

УДК 339.9

DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/189-33>**Драпак Т.І.**

аспірантка,

Західноукраїнський національний університет

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9297-5229>**Корнієнко Д.Б.**

аспірант,

Західноукраїнський національний університет

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1329-9789>**Drapak Tetiana, Korniienko Dmytro**

West Ukrainian National University

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В ЛАНЦЮЖКУ СТВОРЕННЯ ВАРТОСТІ ПЛАСТИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Пластикові відходи вийшли на передній план наукових і політичних дебатів як глобальна проблема, що потребує нагального вирішення. Модель циркулярної економіки, яку підтримують політики, науковці та корпорації, представляє життєздатний шлях до досягнення більш сталого рівня розвитку. Нові та проривні технології можуть прискорити перехід до циркулярної економіки, але їхнє застосування до переходу у сфері пластикових матеріалів ще не до кінця зрозуміле. На основі систематичного огляду літератури дана робота має на меті зрозуміти роль ключових нових технологій у переході до циркулярної економіки в ланцюжку доданої вартості пластикових матеріалів, їхній потенційний вплив, а також бар'єри на шляху їхнього впровадження та розповсюдження. Використовуючи структуру ReSOLVE, аналіз показує, що не окремі технології, а чотири технологічні набори, пов'язані з Індустрією 4.0, розподіленою економікою, біологічними системами та хімічною переробкою, є основними факторами, що сприяють переходу до циркулярної економіки. Обговорюється взаємодоповнюваність технологій і зміни, необхідні з системної точки зору, а також пропозиції щодо управління та практичного впровадження для подолання бар'єрів і опору на шляху до переходу.

Ключові слова: циркулярна економіка, нові технології, ланцюжок доданої вартості пластмас, перехід до сталого розвитку.

NEW TECHNOLOGIES FOR THE TRANSITION TO A CIRCULAR ECONOMY IN THE PLASTIC MATERIALS VALUE CHAIN

Plastic waste has risen to the forefront of scientific and political debate as a global problem that needs to be addressed urgently. The circular economy model, supported by politicians, academics and corporations, represents a viable pathway to achieving a more sustainable level of development. New and disruptive technologies can accelerate the transition to a circular economy, but their application to the plastics transition is not yet fully understood. Based on a systematic literature review, this paper aims to understand the role of key emerging technologies in the transition to a circular economy in the plastics value chain, their potential impact, and the barriers to their adoption and diffusion. Using the ReSOLVE framework, the analysis shows that four technology sets related to Industry 4.0, the distributed economy, biological systems and chemical recycling are the main enablers of the transition to a circular economy, rather than individual technologies. The complementarity of technologies and the changes required from a systemic perspective are discussed, as well as governance and implementation proposals to overcome barriers and resistance to the transition. To date, the research literature has not systematically analysed how new technologies that have been identified as enablers of the circular economy relate to the dynamics of plastic value chains. In addition, there is a great need to better understand how innovative technologies can provide more sustainable solutions in value chains and how more circular alternatives to plastic waste management and recycling can be leveraged. Understanding the opportunities not only from the perspective of individual firms and business models in plastics value chains, but also from a systemic perspective, is key to developing meaningful and effective forms of governance to shape and support the transition to a circular economy. Intending to fill this gap in the literature, the paper seeks to understand the role of key emerging technologies in the transition to a circular economy in the plastics value chain, their potential impacts, and barriers to adoption and diffusion.

Keywords: circular economy, new technologies, plastics value chain, transition to sustainable development.

