

©2026 ПОЛИНЯК В. В.

Полиняк В. В. Імплементация стандартів HAZMAT-логістики США в парадигму циркулярної економіки України

Ключові слова: логістика небезпечних вантажів; система HAZMAT; циркулярна економіка; зворотна логістика; цифрова логістика; управління ризиками; ланцюги постачання; українська система логістики; стандарти логістики США.

Поляняк Володимир Васильович – доктор філософії, викладач кафедри підприємництва і торгівлі, Західноукраїнський національний університет (вул. Львівська, 11, Тернопіль, 46009, Україна)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6033-7332>

Polynyak V. V. Implementation of U.S. HAZMAT Logistics Standards in the Circular Economy Paradigm of Ukraine

Keywords: hazardous materials logistics; HAZMAT; circular economy; reverse logistics; digital logistics; risk management; supply chains; Ukrainian logistics system; U.S. logistics standards.

Polynyak Volodymyr V. – PhD, Lecturer of the Department of Entrepreneurship and Trade, West Ukrainian National University (11 Lvivska Str., Ternopil, 46009, Ukraine)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6033-7332>

щоденно транспортується понад 1 млн партій небезпечних матеріалів різними видами транспорту, що підкреслює високий рівень ризиків та необхідність ефективного регуляторного контролю.

Отже, саме створена у США система регулювання HAZMAT-логістики вважається однією з найбільш розвинених у світі та базується на комплексному підході до забезпечення безпеки

транспортування, який містить класифікацію, маркування, пакування, навчання персоналу та управління ризиками. Центральну роль у цьому процесі відіграє Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, яка забезпечує розробку та впровадження нормативних стандартів (Hazardous Materials Regulations [1]), спрямованих на мінімізацію загроз для життя, майна та довкілля. Ознайомлення з чинною практикою свідчить, що сучасні тенденції розвитку цих стандартів демонструють орієнтацію не лише на безпеку, але й на підвищення ефективності, цифровізацію та гармонізацію з міжнародними вимогами [2].

Паралельно у світовій економіці формується нова модель розвитку – циркулярна економіка, яка передбачає інтеграцію процесів повторного використання, переробки та замкнутих матеріальних потоків у виробничо-логістичні системи. У цьому контексті управління небезпечними матеріалами набуває подвійного значення: з одного боку, як фактор підвищеного ризику, з іншого – як потенційне джерело ресурсів у рамках циркулярних ланцюгів. Зокрема, сучасні підходи до HAZMAT-пакування та транспортування все частіше орієнтуються на багаторазове використання, довговічність та відповідність принципам сталого розвитку, що прямо пов'язує HAZMAT-логістику з концепцією циркулярної економіки [3]. З огляду на коло питань, які зазначені як важливі в контексті предмета дослідження, піднята проблематика є актуальною як з точки зору науки, так із позицій практики.

Аналіз останніх досліджень. Проблематиці транспортування небезпечних вантажів присвячено ряд наукових праць дослідників у сфері логістики, зокрема, таких учених, як Erkut E., Verter V., Finnveden G., Hauschild M., Alp E., Börjeson N., Agerstrand M., Щербина В., Трушкіна Н., Селіванова Н. та ін. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що транспортування небезпечних матеріалів (*hazardous materials transportation*) є високоризиковим сегментом логістики, який потребує окремих моделей управління, регулювання та оптимізації маршрутів, враховуючи вплив на безпеку, довкілля та економічну стабільність [4]. Зростання обсягів перевезення небезпечних вантажів у глобальних ланцюгах постачання обумовлює необхідність переходу від традиційних підходів до інтегрованих систем управління ризиками, що базуються на цифрових технологіях, багатокритеріальних моделях і принципах стійкості (*supply chain resilience*) [5].

Водночас сучасна наукова література демонструє, що логістика поступово трансформується у напрямі циркулярної економіки, яка передбачає

впровадження замкнутих матеріальних потоків, реверсивної логістики та повторного використання ресурсів. Зокрема, інтеграція принципів *circular economy* в логістичні системи забезпечує скорочення відходів, підвищення ресурсоефективності та зниження екологічного навантаження через використання таких інструментів, як багаторазове пакування, реверсивна логістика та менеджмент способу життя [6].

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено поєднанню управління небезпечними матеріалами з циркулярними моделями. Так, новітні роботи підкреслюють, що токсичні матеріали можуть розглядатися не лише як джерело ризику, але і як потенційний ресурс у рамках замкнутих ланцюгів постачання, за умови впровадження цифрових платформ, прозорості даних та контролю життєвого циклу продукції. При цьому цифровізація (blockchain, IoT, AI) виступає ключовим елементом інтеграції безпеки та циркулярності, забезпечуючи відстеження, контроль та оптимізацію потоків небезпечних вантажів у режимі реального часу [7].

