

УДК 504.054

Evgeniy Grechanyuk, Postgraduate student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5687-2269>

Vitalii Ishchenko, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-1096>

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

SUBSTITUTION OF METHODS FOR MANAGEMENT OF POLYMER COMPONENTS OF WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Abstract. *The analytical review is aimed at an expanded study of modern concepts and practical solutions for the management of polymer components of waste electrical and electronic equipment (WEEE), which form rapidly growing technogenic flows and are characterized by increased material and technological complexity. Polymer fractions in WEEE are characterized by low suitability for reuse due to their multicomponent composition, the presence of toxic functional additives, heterogeneous morphology and difficulties in separation from metal, ceramic and composite elements, which exacerbates the problem of transfer of persistent organic pollutants, halogen-containing compounds and thermal degradation products into the environment. Within the framework of the research analysis, infrastructure schemes for the collection and primary treatment of WEEE, including municipal logistics hubs, stationary and mobile collection points, deposit-return mechanisms and extended producer responsibility instruments, were considered, with an assessment of their effectiveness and key limitations. Considerable attention is paid to high-tech solutions, including optical identification systems, robotic dismantling modules, digital trajectory platforms for tracking material flows, intelligent container complexes and sensor Smart Bins. The engineering practices of leading world companies that implement closed polymer cycles, use automated reverse logistics chains and ensure a high level of selective extraction of material fractions are analyzed. The experience of European WEEE pre-processing centers that operate in accordance with EU regulatory standards and demonstrate effective models of selective preparation of polymers for further use is highlighted. Based on the generalized results, a set of scientifically based recommendations has been formed to improve the efficiency of WEEE polymer component management, which involves the integration of innovative technologies, regulatory practices and circular economy principles to minimize environmental risks and improve the resource cycle.*

Keywords: *polymer components, waste recycling, circular economy, automated sorting, reverse logistics, waste collection optimization.*

© Є. Гречанюк, В. Іщенко, 2026

Є. Гречанюк, В. Іщенко

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБІВ УПРАВЛІННЯ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ВІДХОДІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація. Аналітичний огляд спрямований на розширене вивчення сучасних концепцій і практичних рішень щодо управління полімерними складниками відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО), які формують швидкозростаючі техногенні потоки та характеризуються підвищеною матеріальною й технологічною складністю. Полімерні фракції у ВЕЕО вирізняються низькою придатністю до повторного використання через багатокомпонентний склад, наявність токсичних функціональних добавок, різномірність морфології та труднощі відокремлення від металевих, керамічних і композиційних елементів, що загострює проблему перенесення у довкілля стійких органічних забруднювачів, галогеновмісних сполук і продуктів термічного руйнування. У межах дослідницького аналізу розглянуто інфраструктурні схеми збирання та первинної обробки ВЕЕО, що включають муніципальні логістичні вузли, стаціонарні й мобільні пункти приймання, депозитно-поворотні механізми та інструменти розширеної відповідальності виробника з оцінкою їх результативності та ключових обмежень. Значну увагу приділено високотехнологічним рішенням, серед яких оптичні ідентифікаційні системи, роботизовані модулі демонтажу, цифрові траєкторні платформи відстеження матеріальних потоків, інтелектуальні контейнерні комплекси та сенсорні Smart Bins. Проаналізовано інженерні практики провідних світових компаній, що впроваджують замкнуті полімерні цикли, використовують автоматизовані ланцюги зворотної логістики та забезпечують високий рівень селективного вилучення матеріальних фракцій. Висвітлено досвід європейських центрів попереднього оброблення ВЕЕО, які діють відповідно до регуляторних норм ЄС та демонструють ефективні моделі селективної підготовки полімерів до подальшого використання. На основі узагальнених результатів сформовано комплекс науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення ефективності управління полімерними компонентами ВЕЕО, який передбачає інтеграцію інноваційних технологій, регуляторних практик та принципів циркулярної економіки для мінімізації екологічних ризиків і вдосконалення ресурсного циклу.

Ключові слова: полімерні компоненти, переробка відходів, циркулярна економіка, автоматизоване сортування, зворотна логістика, оптимізація збору відходів.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.54-68>

Вступ

Управління відходами електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Згідно з даними Глобального моніторингу електронних відходів [27], у 2019 році в усьому світі було утворено 53,6 мільйона тонн електронних відходів, і цей показник продовжує зростати з середньорічним темпом у 3-4%.

Полімерні компоненти, які становлять значну частину ВЕЕО, є особливо складними для переробки через їхню різноманітність, наявність токсичних добавок та технологічні обмеження [3]. Наприклад, у складі електронних відходів часто зустрічаються такі пластики, як акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полістирол (PS), полікарбонат (PC) та поліпропілен (PP), кожен з яких вимагає специфічних методів переробки.

Ефективне управління полімерними компонентами ВЕЕО має вирішальне значення для зменшення екологічного впливу та реалізації принципів циркулярної економіки. Згідно з дослідженнями [27], лише 17,4% електронних відходів у світі було зібрано та перероблено у 2019 році, що підкреслює необхідність вдосконалення систем збору, сортування та переробки. Полімерні відходи, які не піддаються правильній утилізації, часто потрапляють на звалища, де вони можуть виділяти токсичні речовини, такі як діоксини та фурани, що становить серйозну загрозу для здоров'я людей та навколишнього середовища [5].