JEL classification: F01, F02, F64

Постановка проблеми. У природі немає відходів. Результуючий результат будь-якого заданого природного циклу працює як вхід до додаткового природного процесу. Завдяки цьому принципу вся планета є взаємопов'язаною складною та адаптивною системою [1]. Навпаки, системи виробництва та споживання в сучасній економіці дотримуються лінійної раціональності, згідно з якою ресурси видобуваються, використовуються, а потім відкидаються в кінці свого життє-

вого циклу. Нежиттєздатність цієї лінійної системи була предметом академічних дискусій протягом десятиліть [2–4]. Концепція циркулярної економіки набула поширення в академічній літературі [5–7], а також у сфері політики [8–10] як альтернатива домінуючій лінійній економічній моделі. Одним словом, цілі ЦЕ полягають у проектуванні відходів і забруднення, відновленні природних екосистем і значному подовженні життєвих циклів продуктів і матеріалів [8].

Але перехід від лінійної глобалізованої економіки, зосередженої на швидкому виробництві та розповсюдженні товарів за низькими витратами, до циркулярної економіки, яка зосереджується на кращому використанні ресурсів і відновленні навколишнього середовища, вимагає значних змін у більшості сфер суспільства – в очікуваннях, практиках, правилах, і технологіях. Такі «довгострокові, багатовимірні та фундаментальні трансформаційні процеси, через які усталені соціотехнічні системи переходять до більш стійких способів виробництва та споживання» [11] залежать від зовнішнього тиску, щоб відкритися для змін і дозволити появі альтернативних практик і технологій.

Хоча жодна окрема технологія не може виступати як срібна куля для переходу до циркулярної економіки, існують нові технології, які пропонують багатообіцяючі шляхи до більш циркулярних режимів використання ресурсів і надання послуг. Все більше літератури виявляє інтерес до розуміння потенційного внеску таких нових технологій у циркулярну економіку, а також обмежень, які вони мають у цьому. Розвиток загальних цифрових технологій, призначених для промислових застосувань, які зазвичай об'єднуються під егідою Індустрії 4.0, було визначено як важливий фактор, що сприяє багатьом практикам, узгодженим з цілями циркулярної економіки [12–18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням питань переходу до циркулярної економіки в ланцюжку створення вартості доданої вартості займалася низка науковців, серед яких Крисоватий А.І., Зварич І.Я., Резнікова Н.В., Савельєв Є.В., Сохацька О.М. та інші. Крім того, нові технології, що підтримують перехід до циркулярної економіки, їх взаємозв'язок з ланцюгами доданої вартості були предметом дослідження для зарубіжних науковців, таких як Форд В., Джонс Н., Девіс А., Кабернал Л. та інші. З точки зору дослідження нових технологій, які забезпечують перехід до циркулярної економіки важливим є створення ланцюгів доданої вартості як на регіональному так і на глобальному рівнях.

Мета статті є визначення новітніх технологій, які переходять до циркулярної економіки в ланцюжку доданої вартості пластикових матеріалів. Визначенні їхнього потенційного впливу, а також розумінні бар'єрів на шляху до їхнього впровадження та розповсюдження.

Використовуючи структуру ReSOLVE, аналіз показує, що не окремі технології, а чотири технологічні набори, пов'язані з Індустрією 4.0, розподіленою економікою, біологічними системами та хімічною переробкою, є основними факторами, що сприяють переходу до циркулярної економіки. Обговорюється взаємодоповнюваність технологій і зміни, необхідні з системної точки зору, а також пропозиції щодо управління та практичного впровадження для подолання бар'єрів і опору на шляху до переходу.

Виклад основних результатів дослідження. Виробництво пластику продовжує швидко зростати [18] і майже виключно покладається на викопне паливо – процеси його виробництва дуже енергоємні та пов'язані з великими обсягами викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин [19]. Пакувальний пластик, який становить найбільший сегмент попиту на пластик, має дуже короткий термін служби,

як і багато інших відомих видів використання пластику, наприклад текстиль, який використовується в індустрії швидкої моди [20].