Виділення невирішених раніше частин проблеми. Попри правильну ідентифікацію в існуючих наукових розвідках сучасних тенденцій і проблем у розвитку логістики небезпечних вантажів, інформації про доцільність імплементації в логістику елементів циркулярної економіки, предмет дослідження в них охоплює одиничні аспекти проблеми, не розглядається як інтегрована система знань, теоретико-методичних і прикладних засад щодо формування інтегрованого підходу до управління HAZMAT-логістикою на засадах циркулярної економіки, що поєднує безпеку, ресурсоефективність та екологічну відповідальність. У розглянутих працях недостатньо враховані виклики, які актуалізують проблематику дослідження для країни, яка піддана агресії та знаходиться у стані війни. Для України актуальність дослідження посилюється впливом воєнних дій, руйнуванням логістичної інфраструктури та зростанням техногенних ризиків. В умовах післявоєнного відновлення та євроінтеграції виникає потреба модернізації системи управління небезпечними вантажами відповідно до міжнародних стандартів. Водночас національна система HAZMAT-регулювання характеризується фрагментарністю нормативної бази, недостатнім рівнем контролю та обмеженою інтеграцією з принципами сталого розвитку і циркулярної економіки.

Додатковим чинником загострення уваги до зазначеної проблеми є необхідність гармонізації законодавства з європейськими екологічними

політиками та міжнародними стандартами перевезення небезпечних вантажів. У цьому контексті імплементація передових практик, зокрема стандартів HAZMAT-логістики США, може стати ефективним інструментом трансформації національної логістичної системи.

Таким чином, наукова актуальність дослідження полягає в необхідності формування інтегрованого підходу до управління HAZMAT-логістикою в Україні на засадах циркулярної економіки, що поєднує безпеку, ресурсоефективність та екологічну відповідальність. Предметом дослідження є теоретико-методичні та прикладні засади інтеграції стандартів HAZMAT-логістики в систему циркулярної економіки, розробка механізмів управління ризиками, цифровізації та побудови замкнутих матеріальних потоків у процесі транспортування небезпечних вантажів.

Іншими словами, предмет дослідження охоплює: 1) механізми управління ризиками в HAZMAT-логістиці; 2) інструменти цифровізації (IoT, AI, blockchain) у транспортуванні небезпечних матеріалів; 3) процеси інтеграції HAZMAT-логістики в замкнуті (*circular*) ланцюги постачання; 4) моделі підвищення безпеки та ресурсоефективності логістичних систем.

Це дозволяє розглядати HAZMAT-логістику не лише як систему забезпечення безпеки, але як складову сталих та циркулярних логістичних систем, що формує новий науковий підхід до управління небезпечними матеріалами в умовах трансформації економіки.

Метою дослідження є розробка теоретико-методичних засад і прикладної моделі імплементації стандартів HAZMAT-логістики США в парадигму становлення системи циркулярної економіки України на основі інтеграції підходів управління ризиками, цифровізації та замкнутих матеріальних потоків у логістичних ланцюгах.

Таке формулювання мети обумовлено тим, що сучасні дослідження розглядають транспортування небезпечних матеріалів як складну багатокритеріальну систему, де ключову роль відіграють моделі оптимізації маршрутів, управління ризиками та забезпечення безпеки у умовах невизначеності [8]. Водночас новітні наукові роботи доводять, що ефективне управління небезпечними матеріалами потребує інтеграції всіх стадій життєвого циклу – від генерації до утилізації – із застосуванням принципів циркулярної економіки та цифрових технологій [9].

Крім того, сучасні підходи до розвитку логістичних систем демонструють перехід до *circular supply chains*, де поєднуються економічна ефектив-

ність, екологічна безпека та ресурсоефективність. У цьому контексті інтеграція стандартів HAZMAT-логістики з принципами циркулярної економіки дозволяє не лише мінімізувати ризики, але й трансформувати небезпечні матеріали у вторинні ресурси в рамках замкнутих ланцюгів постачання [10]. Однак об'єднання зазначених наукових поглядів на засадах єдиної науково-методичної бази для вибудови процесу прикладного впровадження не набуло довершеності. З огляду на це, пропонуємо авторське вирішення цього завдання.

Опис методики дослідження. Методика дослідження ґрунтується на синтезі міжнародних регуляторних підходів, зокрема стандартів Адміністрації з безпеки трубопровідного транспорту та небезпечних матеріалів (*Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA*) та концепцій ланцюгів постачання. Застосовано методи порівняльного аналізу, методи узагальнення, зокрема стосовно узагальнення кейсів, моделювання.

Викладення основного матеріалу. Вихідною позицією будь-якого дослідження є обґрунтування його теоретичних засад. З огляду на це, необхідно розглянути наукові підходи щодо вирішення цієї проблеми її дослідниками.

Зазначимо, що сучасні трансформації логістичних систем відбуваються під впливом переходу до циркулярної економіки, яка розглядається українськими науковцями як стратегічна модель сталого розвитку, що забезпечує замкнутість матеріальних потоків і мінімізацію втрат ресурсів. Зокрема, у дослідженнях В. Щербини наголошується, що впровадження принципів циркулярної економіки сприяє трансформації традиційних логістичних систем у замкнуті виробничо-логістичні моделі, орієнтовані на повторне використання ресурсів, зниження відходів та підвищення ефективності їх використання [11].

Розвиваючи даний підхід, українські дослідники акцентують увагу на ролі логістики як ключового елемента циркулярної економіки. Зокрема, у праці Н. В. Трушкіної підкреслюється, що циркулярна економіка передбачає трансформацію традиційних виробничо-логістичних систем у комплексні системи управління матеріальними потоками, орієнтовані на повторне використання ресурсів, мінімізацію відходів і продовження життєвого циклу продукції [12, с. 9–12].