Однією з ключових проблем у переробці полімерних компонентів ВЕЕО є їхнє відділення від інших матеріалів, таких як метали, скло та кераміка. Наприклад, у складі електронних пристроїв часто зустрічаються композитні матеріали, які ускладнюють процес сортування. Згідно з дослідженнями [5], наявність домішок у полімерних відходах може знизити їхню придатність для вторинного використання на 50-70%. Тому розробка ефективних методів відділення полімерних компонентів є критично важливою для підвищення якості переробки та зменшення обсягів відходів, що потрапляють на звалища.

Крім того, зростання обсягів електронних відходів супроводжується збільшенням кількості токсичних речовин, які містяться в полімерних компонентах. Наприклад, полівінілхлорид (ПВХ), який широко використовується в електроніці, при механічній обробці може виділяти хлористі сполуки, що є шкідливими для здоров'я працівників [16]. Це підкреслює необхідність розробки безпечних методів обробки полімерних відходів та впровадження сучасних технологій, які дозволяють мінімізувати ризики для здоров'я та навколишнього середовища.

У цьому контексті актуальним є впровадження інноваційних підходів до управління полімерними компонентами ВЕЕО, які включають вдосконалення методів збору, сортування, переробки та розробку нових матеріалів, спрямованих на зменшення екологічного впливу. Наприклад, використання автоматизованих систем сортування, таких як оптичні сепаратори та роботизовані лінії, дозволяє значно підвищити ефективність процесу відділення полімерів від інших матеріалів. Крім того, розробка замкнутих циклів використання полімерів демонструє потенціал для зменшення обсягів відходів та економії ресурсів [7].

Таким чином, управління полімерними компонентами ВЕЕО є комплексним завданням, яке вимагає інтеграції технологічних, екологічних та економічних підходів. У цій роботі розглядаються основні аспекти управління полімерними відходами електричного та електронного обладнання, включаючи аналіз існуючих систем збору, методи сортування та переробки, а також рекомендації щодо оптимізації цих процесів. Метою дослідження є розробка науково обґрунтованих підходів до підвищення ефективності управління полімерними компонентами ВЕЕО, що сприятиме зменшенню екологічного впливу та реалізації принципів циркулярної економіки.

Результати дослідження

Аналіз існуючих систем збирання електронних відходів

Полімерні компоненти відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) становлять значну частину загального обсягу електронних відходів. Їх утилізація та переробка є складною задачею через різноманітність хімічного складу, наявність токсичних добавок та технологічні обмеження. Управління полімерними відходами потребує комплексного підходу, що включає вдосконалення методів збору, сортування, переробки та розробки нових матеріалів, спрямованих на зменшення екологічного впливу.

Ефективне управління полімерними компонентами ВЕЕО починається з їх правильного збору та сортування. Існуючі системи збору, такі як муніципальні пункти, роздрібні точки та мобільні збірні пункти, демонструють різний рівень ефективності. Однак для полімерних відходів ключовим завданням є забезпечення їх відокремлення від інших матеріалів, таких як метали та скло.

Ефективне збирання електронних відходів (ВЕЕО) є першою ланкою в системі їхнього управління, від якої залежить успішність подальшої переробки та мінімізація екологічних ризиків. Сучасні системи збирання базуються на різних організаційних моделях, що враховують економічні, соціальні та технологічні особливості регіонів.

Однією з найпоширеніших моделей є муніципальні пункти збору, організовані органами місцевої влади. Наприклад, у Німеччині мережа стаціонарних пунктів Wertstoffhöfe забезпечує збір до 65% ВЕЕО завдяки широкій доступності для населення [13]. Такі системи дозволяють контролювати якість відходів, але потребують значних витрат на утримання, особливо в сільській місцевості.

У країнах із розвинутою інфраструктурою, як Японія, ключову роль відіграють програми розширеної відповідальності виробників (англ. Extended Producer Responsibility, EPR). Згідно з Законом про переробку побутової техніки, виробники зобов'язані збирати до 80% своєї продукції, що стимулює розробку екологічно більш безпечних приладів [1]. Однак ця модель часто стикається з проблемою контролю за дотриманням зобов'язань виробників, особливо в регіонах із слабким регулюванням.

Роздрібні точки збору, інтегровані в мережі магазинів електроніки, забезпечують зручність для споживачів. У США компанія Best Buy через свою систему прийому старих приладів з 2009 року зібрала 2,7 мільярда фунтів електроніки та техніки для переробки, що робить їх найбільшим роздрібним збирачем електронних відходів у Сполучених Штатах [17]. Незважаючи на ефективність, такі системи обмежені типами відходів, що приймаються, і часто не охоплюють великогабаритну техніку.

Для покращення доступності в провінційних регіонах використовуються мобільні збірні пункти. Так, у Канаді мобільні рішення, як і стаціонарні модульні системи, є однією з ланок в ланцюгу EPR, де виробники фінансують переробку через збори або власні програми повернення товарів. Згідно з національною моделлю, розробленою у 2004 році, такі ініціативи допомагають зменшити частку ВЕЕО на звалищах (історично – 90%), але потребують подальшого вдосконалення. Наприклад, впровадження цільових показників переробки, стимулів для «зеленого» дизайну продуктів та розширення охоплення віддалених регіонів. Технологічні інновації, такі як автоматизовані

сортувальні лінії у Edmonton Waste Management Centre, демонструють потенціал для підвищення ефективності, але їх впровадження вимагає значних інвестицій [11].