Незважаючи на те, що рекомендації з екодизайну існують, вони все ще знаходяться на ранній стадії і не застосовуються в масштабах [21], через що пластикові вироби зазвичай важко ремонтувати або демонтувати, оскільки вони не були розроблені для переробки і тому потрапляють на звалища, сміттєспалювальні заводи або викинуті в природне середовище. Пластмаси проникли в усі сфери світу, і тепер їх можна знайти буквально скрізь, від арктичного льодовикового покриву [22] до людських плацент [23], тоді як оцінки показують, що до 2050 року океанські пластикові матеріали будуть важити більше, ніж футуристичний фут [24]. Таким чином, пластик є ключовою проблемою для переходу до циркулярної економіки, яка спрямована на підтримку цілісності як екосистем, так і глобального клімату [25], одночасно надаючи необхідні послуги та функції в економіці.

До цього часу в дослідницькій літературі не проводився систематичний аналіз того, як нові технології, які були визначені як засоби, що сприяють циркулярній економіці, взаємопов'язані з динамікою ланцюжків створення вартості пластикових матеріалів. Крім того, існує велика потреба в кращому розумінні того, як інноваційні технології можуть забезпечити більш стійкі рішення в ланцюжках створення вартості та як можна задіяти більш циклічні альтернативи поводженню з пластиковими відходами та переробці [26; 27].

Розуміння можливостей не лише з точки зору окремих фірм і бізнес-моделей у ланцюжках створення вартості пластику, але й із системної точки зору, є ключовим у розробці значущих і ефективних форм управління для формування та підтримки переходу до циркулярної економіки. Маючи намір заповнити цю прогалину в літературі, є прагнення зрозуміти роль ключових нових технологій у переході до циркулярної економіки в ланцюжку доданої вартості пластикових матеріалів, їхній потенційний вплив, а також бар'єри впровадження та поширення.

Концепція циркулярної економіки, що бере свій початок у таких дисциплінах, як економіка навколишнього середовища, промислова екологія та корпоративна стійкість [4; 28; 29], зараз пропагується політиками, академічними колами та корпораціями як життєздатний шлях до сталого розвитку. Досягти Цілей сталого розвитку, висунутих ООН [30]. Хоча існує багато визначень цієї концепції, кожне з яких наголошує на іншому її аспекті, [6] який вважає циркулярну економіку «економічною системою, яка базується на бізнес-моделях, які замінюють концепцію «закінчення терміну служби» на скорочення, альтернативне повторне використання, переробку та відновлення матеріалів у процесах виробництва/розповсюдження та споживання, таким чином діючи на мікрорівні (продукти, компанії, споживачі), мезорівень (екоіндустріальні парки) та макрорівень (місто, регіон, нація та поза ними), з метою досягнення сталого розвитку, що передбачає створення якості навколишнього середовища, економічного процвітання та соціальної справедливості на користь поточного та майбутні покоління» [6].

Це вичерпне визначення розрізняє циркулярність на різних рівнях, а також у різних вимірах. У такій

моделі циркулярно економічна цінність створюється шляхом зосередження уваги на збереженні внутрішньої вартості продукції. Крім того, визнається важливість економіки в поточній системі виробництва та споживання шляхом сприяння ефективності та достатності в усіх масштабах [11]. Найважливіше те, що у визначенні підкреслюється, що метою ЦЕ є не лише зменшення шкоди, пов'язаної з лінійною економікою, а радше створення позитивного та підсилювального циклу розвитку для підтримки життя в довгостроковій перспективі [6]. Таким чином, концепція циркулярної економіки відображає три фундаментальні принципи [11]:

- збереження та збільшення природного капіталу шляхом контролю кінцевих запасів і балансування потоків відновлюваних ресурсів;

- оптимізація виходу ресурсів шляхом циркуляції продуктів, компонентів і матеріалів із найвищою користю, як у технічному, так і в біологічному циклах;

- сприяти ефективності системи шляхом виявлення та проектування негативних зовнішніх ефектів.

