олена НАУМОВСЬКА

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Кралевичу Андрію Віталійовичу

Спеціальність: «101иЕкологія»

Освітня програма «Екологічний контроль та аудит»

Орієнтація освітньої програми «освітньо-професійна»

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Розробка програмного комплексу з підтримання процедур якості екологічного менеджменту на підприємстві»
затверджена наказом від «5» листопада 2025 р. № 1979 «С»

Термін подачі завершеної роботи на кафедру: 15.11.2025 р.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: нормативно-правові акти, протоколи лабораторних досліджень, процедури розроблення СЕМ

Перелік питань, які підлягають дослідженню:

1. Оцінити сучасний стан екологічної документації та процедур якості на підприємствах України, виявити проблеми паперового документообігу, фрагментарності даних і впливу людського фактору.

2. Визначити принципи та переваги цифрової трансформації екологічного менеджменту.

3. Розглянути сучасні інструменти та технології цифрового управління екологічними даними й документацією.

4. Розробити концепцію інтегрованого програмного комплексу з VR-модулем для підтримки процедур якості.

5. Сформувати архітектуру, алгоритми роботи та функціональні зв'язки модулів системи.

6. Обґрунтувати очікувані результати впровадження програмного комплексу та його вплив на ефективність управління екологічною діяльністю підприємств.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) графіки та ілюстрації

Дата видачі завдання «10» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Ладика М. М.

Завдання прийняв до виконання _____ Кралевиц А.В.

РЕФЕРАТ

Робота виконана на 67 сторінок та містить 3 розділи, 1 додаток, 11 рисунків, 5 таблиць, 67 використаних джерел.

Мета дослідження: обґрунтування теоретичних і практичних засад створення інтегрованого програмного комплексу з модулем віртуальної реальності (VR) для підтримки еко-менеджменту, що спрямований на підвищення ефективності управління усіма екологічними процесами, оптимізацію документообігу та створення єдиного цифрового середовища екологічної документації на підприємствах України.

Об'єктом дослідження: система екологічного менеджменту підприємства в умовах цифрової трансформації та її структура відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 14001 і ISO 9001.

Предмет дослідження: процес цифрової трансформації системи екологічного менеджменту підприємства, що включає розробку, впровадження та функціонування цифрових технологій віртуальної реальності (VR) для підтримки процедур якості, управління екологічними даними та автоматизації документообігу.

У 2025 році проведено аналіз сучасного стану екологічної документації та процедур якості на підприємствах України. Дослідження показало, що паперовий документообіг, фрагментарність даних та значний вплив людського фактора суттєво знижують достовірність екологічної інформації та ускладнюють проходження аудитів. Найбільші проблеми виявлено на підприємствах із застарілими підходами до організації екологічного контролю, де відсутня інтегрована цифрова структура ведення даних і системність у роботі з документами.

У ході роботи розроблено концепцію програмного комплексу з VR-модулем, здатного автоматизувати екологічні процеси, підвищити простежуваність даних та полегшити навчання персоналу. Інтеграція електронного документообігу, автоматичних розрахунків, внутрішнього моніторингу та VR-симуляцій забезпечує значне зниження навантаження на фахівців і підвищує відповідність стандартам ISO 14001 і ISO 9001.

Очікується, що впровадження запропонованого комплексу дозволить підприємствам мінімізувати ризики невідповідностей, зменшити вплив людського фактора та створити єдине цифрове середовище для екологічного менеджменту. У воєнних умовах, коли зростають екологічні ризики та знижується фінансування, такі рішення стають критично важливими для забезпечення безперервності та надійності екологічного контролю.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕКОЛОГІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ; ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ; VR-ТЕХНОЛОГІЇ; ДОКУМЕНТООБІГ; ПРОЦЕДУРИ ЯКОСТІ; АВТОМАТИЗАЦІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ТА ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУР ЯКОСТІ.....	5
1.1. Поняття, цілі та завдання екоменеджменту.....	5
1.2. Нормативно-правове забезпечення екологічного менеджменту та процедур якості.....	9
1.3. Цифрова трансформація систем екологічного менеджменту.....	12
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВЕДЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТА ПРОЦЕДУР ЯКОСТІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ.....	15
2.1. Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження.....	15
2.2. Стан екологічної документації та процедур якості на підприємствах України	16
2.3. Аналіз екологічного менеджменту у хіміко-технічній лабораторії	21
2.4. Бар'єри цифровізації екологічного менеджменту.....	27
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО VR-КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ПРОЦЕДУР ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ	35
3.1. Концепція, цілі та завдання розробки програмного комплексу.....	35
3.2. Архітектура та функціональна структура програмного комплексу.....	38
3.3. Розробка та реалізація VR-модуля програмного комплексу.....	41
3.4. Технічні та організаційні аспекти реалізації.....	46
3.5. Ефективність впровадження та очікувані результати.....	51
3.6. Перспективи розвитку та масштабування програмного комплексу.....	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	58
ДОДАТКИ.....	66

ВСТУП

Наразі тенденція глобального розвитку така, що активно поширюються цифрові технології, які досить кардинально змінюють підходи до управління усіма процесами - виробничими, екологічними та соціальними. В умовах переходу усієї світової економіки до моделі сталого розвитку, яка зараз набирає все більше популярності, особливого значення мають системи екологічного менеджменту або скорочено екоменеджмент, які забезпечують правильне використання природних ресурсів. Зниження впливу людини на навколишнє середовище та збільшення екологічної відповідальності суспільства та підприємств в цілому. Треба зазначити, що ефективність таких систем залежить від ступеня цифрової освіти громадян, правильних законів, прийнятих у тій чи іншій державі, та в цілому готовності суспільства прийняти ці зміни.

Україна на даний момент перебуває на шляху інтеграції до європейського суспільства, активно впроваджує диджиталізацію та принципи сталого розвитку, зокрема стандарти серії ISO 14000. Але до сих пір, незважаючи на 2025 рік, рік активного розвитку цифрових технологій, розвитку віртуальної реальності та штучного інтелекту, дуже велика частина підприємств, особливо державних, продовжує використовувати традиційні паперові методи ведення екологічної та управлінської документації. Зокрема, це зв'язано з законами України, прийнятими консервативними методиками, про які я буду розповідати пізніше. Це призводить до неефективності використання даних, дублювання процесів, втрати простежуваності усієї лінії документації, зниження достовірності екологічного звіту, та і в цілому зниження довіри до таких документів. Відсутність єдиного екологічного цифрового простору, таким, наприклад, як для документів в Україні є ДІЯ, обмежує потенціал систем екоменеджменту, сповільнює швидкість ухвалення рішень та унеможлиблює проходження внутрішніх і зовнішніх аудитів на необхідному для європейської інтеграції рівні. За таких умов особливу актуальність набуває створення структурованої системи екоменеджменту і впровадження нових рішень на основі сучасних технологій,

які здатні об'єднати функції еко-моніторингу, управління документацією та усіма іншими моментами, що прописані у міжнародних методиках. До того ж, треба не забувати про доступність освіти в темі цифрового екоменеджменту, бо це питання є досить великою проблемою в Україні. Якраз розвиток технології віртуальної реальності, VR та доповненої реальності відкриває такі можливості для освіти персоналу підприємств, візуалізації усіх виробничих та екологічних процесів, введення цифрової документації не з якої точки України та планети і відкриває нові горизонти для покращення цифрового екоменеджменту в країні. Взагалі, використання новітніх технологій завжди підвищує ефективність роботи, і залучення VR-модулю не є виключенням. Використання віртуальної реальності у складі програмного комплексу екологічного менеджменту дозволяє підвищити залученість користувачів різних вікових рамок, різного ступеня підготовки до цифровізації та людей з різними можливостями.

Наукова новизна моєї кваліфікаційної роботи полягає в обґрунтуванні необхідності впровадження концепції інтегрованого, комплексного, програмного забезпечення з модулем віртуальної реальності для підтримки процедур якості не тільки екологічного менеджменту, а й менеджменту підприємств в цілому, які працюють на території України. Основна моя ідея полягає в створенні комплексної структури навчання, контролювання, прогнозування, моделювання усіх екологічних документів, на якому завгодно підприємстві, яке діє на території України, для того, щоб доступ до екодокументів був швидким та ефективним.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ТА ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПРОЦЕДУР ЯКОСТІ

1.1. Поняття, цілі та завдання екоменеджменту

Екологічний менеджмент на цей час є невід'ємною частиною системи управління підприємством, спрямованою на раціональному використанні природних ресурсів, зменшення негативного впливу на довкілля, збільшення екологічної відповідальності та відповідності до прийнятих законів країни та світу. Розвиток екологічного менеджменту був зумовлений підвищенням вимог до природоохоронного законодавства і переходом до моделі сталого розвитку усієї європейської та світової економіки. При таких умовах підприємства все частіше стикаються з необхідністю впровадження екологічного менеджменту не як додатковий елемент до системи якості, а як комплексну частину корпоративного управління, що досить суттєво впливає на конкурентну спроможність бізнесу, привабливість інвесторів, та імідж у суспільстві [1].

Взагалі, екологічний менеджмент - це сукупність управлінських рішень, процесів та інструментів для виконання цих процесів, спрямованих на виконання підприємством вимог екологічного законодавства та мінімізацію впливів на навколишнє середовище та на здоров'я людей. Звичайно, Україні не треба створювати нову систему екологічного менеджменту з нуля, бо в світі широко використовується система екологічного менеджменту під назвою Environmental Management System (EMS), що є структурованим набором процесів і процедур, які забезпечують підприємство необхідними інструментами та методиками відповідно до міжнародних стандартів ISO 14001 та інших.

Можна сказати, що мета екологічного менеджменту - це створення ефективної системи управління усіма екологічними аспектами підприємства.

Основними цілями екологічного менеджменту є забезпечення вимог природоохоронного законодавства та різних нормативів в сфері охорони навколишнього середовища, зменшення негативного впливу на навколишнє

середовище, збільшення ефективного та раціонального використання усіх видів ресурсів, створення екологічної відповідальності, збільшення репутації підприємства в очах суспільства та інвесторів [2, 3].

Для реалізації цих цілей існують чіткі завдання екологічного менеджменту, що спрямовані на організації роботи підприємства в цій сфері. Ключовими завданнями екологічного менеджменту є розробка та реалізація екополітики підприємства, оцінка екологічних аспектів та впливів, ризиків, планування та впровадження заходів для зниження негативного впливу на навколишнє середовище, введення екологічного контролю, моніторингу та аудиту, як внутрішнього, так і зовнішнього, підготовка та структуроване введення екологічної документації та звітності по всім викидам та можливим екологічним ризикам. Збільшення обізнаності персоналу підприємства завдяки курсам, тренінгам і тому подібному. Але на цей час все актуальнішим стає такий напрямок розвитку екологічного менеджменту, як цифровізація усіх процесів та впровадження електронного документообігу, простежуваності процесів та створення єдиної системи – бази даних по екологічному контролю та моніторингу. Використання цифрових інструментів, звичайно, позитивно сприяє збору, обробці та аналізу екологічних даних, знижує кількість помилок та підвищує достовірність даних, які отримує підприємство та громадськість. Також дозволяє автоматизувати процеси моніторингу та ведення екологічної документації. Тобто можна зазначити, що у сучасності екологічний менеджмент представляє собою комплексну та вкрай необхідну частину, якого завгодно підприємства, що хоче вести діяльність на території України, без якого це на даний час вже неможливо.

І оскільки цей механізм є комплексним, існують розроблені міжнародні системи, чіткі цілі та завдання цього екологічного менеджменту, що враховують сучасний стан речей, нормативні та правові вимоги, а також необхідність екологічної відповідальності бізнесу. Про конкретні методики я буду писати у наступних розділах моєї кваліфікаційної роботи. Як я писав вище, Україна активно інтегрується до світового суспільства та європейської економічної зони.

Тому екологічний менеджмент посідає ключове місце в системі сталого розвитку українського підприємства, оскільки сама ідея сталого розвитку забезпечує баланс між економічними інтересами та екологічною дією – збереженню довкілля на території, де веде свою діяльність бізнес. Концепція сталого розвитку включає в собі поєднання екологічних та економічних факторів. Важливість також зумовлена глобальними тенденціями трансформації екологічної політики у всьому світі та підвищення екологічної свідомості громади, яка все активніше приймає участь у збереженні природних ресурсів своєї країни та території, де вони проживають. Це на даний час є тенденцією до посилення вимог корпоративної відповідальності підприємств. Для підприємств це означає необхідність комплексного управління усіма екологічними аспектами, розробки, впровадження методик внутрішнього контролю та адаптацію до сучасних трендів і міжнародних правових вимог. Таким чином екологічний менеджмент є дубиною між економічними планами підприємства та його зобов'язаними, які включені у систему сталого розвитку.

В умовах вище названої європейської інтеграції України зростає значення екологічного менеджменту, оскільки це забезпечує гармонію між консервативними корпоративними практиками нашої країни та міжнародними стандартами у цій сфері, що дає можливість ефективно розвинутися та запобігти проблемам, що є в цілому основною ідеєю раціонального екологічного менеджменту.

Процедури якості в екологічному менеджменту є основою, що спрямована на забезпеченні результативності екологічної діяльності підприємства. Це формує основу для організації управління екологічними процесами підприємства та визначає послідовність дій, відповідальність виконавців та вимоги до ведення екологічної документації. Неможливо уявити екологічний менеджмент без цих чітко розроблених процедур якості, які дозволяють підприємствам встановити стандартизовані правила введення роботи та забезпечувати однаковість процесів з підвищенням їхньої ефективності. Суть цих процедур полягає у створенні комплексного підходу до планування та покращення екологічних процесів. До

системи процедури якості входять регламенти з ідентифікації усіх екологічних аспектів на підприємстві, оцінки ризиків та впливів на навколишнє середовище, моніторингу викидів та відходів, які утворюються у процесі діяльності підприємства, управління наявними ресурсами, введення екологічної документації та проведення внутрішнього аудиту, плюс підготовки до зовнішнього аудиту.

Процедури якості, що забезпечують виконання загально прийнятих екологічних норм законодавства та екологічної політики підприємства, слугують необхідним інструментом контролю та запобігання порушень у екологічній сфері.