Сучасні економічні системи мають формуватися на основі інтеграції інноваційних управлінських підходів, які забезпечують поєднання економічної результативності з екологічною відповідальністю та здатністю організацій до адаптації. Такий підхід закладає основу для розвитку новіт-

ніх логістичних моделей, орієнтованих на принципи сталого розвитку. У цьому контексті особливого значення набуває управління небезпечними матеріалами (HAZMAT), яке в сучасних умовах розглядається як високоризикова сфера логістики. Міжнародні дослідження доводять, що транспортування небезпечних вантажів потребує застосування багатокритеріальних моделей управління, які враховують ризики аварій, екологічні наслідки та соціальні фактори [13]. Додатково підкреслюється важливість ризик-орієнтованого підходу до планування маршрутів перевезень [14].

Інтеграція HAZMAT-логістики в парадигму циркулярної економіки формує новий науковий підхід, у межах якого небезпечні матеріали розглядаються не лише як джерело ризику, але й як потенційний ресурс у системі замкнутих матеріальних потоків. Проте, як зазначають сучасні дослідження, без належного контролю це може призвести до повторного поширення токсичних речовин у виробничих циклах, що вимагає впровадження концепції *“non-toxic circular supply chains”* [15].

Важливим теоретичним підґрунтям є також концепція життєвого циклу, яка передбачає управління матеріалами на всіх етапах їх існування. Як зазначає Finnveden G., інтеграція підходу оцінювання життєвого циклу (LCA) дозволяє оцінювати екологічні наслідки логістичних процесів та забезпечувати баланс між економічними та екологічними цілями [16].

Таким чином, сучасні теоретичні засади дослідження мають формуватися на основі синтезу українських наукових підходів до

циркулярної економіки, міжнародних концепцій управління ризиками у HAZMAT-логістиці та підходу життєвого циклу. Їх інтеграція дозволяє сформувати нову концепцію логістичних систем, що поєднують безпеку, ресурсоефективність та екологічну стійкість (табл. 1).

Розгляд проблеми через призму інституційного забезпечення та чинної української практики дозволяє констатувати таке. Сучасний стан управління перевезеннями небезпечних вантажів в Україні формується під впливом поєднання нормативної гармонізації з європейськими стандартами та системних внутрішніх обмежень, пов'язаних із трансформацією економіки і наслідками воєнних дій. Нормативно-правове забезпечення базується на Законі України «Про перевезення небезпечних вантажів» [17] та підзаконних актах, що регламентують організацію транспортування, вимоги до транспортних засобів, персоналу та документації. Зокрема, відповідно до чинного законодавства, перевезення небезпечних вантажів передбачає обов'язкову наявність спеціальних документів, маркування, сертифікації транспорту та підготовки персоналу [18].

Важливим елементом є імплементація міжнародних стандартів, зокрема положень Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR), до яких Україна приєдналася, що забезпечує уніфікацію вимог до класифікації, пакування, маркування та перевезення небезпечних матеріалів. Сучасні вимоги передбачають обов'язкову наявність транспортної документації з ООН-номером (UN), класом небезпеки

Таблиця 1

Теоретико-методологічні підходи до побудови моделей логістики

Критерій	Традиційна логістика HAZMAT	Циркулярна логістика	Інтегрована модель (пропонований підхід)
Основна мета	Мінімізація ризиків перевезення	Мінімізація відходів та ресурсів	Баланс безпеки та ресурсоефективності
Об'єкт управління	Небезпечний вантаж	Матеріальні потоки	Життєвий цикл небезпечних матеріалів
Підхід до ризику	Реактивний	Частково враховується	Проактивний (risk-based + lifecycle)
Логістична модель	Лінійна	Замкнута	Гібридна (circular + safety)
Інструменти	Регулювання, контроль	Зворотна логістика, переробка	AI, IoT, risk modeling, traceability
Екологічний аспект	Обмежений	Ключовий	Інтегрований (ESG + safety)
Роль цифровізації	Допоміжна	Частково	Ключова (smart logistics)
Результат	Безпечне перевезення	Зниження відходів	Стійка та безпечна логістична система

Джерело: розроблено автором.

та паспортом безпеки речовини [19]. Водночас, навіть за наявності нормативної бази, ефективність її реалізації залишається обмеженою.

Аналіз сучасної практики та оцінок українських дослідників свідчить, що система HAZMAT-логістики функціонує в умовах підвищених ризиків та структурних обмежень. Зокрема, у дослідженні Н. Селіванової (2025) зазначається, що в умовах воєнного стану відсутній комплексний підхід до оцінки ризиків перевезення небезпечних вантажів, а також бракує інтегрованих моделей, які враховують специфіку воєнних загроз, зокрема руйнування інфраструктури, обмеження руху та необхідність зміни маршрутів [20]. Це свідчить про наявність суттєвої науково-практичної прогалини у сфері управління ризиками.

Системні проблеми функціонування HAZMAT-логістики в Україні проявляються у кількох ключових аспектах. *По-перше*, спостерігається фрагментарність контролю та відсутність єдиного координуючого органу, що ускладнює ефективний моніторинг перевезень. *По-друге*, логістична інфраструктура не відповідає сучасним вимогам безпеки: обмежена кількість спеціалізованих складів, відсутність розвиненої системи аварійного реагування та недостатній рівень технічного оснащення транспортних засобів. *По-третє*, зберігається високий рівень операційних ризиків, пов'язаних із людським фактором, порушенням правил пакування та недостатнім рівнем підготовки персоналу.