Парадигма циркулярної економіки також піддавалася серйозній критиці щодо її застосування на практиці [12], її екологічних обмежень [7] та обмеженої уваги до соціальної стійкості [13]. В аналізі еволюції концепції з моменту її появи Д. Рейке та інші [12] підкреслюють, що, незважаючи на великий потенціал для збереження цінності ресурсів, більшість ініціатив циркулярної економіки на практиці зосереджені на аспектах утримання низької вартості переробки.

Навпаки, ті, які потенційно можуть мати більший вплив з точки зору ефективності використання ресурсів, як-от переробка, реконструкція або перепрофілювання, широко нехтували як бізнесом, так і політиками.

К. Корхонен та інші [7] посилаються на потенційні екологічні обмеження концепції ЦЕ, пов'язані з термодинамічними межами, її перспективним внеском у стійкість глобальної мережі, ризиком ефекту відскоку та залежностями від шляху або блокуванням, які перешкоджають прийняттю більш циклічних практик. Тим не менш, незважаючи на критику, модель ЦЕ продовжує вважатися перспективним місцем для сприяння переходу до сталого майбутнього.

Базуючись на принципах ЦЕ, впливовий Фонд Еллен Макартур визначив шість сфер дій, що забезпечують такий перехід [14]: регенерувати, ділитися, оптимізувати, зациклювати, віртуалізувати та обмінюватися.

Регенерація означає перехід до відновлюваних джерел енергії та матеріалів, а також відновлення, збереження та відновлення здоров'я екосистем. Ділитися спрямовано на максимізацію використання продуктів шляхом заміни індивідуальної власності та повторного використання протягом усього технічного терміну експлуатації шляхом проектування та ремонту. Оптимізація стосується дій, спрямованих на підвищення ефективності виробництва та ланцюжка створення вартості. Цикл спрямований на збереження продуктів і матеріалів, що використовуються в економіці, якомога довше. Віртуалізація означає заміну матеріальних продуктів і послуг цифровими, найкращим прикладом є цифрова музика та книги, що замінюють компакт-диски та паперові книги. Нарешті, обмін відноситься до дій, спрямованих на заміну старих матеріалів новими, покращеними невідновлюваними матеріалами. Кожна з цих сфер діяльності представляє бізнес-можливість,

яка разом із технологічними інструментами дає змогу компаніям і урядам створювати рішення та правила, які сприяють переходу до ЦЕ [14].

Фреймворк, також відомий як фреймворк «ReSOLVE» вирішення, в основному застосовувався для аналізу окремих підсистем (мобільність, енергетика) і секторів (текстиль), але його потенціал для аналізу матеріалів ще не повністю вивчений. Однією з таких ключових груп матеріалів є пластмаси. Його важливість і вплив буде обговорено далі. Ланцюжки доданої вартості пластикових матеріалів. Термін «пластик» охоплює різноманітну групу полімерів, яка все ще збільшується, і займає центральне місце в багатьох галузях промисловості, напр. автомобільна промисловість, будівництво, упаковка, текстиль та електроніка. Виведений на масовий ринок у середині двадцятого століття пластик, який реально можна було виробляти в дешевих і величезних кількостях, означали, що матеріальне виробництво більше не було практичним обмеженням для економіки [15]. З часом те, що було нішевою інновацією в режимі органічних хімікатів, успішно перетворилося на революційну технологію, яка зрештою трансформує всю соціально-технічну систему [16]. Але також, як одна із основних категорій нафтохімічної промисловості, стрімке зростання пластику значною мірою сприяло зростанню економічної системи, заснованої на викопному паливі [17] і продовжує робити це сьогодні [18].