Інноваційним рішенням є депозитно-поворотні системи, які мотивують населення повертати відходи через фінансові стимули. У Швеції така модель застосовується для збору батарей, забезпечуючи рівень повернення 65% [12]. Однак адміністративна складність і високі витрати на впровадження роблять її менш привабливою для країн із низьким рівнем доходів. У таких регіонах переважає неформальний сектор: у Гані та Індії до 90% ВЕЕО збираються приватними компаніями, які продають відходи на переробку [20]. Це забезпечує низьку собівартість збору, але супроводжується серйозними ризиками для здоров'я працівників і забрудненням довкілля через відсутність технологій знешкодження.

Ключові виклики систем збирання включають низьку обізнаність населення. Дослідження Євростату [10] показало, що лише 35% споживачів у ЄС знають про наявність пунктів збору ВЕЕО. Оптимізація маршрутів транспортування стала нагальним питанням для країн із розрізною інфраструктурою.

Одним із перспективних напрямків удосконалення систем збирання ВЕЕО є інтеграція цифрових технологій. Зокрема, використання IoT (Internet of Things) для моніторингу стану контейнерів для збору відходів дозволяє оптимізувати маршрути транспортування та зменшити витрати на логістику. Наприклад, у Великій Британії впроваджено систему Smart Bins, яка автоматично повідомляє операторів про заповненість контейнерів, що значно підвищує ефективність збору [1]. Такі рішення також можуть бути корисними для віддалених регіонів, де традиційні методи збору є неефективними.

Ще одним важливим аспектом є розвиток систем зворотної логістики, які забезпечують повернення відходів від споживачів до виробників або переробників. Це вимагає тісної взаємодії між виробниками, роздрібними мережами та логістичними компаніями. Аналіз сучасних кейсів управління полімерними компонентами відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) демонструє, що ефективне впровадження систем зворотної логістики є ключовим елементом у забезпеченні сталого розвитку та переходу до циркулярної економіки. Одним із найбільш показових прикладів є програма Dell «Closed Loop Recycling», яка реалізує замкнутий цикл використання пластику, зібраного зі старих пристроїв, для виробництва нової продукції [9]. Цей підхід не лише зменшує обсяги відходів, що потрапляють на звалища, але й значно скорочує потребу у використанні первинних матеріалів, що суттєво знижує екологічний слід компанії. Аналогічну стратегію впровадила компанія Apple у рамках програми «Apple Trade In», де використання роботів для розбирання пристроїв дозволяє ефективно відокремлювати полімерні компоненти для подальшої переробки [6]. Такі ініціативи підкреслюють важливість інтеграції інноваційних технологій у процеси зворотної логістики.

Іншим важливим аспектом є співпраця між виробниками, роздрібними мережами та логістичними компаніями, що дозволяє створювати ефективні системи збору та транспортування відходів. Наприклад, програма HP «Planet Partners» демонструє, як організований збір та переробка картриджів для принтерів можуть забезпечити значну економію ресурсів і зменшити викиди вуглекислого газу [23]. Подібні механізми активно використовуються

компанією Samsung у рамках ініціативи «Re+», де спеціальні пункти збору та логістичні мережі забезпечують повернення відходів від споживачів до переробних центрів [24]. Ці приклади підкреслюють, що успішна реалізація зворотної логістики вимагає не лише технічних рішень, але й чіткої координації між усіма учасниками ланцюга поставок.

Важливим елементом у глобальному контексті є нормативне регулювання, яке стимулює виробників до впровадження відповідальних практик управління відходами. Директива Європейського Союзу щодо відпрацьованого електричного й електронного обладнання (Директива ВЕЕО) [2] є яскравим прикладом того, як законодавчі ініціативи можуть сприяти розвитку систем зворотної логістики. В рамках цієї директиви виробники зобов'язані забезпечувати збір та переробку електронних відходів, що включає й полімерні компоненти. Це призвело до значного збільшення рівня переробки ВЕЕО у Європі та створення єдиних стандартів для управління відходами. Таким чином, поєднання технологічних, організаційних та нормативних підходів є необхідною умовою для досягнення ефективності управління полімерними відходами електричного та електронного обладнання.

Узагальнюючи, сучасні кейси свідчать про те, що впровадження систем зворотної логістики для управління полімерними компонентами ВЕЕО є комплексним процесом, який вимагає інтеграції інноваційних технологій, тісної взаємодії між учасниками ланцюга поставок та підтримки з боку законодавчих ініціатив. Такі підходи не лише сприяють зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, але й відкривають нові можливості для економії ресурсів та створення доданої вартості в умовах циркулярної економіки. Отже, ключовим напрямком розвитку систем збору ВЕЕО стане інтеграція концепції циркулярної економіки, що передбачає створення замкнених циклів використання ресурсів, де відходи стають сировиною для нових продуктів.