В Україні процедури якості в екологічному менеджменті регламентує стандарт ISO 14001. Цей стандарт передбачає необхідність документообігу управління екологічними аспектами, формування усіх процедур моніторингу, проведення заходів та аудиту усіх систем з подальшим їх покращенням. Також існує стандарт ISO 9001, який є системою якості не тільки екологічного менеджменту, а й менеджменту підприємства в цілому, що доповнює стандарт ISO 14001. Ці стандарти на підприємствах частіше за всього є поєднаними - підприємства ведуть свою діяльність по цим двом стандартам разом. Поєднування цих стандартів дозволяє підприємству на самого початку своєї діяльності вже закласти екологічний менеджмент у свою основу, що забезпечить не тільки екологічну безпеку, а й високу якість майбутніх організаційних процесів. У аналітичному розділі я на прикладі лабораторії залізничного транспорту, яка акредитована по стандарту ISO 17025 та має систему управління якості по ISO 9001, покажу впровадження систем екологічного моніторингу.

Але не треба забувати, що в сучасних динамічних умовах збільшується необхідність покращення процедур якості за рахунок впровадження новітніх технологій, зокрема цифрових рішень по автоматизації та стандартизації процесів діяльності підприємства. Наприклад, використання електронних систем документообігу, цифрових журналів з автоматизацією розрахунків, автоматичних нагадувань про калібрування обладнання та автоматизацію внутрішнього аудиту

підприємства для покращення його роботи. Це дозволяє забезпечити вищий рівень роботи, прозорості, ефективності та наблизити підприємство до майбутніх міжнародних вимог, які будуть прийняті у майбутньому. Це вже є необхідністю, і такий підхід сприяє переходу від формального виконання вимог екологічного законодавства до дійсно результативних управлінських рішень підприємства у сфері екологічного законодавства, що є актуальним для підприємства, яке хоче залучити до себе освічених інвесторів та покращити свій імідж в очах громади.

Таким чином, процедури якості разом з новітніми технологіями виступають ланцюгом з'єднання класичної системи управління підприємством та системи екологічного менеджменту, що збільшує результативність та інноваційність підприємства, що позитивно впливає на його діяльність.

1.2. Нормативно-правове забезпечення екологічного менеджменту та процедур якості

Законодавство - це основа організації екологічної діяльності підприємства, на якій базуються вимоги до охорони навколишнього природного середовища, етапи введення екологічної документації та дотримання процедур, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки. Неможливим є функціонування підприємства без дотримання цих вимог екологічного законодавства, а їх виконання сприяє формуванню сталих екологічних практик. Основним нормативним актом є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», який встановлює правові основи, регулює природокористування та вводить санкції за екологічні порушення. Важливу роль грає і «Стратегія державної екологічної політики на період до 2030 року», що ставить необхідну планку розвитку екоменеджменту, підтримання високого рівня екологічної культури та впровадження екологічно орієнтованих технологій [4, 5, 6].

Взагалі, екологічні закони тісно пов'язані з усім законодавством України, що говорить о комплексному підході до введення екологічної політики в країні. В законодавстві є закони, які усі підприємства мають виконувати. Зокрема, підприємства зобов'язані оформляти та зберігати екологічну документацію, що

підтверджує результати вимірювань, мати звітність, вести плани заходів та дані моніторингу. Це все вимагає точності та достовірності, а також зменшення людського фактору.

На рівні підприємства, у тому числі лабораторії, яка буде моїм прикладом в аналітичному розділі, екологічна документація - це не просто «пара папірців», це широкий спектр внутрішніх документів, від протоколів лабораторних вимірювань до документації по зберіганню небезпечних відходів, прекурсорів, тощо. Такі документи є не лише обліковими, але й необхідною частиною оцінки екологічного розвитку. Зазначаю, що виконання нормативних вимог передбачає не лише «де-юре» наявність відповідних документів на підприємстві, але й їхнє використання «де-факто». Тобто, без чітко сформованої, багатошарової системи неможливо вести екологічну документацію – саме це і формує основу процедур якості в екологічному менеджменті, але і створює ряд проблем, бо підвищує навантаження на фахівців, збільшує ризик помилок, невідповідностей та порушень термінів. Це викликає потребу в автоматизації усієї системи, де людина буде виконувати роль оператора, а не виконавця. Українське законодавство формує обов'язкові вимоги по організації екологічного менеджменту та ведення екологічної документації. А новітні поправки рухають країну до цифровізації, проте не так швидко, як це йде в країнах Європейського Союзу.

Зростаюча складність екологічних систем, вимоги до точності, динаміки та прозорості створюють передумови для впровадження сучасних інструментів управління та вдосконалення процедур якості, про що я буду писати у третьому розділі своєї кваліфікаційної роботи.

Міжнародні стандарти серії ISO 14000 в Україні є основою для системи екологічного менеджменту на підприємствах та відіграють головну роль у забезпеченні сталого розвитку в цілому. По суті, це єдині міжнародні вимоги до управління екологічними аспектами, які сприяють підвищенню екологічної відповідальності бізнесу та дозволяють підприємствам включати екологію в стратегії управління. Я буду спиратись на стандарт ISO 14001:2015, який визначає вимоги для створення, впровадження, функціонування, оцінки та

постійного вдосконалення системи екологічного менеджменту (EMS), а також на ISO 9001:2015, ISO 19011:2018 та ISO 17025:2019 [8, 9, 10, 11].

Основою ISO 14001 є покроковий підхід та модель безперервного покращення PDCA (Plan-Do-Check-Act), орієнтована не на вирішення виниклих екологічних проблем, а на їх запобігання, системне планування екологічної діяльності, контроль та вдосконалення процесів. ISO 14001:2015, як і інші стандарти якості формату ISO, стосуються всього підприємства – від робочого місця до навчання персоналу. Такий підхід створює повноцінну, послідовну систему управління екологічними аспектами, де кожен етап підлягає контролю та оцінці. Додатково треба зазначити, що аспект безперервного покращення гарно корелює з розвитком цифрових рішень по екологічному моніторингу, бо «вбирає усе найкраще». PDCA – це про планування та запобігання проблем. Тому стандарт приділяє особливу увагу управлінню невідповідностями та реалізації коригувальних дій. В Україні впровадження ISO 14001 в першу чергу надає підприємству іміджевий статус, а вже потім сприяє стандартизації екологічних процесів, підвищенню прозорості та ефективності екологічної діяльності. Це є проблемою. Бо на практиці трапляються ситуації, коли система екологічного менеджменту впроваджується формально для отримання сертифікату, а сама не підтримується по різних причинах. Це показує, що є необхідність не лише в існуванні ефективного стандарту якості, але й в створенні сприятливих умов для його реального функціонування в локальних умовах регіону.

Виконання вимог ISO 14001 - це складний процес зі значним обсягом роботи. В умовах збільшення обсягу екологічної інформації, розширення вимог до її точності, традиційні паперові або малорозвинені цифрові системи стають недостатньо ефективними. Така ситуація створює об'єктивну потребу в автоматизації процесів управління екологічними даними та процедурами якості, що дозволить забезпечити ті самі «сприятливі умови» для функціонування систем якості. Тому подальший аналіз екологічного менеджменту в цілому та систем якості буде присвячений цифровим рішенням, інструментам

автоматизації екологічної документації та їх впровадження на українські підприємства.

1.3. Цифрова трансформація систем екологічного менеджменту

Цифрова трансформація – це промислова революція у системі екологічного менеджменту, що є невід'ємною у наш час частиною розвитку держави. Трансформація представляє перехід від паперових методів ведення екологічної діяльності до використання сучасних технічних рішень, зокрема VR-технологій. Тренд сучасних міжнародних законодавчих актів полягає у сталому розвитку, де цифровізація - ключовий компонент системи.

Основа цифрової трансформації - це перехід до повноцінних баз даних (Data Drive and Management). Створення локальних серверів, інформаційних систем, де усі екологічні рішення підприємства спираються на актуальну, достовірну та динамічну інформацію о діяльності підприємства. Цифровий документообіг забезпечує значно вищий рівень простежуваності даних, що я покажу на прикладі хіміко-технічної лабораторії у другому, аналітичному, розділі.

Цифровізація екологічного менеджменту - це не тільки про забезпечення законодавчої актуальності, але і про економічні переваги, конкурентоспроможність. Найбільш значущою перевагою я виділю покращення якості та швидкості (динаміки) обробки екологічної інформації, підвищення точності розрахунків (наприклад, автоматичне порівняння з ГДК для викидів) [12, 13, 14].

Автоматизація рутинних процедур, що у минулому представляли собою заповнення вручну журналів та ручний підрахунок результатів дослідження, дозволяє перерозподілити ресурси та час фахівців підприємства більш ефективно, що в цілому є дотичним до концепції сталого розвитку. Це створює привабливі умови для реального підтримання вимог законодавства стандартів якості ISO.

З цього виходить, що цифрова трансформація екологічного менеджменту - це не лише модернізація менеджменту, а подальший стратегічний напрямок розвитку усіх підприємств країни, що задовольняє концепцію сталого розвитку. Такі умови створюють ідеальну основу для впровадження комплексних цифрових рішень, здатних якісно покращити підхід до екологічного управління.

Якщо розглядати цифрове управління з технічної точки зору, то можна сказати, що цифровий екологічний менеджмент - це набір структурованих даних, які створюють спільну управлінську базу для підтримки, вдосконалення та змінності усієї системи. Ця база, частіше за всього, (особливо у військовій частини та відсутності електропостачання), ґрунтується на хмарних сервісах, корпоративних датабазах (серверах) у Європейському Союзі, США і Японії. Такий підхід до документації забезпечує безперервний доступ до інформації, відмовостійкість та підготовленість до військових дій.

Завдяки існуванню електронного підпису, документи в цифровій системі управління проходять повноцінний «життєвий цикл логіку» - публікація на сервері, узгодження з необхідними підписами, редагування за необхідності, архівація на строк, зазначений законодавством. Це також створює додатковий захист від несанкціонованого потрапляння документів до сторонніх осіб. На практиці це все означає, що навіть звичайна «прото-цифровізація» управління створює структурований об'єкт-систему на підприємстві.

Другим сильним плюсом цифровізації виступає автоматизація обчислення екологічних записів, результатів моніторингу, побудова калібрувальних графіків, пошук невідповідності та впровадження коригувальних дій. Модель за такими правилами перетворюється на цілісну відомість, що зручно як для керівників підприємства, так і для аудиторів при акредитації та аудитах. Це дозволяє підприємствам не хаотично готуватись до аудитів в останні строки, а поступово ввести усі екологічні відомості, змінюючи їх.

Завдяки законодавству України цифрове середовище має юридичну та доказову силу, тому на даний час це не є проблемою. А навіть навпаки, є поштовхом для вдосконалення існуючих систем. Так, наприклад, електронний

підпис має точний час підписання, що неможливо перевірити у звичайному підпису. Це створює довіру до електронного підпису та для підприємства, яке їх впровадило.

Мобільні інтерфейси, нейронні мережі всередині корпоративного серверу - ще один «шар зрілості». Співробітники можуть напряму подати запит на необхідний документ чи методику і одразу отримати результат у який завгодно час. Сучасні вимоги диктують компаніям свої умови - прозорість екологічних показників та керованість ризиків є зараз обов'язковою частиною діяльності. Зараз цифровізація - це не тільки зручність ведення внутрішнього контролю, але й інструмент іміджу, довіри інвесторів та громадськості.

Отже, описаний вище технічний ланцюг обґрунтовує створення необхідних умов для адекватного екологічного управління, знижує рутинні людські операції, зменшує кількість можливих помилок, створює необхідну динаміку змін та робить систему готовою до аудиторських перевірок та складних зовнішніх умов. Саме завдяки таким інструментам існує економічна та раціональна цілеспрямованість та потреба в створенні комплексної системи цифрового екологічного моніторингу, що задає хід про це прогресу. Реалізацію системи я покажу на прикладі хіміко-технічній лабораторії у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВЕДЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТА ПРОЦЕДУР ЯКОСТІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ

2.1. Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження

Мета роботи - обґрунтування теоретичних і практичних засад створення інтегрованого програмного комплексу з модулем віртуальної реальності (VR) для підтримки еко-менеджменту, що спрямований на підвищення ефективності управління усіма екологічними процесами, оптимізацію документообігу та створення єдиного цифрового середовища екологічної документації на підприємствах України.

Об'єктом дослідження є система екологічного менеджменту підприємства в умовах цифрової трансформації та її структура відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 14001 і ISO 9001.

Предметом дослідження є процес цифрової трансформації системи екологічного менеджменту підприємства, що включає розробку, впровадження та функціонування цифрових технологій віртуальної реальності (VR) для підтримки процедур якості, управління екологічними даними та автоматизації документообігу.

Завдання дослідження:

1. Оцінити сучасний стан екологічної документації та процедур якості на підприємствах України, виявити проблеми паперового документообігу, фрагментарності даних і впливу людського фактору.
2. Визначити принципи та переваги цифрової трансформації екологічного менеджменту.
3. Розглянути сучасні інструменти та технології цифрового управління екологічними даними й документацією.
4. Розробити концепцію інтегрованого програмного комплексу з VR-модулем для підтримки процедур якості.

5. Сформувати архітектуру, алгоритми роботи та функціональні зв'язки модулів системи.

6. Обґрунтувати очікувані результати впровадження програмного комплексу та його вплив на ефективність управління екологічною діяльністю підприємств.

Наукова новизна полягає у розробці концепції інтегрованого програмного комплексу з VR-модулем, що вперше в українській практиці пропонується як єдина цифрова екосистема підтримки процедур якості екологічного менеджменту. Запропонований підхід поєднує цифрові інструменти, системи екодокументації та технології віртуальної реальності для забезпечення автоматизації, простежуваності, інтерактивного навчання персоналу та підвищення рівня екологічної відповідальності підприємств.

2.2. Стан екологічної документації та процедур якості на підприємствах України

Екологічна документація посідає центральне місце в системі екологічного менеджменту підприємства, оскільки забезпечує фіксування екологічно значущої інформації, підтвердження виконання нормативних вимог, організацію моніторингу та формування доказової бази природоохоронної діяльності. У сучасних умовах її значення суттєво зростає, оскільки документи у сфері екології розглядаються не лише як обов'язковий елемент звітності перед контролюючими органами, але і як інструмент управління ризиками, підвищення результативності екологічної діяльності та забезпечення прозорості для стейкхолдерів. Коректне та системне ведення екодокументації є важливою умовою функціонування екологічної політики підприємства та ефективного внутрішнього контролю. З урахуванням функціонального призначення екологічну документацію, характерну для підприємств України, доцільно розглядати в кількох основних групах: стратегічна документація, операційна (виконавча), контрольна та моніторингова, звітна, а також документація, пов'язана з процедурами якості та діяльністю екологічних лабораторій. Такий

підхід дозволяє комплексно охарактеризувати структуру екодокументації та визначити її роль у забезпеченні сталого та системного екологічного управління [15].