Ланцюжок доданої вартості пластику є складним і зачіпає на своєму шляху кілька бізнес-секторів. Більшість пластмас виробляється з викопних вуглеводнів, традиційно з нафти – побічного продукту переробки сирої нафти в паливо – або з конденсатів природного газу, таких як пропан і етан [17]. Потім ці сировинні матеріали піддаються крекінгу для отримання мономерів, таких як пропілен і етилен, які згодом полімеризуються, утворюючи первинні полімери, такі як поліпропілен або поліетилен. Первісні полімери, які зазвичай випускаються у формі гранул (також званих гранулами або зернами), змішуються з додатковими добавками для отримання бажаних властивостей для запланованого застосування в процесі, який називається компаундуванням. Згодом ці пластики перетворюються на вироби за допомогою таких процесів, як формування, видування або екструзія. Отримані предмети або продаються безпосередньо кінцевим споживачам, або використовуються як компоненти в більш складних продуктах [18].

Після того, як ці кінцеві продукти спожиті або використані, значна частина стає неправильно використаним відходом (закінчується в річках або океанах), тоді як невелика частина їх збирається та сортується службами управління відходами, які потім передають відходи, придатні для вторинної переробки, до «переробників» або відправити частину, що не підлягає вторинній переробці, на захоронення або спалювання. Частина, придатна для переробки, потім переробляється для повторного використання, починаючи з етапу полімерування або перетворення. Схематичне зображення ланцюжків доданої вартості пластику показано на рис. 1.

Пластмаси в даний час використовуються в різноманітних продуктах. Кілька прикладів включають обгортку та ковпачки (ПП), сумки для покупок і загальний пакувальний матеріал (ПЕ низької щільності), текстиль (поліестер, поліамід і акрил – PP&A), пляшки



Рис. 1. Зображення ланцюжка доданої вартості

Джерело: розроблено авторами [18; 19]

(ПЕ високої щільності та поліетилентерефталат – ПЕТ), матраци та взуття (поліуретан – ПУ), одноразові тарілки та стакани (полістирол – ПС), труби (полівінілхлорид – ПВХ).

Враховуючи його широке використання, не дивно, що в ланцюжках створення вартості пластикових матеріалів багато акторів, інституцій та матеріальних елементів співпадають із секторами викопного палива та енергетикою, а також з іншими секторами, що склалися раніше, такими як агрохарчова промисловість, електроніка, транспорт тощо. текстиль, серед багатьох інших [10]. Через високу неоднорідність полімерів, марок і добавок, переробка пластику, як відомо, є складною [16]. По-перше, кожне сімейство полімерів (наприклад, ПЕТ, РР, PVC, PS) має різні фізичні властивості; отже, для їх обробки потрібні різні методи переробки.

По-друге, існує величезна і постійно зростаюча кількість пластикових компаундів, які розроблені без урахування можливості переробки.

По-третє, кінцеві продукти рідко виготовляються з одного матеріалу, і тому процеси переробки, навіть якщо вони достатні для одного типу пластику, можуть не працювати для продуктів, які складаються з кількох матеріалів (наприклад, дерева, металу тощо) або типів пластику.

І по-четверте, навіть якщо пластик вдається переробити, його можна переробити стільки разів, тому що з кожним циклом його властивості погіршуються до моменту, коли він більше не підлягає переробці.

Отже, розуміння того, як принципи ЦЕ за допомогою нових технологій можуть бути застосовані у сфері пластикових матеріалів і полегшити їй перехід, є важливим не лише для галузі як такої, але й для більш широкої трансформації сучасної парадигми виробництва та споживання. Нові технології під час переходу до циркулярної економіки. Дослідження «нових технологій» зросло в академічній літературі за останні роки під різними назвами, такими як трансформаційні технології (ТТ) або ключові сприятливі технології (КЕТ) [15]. Незважаючи на різні позначки, ці терміни

стосуються набору технологій, які представляють певні характеристики [16]:

- Вони принципово відрізняються від того, що раніше використовувалося для досягнення подібної мети, і тому демонструють радикальну новизну.

- У порівнянні з іншими технологіями вони досягають відносно швидкого зростання.