Аналіз існуючих способів та засобів для зберігання електронних відходів

Ефективне зберігання відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) є критичним етапом у системі управління цими відходами, оскільки від нього залежить збереження ресурсів, мінімізація екологічних ризиків та забезпечення ефективності подальшої переробки. Сучасна практика передбачає використання різних методів, кожен із яких має специфічні умови застосування, обмеження та переваги.

Один з поширених підходів – тимчасове зберігання відходів безпосередньо на місці їх утворення, наприклад, на території підприємств або в домогосподарствах. Відходи зберігаються в спеціально відведених зонах, часто у вигляді окремих контейнерів або закритих приміщень. Для запобігання окисненню металів або деградації полімерів необхідний захист від вологості, ультрафіолету та механічних пошкоджень. Наприклад, плати зберігаються в антистатичних упаковках, а корпуси приладів – на палетах з поліетиленовим покриттям. Цей метод зберігання дозволяє зменшити витрати на транспортування шляхом консолідації обсягів, а також сприяє попередньому сортуванню. Проте його основним недоліком є високий ризик пошкодження компонентів, зокрема полімерних елементів, що ускладнює їх подальше використання. Крім того, недотримання норм зберігання (наприклад, захисту від вологості або витоку токсичних речовин) може призвести до забруднення навколишнього середовища.

Спеціалізовані центри зберігання, обладнані системами контролю мікроклімату та механічного захисту, пропонують більш безпечні умови для тимчасового накопичення ВЕЕО. Такі об'єкти здатні вміщувати значні обсяги відходів, що робить їх оптимальними для промислових регіонів або міст із високим рівнем споживання електроніки. Незважаючи на ефективність, їх експлуатація вимагає значних фінансових інвестицій, а також регулярного моніторингу для запобігання корозії чи деградації матеріалів.

Спеціалізовані центри зберігання ВЕЕО є ключовими елементами інфраструктури для ефективного управління електронними відходами. В Європі, наприклад, центр Stena Technoworld (Швеція) інтегрує зберігання з попередньою переробкою: відходи розміщуються в герметичних контейнерах з фільтрами для токсичних випарів, а автоматизовані лінії здійснюють дроблення та сепарацію матеріалів. Об'єкт відповідає вимогам Директиви ЄС 2012/19/ЄС [2], ізолюючи небезпечні компоненти (ртутні лампи, батареї) в окремі зони, і обробляє понад 50 тис. тонн відходів щороку [26].

У Бельгії та Німеччині компанія Sims Lifecycle Services створює умови для зберігання ВЕЕО з точним контролем температури (15–20 °C) та вологості. Її центри обладнані автоматизованими конвеєрами для сортування плат, кабелів і полімерних корпусів, а система рециркуляції повітря з HEPA-фільтрами запобігає поширенню токсинів [25]. Ці технології також знаходять розвиток у нідерландському центрі Coolrec, який спеціалізується на переробці великогабаритних побутових приладів.

Coolrec інтегрує передові рішення [8] четвертої промислової революції, зокрема автоматизовані лінії для обробки складних відходів, такі як унікальна система видалення аміаку з холодильників, що відповідає вимогам WEEE-Labex. Для підвищення якості вторинної сировини центр використовує високоточні сепаратори металів, які дозволяють відокремлювати алюміній, мідь та друковані плати без необхідності експортувати відходи за межі ЄС. Цифрові технології забезпечують моніторинг процесів у реальному часі: дані з вагових систем, транспорту та виробничих ліній автоматично інтегруються в єдину платформу, а будь-які відхилення (наприклад, неповна утилізація пристроїв) фіксуються фотозвітами та негайно передаються клієнтам.

Важливим екологічним досягненням Coolrec стала установка рекуперації видувних агентів, яка замість традиційного стиснення використовує охолодження для зрідження шкідливих речовин, запобігаючи їх потраплянню в атмосферу [8]. Для оптимізації логістики впроваджено цілодобовий безпілотний ваговий термінал, що дозволяє знизити вуглецевий слід за рахунок нічного транспортування та аналізу ефективності перевізників.

В Азії прикладом інноваційного підходу є японський Panasonic Eco Technology Center (PETEC) [21]. Він зберігає та переробляє великогабаритні прилади (кондиціонери, пральні машини) у приміщеннях із регульованою вологістю, що запобігає корозії металів. Для демонтажу складних вузлів використовуються роботизовані системи, але енерговитрати на підтримку мікроклімату залишаються високими. У Південній Кореї центр Korea Environment Corporation (K-eco) поєднує зберігання з енергоефективністю: сонячні панелі забезпечують частину енергії, а вакуумні системи збирають пил під час переробки. Окремі модулі для літєвих батарей обладнані термоконтролем, що знижує ризик пожеж [19].

Проте такі центри такого типу стикаються із серйозними обмеженнями. Вартість їх будівництва сягає \$1–2 млн, а до 30% операційних витрат припадає на енергію для підтримки мікроклімату. Не менш важливим є технічне обслуговування: HEPA-фільтри потребують щорічної заміни, а небезпечні компоненти (наприклад, літєві батареї) – постійного моніторингу. Незважаючи на це, подібні об'єкти залишаються невід'ємною ланкою в ланцюгу переробки ВЕЕО, забезпечуючи безпеку зберігання та підготовку матеріалів до подальшого використання.