Стратегічна документація визначає загальні принципи та напрямки екологічної діяльності підприємства, формуючи основу для розробки екологічної політики та планування природоохоронної діяльності. До її ключових видів належить екологічна політика підприємства, що відображає офіційні зобов'язання керівництва у сфері охорони довкілля та сталого розвитку, а також екологічні цілі, завдання та програми, в яких встановлюються пріоритети, цільові показники та планові заходи на певний період. Суттєве місце посідають плани природоохоронних заходів, спрямовані на зниження негативного впливу на довкілля, підвищення ресурсної та енергоефективності, проведення модернізації обладнання та впровадження екологічно орієнтованих рішень. Стратегічна документація є обов'язковим елементом системи екологічного менеджменту для підприємств, що впровадили стандарт ISO 14001, та забезпечує єдине розуміння екологічних пріоритетів на всіх рівнях управління [16].

Операційна документація це та, що включає в себе увесь комплекс документів, регламентуючих щоденну (динамічну) екологічну діяльність підприємства, що є «тут і зараз». Це, наприклад, журнал роботи витяжки, паспорти відходів, використання прекурсорів за робочий день.

Контрольна та моніторингова документація формує основу системи виробничого екологічного контролю та відображає фактичні результати моніторингу впливу підприємства на довкілля. До цієї групи входять журнали виробничого екологічного контролю, що містять відомості про параметри викидів, скидів, утворення відходів та стан природоохоронного обладнання, а також протоколи лабораторних вимірювань, що фіксують результати аналізу якості води, повітря, ґрунту, відходів та інших об'єктів контролю. Суттєве значення мають журнали обліку перевірок, оглядів та профілактичного обслуговування обладнання, яке впливає на екологічну безпеку, а також дані моніторингу стану довкілля на території підприємства. Така документація

забезпечує можливість аналізу екологічних показників, є обов'язковою при проведенні внутрішніх аудитів, інспекційних перевірок та сертифікаційного контролю [15, 16]

Звітна документація відображає виконання підприємством вимог природоохоронного законодавства та подається до контролюючих органів та зацікавлених сторін. До основних її видів належать встановлена звітність щодо поводження з відходами, викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, використання природних ресурсів, водоспоживання та водовідведення, а також звіти про виконання природоохоронних заходів. Для підприємств, орієнтованих на міжнародні ринки, все більшої ролі набуває підготовка екологічних декларацій та нефінансової (в тому числі ESG) звітності. Слід зазначити, що для звітної документації характерні суворо встановлені терміни, форми та порядок подання, порушення яких може спричинити адміністративну відповідальність та штрафні санкції.

Екологічна документація в випробувальних лабораторіях України має свою особливість, тому що сама діяльність лабораторій регулюється стандартом ISO 17025. Лабораторія – це місце потенційної екологічної небезпеки, тому в ній ведеться розширений перелік спеціальної документації, що включає журнали реєстрації проб та пробопідготовки, обліку умов зберігання та транспортування проб, журнали обліку реактивів та засобів індивідуального захисту, протоколи міжлабораторних порівнянь та внутрішнього контролю якості вимірювань, програми забезпечення якості та валідації методів, а також звіти з внутрішньолабораторного контролю та оцінки відтворюваності результатів. Ведення такої документації забезпечує повну простежуваність життєвого циклу вимірювань — від відбору проб до формування протоколу аналізу, що має ключове значення в контексті екологічної відповідальності підприємства та можливості підтвердження результатів у разі спірних ситуацій [15]

Екологічна документація має свої вимоги до ведення, про що зазначено у першому розділі. Але додатково варто виділити принцип простежуваності усіх даних, ведення якої у цифровому варіанті буде представлено на прикладі хіміко-

технічної лабораторії філії «НДКТИ». Також для усіх підприємств, що мають акредитацію за стандартами ISO та ведуть свою систему якості, обов'язковим є контроль останніх версій нормативних документів, шаблонів – для ефективного керування усією системою. При дотриманні цих вимог підприємство підвищує свою ефективність та виконує норми прийнятих стандартів.

Незважаючи на наявність нормативних вимог та поступове впровадження систем екологічного менеджменту на вітчизняних підприємствах, практика ведення екологічної документації в Україні продовжує залишатися переважно паперовою та мало структурованою. У сучасних умовах така модель документообігу не забезпечує необхідного рівня ефективності, прозорості та стійкості екологічного управління. Це призводить до виникнення системних проблем, які перешкоджають своєчасному контролю екологічних процесів та ускладнюють виконання вимог внутрішніх і зовнішніх аудитів.

Проблема паперових документів досить велика і по цей день та є об'єктом дослідження багатьох науковців. Тож, згідно з дослідженням IDC, «виклики документного управління» (document challenges) спричиняють $\approx 21,3\%$ втрати продуктивності для інформаційного працівника, що графічно показано на рисунку 2.1 [15, 16, 17, 18].

Звичайно, паперовий характер екологічної документації не співпадає з принципами сталого розвитку про раціональне використання ресурсів, тому що використання паперу є занадто дорогим, ніж використання комп'ютерних технологій. Немає необхідності вести паперовий журнал, якщо можна перевести його у цифровий вигляд, з автоматичними розрахунками та можливістю постійного вдосконалення. Тому паперова форма документообігу не відповідає сучасним вимогам до прозорості та доступності екологічної інформації [19].

Також однією з характерних проблем є фрагментарність екологічних даних, зумовлена розрізненістю носіїв інформації та відсутністю єдиної системи управління екологічним документообігом. Дані екоконтролю можуть зберігатися одночасно в паперових журналах, окремих електронних файлах, службових записках та архівних папках у різних структурних підрозділах підприємства. В

результаті порушується цілісність інформаційного поля, ускладнюється доступ до актуальних відомостей та стає неможливим проведення комплексного аналізу екологічних показників. За відсутності інтеграції між відділами підприємства оперативний обмін екологічними даними ускладнений, що негативно впливає на ухвалення управлінських рішень, виконання коригувальних дій та своєчасне реагування на екологічні ризики [20].

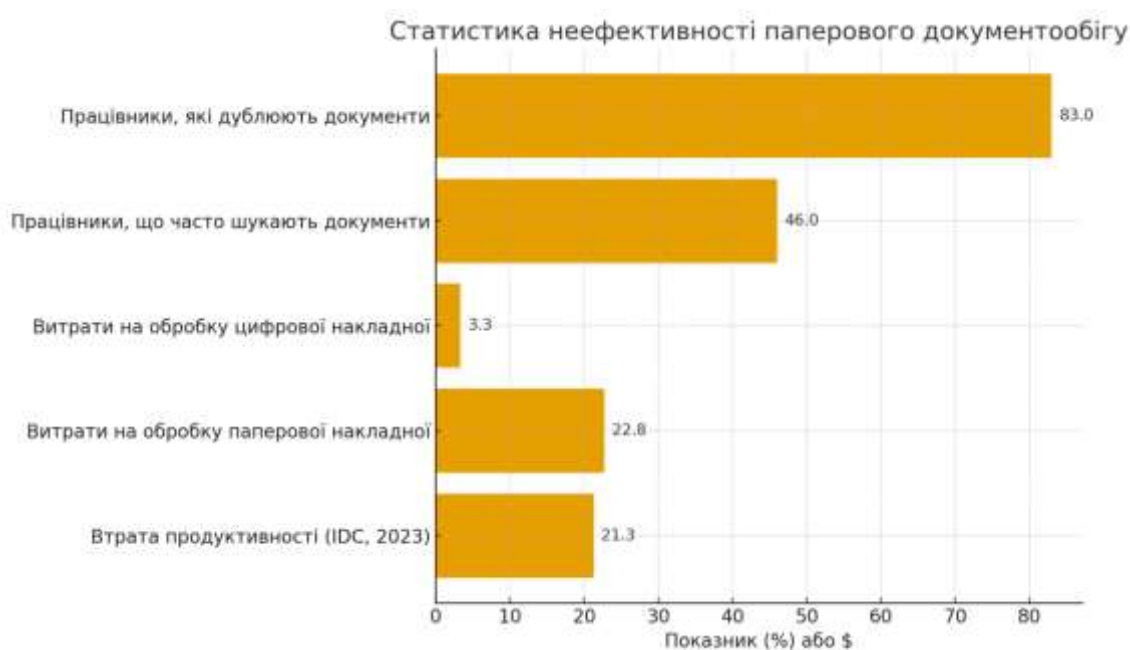


Рис. 2.1. Статистика неефективності паперового документообігу (за даними IDC, 2023)

Сукупність перерахованих факторів призводить до зниження результативності системи екологічного менеджменту та ускладнює забезпечення відповідності сучасним стандартам сталого розвитку. В результаті виникають ризики, які можуть суттєво вплинути на діяльність підприємства. До найбільш поширених наслідків належать:

1. зниження достовірності та об'єктивності екологічних даних;
2. збільшення ймовірності невідповідностей під час інспекційних перевірок;
3. ускладнення проходження внутрішніх та зовнішніх аудитів, у тому числі за стандартами ISO;

4. обмежені можливості аналізу динаміки змін та планування покращень;

5. недостатня прозорість екологічної інформації для інвесторів.

Таким чином, паперовий документообіг, людський фактор та фрагментарність даних формують серйозні перешкоди для ефективного функціонування екологічного менеджменту на підприємствах. У сучасних умовах усунення цих проблем вимагає переходу до використання цифрових інструментів та інтегрованих систем управління екологічною інформацією, що дозволить підвищити надійність, прозорість та стійкість процесів екодокументації [21, 22].

2.3. Аналіз екологічного менеджменту у хіміко-технічній лабораторії

Хіміко-технічна лабораторія філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» є структурним підрозділом, що здійснює діяльність у сфері науково-технічного забезпечення залізничного транспорту та впровадження сучасних технологічних рішень. Лабораторія має акредитацію по стандарту ISO 17025 та введена у філії «НДКТІ» систему управління якістю (СУЯ) по стандарту ISO 9001. Сама філія відіграє важливу роль у системі АТ «Укрзалізниця», забезпечуючи проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, розробку інноваційних технологій, а також контроль якості матеріалів та ресурсів, що застосовуються в залізничній інфраструктурі. Екологічна складова діяльності лабораторії пов'язана, перш за все, з контролем якості води, що використовується на об'єктах залізничної інфраструктури. Лабораторія здійснює аналіз стічної води, води, що застосовується в технологічних процесах відповідно до чинних нормативних вимог. Така діяльність спрямована на забезпечення екологічної безпеки виробничих процесів, дотримання санітарно-гігієнічних норм та запобігання негативному впливу на довкілля. Слід зазначити, що лабораторія функціонує на основі галузевих стандартів, нормативно-правових актів та внутрішніх регламентів АТ «Укрзалізниця». Діяльність підрозділу спирається на науково-технічний підхід до організації контролю, застосування стандартизованих

методик досліджень та проведення внутрішнього контролю якості вимірювань. Це забезпечує достовірність результатів аналізу, які мають важливе значення при ухваленні управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та раціонального використання водних ресурсів.

Ведення екологічної документації в хіміко-технічній лабораторії філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» здійснюється відповідно до встановлених внутрішніх регламентів СУЯ (системи управління якістю), нормативних вимог та галузевих стандартів, що регулюють процеси контролю якості води та організації лабораторних досліджень. У роботі лабораторії простежується поєднання традиційного паперового документообігу та використання окремих електронних форм, що забезпечує базову системність ведення записів, однак вимагає значних трудовитрат і не завжди сприяє оперативності обробки даних. Документація, що супроводжує лабораторні дослідження, охоплює ключові етапи роботи з пробами води та забезпечує простежуваність усього процесу аналізу. Ведуться журнали реєстрації проб, в яких фіксуються дата та місце відбору, характеристика об'єкта дослідження та відповідальні особи, а також журнали лабораторних робіт (пробопідготовки), що відображають хід виконання аналітичних процедур.

Суттєве значення має журнал обліку реактивів, що дозволяє контролювати наявність, терміни придатності та умови зберігання хімічних речовин, які застосовуються при аналізі. Ведеться також журнал перевірки та калібрування лабораторного обладнання, що є необхідною умовою забезпечення достовірності результатів вимірювань та відповідності вимогам системи якості. Слід зазначити, що результати лабораторних досліджень оформлюються у вигляді протоколів аналізу встановленої форми, що містять дані вимірювань, інтерпретацію отриманих результатів та висновки щодо відповідності досліджених зразків встановленим нормам. На рисунку 2.2 зображений журнал обліку витрат

простежуваності даних. Загалом, організація ведення екологічної документації та контролю якості в ХТЛ філії НДКТІ характеризується дотриманням ключових нормативних вимог, наявністю базової системи обліку та документування результатів лабораторних досліджень, а також відповідальним підходом до забезпечення достовірності даних. Водночас поєднання паперових та частково електронних форм фіксування інформації зумовлює певні обмеження в частині оперативності доступу, аналізу та інтеграції даних, що формує передумови для вдосконалення існуючої системи в напрямку цифровізації.

Незважаючи на дотримання ключових нормативних вимог та сформовану систему ведення екологічної документації, в діяльності хіміко-технічної лабораторії філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця» простежуються окремі обмеження, які стримують ефективність управління даними та процесами. Діюча модель документообігу забезпечує виконання основоположних функцій контролю якості води, однак її потенціал у частині оперативності, системності та аналітичності залишається обмеженим.

Розглянемо найбільш характерні аспекти, що потребують вдосконалення. Перш за все, не уся документація лабораторії переведена у цифровий формат. Наприклад, первинні записи по закону повинні оформлюватися виключно від руки, а електронні підписи прийняті не на усі документи та форми. Тому, на даний час процес цифровізації ще знаходиться на ранньому етапі, але вже показав свою ефективність на реальному підприємстві.