- Вони здійснюють помітний вплив або на певну сферу, або на більш широку сферу в рамках соціально-економічної системи, змінюючи конституцію акторів, інститутів або взаємодію між ними.

- Вони оточені невизначеністю та двозначністю щодо їхніх потенційних результатів і застосувань, що також може призвести до небажаних або непередбачуваних наслідків.

Література про вплив нових технологій на циркулярну економіку, незважаючи на те, що зростає, перебуває в зародковому стані. У систематичному огляді літератури Роса та інші [17] вказують на те, що більшість існуючої літератури зосереджується на ролі технологій, що розвиваються, як стимулів для ЦЕ, головним чином через широке використання цифрових технологій, орієнтованих на ефективність, включаючи штучний інтелект (AI), блокчейн, 3D-друк, великі дані або Інтернет речей (IoT). У меншій кількості випадків нові технології обговорюються у рамках ресурсоефективності, переробки або управління життєвим циклом продукту, в той час як дослідження, зосереджені на управлінні зміною постачання та розбиранні продуктів, є нечисленними [17].

Нові технології у виробничому ланцюжку створення вартості пластикових матеріалів Як показано в таблиці 1, у розглянутих публікаціях було визначено 15 нових технологій, пов'язаних із переходом до циркулярності в ланцюжку створення вартості пластикових матеріалів. уваги в літературі, а потім цифрові технології, включаючи штучний інтелект, блокчейн та Інтернет речей. Розглядаючи окремі технології, перше цікаве відкриття стосується етапів ланцюжка створення вартості, для яких актуальні ці нові технології. Як видно на рис. 1, найбільша група стосується ранніх етапів

ланцюга створення вартості, виробників сировини та полімерів, тоді як друга найбільша група стосується етапів завершення життєвого циклу поводження з відходами та переробки. Дуже небагато спеціально стосуються середніх етапів ланцюжка створення вартості. Цікаво, що в останній групі з 20 документів представлені технології, які впливають на всі етапи ланцюжка створення вартості, і тому можуть вказувати на можливі зміни на рівні системи. Окрім окремих технологій, у літературі висвітлюється взаємодоповнюваність між ними. Серед цих нових технологій ми виділяємо чотири набори технологій, які мають потенціал порушити поточний режим використання пластикових матеріалів чотирма різними способами:

- підвищення ефективності та можливостей автоматизації (Промисловість 4.0);
- уможливлення зміни в системі виробництва та споживання (розподілена економіка);
- сприяння розробка продуктів з високою доданою вартістю з біологічних матеріалів (системи на основі біопродуктів);
- зменшення потреби в сировині для виробництва високоякісного переробленого пластику (хімічна переробка).

По-перше, згідно з літературою, можливості обміну даними та автоматизації, які забезпечуються технологіями «Промисловості 4.0», демонструють великий потенціал для підвищення циркулярності на етапах виробництва пластикового ланцюга створення вартості. Сприятливі сили, що стоять за цією групою технологій, включають обіцянку підвищення ефективності та продуктивності [12–14], створення позитивних маркетингових повідомлень для споживачів [14], повторного використання матеріалів [13], потенційне захоплення змішаних джерел відходів [27], забезпечення прозорості та співпраці між суб'єктами, а також

значний суспільний вплив, який узгоджується з поточними політичними дискусіями. Концепція розподіленої економіки стосується переходу економічної парадигми до більш локальних або навіть персональних систем постачання, виробництва, споживання та переробки. Комбінація нових технологій, які створюють цю нову концепцію, – це 3D-друк, IoT, блокчейн, штучний інтелект та хмарні обчислення, а також невеликі процеси хімічної трансформації, що сприяють змінам у системах виробництва, споживання та соціально-економічних систем, а не до збільшення ефективності і можливості автоматизації, представлені в попередній категорії. Приклади таких рішень включають «мікропереробку» [14], «однорангову циркулярність» [12] і соціотехнічну систему виробництва/споживання з підтримкою 3D-друку [13]. Аргументи на користь прийняття цього набору технологій у ланцюжку вартості виробництва пластику включають повне перевизначення понять «відходи» та «цінність», повторне використання матеріалів, використання змішаних потоків відходів через децентралізовану форму вирішення поточних проблем із сортуванням та збиранням відходів [14], а також обіцянку впливу на все суспільство [13].