Найпоширенішим рішенням залишаються контейнерні системи, розміщені в громадських місцях або на територіях підприємств. Такі контейнери забезпечують доступність для населення та бізнесів, дозволяючи швидко здавати дрібну техніку, кабелі або електронні компоненти. Однак їхня ефективність обмежена невеликою ємністю та низьким рівнем контролю за якістю сортування. Часте сміттєве забруднення або неправильна класифікація відходів призводять до деградації матеріалів, зменшуючи їхню придатність до подальшої переробки.

Альтернативою стають модульні системи зберігання, що поєднують гнучкість і технологічність. Вони дозволяють масштабувати об'єми зберігання залежно від потреб, а також інтегрувати елементи автоматизації – наприклад, сенсори для виявлення типу відходів, вбудовані компактні сортувальні лінії або системи пресування для зменшення обсягів. Такі модулі часто обладнуються QR-кодами або RFID-мітками для відстеження джерела відходів, що підвищує прозорість ланцюга поставок. Проте їхнє впровадження вимагає значних інвестицій у інфраструктуру, а також підготовки персоналу для обслуговування складних механізмів.

Для компаній на кшталт Coolrec або Sims Lifecycle Services модульні системи є проміжною ланкою між збором і глибокою переробкою. Вони дозволяють попередньо відсортувати матеріали, ізолювати небезпечні компоненти (наприклад, акумулятори) та підготувати сировину до подальших технологічних процесів, таких як виділення металів або утилізація токсичних речовин. Це особливо критично для великогабаритних приладів, де навіть незначне забруднення може зробити переробку економічно невігідною.

Тому, важливим аспектом є категоризація відходів на етапі зберігання. Відокремлення полімерних компонентів, металів, плат та інших матеріалів дозволяє зменшити ризик їх взаємного забруднення та підвищити ефективність подальшої переробки. Наприклад, полімери, які контактують з токсичними елементами (свинець, ртуть), можуть втратити властивості, що робить їх непридатними для вторинного використання. Проте організація такого зберігання потребує додаткових площ і логістичних рішень, що не завжди є доступними для малих підприємств або регіонів з обмеженою інфраструктурою.

Таким чином, вибір оптимального способу зберігання ВЕЕО залежить від комплексу факторів: обсягів відходів, їх хімічного складу, наявності фінансових та технічних ресурсів. Найбільш перспективними вважаються комбіновані підходи, які поєднують модульні системи, категоризацію матеріалів із суворим дотриманням екологічних стандартів. Це не лише зменшує вплив на довкілля, але й створює основу для замкнених циклів використання полімерів та інших цінних компонентів електронних відходів.

Оптимізація систем збирання та розміщення електронних відходів

Оптимізація систем збирання та розміщення електронних відходів являє собою комплексний процес модернізації та вдосконалення існуючих методологічних підходів до управління відходами електричного та електронного обладнання, що потребує системного аналізу та врахування множини взаємопов'язаних факторів. Даний процес характеризується необхідністю інтеграції технологічних, економічних та соціальних аспектів з метою створення ефективної системи поводження з електронними відходами. При цьому особлива увага приділяється оптимізації матеріальних та інформаційних потоків, що забезпечують безперервність та ефективність процесу збору та подальшої переробки відходів.

Фундаментальним аспектом даної оптимізації виступає створення раціональної інфраструктури збору, що базується на науково обґрунтованому розміщенні стаціонарних та мобільних пунктів прийому з урахуванням демографічних показників та територіального розподілу населення. Важливим етапом проєктування такої інфраструктури є проведення детального аналізу просторового розподілу джерел утворення електронних відходів, що включає дослідження щільності населення, рівня економічного розвитку регіонів, специфіки споживання електронної техніки різними категоріями населення. На основі отриманих даних здійснюється математичне моделювання оптимального розташування пунктів збору з використанням методів просторового аналізу та геоінформаційних технологій.

Суттєвим аспектом оптимізації є врахування сезонних коливань у обсягах утворення електронних відходів та специфіки їх компонентного складу. Це дозволяє забезпечити адаптивність системи збору та її здатність ефективно функціонувати в умовах змінного навантаження. При проєктуванні інфраструктури збору також враховуються технічні характеристики транспортних засобів, що використовуються для перевезення відходів, та особливості дорожньої мережі, що впливають на доступність пунктів збору для населення та ефективність логістичних операцій.

Важливо відзначити, що створення раціональної інфраструктури збору електронних відходів повинно супроводжуватися розробкою відповідного інформаційного забезпечення, яке включає системи обліку та контролю руху відходів, бази даних про джерела їх утворення та методи переробки, а також засоби інформування населення про можливості та правила здачі відпрацьованої техніки. Це дозволяє забезпечити прозорість процесів управління відходами та підвищити рівень залучення населення до їх роздільного збору.

Імплементація автоматизованих систем сортування та первинної обробки електронних відходів безпосередньо у пунктах збору зумовлює значне підвищення ефективності логістичних процесів. Зазначені системи забезпечують селективну сепарацію компонентів відповідно до їх фізико-хімічних властивостей, що суттєво оптимізує подальші процеси переробки та утилізації.