З метою систематизації основних проблем функціонування HAZMAT-логістики в Україні доцільно узагальнити ключові фактори ризику, їх прояви та наслідки (табл. 2).

Як видно з табл. 2, найбільш критичними є нормативні, організаційні та інфраструктурні

проблеми, які мають системний характер і суттєво впливають на рівень безпеки перевезень. Особливої уваги потребує врахування впливу зовнішніх факторів, пов'язаних із воєнними умовами, що значно підвищують рівень невизначеності та ризиків у логістичних процесах.

Згідно із сучасними дослідженнями та практикою перевезень, навіть незначні порушення вимог можуть призводити до аварій, витоків небезпечних речовин або екологічних інцидентів, що підтверджує критичну важливість дотримання стандартів безпеки [21]. Особливо це стосується перевезення хімічних речовин, фарб, розчинників та інших матеріалів, які широко використовуються у промисловості, але становлять потенційну загрозу для довкілля.

Практичний досвід здійснення логістичних операцій підтверджує зазначені проблеми. У реальних умовах перевезення небезпечних вантажів часто виникають ситуації, пов'язані з пошкодженням тари та витоків речовин унаслідок неналежного кріплення вантажу або відсутності контролю під час завантаження. Іншим поширеним кейсом є помилки в документації, зокрема відсутність UN-номера або паспорта безпеки, що унеможливає оперативне реагування у випадку аварії. Також характерною проблемою є відсутність чіткої координації дій у надзвичайних ситуаціях, що збільшує час реагування та масштаби наслідків.

Узагальнюючи, можна зазначити, що сучасна система HAZMAT-логістики в Україні перебуває на етапі трансформації, поєднуючи формальну відповідність міжнародним стандартам із низьким рівнем їх практичної реалізації. Це проявляється в невідповідності між нормативними вимогами та реальними умовами функціонування

Таблиця 2

Оцінка проблем і ризиків HAZMAT-логістики в Україні

Група факторів	Конкретні прояви	Наслідки	Рівень впливу
Нормативні	Фрагментарність контролю, відсутність єдиного органу	Низька ефективність регулювання	Високий
Інфраструктурні	Недостатня кількість спеціалізованих складів, відсутність hazmat-хабів	Ускладнення логістичних операцій	Високий
Організаційні	Відсутність єдиної системи координації	Збільшення часу реагування	Високий
Технічні	Недостатнє оснащення транспорту	Підвищення ризику аварій	Середній
Людський фактор	Низька підготовка персоналу, помилки в документації	Витоки, пошкодження вантажу	Високий
Інформаційні	Відсутність цифрового моніторингу	Втрата контролю над вантажем	Високий
Зовнішні (війна)	Руйнування інфраструктури, зміна маршрутів	Підвищені ризики та нестабільність	Критичний

Джерело: авторська розробка.

логістичних систем, що зумовлює підвищений рівень ризиків та обмежує можливості інтеграції в циркулярну економіку.

З огляду на виявлені проблеми української системи перевезення небезпечних вантажів, доцільним є формування інтегрованої моделі HAZMAT-логістики в умовах циркулярної економіки, яка поєднує регуляторну логіку стандартів США, цифровий контроль перевезень і механізми замикавання матеріальних потоків. Базовою опорою такої моделі пропонуємо вважати підходи PHMSA, оскільки правила перевезення небезпечних матеріалів (*Hazardous Materials Regulations, HMR*) охоплюють не лише класифікацію небезпечних матеріалів, а й інформування про небезпеку (*hazard communication*), підготовка персоналу та заходи безпеки (*training and security*), вимоги до пакування (*packaging requirements*) та операційні правила (*operational rules*), тобто фактично формують повний цикл управління небезпечним вантажем від ідентифікації до транспортування й контролю відповідності. Для України це важливо тому, що чинна система все ще тяжіє до фрагментарного регулювання, тоді як модель PHMSA задає процесну, а не лише формально-нормативну архітектуру управління.

У запропонованій моделі імплементація стандартів PHMSA не повинна означати механічне копіювання американського регуляторного поля. Йдеться про адаптацію його ключових принципів до українських умов: єдиної відповідальності за безпеку вантажу на всіх етапах руху, обов'язкової простежуваності даних, формалізації ролей учасників, пріоритету превентивного контролю над постфактум реагуванням, а також інтеграції вимог до перевезення з вимогами до поводження з відходами. Такий підхід узгоджується і з українським Законом «Про перевезення небезпечних вантажів», і з Законом «Про управління відходами», який закріплює ієрархію управління відходами, підготовку до повторного використання, рециклінг і відновлення як пріоритетні напрями державної політики.

Другим елементом моделі має стати цифровий контур контролю. Його доцільно будувати не тільки навколо електронного реєстратора режиму праці та відпочинку водія (*Electronic Logging Device, ELD*), а ширше – як інтегровану платформу, що поєднує ELD-дані, GPS/tracking, електронний документообіг, hazard data та маршрутну аналітику. Важливо врахувати нюанс американської практики: Федеральна адміністрація безпеки автотранспортних перевезень США (*Federal Motor Carrier Safety Administration, FMCSA*) прямо вказує, що ELD автоматично фіксує час руху та записи

щодо режиму праці/відпочинку, але саме по собі правило ELD не вимагає обов'язкового real-time tracking; однак перевізник може використовувати такі дані для бізнес-процесів за умови недопущення harassment і порушення правил безпеки. Для України це означає, що ELD слід розглядати не як завершене рішення, а як один із модулів ширшої системи цифрового моніторингу. Цю думку підтверджують деякі українські дослідники, які також наголошують на тому, що слабка поширеність e-CMR, GPS-моніторингу та AI-аналітики, а також відсутність єдиної цифрової ADR-платформи і RACI-механізмів є одними з ключових слабких місць національної системи [22].