Важливим аспектом є те, що документація лабораторії існує в змішаному форматі: частина записів ведеться на папері, частина — в електронному вигляді (переважно в Excel та Word). За відсутності єдиного інформаційного простору та уніфікованих шаблонів даних окремі файли та журнали функціонують автономно, не будучи інтегрованими між собою. Це ускладнює формування цілісної картини за результатами лабораторних досліджень, ускладнює зіставлення даних за різні періоди та обмін інформацією між відповідальними особами. Фрагментарність інформаційних джерел знижує можливості аналітичного використання даних та оперативного ухвалення рішень.



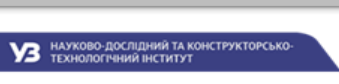
Автоматизація внесення даних до програм наразі також не має потрібного рівня розвитку, тому навіть автоматичні розрахунки спираються на ручне внесення даних до комп'ютерної системи, що збільшує кількість можливих помилок (людський фактор) та знижує загальний рівень автоматизації роботи. Це виникає через відсутність розроблених інструментів, відсутність фінансування проектів та недостатню освіченість працівників у питанні цифровізації.

Візуальні приклади цифровізації документації лабораторії представлено у рисунках 2.3-2.5.

Показник	Проба	Хлориста	Трихлорид	Численні значення	Середнє значення	Помилка вимірювання	Відсоткова помилка	Висловленість	Висловленість	Т.ЗК	об'єм проби	0.04	0.01000	0.01000	0.0001000	0.00001000
PH	7.12	8	7.12	7.12	7.15	$\Delta = \pm 0.03$	$-0.009 \pm 0.03 - \text{Вим. НС}$	0.083	0.5-0.0	100	8	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
chl	2.211	8	0.211	0.211	0.217	$\Delta = \pm 0.01000$	0.01000	0.0004	1.78	100	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
ADAF	0.041	8	0.041	0.041	0.040	$\Delta = \pm 0.0025$	0.0025	0.0018	1.31	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
УСК	88.800	8	89.600	89.600	89.190	$\Delta = \pm 17.8$	17.80	13.9663	306	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
Cl	4.800	8.3	4.320	4.639	4.618	$\delta = \pm 10\%$	$0.011 \pm 0.11 - \text{Вим. НС}$	23.0038	398	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
NH4	0.190	0.09	0.091	0.211	0.448	$\delta = \pm 30\%$	$0.012 \pm 0.18 - \text{Вим. НС}$	0.0442	20	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
Fe	0.730	0.02	0.141	1.493	1.492	$\Delta = \pm 0.101$	$0.0642 \pm 0.897 - \text{Вим. НС}$	0.1305	0.68	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
PO4	0.023	0.008	0.019	0.030	0.040	$\delta = \pm 0.01$	$0.0422 \pm 0.60 - \text{Вим. НС}$	0.0017	0.8	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
NO2	0.009	8	0.009	-0.009	-0.008	$\Delta = \pm 4.908$	0.0000	0.0000	1.38	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
NO3	0.080	0.028	0.028	0.881	0.898	$\delta = \pm 47.502$	$0.028 \pm 0.343 - \text{Вим. НС}$	0.1308	28.2	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
SO4	0.579	8	0.179	224.938	225.170	$\Delta = \pm 22.01$	$0.083 \pm 20.343 - \text{Вим. НС}$	11.6871	217	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
LF	39.790	0.000	0.000	88.800	87.000	$\delta = \pm 10\%$	$0.0 \pm 13.8 - \text{Вим. НС}$	1.3239	254.3	100	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
С.1	60.0248	0.000	0.000	3397.000	2004.000	$\Delta = \pm 103.2$	$0.05969 \pm 0.4338 - \text{Вим. НС}$	10.481	8.9	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001
Zn	0.000	8	0.000	0.000	0.000	«НАП»	«НАП»	0.0000	0	8	8	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001	0.000001

Датум та адреса внесеної проби	Метод аналізу	Висновки	Об'єкт, на якому здійснюється аналіз	Ідентифікатор проби	Лист №	Період забори	Адреса об'єкта забору	Відомості про забор	Час забору	Температура повітря	Відомості про забор	Висновки
10.10.2024 № 1000	10.10.2024			100.100		10.10.2024	10.10.2024	10.10.2024	10.10.2024	10.10.2024	10.10.2024	10.10.2024

Рисунок 2.3. Автоматизований Excel-розрахунок проб стічної води.

201454
Випробування

АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»
ФІЛІЯ «НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ»
НАУКОВО-ВПРОВАДЖУВАЛЬНИЙ ЦЕНТР
 Управління хіміко-технологічних випробувань та санітарно-промислових обстежень, сектор екологічних вимірювань
 вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, тел.: (+380 44) 465-38-10, ndkti@uz.gov.ua
Науково-впроваджувальний центр акредитований Національним агентством з акредитації України на випробування відповідно до ДСТУ ENISO/IEC 17025, атестат акредитації №201454 чинний до 15.02.2028
 Форма Ф-7.8-01 Розпорядження від 18.02.2021р. №СУ.8/8

З А Т В Е Р Д Ж У Ю :
 Начальник НВЦ
 філії «НДКТИ» АТ «Укрзалізниця»
 _____ **Володимир Повисний**
 особистий підпис Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ

« ____ » _____ 2024 р.

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАННЯ №НДКТИ/НВЦ УХ 164-2024

Випробування води стічної
 (проби № 1 акт відбору від 15.05.2024р.)

Кількість екземплярів 2
 Екземпляр № _____

Рисунок 2.4. Титульна сторінка цифрового документу – протоколу випробування.

№ з/п	Відомі дані (тип) від Замовника	Питань Замовника	№Договори/ Випробувальних актів/акцій	Регістраційний № акту проби/акта передаті зразка по проби/акта випробувань	Регістраційний № протоколу випробувань/ акцій/акцій	Вид акту для випробувань/ випробувань	Регістраційний № зразка/у випробувань	Лист-відмова	Цілісність зразка/акції	Лист випробувань/ протоколу (№)	Протокол випробувань/ акції
217	12.05.2024	Випробування		№ 187 від 20.06.2024	№ 187 від 20.06.2024	стічна вода	214-2024 від 21.06	НДКТИ-16/5129 від 26.07.2024	Випробування	16/5309 від 11.07.2024	
218	12.05.2024	Випробування		№ 190 від 20.06.2024	№ 188 від 20.06.2024	дист. вода	213-2024 від 21.06	НДКТИ-16/5129 від 26.07.2024	Випробування		
219	12.05.2024	Випробування		№ 191 від 24.06.2024	№ 189 від 24.06.2024	стічна вода	218-2024 від 25.06	НДКТИ-16/5131 від 28.07.2024	Випробування	16/5334 від 11.07.2024	
220	12.05.2024	Випробування		№ 192 від 24.06.2024	№ 190 від 25.06.2024	стічна вода	217-2024 від 25.06	НДКТИ-16/5130 від 26.07.2024	Випробування	16/5333 від 11.07.2024	
221	12.05.2024	Випробування		№ 193 від 28.06.2024	№ 191 від 26.06.2024	фарби	219-2024 від 27.06 219-2024 від 27.06 220-2024 від 27.06		Випробування		
224	12.05.2024	Випробування		№ 194 від 26.06.2024	№ 192 від 26.06.2024	гітча вода	221-2024 від 26.06	НДКТИ-16/5047 від 22.07.2024	Випробування	16/5356 від 11.07.2024	
225	12.05.2024	Випробування		№ 195 від 27.06.2024	№ 193 від 27.06.2024	стічна вода	222-2024 від 27.06	НДКТИ-16/5147 від 26.07.2024	Випробування	16/5367 від 11.07.2024	
226	12.05.2024	Випробування		№ 196 від 27.06.2024	№ 194 від 27.06.2024	дист. вода	223-2024 від 27.06		Випробування		
227	12.05.2024	Випробування		№ 196 від 27.06.2024	№ 194 від 27.06.2024	інструмент/звук. ЕКГ/ГЛ	224-2024 від 27.06		Випробування		
228	12.05.2024	Випробування		№ 197 від 27.06.2024	№ 195 від 27.06.2024	стічна вода		НДКТИ-16/5145 від 26.07.2024	Випробування	16/5381 від	

Рисунок 2.5. Цифрова простежуваність роботи лабораторії – з гіперпосиланнями.

2.4. Бар'єри цифровізації екологічного менеджменту

Виявлені у функціонуванні системи екологічного менеджменту обмеження свідчать про наявність глибинних організаційно-структурних проблем, характерних не лише для окремих лабораторій чи підприємств, а й для більшості вітчизняних виробничих структур. Аналіз практики показує, що впровадження цифрових рішень стримується через інституційну інерцію та відсутність чітко визначених механізмів інтеграції екологічних процесів у загальну систему управління підприємством. Переважаюча бюрократизована модель ведення екологічної документації, орієнтована на паперові носії, формує середовище, у якому цифрові інновації сприймаються як додатковий ризик, а не як інструмент підвищення ефективності [23, 24, 25].

Суттєвим бар'єром виступає відсутність внутрішньої взаємодії між структурними підрозділами, що відповідають за екологічний контроль, якість, охорону праці та виробництво. Кожна служба зберігає власні набори даних, що ведуться у різних форматах – від паперових журналів до окремих Excel-файлів без їх належної синхронізації. У результаті порушується цілісність інформаційного простору, що призводить до дублювання даних, розбіжностей у показниках і складності підготовки консолідованої звітності. Відсутність централізованої цифрової бази даних не дозволяє оперативно відстежувати зміни екологічних параметрів, що знижує якість управлінських рішень та уповільнює реакцію на потенційні екологічні ризики.

Організаційна структура багатьох підприємств також не передбачає окремих посад або підрозділів, відповідальних за цифровізацію екологічних процесів. Функції у сфері екоменеджменту часто виконуються «за сумісництвом», без чітко визначених обов'язків і показників ефективності. Через це впровадження цифрових рішень не отримує необхідного пріоритету, розглядається як тимчасовий експеримент, а не як стратегічний напрям розвитку. Подібна ситуація призводить до того, що навіть при наявності сучасного

обладнання та програмного забезпечення підприємства не використовують їх повний потенціал.

Додатковим фактором є відсутність чітко розроблених внутрішніх регламентів цифрової обробки екологічних даних. У більшості випадків електронні документи не мають єдиної структури, версійного контролю або стандартів збереження, що створює ризики втрати інформації та знижує рівень довіри з боку контролюючих органів. Відсутність інтегрованого підходу також ускладнює проведення внутрішніх аудитів, оскільки значна частина часу витрачається на пошук і перевірку даних, розташованих у різних форматах і сховищах.

Таким чином, організаційно-структурні бар'єри цифровізації екологічного менеджменту виявляються у трьох взаємопов'язаних площинах: *інституційній* (брак стратегічного бачення та відповідальності), *управлінській* (фрагментація даних та відсутність інтегрованої системи управління) і *нормативно-процедурній* (нестача єдиних регламентів та цифрових стандартів). Подолання цих бар'єрів потребує комплексного підходу – перегляду внутрішньої організаційної моделі, створення єдиної системи управління екологічними даними та впровадження цифрових платформ, здатних об'єднати всі рівні екологічного менеджменту в єдиний інформаційний контур [26].

Наслідки для підприємства:

- низька швидкість впровадження цифрових рішень та модернізації екодокументації;
- відсутність єдиного інформаційного середовища та складнощі в інтеграції даних між підрозділами;
- обмежені можливості аналітичної обробки інформації та управлінського контролю;
- підвищені організаційні витрати при переході до нових технологій.

Низький рівень цифрової культури на підприємствах безпосередньо впливає на сприйняття інновацій і формує психологічний бар'єр, який ускладнює

перехід до нових форматів роботи. Працівники, які протягом тривалого часу виконували функції у стабільному, малозмінному середовищі, часто розглядають цифрові технології не як інструмент спрощення процесів, а як загрозу звичному порядку, що може призвести до додаткового контролю, зміни функціональних обов'язків або навіть скорочення штатів. Такий тип сприйняття зумовлює пасивне або формальне ставлення до процесу цифровізації, зводячи її потенціал до мінімуму.

Важливою проблемою є також недостатня підтримка ініціатив з боку керівництва середньої ланки, яке виконує роль посередника між стратегічним рівнем управління і безпосередніми виконавцями. Часто саме цей рівень управління визначає темп і якість впровадження цифрових рішень. Якщо керівники підрозділів не мають достатнього розуміння цифрових процесів або не поділяють цінності цифрової трансформації, вони можуть несвідомо гальмувати її розвиток, залишаючи перевагу традиційним методам роботи. Відсутність чіткої системи мотивації та заохочення до впровадження інновацій лише посилює цю тенденцію.

Додатковим кадровим викликом залишається дефіцит фахівців, які одночасно володіють знаннями у сфері екологічного менеджменту та компетенціями в галузі інформаційних технологій. На ринку праці України спеціалісти подібного профілю зустрічаються рідко, а залучення окремих ІТ-консультантів без екологічного «бекграунду» не забезпечує необхідного ефекту через відмінності у професійній термінології та специфіці даних. Це створює розрив між екологічними службами та ІТ-відділами, ускладнюючи комунікацію та спільну розробку цифрових рішень.

Таким чином, кадрово-культурні бар'єри цифровізації екологічного менеджменту охоплюють не лише дефіцит технічних навичок, але й ширші питання корпоративної культури, психологічної готовності до змін та відсутності системної політики цифрового навчання. Для подолання цих перешкод необхідно впроваджувати довгострокові програми розвитку цифрових компетентностей персоналу, формувати культуру інноваційності та відкритості до змін, а також

забезпечити підтримку з боку керівництва всіх рівнів. Лише за таких умов цифрова трансформація екологічного менеджменту може набути сталого характеру та забезпечити реальне підвищення ефективності управління екологічними процесами на підприємствах України [27].

Наслідки для підприємства:

- низька готовність персоналу до переходу від звичних методів роботи до цифрових форматів;
- ризик формального впровадження цифрових рішень без реального залучення співробітників;
- сповільнення процесу адаптації нових технологій та зниження ефективності їх використання;
- підвищена залежність від окремих фахівців, які володіють цифровими навичками.

Цифровізація екологічного менеджменту на підприємствах України багато в чому зумовлена станом нормативно-правової бази, що регулює ведення документації, застосування електронних документів та використання цифрових інструментів. Незважаючи на наявність законодавчих актів, що визнають юридичну силу електронних документів, правове регулювання в цій сфері залишається фрагментарним і не повністю адаптованим до потреб цифрової трансформації екологічної діяльності підприємств.