Особливої уваги заслуговує питання проєктування та експлуатації спеціалізованих сховищ тимчасового зберігання електронних відходів, що являє собою складну інженерно-технічну задачу. Дані об'єкти повинні відповідати комплексу технічних вимог щодо підтримання оптимальних параметрів мікроклімату, що є критично важливим для запобігання деградації

полімерних компонентів та емісії токсичних речовин. При цьому особлива увага приділяється системам вентиляції та кондиціонування, які повинні забезпечувати не лише підтримання заданих параметрів температури та вологості, але й ефективне видалення потенційно небезпечних газоподібних продуктів розкладання полімерів. Технічне оснащення сховищ має включати автоматизовані системи контролю температури та вологості та забезпечення протипожежної безпеки, інтегровані з центральною системою моніторингу та управління.

Важливим аспектом проєктування сховищ є розробка систем сортування та розміщення відходів з урахуванням їх хімічного складу та потенційної небезпеки. Це передбачає створення окремих секцій для зберігання різних типів електронних відходів, обладнаних спеціальними системами нейтралізації можливих викидів та захисту від протікання небезпечних речовин. Особлива увага приділяється системам зберігання акумуляторів та інших компонентів, що містять важкі метали та токсичні сполуки.

Економічний аспект оптимізації базується на розробці та впровадженні науково обґрунтованих механізмів економічного стимулювання, що враховують специфіку місцевих ринків вторинної сировини та потенціал переробки різних компонентів електронних відходів. Емпіричні дослідження демонструють високу ефективність впровадження депозитно-повернених систем та програм матеріального заохочення населення до відповідального поводження з електронними відходами. При цьому важливим є врахування регіональних особливостей формування тарифів на переробку та утилізацію відходів, а також розробка механізмів компенсації витрат на транспортування та зберігання.

Інтеграція вищезазначених компонентів у єдину систему потребує застосування системного підходу та проведення комплексного аналізу взаємозв'язків між окремими елементами, що включає оцінку технологічних, економічних та екологічних аспектів. Впровадження оптимізаційних заходів призводить до підвищення коефіцієнта вилучення цінних компонентів та зниження негативного впливу на навколишнє середовище. При цьому необхідним є проведення регулярного моніторингу ефективності впроваджених заходів з використанням сучасних методів статистичного аналізу та математичного моделювання для своєчасного коригування параметрів системи.

Суттєвим елементом оптимізації є впровадження систем автоматизованого контролю якості відсортованих матеріалів, що дозволяє підвищити ефективність подальшої переробки та знизити витрати на додаткове сортування. Такі системи можуть включати спектральні аналізатори для визначення складу полімерних матеріалів, рентгено-флуоресцентні аналізатори для ідентифікації металів, а також системи машинного зору для сортування компонентів за зовнішніми ознаками.

Рекомендації щодо відділення полімерних компонентів електронного обладнання

У процесі управління відходами електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) особливу увагу слід приділити відділенню полімерних компонентів, оскільки це суттєво впливає на ефективність подальшої переробки та утилізації матеріалів. На основі проведених досліджень можна сформулювати наступні рекомендації щодо оптимізації цього процесу.

Перш за все, необхідно забезпечити попереднє сортування ВЕЕО за категоріями обладнання. Це дозволяє врахувати особливості конструкції різних типів пристроїв та застосувати найбільш ефективні методи демонтажу для кожної категорії. Наприклад, корпусні деталі комп'ютерної техніки зазвичай кріпляться за допомогою гвинтових з'єднань, тоді як побутова техніка часто має зварні або клейові з'єднання, що вимагає різних підходів до розбирання.

Візуальна ідентифікація типів полімерів є критично важливим етапом у процесі управління відходами електричного та електронного обладнання (ВЕЕО). Цей процес дозволяє швидко і точно визначити типи пластиків, що містяться в електронних відходах, що, в свою чергу, сприяє їх ефективному сортуванню та переробці.

Рекомендується використовувати маркування відповідно до стандарту ISO 11469 [18], яке зазвичай наноситься на великі пластикові деталі. Це маркування дозволяє відразу розділяти основні види термопластів, такі як акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полістирол (PS), полікарбонат (PC) та поліпропілен (PP). Наприклад, ABS використовується для виробництва корпусів комп'ютерів і моніторів, тоді як PS застосовується для виготовлення упаковки та ізоляційних матеріалів. Полікарбонат часто використовується для виробництва прозорих вставок і панелей, а поліпропілен знаходить застосування в різноманітних деталях електронних пристроїв.

Використання маркування за стандартом ISO 11469 [18] забезпечує чистоту відсортованих фракцій, що є важливим для подальшої переробки. Чисті фракції полегшують процес рециклінгу, зменшуючи ризик забруднення та підвищуючи якість вторинних матеріалів. Правильна ідентифікація та сортування пластикових компонентів ВЕЕО можуть суттєво зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Це також сприяє реалізації принципів циркулярної економіки, де відходи перетворюються на ресурси, що повторно використовуються у виробництві.

Для підвищення ефективності відділення полімерних компонентів доцільно розробити технологічні карти розбирання типового обладнання. Такі карти повинні містити послідовність операцій демонтажу, необхідний інструмент та особливості конструктивних з'єднань. Це значно прискорює процес та знижує ризик пошкодження деталей. Згідно з дослідженнями [16], розробка детальних технологічних карт дозволяє зменшити час розбирання обладнання на 20-30%, а також знизити кількість пошкоджень матеріалів.