У практичному вимірі цифровий контур моделі має охоплювати: електронну картку небезпечного вантажу з UN-номером, класом небезпеки, пакувальною групою, SDS/паспортом безпеки, маршрутом, дозволами, даними про транспортний засіб, водія і ADR-консультанта; модуль подій, який фіксує відхилення від маршруту, перевантаження, порушення температурного режиму, довгі простої, аварійні сигнали; а також аварійний протокол повідомлення, який автоматично передає критичну інформацію перевізнику, вантажовідправнику, отримувачу, ДСНС, страховику та екологічному контролю. Логіка тут прямо кореспондує з американською моделлю, у якій безпека вантажу забезпечується через поєднання класифікації, пакування, training/security та incident/emergency response, а в українському контексті – із зафіксованою потребою в посиленні координації між усіма учасниками процесу перевезення.

Третім структурним блоком інтегрованої моделі має бути циркулярний контур, який переводить HAZMAT-логістику з площини лише «безпечного перевезення» у площину «безпечного управління цінністю матеріалу». Це означає, що небезпечний вантаж у моделі розглядається не тільки як об'єкт ризику, а і як матеріальний потік із потенціалом відновлення, переробки, повторного використання або контрольованого вилучення з обігу. Саме тут ключову роль відіграє реверсивна логістика: повернення залишків, прострочених або пошкоджених матеріалів, забрудненої тари, непридатної упаковки, відпрацьованих хімічних компонентів, а також їх сортування, обробка, нейтралізація та реінтеграція у виробничі чи утилізаційні ланцюги. У сучасних українських дослідженнях реверсивна логістика визначається як ключовий елемент циркулярної економіки, ефективність якого безпосередньо пов'язана із застосуванням цифрових інструментів, механізмів зворотного зв'язку та поверненням вторинних ресурсів у господар-

ський обіг. Зокрема, Афанасьєва О. та Куляк В. підкреслюють значення таких процесів, як збирання (*collection*), сортування (*sorting*), переробка (*processing*), повторна інтеграція ресурсів у виробництво (*reintegration*), а також роль цифрових технологій у функціонуванні системи зворотної логістики [23].

Четвертий елемент моделі – контроль життєвого циклу вантажу. Йдеться про перехід від управління окремою транспортною операцією до управління повним циклом небезпечного вантажу: від походження речовини, пакування, відвантаження, транспортування та проміжного зберігання до використання, повернення залишків, утворення небезпечного відходу та його подальшої передачі на відновлення, переробку або утилізацію. У цьому контексті циркулярна економіка вимагає, щоб кожен небезпечний матеріал мав не лише транспортний маршрут, а й «маршрут після використання».

Для України це є принципово важливим, оскільки наукові дослідження фіксують слабкість інфраструктури поводження з відходами та низький рівень їх повторного використання. Зокрема, у дослідженні Н. Трушкіної підкреслюється, що система управління відходами в Україні характеризується недостатнім розвитком інфраструктури та обмеженими можливостями залучення відходів до вторинного обігу [12, с. 12–14]. Додатково зазначимо, що за оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, незважаючи на набрання чинності Законом України «Про управління відходами», реформа перебуває на початковому етапі реалізації, при цьому понад 90% відходів підлягають захороненню без попередньої переробки чи сортування, а значна частина полігонів є перевантаженою або не відповідає санітарним вимогам [24].

Отже, запропонована до впровадження інтегрована модель HAZMAT-логістики в умовах циркулярної економіки, що формується, має базуватися на шести основних взаємопов'язаних контурах: регуляторному, цифровому, циркулярному, екологічному, координаційному та життєвого циклу. Її новизна полягає в тому, що вона поєднує адаптовані стандарти RHMSA з українським правовим полем та сучасними потребами системи управління відходами. На відміну від традиційного підходу, де перевезення небезпечного вантажу завершується в точці доставки, у запропонованій моделі воно є лише одним етапом ширшого циклу контролю, безпеки, повернення та переробки матеріалу. Саме така архітектура дозволяє інтегрувати HAZMAT-логістику в парадигму циркулярної економіки України.

Для повноцінного представлення логіки запропонованого підходу доцільно систематизувати його структурні контури, інструменти та очікувані результати (табл. 3).

Як видно з табл. 3, запропонована модель відрізняється від традиційної системи перевезення небезпечних вантажів тим, що переносить акцент із окремої транспортної операції на повний цикл управління небезпечним матеріалом. Це дає змогу поєднати вимоги безпеки, цифрової простежуваності та циркулярного використання ресурсів в одній управлінській конструкції.