Відповідно до Закону України «Про електронні документи та електронний документообіг» № 851-IV, електронний документ не може бути позбавлений юридичної сили виключно через електронну форму. Аналогічно, Закон України «Про електронні довірчі послуги» № 2155-VIII визначає юридичний статус кваліфікованого електронного підпису та його еквівалентність власноручному підпису при дотриманні встановлених вимог. Однак ці нормативні положення мають загальний характер і не містять деталізованих вимог до ведення окремих видів екологічної документації в електронній формі. Крім того, чинна система екологічного законодавства України залишається фрагментарною в частині регламентації цифрового документообігу.

Значна кількість положень різних нормативно-правових актів дублює або суперечить одне одному, що створює правову невизначеність при практичному застосуванні цифрових технологій у сфері екологічного менеджменту. Відсутність єдиного уніфікованого стандарту для електронних екологічних записів, цифрових підписів та електронних журналів знижує рівень довіри з боку контролюючих органів і ускладнює процес акредитації лабораторій за міжнародними вимогами. У результаті навіть за наявності технічної можливості підприємства обмежені в реалізації повноцінного електронного документообігу, оскільки юридичні ризики залишаються надто високими [28].

Ситуація ускладнюється відсутністю чітких процедур взаємодії між державними платформами та корпоративними екосистемами підприємств. Електронна звітність у галузі охорони довкілля подається через різні інформаційні канали, які не мають спільних технічних протоколів, що перешкоджає автоматизованій інтеграції даних і створює додаткове навантаження на персонал. Внаслідок цього цифровізація екологічної звітності набуває фрагментарного характеру: окремі елементи системи функціонують автономно, не формуючи єдиного цифрового контуру управління.

Для гармонізації правових засад цифрового екологічного менеджменту необхідно розробити цілісну нормативну рамку, що охоплюватиме питання юридичної сили електронних документів, зберігання екоданих у хмарних сервісах, цифрової ідентифікації користувачів, захисту конфіденційної інформації та взаємодії корпоративних систем із державними реєстрами. У перспективі така гармонізація дозволить створити прозоре правове середовище, яке стимулюватиме підприємства до впровадження сучасних цифрових технологій, підвищить рівень довіри до екологічної інформації та сприятиме інтеграції України в європейський цифровий простір сталого розвитку [29, 30, 31].

Наслідки для підприємства:

- збереження юридичних ризиків при повному переході на електронні формати екологічної документації;

- необхідність дублювання документів у паперовій формі, що знижує ефективність цифровізації;
- обмежені можливості використання хмарних рішень та цифрових платформ для зберігання екоданих;
- труднощі в адаптації до міжнародних вимог ESG та європейських стандартів екологічної прозорості.

Додатковою проблемою є відсутність інтеграційних рішень між існуючими корпоративними системами управління (ERP, SCADA, LIMS) та майбутніми цифровими платформами екологічного менеджменту. Через несумісність форматів даних, відсутність єдиних API-протоколів та стандартизованих інтерфейсів обмін екологічною інформацією між підсистемами часто здійснюється вручну, що нівелює ефекти автоматизації та підвищує ризик помилок. У результаті навіть ті підприємства, які вже впровадили часткову цифровізацію екопроцесів, не можуть забезпечити цілісність інформаційних потоків і простежуваність екологічних показників у реальному часі.

Суттєвим бар'єром є також обмежені фінансові ресурси, необхідні для модернізації IT-інфраструктури. Закупівля серверного обладнання, ліцензійного програмного забезпечення, засобів кіберзахисту та регулярне оновлення технічних засобів вимагають значних інвестицій, які для більшості підприємств екологічного профілю залишаються недосяжними. У поєднанні з нестачею технічних фахівців та відсутністю внутрішньої підтримки цифрових рішень це призводить до того, що навіть перспективні технологічні ініціативи зупиняються на стадії пілотних проектів або впроваджуються лише частково.

Крім технічних обмежень, важливим аспектом залишається питання надійності зберігання великих масивів екологічних даних. Використання зовнішніх серверів або хмарних платформ потребує гарантій з боку постачальників послуг щодо доступності, безпеки та довготривалого збереження інформації. В умовах воєнного стану, кіберзагроз та нестабільного енергопостачання ці питання набувають особливої актуальності. Відсутність резервних копій або механізмів відновлення даних може призвести до втрати

критично важливої інформації, що створює як екологічні, так і репутаційні ризики для підприємства.

Таким чином, технологічні бар'єри цифровізації екологічного менеджменту мають комплексний характер і охоплюють проблеми інфраструктурної недостатності, кібербезпеки, інтеграційної сумісності та фінансових обмежень. Для їх подолання необхідно розробити національні технічні стандарти цифрової взаємодії у сфері екологічного управління, забезпечити державну підтримку у створенні безпечних хмарних платформ, а також стимулювати підприємства до впровадження сучасних рішень через грантові програми та податкові пільги. Лише за умов комплексного підходу технологічна модернізація стане реальним фундаментом для формування ефективної, стійкої та безпечної цифрової екосистеми екологічного менеджменту в Україні [32, 33].

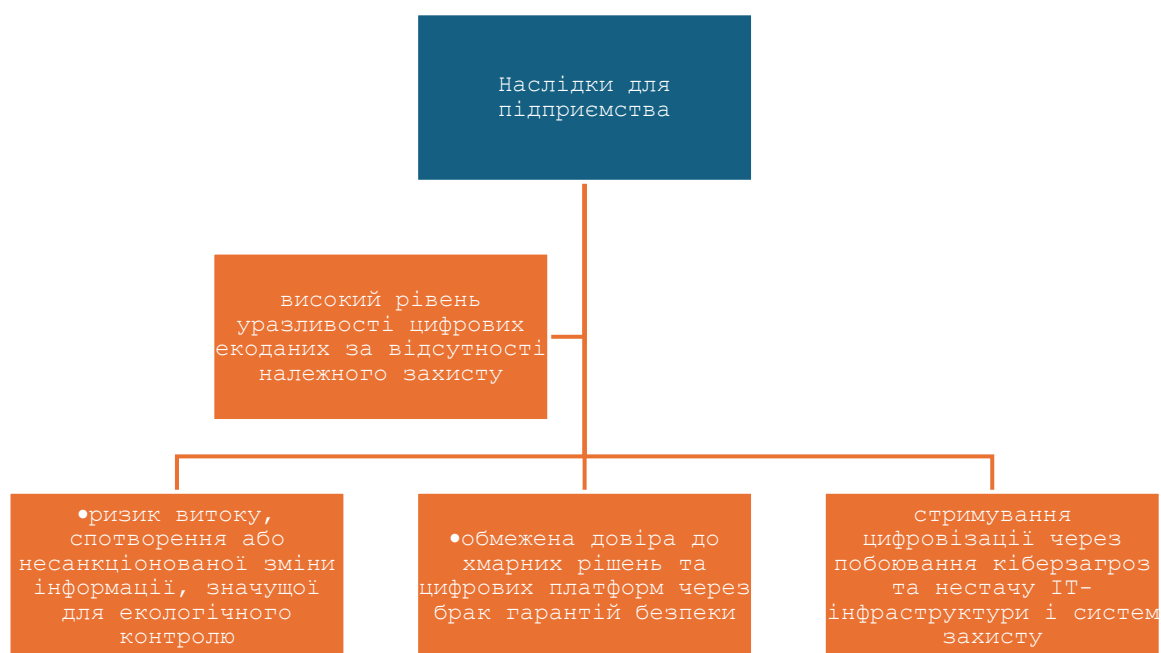


Рисунок 2.6. Основні технологічні наслідки для підприємства

Отже, подолання окреслених бар'єрів потребує системного підходу, що поєднує організаційні, правові, технічні та освітні заходи. Важливим напрямом є розроблення цілісної державної стратегії цифровізації екологічного управління, яка передбачатиме не лише нормативне врегулювання процесів електронного

документообігу, а й створення єдиної цифрової інфраструктури збору, обробки та зберігання екологічних даних. Паралельно необхідно формувати культуру цифрової екологічної відповідальності на підприємствах – через підвищення цифрової компетентності персоналу, розвиток внутрішніх систем кіберзахисту та стимулювання інноваційних ініціатив.

Застосування кращих міжнародних практик, інтеграція європейських стандартів прозорості та цифрової звітності, а також підтримка з боку держави й наукової спільноти дадуть змогу створити умови для сталого розвитку цифрового екоменеджменту. У подальшому саме такі підходи можуть стати базисом для формування інтегрованих програмних рішень, які забезпечуватимуть комплексну автоматизацію екологічних процесів і сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності українських підприємств у контексті євроінтеграції [34, 35, 36, 37, 38, 39].

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО VR-КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ПРОЦЕДУР ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

3.1. Концепція, цілі та завдання розробки програмного комплексу

Дослідження проблем сучасного еко-менеджменту обумовило потребу у комплексному вирішенні систематичних проблем – створення програмного VR-комплексу. VR-комплекс – це інтегрована віртуальна платформа, що поєднує моделювання виробничих і екологічних процесів, навчальні сценарії, інструменти аудиту та візуалізацію даних у єдиному імерсійному середовищі.

Він дозволяє користувачам відтворювати реальні робочі ситуації, проводити тренування та перевірки без ризику для обладнання чи довкілля, а також забезпечує просторове представлення процедур, показників і документів екологічного менеджменту.

Необхідність створення такого комплексу визначається такими факторами:

1. перехід від паперового до цифрового документообігу, що забезпечує надійне зберігання, контроль версій та захист даних;
2. підвищення достовірності екологічної інформації за рахунок автоматизації розрахунків, перевірок та звітних форм;
3. посилення тотожності з вимогами ISO та національних стандартів;
4. створення прозорого інформаційного простору для внутрішніх аудиторів, екологів, лабораторій та зовнішніх стейкхолдерів;
5. можливість масштабування та інтеграції

Таким чином, впровадження програмного комплексу цифрового екологічного менеджменту виступає необхідним етапом технологічної модернізації підприємств України, що забезпечує перехід до сталого, керованого та перевірюваного формату ведення екологічної діяльності [40, 41, 42].

Метою даної розробки є створення інтегрованого програмного комплексу, що об'єднує модулі управління екологічними даними, процедур якості та

документованого контролю, а також інноваційний VR-модуль, що забезпечує інтерактивну взаємодію користувачів із цифровим середовищем екологічного менеджменту.

Основна ідея полягає у формуванні єдиного інформаційного простору, де всі ключові функції, від реєстрації лабораторних проб та обліку невідповідностей до проведення внутрішніх аудитів, реалізуються в межах взаємопов'язаних модулів. Такий підхід дозволить підвищити ефективність управління, скоротити витрати часу на підготовку звітності та забезпечити повну простежуваність даних [43].

Алгоритм створення включав:

1. Розроблення концептуальної архітектури програмного комплексу, що включає модулі:
 - управління екологічними даними та звітністю (e-reporting / LIMS-підсистема); [44].
 - контроль та документування процедур якості (ISO 14001/9001-модуль);
 - аналітичну візуалізацію даних та показників результативності (KPI-панель);
 - VR-модуль інтерактивного навчання, демонстрації та аудиту процедур якості.
2. Визначення функціональних взаємозв'язків між модулями та розроблення принципів їх інтеграції на рівні даних, інтерфейсів та користувачів.
3. Реалізація уніфікованих механізмів документування та контролю:
 - ведення електронних журналів та протоколів із електронним підписом;
 - автоматичну реєстрацію невідповідностей (Non-Conformance Reports) та коригувальних дій (CAPA);
 - контроль термінів перевірок обладнання та актуальності методик.

4. Забезпечення можливості інтеграції комплексу із зовнішніми цифровими системами підприємств (ERP, SCADA, 1С, корпоративні портали) та державними платформами e-reporting [45].

5. Розроблення демонстраційного прототипу VR-модуля, що дозволяє моделювати типові сценарії роботи еколога, лаборанта та аудитора в імерсивному середовищі (віртуальна лабораторія, пункт відбору проб, зона аудиту).

6. Підготовка методики оцінки ефективності впровадження комплексу за еколого-економічними, організаційними та освітніми критеріями [46].

Реалізація проекту дозволить отримати функціональний прототип інтегрованої системи, що забезпечує:

1. підвищення прозорості та керованості екологічних даних за рахунок єдиного цифрового контуру;
2. скорочення часу документообігу (оформлення протоколів, підготовка звітності, реєстрація САРА);
3. зниження частки помилок та невідповідностей, пов'язаних з людським фактором;
4. підвищення готовності підприємств до аудитів ISO за рахунок автоматизації контролю та звітності;
5. розвиток цифрової компетентності персоналу через VR-навчання та моделювання робочих ситуацій;
6. посилення корпоративної екологічної культури та іміджу підприємства як інноваційно-відповідального.

Ключовими показниками ефективності впровадження комплексу виступають:

- скорочення часу підготовки звітних документів не менше ніж на 30 %;
- зменшення кількості невідповідностей, виявлених під час аудитів, на 25–40 %; [47].
- підвищення швидкості внутрішнього контролю (період оновлення даних та підтвердження коригувальних дій);

- рівень залученості персоналу до VR-навчання та внутрішніх перевірок.

VR-модуль виступає інноваційною надбудовою над основними компонентами програмного комплексу. Його призначення – створення імерсивного освітнього та демонстраційного середовища, в якому користувачі можуть:

1. проходити симуляції екологічних процедур (відбір проб, контроль обладнання, перевірка журналів);
2. візуалізувати потік даних з LIMS та e-reporting-модулів у просторовому форматі;
3. моделювати сценарії внутрішнього аудиту та реагування на невідповідності;
4. отримувати інтерактивний зворотний зв'язок про правильність дій та дотримання регламентів.

Інтеграція VR-модуля з основною системою здійснюється через API, що забезпечує двосторонній обмін даними: з бази комплексу до VR-середовища передаються актуальні записи, параметри та документи, а результати взаємодії користувача (наприклад, проходження сценарію аудиту) фіксуються в системі як виконані дії [48].

Таким чином, VR-компонент не є ізольованим елементом, а стає функціональною частиною цифрової екосистеми, спрямованою на підвищення якості процедур, навчання персоналу та формування культури екологічної відповідальності.