При механічному відділенні полімерних компонентів слід враховувати наявність металевих вставок, армуючих елементів та інших композитних матеріалів. Рекомендується використовувати спеціалізований інструмент, який мінімізує утворення сколів та пилу. Особливу увагу варто приділити техніці безпеки, оскільки деякі полімери при механічній обробці можуть виділяти шкідливі речовини. Наприклад, полімерні матеріали, такі як ПВХ, при механічній обробці можуть виділяти хлористі сполуки, що є токсичними для людини [16].

Для великогабаритного обладнання ефективним є застосування напівавтоматичних ліній розбирання. Такі лінії повинні бути обладнані конвеєрними системами, робочими станціями для різних операцій та контейнерами для роздільного збору матеріалів. Це дозволяє організувати потоковий процес та підвищити продуктивність праці. Як зазначають дослідники [15], використання напівавтоматичних ліній дозволяє збільшити продуктивність на 40-50% порівняно з ручним розбиранням.

З метою підвищення якості відсортованих полімерів рекомендується проводити додаткову очистку від забруднень та видалення металевих включень. Для цього можуть використовуватися методи флотації, магнітної сепарації та промивки спеціальними розчинами. Важливо враховувати, що наявність домішок суттєво знижує можливості подальшої переробки полімерів.

Необхідно також забезпечити належні умови зберігання відсортованих полімерних компонентів. Рекомендується використовувати закриті контейнери або біг-беги, які захищають матеріал від атмосферних впливів та забруднень. Важливо організувати маркування та облік відсортованих фракцій для подальшої логістики. Як зазначають експерти [14], правильне зберігання та маркування полімерних матеріалів є ключовим фактором для їхньої ефективної переробки та повторного використання. Впровадження запропонованих рекомендацій дозволить оптимізувати процес відділення полімерних компонентів ВЕЕО та підвищити економічну ефективність їх подальшої переробки. При цьому слід регулярно проводити моніторинг та оцінку ефективності застосованих методів з метою їх удосконалення та адаптації до змін у конструкції сучасного електронного обладнання.

Висновки

Управління полімерними компонентами відходів електричного та електронного обладнання (ВЕЕО) є складною та багатоаспектною проблемою, яка потребує інтеграції технологічних, екологічних та економічних підходів. Полімерні матеріали, що становлять значну частину ВЕЕО, характеризуються різноманітністю хімічного складу, наявністю токсичних добавок та технологічними обмеженнями, що ускладнює їх переробку. Невідповідна утилізація таких відходів призводить до серйозних екологічних наслідків, включаючи забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами та втрату цінних ресурсів, які могли б бути повторно використані в рамках циркулярної економіки.

Ефективне управління полімерними компонентами ВЕЕО починається з їх правильного збору та сортування. Існуючі системи збору, такі як муніципальні пункти, роздрібні точки та мобільні збірні пункти, демонструють різний рівень ефективності. Однак ключовим завданням є забезпечення відокремлення полімерних відходів від інших матеріалів, таких як метали та скло, що вимагає впровадження інноваційних технологій сортування, зокрема автоматизованих систем та оптичних сепараторів. Важливим елементом є також розвиток систем зворотної логістики, які забезпечують повернення відходів від споживачів до виробників або переробників, що сприяє замкнутим циклам використання ресурсів.

Зберігання ВЕЕО є критичним етапом у системі управління цими відходами, оскільки від нього залежить збереження ресурсів та мінімізація екологічних ризиків. Спеціалізовані центри зберігання, обладнані системами контролю мікроклімату та автоматизованими лініями сортування, демонструють високу ефективність, але вимагають значних фінансових інвестицій. Для покращення доступності та ефективності зберігання рекомендується використання модульних систем, які дозволяють масштабувати обсяги зберігання та інтегрувати елементи автоматизації.

Категоризація відходів на етапі зберігання, зокрема відокремлення полімерних компонентів від інших матеріалів, є важливим кроком для підвищення якості подальшої переробки.

Оптимізація систем збору та розміщення ВЕЕО вимагає комплексного підходу, що включає створення раціональної інфраструктури збору, врахування сезонних коливань у обсягах утворення відходів та інтеграцію автоматизованих систем сортування. Важливим елементом є також проектування спеціалізованих сховищ тимчасового зберігання, які повинні відповідати вимогам щодо підтримання оптимальних параметрів мікроклімату та забезпечення протипожежної безпеки. Економічний аспект оптимізації включає розробку механізмів економічного стимулювання, таких як депозитно-повернені системи, що сприяють залученню населення до відповідального поводження з відходами.

Відділення полімерних компонентів ВЕЕО є ключовим етапом у процесі їх переробки. Для підвищення ефективності цього процесу рекомендується використання маркування за стандартом ISO 11469, що дозволяє швидко ідентифікувати типи пластиків та забезпечити чистоту відсортованих фракцій. Розробка технологічних карт розбирання типового обладнання, використання спеціалізованого інструменту та напіваавтоматичних ліній розбирання дозволяють значно прискорити процес та знизити ризик пошкодження матеріалів. Додаткова очистка відсортованих полімерів від забруднень та металевих включень є важливим кроком для підвищення якості вторинної сировини.