На основі розробленої інтегрованої моделі логістики небезпечних матеріалів (HAZMAT-логістики) сформовано практичні рекомендації, спрямовані на підвищення безпеки перевезень, ресурсоефективності та відповідності міжнародним стандартам у контексті циркулярної економіки. Ключовим напрямом є інституційна інтеграція управління перевезеннями через створення єдиної цифрової платформи моніторингу, функціонально наближеної до підходів *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration*. Така система має забезпечувати централізований контроль логістичних процесів, інтеграцію даних про вантаж, маршрут і учасників перевезення, а також безперервний нагляд за дотриманням нормативних вимог. Водночас важливою є синхронізація транспортної логістики із системою управління небезпечними відходами та розвиток інфраструктури збору, переробки й утилізації відповідно до принципів циркулярної економіки та концепції життєвого циклу.

На рівні бізнесу доцільним є впровадження циркулярно орієнтованих стратегій, зокрема розвиток зворотної логістики (*reverse logistics*) для управління залишками небезпечних матеріалів і відходами. Важливим є формування систем управління ризиками, що включають ідентифікацію небезпек, контроль умов транспортування та планування аварійного реагування. Інтеграція цифрових інструментів (систем відстеження, аналітики даних і автоматизованого контролю) підвищує прозорість операцій і знижує ймовірність інцидентів.

Для логістичних компаній ключовим має стати впровадження комплексних систем контролю перевезень, що поєднують електронні реєстратори режиму праці водіїв (ELD), GPS-моніторинг і електронний документообіг. Особливу увагу слід приділяти підготовці персоналу та стандартизації процедур перевірки завантаження, кріплення вантажу, документації та маркування, що забезпечує зниження операційних ризиків. Практичні кейси підтверджують, що неналежне кріплення або від-

Структура пропонованої інтегрованої моделі HAZMAT-логістики в умовах впровадження циркулярної економіки

Контур моделі	Ключовий зміст	Основні інструменти	Очікуваний результат
Регуляторний	Адаптація логіки PHMSA до українських умов	Класифікація (classification), інформування про небезпеку (hazard communication), підготовка персоналу та заходи безпеки (training/security), вимоги до пакування (packaging), операційні правила (operational rules)	Уніфікація вимог і підвищення керованості системи
Цифровий	Безперервний контроль перевезення і подій	ELD, GPS/tracking, e-CMR, hazard data card, маршрутна аналітика, alert-модуль	Простежуваність, швидке виявлення відхилень, менше інцидентів
Циркулярний	Повернення та обробка небезпечних залишків і тари	Зворотна логістика (reverse logistics), сортування (sorting), відновлення ресурсів (recovery), переробка (recycling), контрольована утилізація (controlled disposal)	Зниження втрат ресурсів і безпечне замикання матеріального потоку
Життєвого циклу	Контроль вантажу від походження до утилізації/повторного використання	Відстеження життєвого циклу (lifecycle tracking), паспорти безпеки речовин (SDS – Safety Data Sheets), облік ланцюга відповідального зберігання (record of custody)	Контроль всього потоку небезпечних матеріалів, а не лише однієї поїздки
Координаційний	Формалізація ролей учасників	RACI-матриця, ADR-консультант, аварійний протокол повідомлення	Чіткий розподіл відповідальності та швидше реагування
Екологічний	Узгодження перевезення з вимогами управління відходами	Ієрархія відходів, оцінка залишків, рішення щодо recovery/recycling/disposal	Інтеграція HAZMAT-логістики в циркулярну економіку

Джерело: авторська розробка.

сутність коректної документації (зокрема номерів ООН – UN number чи паспортів безпеки – SDS) призводять до витоків, затримок і додаткових витрат. Водночас відсутність централізованих механізмів реагування, подібних до центру реагування на надзвичайні ситуації з небезпечними матеріалами (CHEMTREC), зумовлює фрагментарність ліквідації інцидентів.

ВИСНОВКИ

Узагальнення результатів показує, що система HAZMAT-логістики в Україні має формальне нормативне забезпечення, проте реально її ефективність обмежується фрагментарністю контролю, інфраструктурними недоліками та низьким рівнем цифровізації. Інтеграція принципів циркулярної економіки відкриває можливості для підвищення ресурсоефективності та зниження екологічних ризиків. Запропонована модель, що поєднує стандарти PHMSA, цифровий контроль і механізми замк-

нутих матеріальних потоків, формує новий підхід до управління небезпечними матеріалами, де ключовими чинниками виступають цифровізація, контроль життєвого циклу та розвиток зворотної логістики.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком інтегрованих цифрових платформ управління HAZMAT-логістикою, моделюванням ризиків в умовах нестабільності, застосуванням штучного інтелекту для моніторингу та прогнозування, а також оцінкою ефективності циркулярних логістичних моделей. ■

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Hazardous Materials Regulations, 49 CFR Parts 100–185. PHMSA. URL: <https://www.phmsa.dot.gov/standards-rulemaking/hazmat/hazardous-materials-regulations>
2. Hazardous Materials: Eliminating Unnecessary Regulatory Burdens on Fuel Transportation. Fede-