3.2. Архітектура та функціональна структура програмного комплексу

Інтегрований програмний комплекс екологічного менеджменту являє собою багаторівневу систему, що об'єднує бази даних, серверну логіку, веб-інтерфейс та VR-модуль в єдиному цифровому контурі. Архітектура побудована за модульним та сервіс-орієнтованим принципом, що забезпечує

масштабованість, гнучкість та можливість поступового розширення функціоналу без повної переробки системи [49].

В основу комплексу покладено трирівневу модель:

1. Рівень даних (Data Layer) — реляційна база PostgreSQL, що забезпечує зберігання всіх видів інформації: лабораторні результати, документи, записи невідповідностей, метадані ISO-процедур, дані користувачів, звітні форми та зв'язки між ними. Підтримка формату JSONB та просторових даних (PostGIS) дозволяє інтегрувати систему з GIS- та IoT-рішеннями на наступних етапах.

2. Серверний рівень (Application Layer) реалізований на Python / Django, що забезпечує безпечну обробку даних, авторизацію користувачів, REST API та бізнес-логіку системи. Django ORM забезпечує взаємодію з базою даних без прямого SQL-втручання, а вбудована система прав та ролей гарантує розмежування доступу відповідно до процедур якості.

3. Користувацький рівень (Presentation Layer) включає два інтерфейси:

- веб-портал (React) — для повсякденної роботи екологів, лаборантів та аудиторів;
- VR-модуль (Unity) — для імерсивних сценаріїв навчання, візуалізації та демонстрації процесів.

Комунікація між рівнями здійснюється через RESTful API, що робить архітектуру відкритою для зовнішніх інтеграцій (ERP-, SCADA-, LIMS-, e-reporting-платформи). Така структура дозволяє використовувати систему як всередині підприємства, так і в хмарному форматі з розподіленим доступом [50].

Базовий рівень комплексу реалізує функції збору, зберігання та документування екологічної інформації, аналогічні системам **LIMS (Laboratory Information Management System)**. Він забезпечує прозорість, простежуваність та достовірність даних лабораторного контролю та виробничого моніторингу [51].

Основні функції даного модуля:

- Реєстрація проб та вимірювань. Облік проб за датою, місцем відбору, об'єктом контролю, відповідальними особами; автоматична генерація унікальних ідентифікаторів та штрих-кодів.
- Журнали лабораторних операцій. Електронна фіксація пробопідготовки, застосованих методик, умов аналізу та параметрів обладнання.
- Управління обладнанням та реактивами. Облік повірок, термінів калібрування, статусів приладів; автоматичні повідомлення про необхідність обслуговування.
- Автоматичне формування протоколів вимірювань. На основі шаблонів форм ISO / ДСТУ створюються протоколи з цифровими підписами та мітками часу.
- Інтеграція з e-reporting. Експорт агрегованих даних у державні або корпоративні звітні форми (наприклад, щодо відходів, викидів, водокористування).
- Візуалізація результатів. Панель аналітики (React + Plotly) дозволяє відстежувати динаміку показників у режимі реального часу.

LIMS-модуль стає «серцем даних» системи – від нього надходять усі фактичні дані до модуля управління якістю та VR-середовища.

Інтеграція забезпечує цілісність даних та синхронну роботу всіх компонентів комплексу. Основою служить REST API, реалізований засобами Django REST Framework, який дозволяє модулям обмінюватися інформацією в режимі реального часу [52].

Механізми взаємодії включають:

1. API-зв'язок між LIMS та модулем якості. Після завершення аналізу результати автоматично передаються до САРА-модуля, де формується статус «перевірено» / «потребує коригування».
2. API-зв'язок між сервером та VR-модулем. Через HTTP-запити VR-додаток отримує список активних завдань, документів та невідповідностей,

візуалізує їх у 3D-просторі та відправляє назад результати симуляцій (наприклад, проходження сценарію аудиту).

3. Інтеграція із зовнішніми системами.
4. Єдина система авторизації та контролю доступу (Single Sign-On). Користувачі всіх модулів (веб та VR) проходять аутентифікацію через єдиний сервер авторизації; їхні ролі (еколог, лаборант, аудитор, адміністратор) визначають доступ до функцій системи.

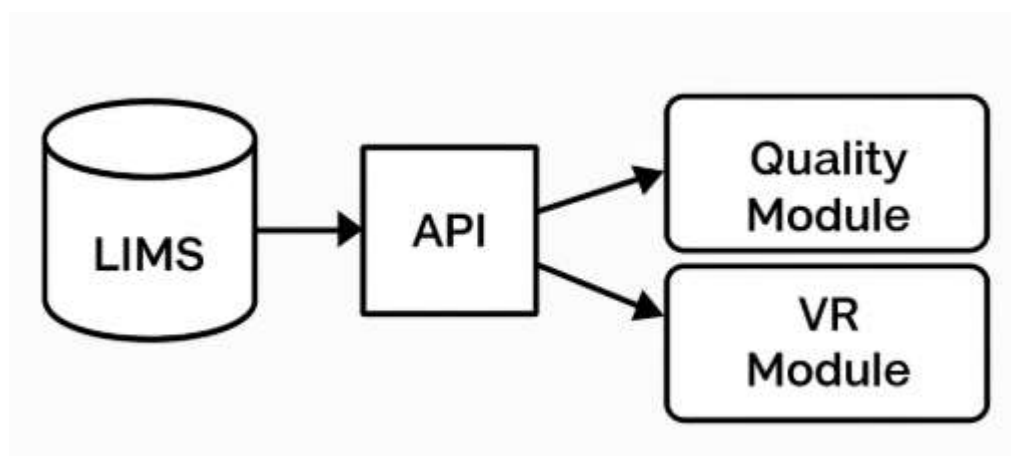


Рисунок 3.1. Архітектура API-взаємодії між LIMS, веб-модулем та VR-модулем

Такий підхід формує єдиний цифровий простір екологічного менеджменту, де всі процеси пов'язані даними, а кожен елемент – від лабораторного аналізу до VR-навчання - стає частиною загального контуру управління якістю [53].

3.3. Розробка та реалізація VR-модуля програмного комплексу

У контексті цифрової трансформації екологічного менеджменту віртуальна реальність (VR) розглядається як інноваційний інструмент візуалізації, навчання та контролю процедур якості. На відміну від традиційних інформаційних інтерфейсів, VR-середовище дозволяє користувачеві не просто спостерігати дані, а взаємодіяти з ними в імерсивному форматі, що значно підвищує рівень залученості та засвоєння інформації.

VR-модуль інтегрований у структуру програмного комплексу як додаткова надбудова, що забезпечує реалістичне моделювання екологічних процесів, лабораторних процедур та аудиторських сценаріїв.

Його призначення – створення віртуального освітнього та демонстраційного середовища, де співробітники підприємства можуть:

1. проходити навчання за процедурами якості ISO 14001 / 9001;
2. тренуватися в діях під час внутрішніх та зовнішніх аудитів;
3. візуалізувати рух екологічних даних та протоколів;
4. вивчати структуру цифрової системи та порядок документування;
5. моделювати нештатні ситуації (наприклад, виявлення невідповідності, реагування на забруднення, коригувальні дії).

Таким чином, VR-модуль виконує одночасно три функції:

1. Освітню – навчання співробітників на основі інтерактивних сценаріїв.
2. Демонстраційну – представлення керівництву та аудиторам моделі функціонування системи якості.
3. Комунікативну – підвищення екологічної культури та залученості персоналу до процесів сталого розвитку.

VR-модуль розроблено на рушії Unity 3D (C#), що забезпечує гнучкість, візуальну реалістичність та можливість інтеграції із зовнішніми API та базами даних Django-сервера.

У межах демонстраційної версії VR-модуля розроблено три основні сценарії взаємодії, що відображають реальні ролі в системі екологічного менеджменту: лаборант, еколог, аудитор.

1. Сценарій «Лаборант»

Користувач переміщується віртуальною лабораторією, де відтворюється процес відбору, підготовки та аналізу проб води.

Інтерактивні дії:

- реєстрація проби через інтерфейс LIMS (віртуальний планшет з API-запитом до бази даних);
- вибір методики аналізу та налаштування приладу;
- фіксація результатів вимірювання (з передачею даних у систему);
- підписання протоколу електронним підписом.

Результати симуляції зберігаються в базі як навчальні дані, що дозволяє використовувати модуль для атестації та внутрішнього навчання персоналу.

2. Сценарій «Еколог»

У VR-просторі відображається модель підприємства з інтерактивними зонами - лабораторний блок, склад реагентів, очисні споруди.

Користувач:

- аналізує дані моніторингу (візуалізація графіків та показників у 3D);
- виявляє невідповідності (наприклад, прострочений сертифікат обладнання);
- ініціює коригувальну дію (CAPA);
- спостерігає результат оновлення статусу задачі в системі.

Цей сценарій моделює процеси екологічного контролю та ухвалення рішень на основі даних, що зберігаються в основній базі комплексу.

3. Сценарій «Аудитор»

Режим призначений для навчання аудиторів внутрішньої системи менеджменту якості.

Користувач у VR проводить віртуальну перевірку лабораторії, оцінює стан документації, фіксує порушення, формує акт аудиту.

Дії включають:

- вибір ділянки перевірки;
- огляд об'єктів та перегляд цифрових журналів;
- заповнення чек-листа відповідності ISO 14001 / 9001;

- підписання підсумкового звіту, який автоматично синхронізується з САРА-модулем системи.

VR-додаток розроблено за клієнт-серверною архітектурою, що забезпечує пряму інтеграцію з ядром програмного комплексу.

Основні елементи:

- Unity-клієнт – візуальна сцена, користувацький інтерфейс, обробка дій та сценаріїв;
- API-шлюз (REST API) - забезпечує обмін даними з сервером Django: отримання списку завдань, документів, даних проб, статусів САРА;
- Data Handler (C# Script) - шар обробки та кешування даних у VR, реалізує авторизацію та синхронізацію;
- PostgreSQL Database - зберігає записи, що генеруються під час VR-сесії (лог дій, результати навчання, звіти); [54].
- Web Dashboard (React) - панель адміністратора, що відображає статистику проходження VR-сценаріїв, звіти про навчання та аудит.

Всередині Unity реалізовано механізм динамічного завантаження контенту (через JSON API), що дозволяє оновлювати дані без перебудови сцени. Наприклад, якщо в системі створюється нова невідповідність, вона автоматично відображається у VR як інтерактивний об'єкт («картка інциденту») [55, 56, 57].

Інтеграція VR-модуля з основною системою побудована на двосторонньому обміні даними через REST API.

Передача інформації реалізується за логікою, що показана на таблиці 3.1:

Для забезпечення синхронізації даних застосовується JWT-аутентифікація та шифрування запитів HTTPS. Після завершення VR-сесії система формує звіт про проходження сценарію, який автоматично зберігається в базі даних і доступний аудиторю або адміністратору через веб-панель.

У модулі реалізовано функцію екологічного трекінгу: в режимі реального часу відображаються показники забруднень (наприклад, концентрація речовин або температурні аномалії) у вигляді кольорових візуальних зон. Ця функція

заснована на даних, що надходять з e-reporting-модуля через API, і може бути розширена при інтеграції з IoT-датчиками або геоінформаційними системами.

Таблиця 3.1

Напрямки обміну даними між сервером та VR-модулем.

Напрямок обміну	Дані	Мета
Сервер → VR	Завдання, журнали, САРА-записи, документи	Завантаження актуальної інформації у VR-середовище
VR → Сервер	Дії користувача, результати навчання, звіти аудиту	Оновлення бази даних та фіксація активності

Демонстраційний прототип VR-модуля реалізований як навчальна сцена «Лабораторія контролю якості». Візуально простір складається з трьох зон:

1. Зона реєстрації проб – робоче місце з інтерактивним планшетом (LIMS-інтерфейс).
2. Зона аналізу – лабораторне обладнання, з яким користувач може взаємодіяти.
3. Зона аудиту – стіл аудитора, на якому відображаються результати аналізу та картки невідповідностей.

Інтерфейс користувача мінімалістичний та інтуїтивний:

- переміщення здійснюється за допомогою контролерів або клавіш;
- дані виводяться у вигляді 3D-панелей;
- документи відкриваються у віртуальних вікнах з можливістю підпису;
- під час виконання сценарію система подає голосові та візуальні підказки.

Наприкінці сеансу користувачеві надається звіт про проходження сценарію, що включає відсоток виконаних дій, допущені помилки та

рекомендації. Цей звіт зберігається в базі даних та доступний для подальшого аналізу у веб-інтерфейсі адміністратора.

Можливі напрямки розвитку VR-модуля:

1. підключення реальних даних з датчиків (IoT) для візуалізації екологічних параметрів у реальному часі;
2. розширення VR-сцен до формату AR (доповнена реальність) для використання в реальних лабораторіях;
3. додавання режиму навчання з ESG та сталого розвитку (модуль корпоративної культури);
4. експорт даних проходження сценаріїв у звітність ISO для оцінки компетенцій персоналу.

3.4. Технічні та організаційні аспекти реалізації

У процесі проектування інтегрованого програмного комплексу було обрано технологічний стек, що забезпечує баланс між функціональністю, надійністю та можливістю подальшого масштабування та який структурований у таблиці 3.2. Основну увагу приділено сумісності компонентів, простоті впровадження та відповідності вимогам до інформаційної безпеки [58, 59].

Таблиця 3.2.

Основні компоненти та технології програмної архітектури системи.

Компонент	Технологія	Призначення
Мова та серверний фреймворк	Python 3.12 + Django	Розробка ядра системи, реалізація REST API, маршрутизація, ORM, управління сесіями
База даних	PostgreSQL 16 (з модулем PostGIS)	Зберігання екологічних даних, лабораторних записів, документів та

		метаданих; підтримка просторових даних
Фронтенд	React + TypeScript	Інтерфейс користувачів (еколог, лаборант, аудитор); візуалізація даних, графіки та звіти
Система звітності	Plotly / Chart.js	Генерація графіків та панелей аналітики
API-архітектура	Django REST Framework	Стандартизована взаємодія між модулями та VR-додатком
Управління файлами та версіями	Django Storages + MinIO	Централізоване зберігання документів та журналів з контролем версій
Інтеграція із зовнішніми системами	REST / JSON / XML	Передача даних в e-reporting, ERP та IoT-системи підприємств

Обраний стек відповідає принципам відкритих технологій (open-source), що робить систему доступною для подальшої адаптації на рівні підприємств. Django забезпечує стабільну серверну архітектуру, PostgreSQL – надійне зберігання великих обсягів даних та геоінформаційні можливості, а React – сучасний інтерфейс з адаптивною версткою та підтримкою модульних панелей,.