Узагальнюючи, управління полімерними компонентами ВЕЕО вимагає інтеграції інноваційних технологій, тісної взаємодії між учасниками ланцюга поставок та підтримки з боку законодавчих ініціатив. Впровадження запропонованих підходів дозволить не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, але й створити нові можливості для економії ресурсів та реалізації принципів циркулярної економіки. Регулярний моніторинг та оцінка ефективності застосованих методів є необхідними для їх удосконалення та адаптації до змін у конструкції сучасного електронного обладнання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Bublyk, M. I. (2012). Mekhanizm rehuliuвання tekhnohennykh zbytkiv promyslovykh pidpriemstv: lohistyka retsykluvannya yak instrument yoho zastosuvannya *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*, (749), 530–537. (In Ukrainian). [Бублик, М. І. (2012). Механізм регулювання техногенних збитків промислових підприємств: логістика рециркулювання як інструмент його застосування. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. № 749: Логістика. С. 530–537].
2. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (2012). [Директива Європейського Парламенту і Ради 2012/19/ЄС від 4 липня 2012 року про відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО)]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_030-12#Text
3. Kolomiets, T. M., Karavaiev, T. A., & Hlushkova, T. H. (2021). Polimerni vidkhody: problemy nakopychennia ta vtorynoi pererobky. *Visnyk LTEU. Tekhnichni nauky*, (26). (In Ukrainian). [Коломієць, Т. М., Караваєв, Т. А., Глушкова, Т. Г. (2021). Полімерні відходи: проблеми накопичення та вторинної переробки. *Вісник LTEU, Технічні науки*. № 26]. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-12>
4. Aizawa, H., Yoshida, H., & Sakai, S. (2008). Current results and future perspectives for Japanese recycling of home appliances. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(12), 1399–1410. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.013>

5. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
6. Apple. (n.d.). *Apple Trade In*. <https://www.apple.com/shop/trade-in>
7. Dell Technologies. (2020). *Closed loop recycling program*. <https://www.dell.com/uk-ua/lp>
8. Coolrec plastics. <https://www.coolrec.com/en/plastics>
9. Dell Technologies. (2024). *Environmental, social and governance report*. <https://www.delltechnologies.com/asset/en-ca/solutions/business-solutions/briefs-summaries/delltechnologies-fy24-esg-report.pdf>
10. Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat>
11. Schroeder & Schroeder. (n.d.). *E-waste management in Canada*. <https://schroeder-inc.com/white-papers/e-waste-management-in-canada/>
12. Forti, V., Baldé, C. P., & Kuehr, R. (2018). *E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators* (2nd ed.). United Nations University. ViE – SCYCLE, Bonn, Germany.
13. Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The global e-waste monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential*. United Nations University; UNITAR; ITU; ISWA. Bonn/Geneva/Rotterdam.
14. Garcia, J. M., & Robertson, M. L. (2017). The future of plastics recycling. *Science*, 358(6365), 870–872. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0324>
15. Gutowski, T. G., Dahmus J., Thiriez A. (2011). Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes. *Proceedings of the ICE, Energy 2*. 2006, 1-15. https://www.researchgate.net/publication/228347560_Electrical_Energy_Requirements_for_Manufacturing_Processes
16. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
17. Best Buy. (2023). *How to recycle (or trade in) your old tech*. <https://corporate.bestbuy.com/2023/how-to-recycle-or-trade-in-your-old-tech/>
18. ISO 11469:2016. Plastics – Generic identification and marking of plastics products. Published (Edition 3, 2016). <https://www.iso.org/standard/63434.html>
19. Korea Environment Corporation. <https://www.keco.or.kr/en/index.do>
20. Lundgren, K. (2012). *The global impact of e-waste: Addressing the challenge*. International Labour Office. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%E2%80%94dialogue/%E2%80%94sector/documents/publication/wcms_196105.pdf
21. Panasonic eco technology center. <https://panasonic.net/eco/petec/>
22. Ragaert, K., Delva, L., & Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
23. HP. (n.d.). *Repurpose and recycle today*. <https://www.hp.com/us-en/sustainable-impact/planet-product-recycling.html>
24. Office of Sustainable Solutions. (2023, January 24). Samsung оголошує про нову екологічну стратегію для боротьби зі зміною клімату [Samsung оголошує про нову екологічну стратегію для боротьби зі зміною клімату]. <https://ukraine-oss.com/samsung-ogoloshuye-pro-novu-ekologichnu-strategiyu-dlya-borotby-zi-zminoyu-klimatu/>
25. Sims lifecycle services. <https://www.simslifecycle.com/>
26. Stena technoworld. <https://www.stenarecycling.com/>
27. E-waste Monitor. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020 – Quantities, flows, and the circular economy potential*. <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>

Стаття надійшла до редакції 03.12.25, надійшла після рецензування 23.01.26, прийнята 25.02.26

The article was received 03.12.25, received after revision 23.01.26, accepted 25.02.26

Євгеній Гречанюк

аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет

Адреса робоча: 21000, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5687-2269>

Віталій Іщенко

кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет

Адреса робоча: 21000, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-1096>