- ral Register. URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2026/01/14/2026-00578/hazardous-materials-eliminating-unnecessary-regulatory-burdens-on-fuel-transportation>
3. Why Hazmat Packaging is Central to Modern Industrial Logistics. *Kings Research*. 2026. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/why-hazmat-packaging-central-modern-industrial-logistics-aetvf/>
 4. Sustainable risk mitigation in hazardous material transportation. *TRID*. URL: <https://trid.trb.org/View/2587205>
 5. Hsu C., Yang J., Chang A., Liu G. A new hybrid MCDM approach for mitigating risks of hazardous material road transportation. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2024. Vol. 21. No. 3. P. 4210–4240. DOI: <https://doi.org/10.3934/mbe.2024186>
 6. Nautwima J. P., Asa A. R. Reimagining logistics for sustainability: Green logistics practices, circular economy integration, and digital enablers in sustainable supply chain management. *International Journal of Management Science and Business Administration*. 2025. Vol. 11. No. 5. P. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.115.1001>
 7. The Future of Hazmat Transportation: Trends to Watch in 2025 and Beyond. *Hazmat University*. URL: <https://www.hazmatuniversity.com/news/future-hazmat-transportation-trends-to-watch-2025/>
 8. De Maio A., Laporte G., Musmanno R., Vocaturo F. Sustainable risk mitigation in hazardous material transportation. *Computers and Operations Research*. 2025. Vol. 184. Art. 107228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107228>
 9. Yang Y., Zhao Y., Zhu Z., Li C., Lu Q., Zhou T. A comprehensive review of sustainable hazardous waste management: Generation patterns, storage safety, transportation optimization, and treatment technologies. *Journal of Hazardous Materials*. 2026. Vol. 503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141065>
 10. Mataraarachchi R., Sasindri K., Nanayakkara Hal-loluwa Gamage S. S. Adoption of circular economy practices for waste management: key learnings from Sri Lankan garment manufacturing industry. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1108/JFMM-01-2025-0021>
 11. Щербина В. Циркулярна економіка як основа сталого розвитку морської галузі. *Економіка та суспільство*. 2025. № 71. С. 624–628. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-89>
 12. Трушкіна Н. В. Циркулярна економіка: формування концепції, еволюція розвитку, бар'єри, проблеми та перспективи. *Вісник економічної науки України*. 2021. № 1. С. 9–20. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.1\(40\).9-20](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.1(40).9-20)
 13. Erkut E., Verter V. Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations Research*. 1998. Vol. 46. No. 5. P. 625–642. DOI: <https://doi.org/10.1287/opre.46.5.625>
 14. Alp E. Risk-based transportation planning practice: Overall methodology and a case example. *INFOR: Information Systems and Operational Research*. 1995. Vol. 33. No. 1. P. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.1080/03155986.1995.11732263>
 15. Börjeson N., Agerstrand M. "The problems that we have today are yesterday's solutions": Enabling circular non-toxic supply chains. *Circular Economy and Sustainability*. 2025. Vol. 5. P. 2273–2293. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00501-x>
 16. Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S., Suh S. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 91. No. 1. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
 17. Про перевезення небезпечних вантажів : Закон України. Відомості Верховної Ради України. 2000. № 28. Ст. 222. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/1644-14>
 18. Бунчук В. Перевезення небезпечних вантажів: класи, вимоги та правила безпеки. *Pro-Op*. URL: <https://pro-op.com.ua/article/1403-normativn-vimogi-do-perevezennya-nebezpechnih-vantajv>
 19. Золін Д. ADR перевезення в 2026 році в Україні та Європі: особливості, правила. *Zolin.com.ua*. URL: <https://zolin.com.ua/adr-perevezennya-v-2026-rocz-i-v-ukrayini-ta-yevropi-osoblyvosti-pravya>
 20. Селіванова Н. Оцінка ризиків автоперевезень небезпечних вантажів в умовах воєнного стану в Україні: маршрутизація та спеціальні режими супроводу. *Наука і виробництво*. 2025. Вип. 30. С. 192–206. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347244>
 21. Небезпечні вантажі: класифікація та правила перевезень. *TVL*. URL: <https://www.tvl.net.ua/povyny/nebezpechni-vantazhi-klasifikacziya-ta-pravya-perevezen>
 22. Селіванова Н. Ю., Шевчук О. С., Березька К. М., Сіран Р. В. Аналіз умов взаємодії учасників перевезення небезпечних вантажів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2025. Т. 36. № 6. Ч. 1. С. 315–322. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/47>
 23. Афанасьєва О. К., Куляк В. В. Реверсивна логістика як ключовий елемент моделі циркулярної економіки. *Наукові записки*. 2025. № 40 (3). С. 8–19. DOI: https://doi.org/10.33111/vz_kneu.40.25.03.02.012.018
 24. Небезпечні відходи у цифрах. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. 2022. URL: <https://mep.gov.ua/usefullinks/nebezpechni-vidhody-u-tysfrah>

REFERENCES

- Afanasieva O. & Kuliak V. (2025). Reversyvnа lohistyka yak kluchovyі element modeli tsyrkuliarnoi ekonomiky [Reverse logistics as a key element of the circular economy model]. *Naukovi zapysky*, № 40 (3), 8–19. http://doi.org/10.33111/vz_kneu.40.25.03.02.012.018