VR-компонент комплексу реалізований на базі рушія Unity 2022 LTS з використанням мови C#, що забезпечує кросплатформеність та інтеграцію із зовнішніми API [60].

Усі компоненти продемонстровано у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Технологічна архітектура VR-модуля системи екологічного менеджменту.

Компонент	Технологія	Призначення
Рушій	Unity 3D (HDRP)	Візуалізація сцен, інтерактивна взаємодія, фізична модель середовища
Мова програмування	C#	Логіка поведінки об'єктів, обробка дій користувача
API-інтеграція	UnityWebRequest / REST API	Двосторонній обмін даними з Django
Бібліотеки інтерфейсу	TextMeshPro, XR Interaction Toolkit	Реалізація інтерфейсів, підказок та взаємодій
VR-платформа	Meta Quest / OpenXR	Підтримка автономних та дротових шоломів віртуальної реальності
Середовище збірки	Visual Studio + Unity Hub	Розробка та налагодження коду VR-модуля

Архітектура VR-додатка орієнтована на кросплатформене використання: модуль може запускатися як в автономних VR-шоломах, так і в настільній версії (Standalone Player), що робить демонстраційну реалізацію доступною без спеціалізованого обладнання [61].

Безпека екологічних даних та контроль доступу до документованої інформації є ключовими вимогами до цифрових систем управління якістю. У розробленому комплексі реалізовані такі механізми захисту:

1. Аутентифікація та авторизація. Використовується система JWT-токенів та модель рольового доступу Django (RBAC). Користувач отримує індивідуальні права залежно від посади (еколог, лаборант, аудитор, адміністратор).

2. Шифрування даних. Усі мережеві з'єднання виконуються через протокол HTTPS / TLS 1.3, а конфіденційні дані (паролі, підписи, токени) зберігаються в зашифрованому вигляді з використанням bcrypt та AES-256.

3. Контроль цілісності та версій документів. Кожен документ або запис забезпечується хеш-міткою та міткою часу (timestamp), що забезпечує незмінність та доказовість під час аудитів.

4. Система журналювання (Audit Trail). Усі дії користувачів (створення, зміна, видалення даних, підпис документа) автоматично реєструються в окремій таблиці аудиту із зазначенням часу, IP-адреси та ролі.

5. Резервне копіювання та відновлення. Реалізовано щоденне автоматичне резервування бази даних PostgreSQL та файлового сховища зі зберіганням копій на зовнішньому сервері (off-site backup).

6. Безпека VR-середовища. Передача даних між Unity та Django виконується через API з авторизацією за токеном, що виключає несанкціоновані запити. Усі користувацькі сесії у VR мають обмежений термін дії (session timeout).

7. Відповідність вимогам ISO/IEC 27001. Реалізація захисту даних узгоджена з міжнародними принципами інформаційної безпеки, що застосовуються до корпоративних систем управління.

Ефективність функціонування комплексу залежить від коректного розподілу ролей та прав користувачів, що забезпечує прозорість та керованість процесів екологічного менеджменту [62]. Самі ролі представлені на таблиці 3.4.

Рольова модель користувачів та їхні функціональні можливості в системі

Роль	Основні функції	Доступ
Адміністратор	управління користувачами, налаштування ролей, резервування даних	повний
Еколог	ведення журналів, аналіз даних, реєстрація САРА, формування звітів	обмежений (модулі LIMS, САРА, звітність)
Лаборант	реєстрація проб, введення результатів, робота з журналами повірок	тільки лабораторний контур
Аудитор	перегляд звітів, формування актів перевірки, генерація аудиторських висновків	режим читання та коментарів
Керівництво підприємства	перегляд ключових показників, аналітика, звіти КРІ	тільки візуалізація даних

Для VR-модуля реалізована окрема спрощена схема доступу: користувач авторизується за допомогою корпоративного токена, отримує роль та відповідний сценарій (наприклад, “VR-лаборант” або “VR-аудитор”) [63].

Кожен електронний документ має:

1. ідентифікатор версії (v1.0, v1.1, v2.0 і т. д.);
2. електронний підпис відповідальної особи;
3. статус документа («в роботі», «затверджено», «архівовано»).

У разі коригування документа створюється нова версія зі збереженням попередньої в архіві, що забезпечує повну простежуваність та відповідність вимогам ISO 14001 / 9001 до документованої інформації.

Для впровадження системи на підприємстві передбачені:

- інструкції та навчальні матеріали (PDF, відео);
- VR-тренінги для нових співробітників;
- онлайн-панель зворотного зв'язку та журнал інцидентів для адміністраторів.

Ці елементи забезпечують не лише технічну готовність користувачів, але й розвиток цифрової культури, що підвищує результативність функціонування комплексу. Процес розробки комплексу та сам комплекс показаний на рисунку 3.2, та у додатку А.

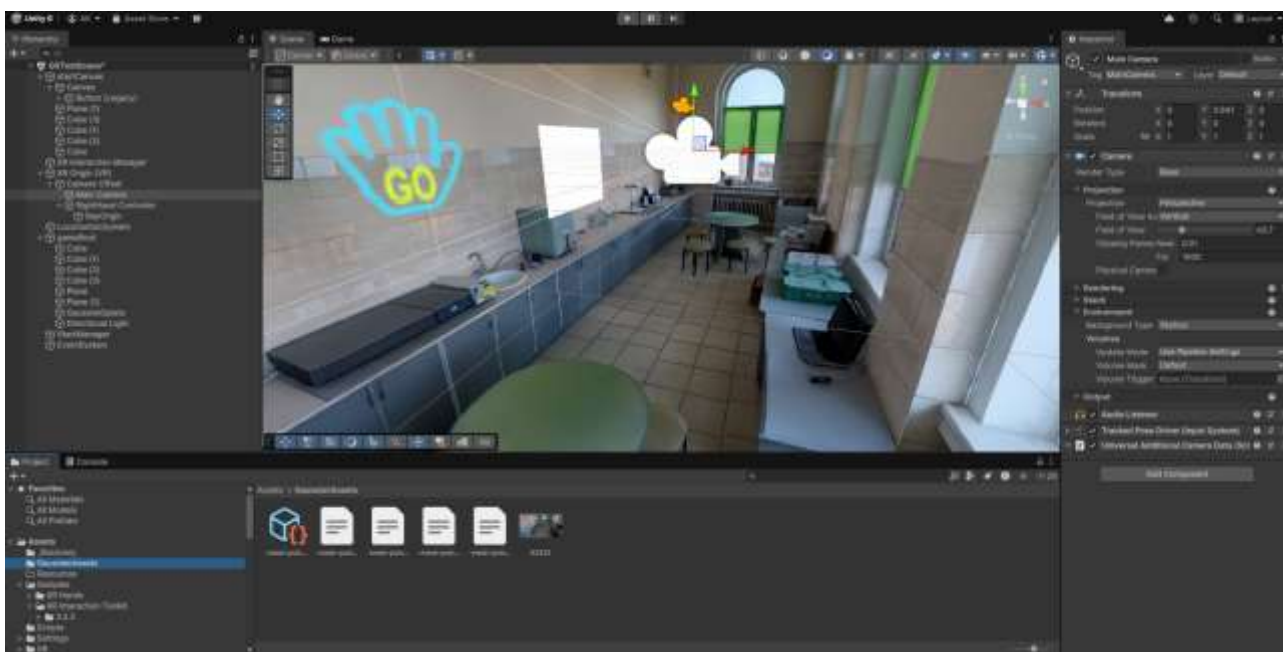


Рисунок 3.2. Створена VR-система з налагодженими модулями віртуальної реальності.

3.5. Ефективність впровадження та очікувані результати

Впровадження інтегрованого програмного комплексу в систему екологічного менеджменту підприємства створює умови для комплексного покращення показників діяльності за рахунок автоматизації, прозорості та

цифрового контролю. Ефективність проявляється на трьох рівнях: екологічному, економічному та організаційному [64].

Екологічні переваги

1. Підвищення достовірності даних моніторингу завдяки централізованому обліку проб, автоматичній перевірці методик та калібрувань обладнання.
2. Зниження ймовірності викидів та забруднень внаслідок своєчасного реагування на невідповідності, зафіксовані в САРМ-модулі.
3. Простежуваність життєвого циклу відходів та викидів, що полегшує підготовку звітності за нормативами e-reporting та національними реєстрами.
4. Моніторинг показників стійкості: ресурсоспоживання, енерговитрати, рівень викидів CO₂ та відходів фіксуються в цифровій панелі КРІ.

Економічні переваги:

1. Скорочення часових витрат на підготовку звітності та документообіг (до 30–40 %), що знижує навантаження на персонал.
2. Оптимізація витрат на паперовий документообіг (офісні матеріали, архівування, зберігання).
3. Зменшення витрат на зовнішні аудити завдяки цифровому контролю процедур якості та внутрішній валідації даних.
4. Підвищення ефективності використання обладнання, оскільки система автоматично нагадує про повірки, ремонти та оновлення методик.

Організаційні переваги:

1. Спрощення взаємодії між відділами (лабораторією, екологічною службою, адміністрацією).
2. Створення цифрового архіву документів, доступного через рольову модель.
3. Зниження ризику помилок та втрати інформації при передачі даних.

4. Підвищення готовності до аудитів та сертифікації за ISO 14001/ 9001, завдяки повній трасованості процесів та версійності документів.

У сукупності це дозволяє перейти від фрагментарної, паперово-орієнтованої моделі до керованої цифрової екосистеми екологічного менеджменту, в якій усі учасники діють у межах єдиного інформаційного простору.

Програмний комплекс забезпечує цифровізацію ключових процедур управління якістю, що безпосередньо впливає на швидкість та точність документообігу. У таблиці 3.5 наведено основні кількісні показники очікуваного покращення.

Таблиця 3.5.

Порівняння ключових показників ефективності до та після впровадження системи

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна, %
Середній час підготовки звіту (1 документ)	2,5 години	1,5 години	-40 %
Середній час реєстрації проби	15 хв	5 хв	-66 %
Кількість невідповідностей, виявлених під час аудиту	10	6	-40 %
Затримки у проведенні повірок обладнання	7 %	<2 %	-70 %

Час відгуку на інцидент (CAPA)	3 дні	1 день	-66 %
Витрати на паперовий документообіг	100 % (база)	40 %	-60 %

Таким чином, система забезпечує значне прискорення документообігу та підвищення прозорості процесів, що підтверджує ефективність цифровізації процедур якості. Крім того, автоматизовані повідомлення, контроль версій та інтеграція з VR-навчанням дозволяють мінімізувати вплив людського фактора, знижуючи ймовірність помилок та втрати даних [65].

VR-модуль комплексу має стратегічне значення не лише як інструмент навчання, але і як засіб формування нової культури екологічної відповідальності.

Освітні ефекти:

- *Імерсивне навчання персоналу.* Співробітники освоюють процедури ISO 14001 / 9001 в інтерактивному середовищі, де кожна помилка або коректна дія негайно відображається в системі. Це підвищує рівень залученості та закріплення знань.
- *Оцінка компетенцій.* Система фіксує проходження VR-сценаріїв, що дозволяє формувати внутрішній рейтинг компетентності та використовувати ці дані під час атестації персоналу.
- *Скорочення потреби в традиційному інструктажі.* Демонстраційні VR-сцени замінюють частину очних занять та інструктажів, знижуючи витрати на навчання.
- *Формування цифрового мислення.* VR-модуль сприяє адаптації співробітників до нових технологій, зміцнює довіру до цифрових процесів.
- *Підвищення екологічної свідомості.* Віртуальні сценарії демонструють вплив виробничих дій на довкілля, формуючи у працівників культуру відповідальності.

- *Зростання мотивації та залученості.* Елементи гейміфікації (бали, статистика, візуальні нагороди) створюють відчуття особистої участі в покращенні системи.

Таким чином, впровадження VR-компонента забезпечує стійкий освітній та культурний ефект, який стає невід'ємною частиною модернізації системи менеджменту якості.

3.6. Перспективи розвитку та масштабування програмного комплексу

Вектор подальшого розвитку програмного комплексу пов'язаний з розширенням функціоналу та включенням технологій геоінформаційного аналізу (GIS) та Інтернету речей (IoT), що дозволить перетворити систему на повноцінну платформу екологічного моніторингу нового покоління.

Інтеграція з ГІС й підключення геоінформаційних інструментів на основі PostGIS та QGIS API дозволить:

1. візуалізувати результати лабораторних аналізів на карті підприємства або регіону;
2. формувати просторові звіти про розподіл забруднень;
3. виявляти зони підвищеного ризику забруднення або невідповідності стандартам [66].

Інтеграція з ГІС також створює передумови для формування регіональних цифрових екологічних паспортів, де всі дані (водні, ґрунтові, атмосферні) об'єднуються в інтерактивному форматі.

Інтеграція з IoT включення IoT-модулів (датчиків контролю повітря, води, температури, шуму, радіації) дозволить:

1. отримувати дані в реальному часі;
2. автоматично формувати повідомлення при перевищенні нормативів;
3. відображати показники у VR-сцені або на панелі аналітики;

Технічно це реалізується через шлюзи MQTT та API-інтеграцію з Django-бекендом, що забезпечує двосторонній обмін даними між фізичними датчиками та цифровою екосистемою. Таким чином, розширення комплексу за рахунок GIS та IoT дозволяє перейти від реактивного до превентивного управління екологічними аспектами, забезпечуючи постійний моніторинг та прогнозування змін у довкіллі.

Розроблений програмний комплекс має модульну архітектуру та відкриту API-інфраструктуру, що забезпечує можливість масштабування рішення на різні типи підприємств — від лабораторій та промислових виробництв до муніципальних екологічних служб.

Напрямки розширення функціоналу:

1. *Додавання модуля ESG-аналітики.* Впровадження показників екологічної, соціальної та управлінської стійкості (Environmental, Social, Governance) для інтеграції з корпоративною звітністю.

2. *Розробка мобільного додатка.* Мобільний інтерфейс для оперативного введення даних про проби та спостереження в польових умовах.

3. *Розширення VR-платформи до AR-режиму.* Можливість використовувати елементи доповненої реальності (AR) для інструктажів та польових аудитів.