- Alp E. (1995). Risk-based transportation planning practice: Overall methodology and a case example. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, No. 1 (Vol. 33), 4–19. <https://doi.org/10.1080/03155986.1995.11732263>
- Börjeson N. & Agerstrand M. (2025). The problems that we have today are yesterday's solutions: Enabling circular non-toxic supply chains. *Circular Economy and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43615-025-00501-x>
- Bunchuk V. Perevezennia nebezpechnykh vantazhiv: klasy, vymohy ta pravyla bezpeky [Transportation of hazardous materials: classes, requirements and safety rules]. *Pro-Op*. <https://pro-op.com.ua/article/1403-normativn-vimogi-do-perevezennya-nebezpechnih-vantajv>
- De Maio A., Laporte G., Musmanno R. & Vocaturo F. (2025). Sustainable risk mitigation in hazardous material transportation. *Computers and Operations Research*, 184, Art. 107228. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107228>
- Erkut E. & Verter V. (1998). Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations Research*, No. 5 (Vol. 46), 625–642. <https://doi.org/10.1287/opre.46.5.625>
- Federal Register. *Hazardous Materials: Eliminating Unnecessary Regulatory Burdens on Fuel Transportation*. <https://www.federalregister.gov/documents/2026/01/14/2026-00578/hazardous-materials-eliminating-unnecessary-regulatory-burdens-on-fuel-transportation>
- Finnveden G., Hauschild M. Z., Ekvall T., Guinée J., Heijungs R., Hellweg S. & Suh S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, No. 1 (Vol. 91), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>
- Hazmat University. *The Future of Hazmat Transportation: Trends to Watch in 2025 and Beyond*. <https://www.hazmatuniversity.com/news/future-hazmat-transportation-trends-to-watch-2025/>
- Hsu C., Yang J., Chang A. & Liu G. (2024). A new hybrid MCDM approach for mitigating risks of hazardous material road transportation. *Mathematical Biosciences and Engineering*, No. 3 (Vol. 21), 4210–4240. <https://doi.org/10.3934/mbe.2024186>
- Kings Research. (2026). *Why Hazmat Packaging is Central to Modern Industrial Logistics*. <https://www.linkedin.com/pulse/why-hazmat-packaging-central-modern-industrial-logistics-aetvf/>
- Matararachchi R., Sasindri K. & Nanayakkara Halloluwa Gamage S. S. (2026). Adoption of circular economy practices for waste management: key learnings from Sri Lankan garment manufacturing industry. *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal*. <https://doi.org/10.1108/JFMM-01-2025-0021>
- Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. (2022). *Nebezpechni vidkhody u tsyfrakh* [Hazardous waste in figures]. <https://mepr.gov.ua/usefullinks/nebezpechni-vidhody-u-tsyfrakh>
- Nautwima J. P. & Asa A. R. (2025). Reimagining logistics for sustainability: Green logistics practices, circular economy integration, and digital enablers in sustainable supply chain management. *International Journal of Management Science and Business Administration*, No. 5 (Vol. 11), 7–21. <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.115.1001>
- PHMSA. Hazardous Materials Regulations, 49 CFR Parts 100–185. <https://www.phmsa.dot.gov/standards-rulemaking/hazmat/hazardous-materials-regulations>
- Selivanova N. Yu., Shevchuk O. S., Berezka K. M. & Siran R. V. (2025). *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky* [Scientific notes of TNU named after V. I. Vernadsky. Series: Technical Sciences]. № 6, ch. 1 (T. 36 (75)). <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/47>
- Selivanova N. (2025). *Otsinka ryzykiv avtoperevezen nebezpechnykh vantazhiv v umovakh voiennoho stanu v Ukraini: marshrutyzatsiia ta spetsialni rezhymy suprovodu* [Risk assessment of road transportation of hazardous materials under martial law in Ukraine: routing and special escort regimes]. <https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347244>
- Shcherbyna V. (2025). Tsykuliarna ekonomika yak osnova staloho rozvytku morskoi haluzi [Circular economy as a basis for sustainable development of the maritime industry]. *Ekonomika ta suspilstvo*, 71, 624–628. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-89>
- TRID. *Sustainable risk mitigation in hazardous material transportation*. <https://trid.trb.org/View/2587205>
- Trushkina N. V. (2021). Tsykuliarna ekonomika: formuvannia kontseptsii, evoliutsiia rozvytku, bariery, problemy ta perspektyvy [Circular economy: concept formation, development evolution, barriers, problems and prospects]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*, № 1 (40), 9–20. [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.1\(40\).9-20](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.1(40).9-20)
- TVL. *Nebezpechni vantazhi: klasyfikatsiia ta pravyla perevezen* [Hazardous materials: classification and transportation rules]. <https://www.tvl.net.ua/novyny/nebezpechni-vantazhi-klasifikaciya-ta-pravyla-perevezen>
- Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. (2000). Pro perevezennia nebezpechnykh vantazhiv: Zakon Ukrainy [On transportation of hazardous materials: Law of Ukraine]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/1644-14>
- Yang Y., Zhao Y., Zhu Z., Li C., Lu Q. & Zhou T. (2026). A comprehensive review of sustainable hazardous waste management: Generation patterns, storage safety, transportation optimization, and treatment technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 503. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.141065>
- Zolin D. ADR perevezennia v 2026 rotsi v Ukraini ta Yevropi: osoblyvosti, pravyla [ADR transportation in 2026 in Ukraine and Europe: features, rules]. <https://zolin.com.ua/adr-perevezennya-v-2026-roci-v-ukrayini-ta-yevropi-osoblyvosti-pravyla>

Стаття надійшла до редакції / Received: 11.04.2026
Статтю прийнято до публікації / Accepted: 23.04.2026
Оприлюднено / Published: 10.06.2026