4. *Впровадження модуля екологічного аудиту підприємств.* Автоматизоване порівняння показників з нормативами, формування звітів щодо відповідності законодавству.

Перспективи масштабування:

1. використання загальної архітектури SaaS-моделі (Software-as-a-Service) для розгортання в хмарі;

2. створення єдиної корпоративної платформи для мережі підприємств;

Такий підхід робить комплекс універсальною платформою цифрового екологічного управління, сумісною з міжнародними стандартами та готовою до впровадження в межах програм європейської інтеграції та цифрового переходу України [67].

ВИСНОВКИ

1. Проведене дослідження дозволило комплексно оцінити сучасний стан екологічної документації та процедур якості на українських підприємствах. Аналіз показав, що паперовий документообіг, фрагментарність даних та вплив людського фактору істотно знижують результативність екологічного менеджменту, ускладнюють проведення аудитів та уповільнюють ухвалення управлінських рішень.

2. Визначено, що цифрова трансформація є ключовим напрямом розвитку сучасних систем екологічного управління. Її принципи – автоматизація, простежуваність, інтегрованість та зниження впливу людського фактору – забезпечують підвищення точності екологічних даних та ефективності процедур якості. Розгляд сучасних цифрових інструментів показав, що застосування електронного документообігу, хмарних сервісів, автоматичних розрахунків, аналітичних панелей та цифрових журналів формує передумови для побудови єдиного екологічного інформаційного середовища.

3. У межах роботи розроблено концепцію інтегрованого програмного комплексу з VR-модулем для підтримки процедур якості. Побудовано його архітектуру, визначено функціональні зв'язки між модулями, логіку їх взаємодії та принципи забезпечення простежуваності екологічних процесів. VR-модуль обґрунтовано як інноваційний інструмент, що підсилює навчання персоналу, візуалізацію екологічної інформації, моделювання виробничих ситуацій та загальний рівень екологічної компетентності працівників.

4. Показано, що впровадження програмного комплексу забезпечує підвищення ефективності екологічного менеджменту підприємств шляхом скорочення часу на опрацювання документів, зменшення кількості помилок, підвищення прозорості процедур якості, автоматизації обчислень та покращення рівня внутрішнього контролю. Цифровізація екологічної діяльності виступає фундаментом формування сучасної культури якості, сприяє виконанню вимог ISO 14001 та наближає українські підприємства до європейських практик сталого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андреева Н. М. Екологічний менеджмент : навч. посіб. Київ : КНЕУ, 2020. 312 с.
2. Згуровський М. З. Усталений розвиток: глобальні та регіональні аспекти. Київ : НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2021. 420 с.
3. Колот А. М., Герасименко О. О. Соціальна відповідальність бізнесу та сталий розвиток. Київ : КНЕУ, 2022. 368 с.
4. Верховна Рада України. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України № 1264-ХІІ від 25.06.1991 (із змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12>
5. Верховна Рада України. Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України № 2697-VIII від 28.02.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> 6.
- Кабінет Міністрів України. Про затвердження Положення про систему екологічного управління на підприємствах : Постанова № 137 від 12.03.2020. Київ, 2020.
7. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Про затвердження методичних рекомендацій щодо ведення екологічної документації на підприємствах : Наказ № 245 від 15.05.2021. Київ, 2021.
8. International Organization for Standardization. ISO 14001:2015. Environmental management systems — Requirements with guidance for use. Geneva, 2015. 46 p.
9. International Organization for Standardization. ISO 9001:2015. Quality management systems — Requirements. Geneva, 2015. 29 p.
10. International Organization for Standardization. ISO/IEC 17025:2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva, 2019. 29 p.
11. International Organization for Standardization. ISO 19011:2018. Guidelines for auditing management systems. Geneva, 2018. 46 p.

12. United Nations. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York, 2015. 41 p.
13. European Commission. The European Green Deal. Brussels : EU, 2019. 32 p.
14. European Environment Agency. Digitalisation and the environment: Opportunities, challenges and policy options. Copenhagen, 2022. 78 p.
15. European Parliament and Council. Regulation (EC) No 1221/2009 on the voluntary participation by organisations in a Community eco-management and audit scheme (EMAS). Brussels, 2009.
16. European Commission. Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control – IED). Brussels, 2010.
17. European Commission. Directive 2008/98/EC on waste (Waste Framework Directive). Brussels, 2008.
18. World Economic Forum. Global Risks Report 2023. Geneva, 2023. 96 p.
19. OECD. Environmental Performance Review: Green Transition and Environmental Governance. Paris : OECD Publishing, 2022. 210 p.
20. Hąbek P., Wolniak R. Assessing the quality of corporate social responsibility reports: The case of reporting practices in selected European Union member states. *Quality & Quantity*. 2016. Vol. 50, No. 1. P. 399–420. DOI: 10.1007/s11135-014-0155-z.
21. Deloitte Insights. ESG Reporting: Global Benchmark Survey 2023. London : Deloitte, 2023. 54 p.
- 22 KPMG Global. Digital transformation in environmental compliance and ESG data management. Amsterdam : KPMG, 2023. 48 p.
23. Савчук Т. В., Накладюк Н. М. Environmental management system: features of implementation by Ukrainian companies. *Scientific Notes of Lviv University of Business and Law*. 2022. № 35. С. 115–122.
24. Головка Л. Environmental policy integration in Ukraine and the EU. *East European Journal of Sustainable Development*. 2019. Vol. 14, No. 10. P. 20.

25. Лабенко О., Собченко Т., Гуцол Т. та ін. Project environment and outlook within the scope of technologically integrated European Green Deal in EU and Ukraine. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 14. Art. 87.

26. Станьковська І., Смага Л. Research on the impact of digital transformation on the quality of management of industrial enterprises based on sustainable development. *Economics and Management in the Oil and Gas Industry*. 2025. № 1(31). С. 180–189.

27. Beier G., Ullrich A., Niehoff S., Reißig M., Habich M. Potentials of big data for corporate environmental management. *Journal of Industrial Ecology*. 2022. Vol. 26, No. 23. P. 20.

28. Cosio L. D., Buruk O., Fernández Galeote D. Virtual and Augmented Reality for Environmental Sustainability: A Systematic Review. 2025.

29. Lin Z. Virtual Reality-Based Digital Landscape Experience and Human Thermal Comfort under Microclimate Change. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 11. Art. 4366.

30. Keles Y. Virtual Reality – A Tool for Sustainable Development in Tourism and Environment. 2025.

31. Дорошенко Г., Тимченко А. Environmental Management: A View Through the Prism of Today. *Environmental Management (Ins. VNTU)*. 2022. № 3. С. 52-61.

32. Lozan A. E., Kovtunenکو Yu. V., Neykov S. O. The Main Concepts and Practices for Digital Support of Enterprise Management. *Економіка розвитку систем*. 2024. Т. 6, № 1. С. 101-112.

33. World Bank. Ukraine – Country Environmental Analysis. 30 Sept 2025.

34. EU4Environment – Water and Data Programme. Laboratory in Ukraine Achieves International Accreditation with EU Support – Ensuring Quality in Water Monitoring. 15.01.2024. URL: <https://www.eu4waterdata.eu/en/blog-news/34-ukraine/323-laboratory-in-ukraine-achieves-international-accreditation-with-eu-support-ensuring-quality-in-water-monitoring-2.html> (дата звернення: 20.10.2025).

35. EcoPolitic. Velyka A. Ukraine implements new European directive on water monitoring. 09.09.2024. URL: <https://ecopolitic.com.ua/en/news/ukraine-implements-new-european-directive-on-water-monitoring/> (дата звернення: 20.10.2025).

36. Cratia. Laboratory (ISO/IEC 17025). URL: <https://cratia.ua/en/service/laboratory-iso-iec-17025/> (дата звернення: 20.10.2025).

United Nations Industrial Development Organization. Complying with ISO 17025 – A practical guidebook... Vienna, 2009. URL: https://www.unido.org/sites/default/files/2010-08/Complying_with_ISO_17025_A_practical_guidebook_0.pdf (дата звернення: 20.10.2025).

37. United Nations Conference on Trade and Development. The Green and Digital Transition in Manufacturing Global Value Chains in Latecomer Countries // Technology and Innovation Report 2023. March 2023. URL: https://unctad.org/system/files/non-official-document/tir2023_background1_en.pdf (дата звернення: 20.10.2025).

38. LabManager. Mensingh J. Preparing for an ISO/IEC 17025 Accreditation Assessment. 2024. URL: <https://www.labmanager.com/preparing-for-an-iso-iec-17025-accreditation-assessment-33478> (дата звернення: 20.10.2025).

39. Zhurenko V. V., Hutsul T., Honcharenko M. et al. Characteristics of development and dissemination of standards for environmental management systems (EMS): implementation of ISO 14001 and ISO 9001 // Čes. slov. Farm. 2022. Vol. 71. P. 200–213. URL: <https://csfarmacie.cz/pdfs/csf/2022/05/03.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

40. Верховна Рада України. Про електронні документи та електронний документообіг: Закон України № 851-IV від 22.05.2003. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15> (дата звернення: 13.11.2025).

41. Верховна Рада України. Про електронні довірчі послуги : Закон України № 2155-VIII від 5.10.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2155-19> (дата звернення: 13.11.2025).

42. Кабінет Міністрів України. Про Єдину екологічну платформу «ЕкоСистема» : Постанова № 1065 від 11.10.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1065-2021-п> (дата звернення: 13.11.2025).

43. Goel A., Masurkar S., Pathade G. R. An Overview of Digital Transformation and Environmental Sustainability: Threats, Opportunities, and Solutions. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 24. Art. 11079. DOI: 10.3390/su162411079.

44. Zhuo R., Zhou Z., Wang Z., Liu Y. Digitalization Transformation and Enterprise Green Innovation: Empirical Evidence from Chinese Listed Companies. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 12. Art. 1405965.

45. Zatini G., Della Porta A., Za S. Deciphering Barriers and Strategies in Environmental Management Accounting (EMA) Adoption. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2025. Vol. 32, No. 3. P. 3355–3370.

46. Šebo J., Prester J., Šebová M. The Role of Environmental Management Systems and Energy Management Systems in the Adoption of Energy Recuperation Technologies. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, Iss. 24. Art. 16913.

47. Santarius T., Pohl J., Lange S. Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing? *Sustainability*. 2020. Vol. 12, Iss. 18. Art. 7496.

48. Girmay S. Virtual laboratories in chemical and laboratory safety education. *LUMAT-B*. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 1–22.

49. Girmay S., Timonen L., Wirtavuopi R. et al. Enhancing 360° virtual laboratory safety training. *Education for Chemical Engineers*. 2024.

50. Potkonjak V., Gardner M., Callaghan V. et al. Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*. 2016. Vol. 95. P. 309-327.

51. Baceviciute S., Terkildsen T., Makransky G. Investigating the value of immersive virtual reality for learning about sustainability. *Journal of Computer Assisted Learning*. 2021. Vol. 37, No. 5. P. 1146–1160.

52. Оленюк О. А., Семенишена Р. В., Дуганець В. І. Віртуальні лабораторії як інструмент підвищення якості підготовки майбутніх фахівців у сфері енергетики. *Професійно-прикладні дидактики*. 2024. Вип. 2. С. 66–70.

53. Wohner C., Peterseil J., Klug H. Designing and implementing a data model for describing environmental monitoring and research sites. *Ecological Informatics*. 2022. Vol. 70. Art. 101708.

54. Peng Y., Meng L., You L. Spatio-temporal Environmental Monitoring Systems based on PostGIS database and Google Maps mashup. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 644–650. P. 5632–5637.

55. Ng J. D. A., Swee D. W. J., Fung F. M., Wong L. C., Peck T.-G. Leveraging virtual reality to enhance laboratory safety and security inspection training. *Chemistry Teacher International*. 2025. Vol. 7, No. 2. P. 247-258.

56. Chan P. et al. Design and Development of a VR Serious Game for Chemical Laboratory Safety (VR LaboSafe Game). *Lecture Notes in Computer Science*. 2021. P. 1–15.

57. Mystakidis S., Besharat J., Papantzikos G. et al. Design, Development, and Evaluation of a Virtual Reality Serious Game for School Fire Preparedness Training. *Education Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 4. Art. 281.

58. Maphosa N., Dube S. Virtual Reality (VR) Simulation of Chemistry Lab Using Blender and Unity. *The IAFOR International Conference on Education – Hawaii 2023*.

59. Guruloo T. N. M., Osman K. Integrating Virtual Reality Laboratories (VRLs) in Chemistry Education: A Systematic Literature Review. *International Journal of Education*. 2023. Vol. 15, No. 4. DOI: 10.5296/ije.v15i4.21372.

60. Ismael M. A., El-Bakry H. M., Nasr M., El-Bakry M. M. Acceptance of Augmented Reality for Laboratory Safety Training. *Frontiers in Virtual Reality*. 2024. Vol. 5. Art. 1355978.

61. Kitsios F., Kamariotou M. The ISO/IEC 27001 Information Security Management Standard: How to Extract Value from Data in the IT Sector. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 7. Art. 5828.

62. Culot G., Nassimbeni G., Podrecca M., Sartor M. The ISO/IEC 27001 Information Security Management Standard: Literature Review and Theory-based Research Agenda. *The TQM Journal*. 2021. Vol. 33, No. 7. P. 76–105.
63. Sandhu R. S., Coyne E. J., Feinstein H. L., Youman C. E. Role-Based Access Control Models. *IEEE Computer*. 1996. Vol. 29, No. 2. P. 38–47.
64. Kunkel S., Tyfield D. Digital Transformation and Environmental Sustainability in Developing Countries. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2020. Vol. 45. P. 1–7.
65. Ohishi K., Abe K. et al. Complete Paperless Intra-Net Process Management System for ISO9001 Quality and 14001 Environmental Management Systems. *Measuring Business Excellence*. 2002. Vol. 6, No. 3. P. 34–39.
66. Sirre A. L. IoT Environmental Monitoring System Using LoRaWAN and Cloud Computing : Master's Thesis. Barcelona : Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
67. Hong A., Choi D. A., Chung H., Kumar P., Lee J. Environmental and Health Monitoring in Smart Cities: A Systematic Review of Trends, Opportunities, and Challenges. *Sustainable Cities and Society*. 2025.

ДОДАТКИ



Рис. А.3. Використані модулі Unity при створенні VR-простору.