Навіть більше, уможливаючи автодостатність і обмежуючи виробництво товарів меншим масштабом і географією, види діяльності, які зараз сприймаються як неприбуткові, можуть стати такими [18]. Третій набір технологій, біосистеми, розширює ідею «виготовлення продуктів із доданою вартістю з матеріалів біологічного походження» та включає набір технологій (наприклад, синтетична біологія, вхідні ресурси (наприклад, біовідходи), процеси (наприклад, анаеробне зброджування), і продукти (наприклад, біополімери), що входять до концепцій біореф'єрів і біоматеріалів [31]. Використовуючи переваги місцевого чи регіонального виробництва та модель «економії масштабу», набір

Таблиця 1

Короткий перелік нових технологій, що використовуються в різних сферах циклічної діяльності за кількістю згадок, набором технологій і сферою діяльності ЦЕ

ТЕХНОЛОГІЇ	Кількість згадок у літературі	Набір технологій 14.0	СФЕРА ДІЯЛЬНОСТІ Розподілена економіка	Система на біологічній основі	Хімічна переробка	Регенерування	Ділення	Оптимізація	Цикл	Віртуалізація	Обмін
Біополімери	24										
Біонафтопереробні заводи	23										
Інтернет речей (IoT)	16										
Штучний інтелект (AI)	14										
Блокчейн	14										
Синтетична біологія	12										
Нанотехнології	11										
3D друк	10										
Робототехніка	10										
Хімічна переробка	10										
Великі дані	9										
Хмарні обчислення	7										
Доповнена та віртуальна реальність	5										
Інтенсифікація процесу	4										
Мікропереробка	3										

Джерело: розроблено автором [22]

парадигм систем на біологічній основі представляє життєздатну альтернативу системній залежності від викопного палива. У літературі стверджується, що біологічні системи дозволяють повторно використовувати матеріал і принципово змінюють сприйняття «відходів» і «цінності» [11].

Крім того, необхідно досягти покращення продуктивності сільського господарства та більш ефективного використання біомаси, де включено концепцію циркулярної економіки [30]. Крім того, перехід до відновлюваних джерел енергії для використання у виробничих процесах також відіграє ключову роль, оскільки це знижує вуглецевий слід кінцевої продукції (наприклад, у харчових продуктах і, таким чином, підвищує її привабливість для споживачів. Поділитися Область дій «Поділитися» зосереджена на повторному використанні та спільному використанні активів і продуктів, а також на подовженні загального терміну служби продукту [14]. Технології, що розширюють внутрішні цикли в моделі циркулярної економіки та зміна бізнес-моделей, виділяються як найбільш трансформаційні. Блокчейн є найбільш згадуваною новою технологією завдяки її можливостям відстежувати активи чи продукти на шляху обміну/споживання, а також завдяки її функціям безпеки, ведення записів і незмінності інформації. Крім того, у кількох документах обговорюються переваги відстеження фізичного розташування, які надають технології IoT [13].

Однак такий підхід ускладнює переробку кінцевих продуктів і перешкоджає використанню біоматеріалів. Методи синтетичної біології, зосереджені на покращенні властивостей біополімерів, а не на розробці нових сполук, демонструють великий потенціал – харчова упаковка з антимікробними властивостями та покращеними фізичними властивостями або подовження терміну придатності фруктів і овочів за допомогою використання біополімерів нанокompозити стають дедалі життєздатнішими [29]. Або в поєднанні, або з автономної точки зору, різні автори виділяють декілька нових технологій, які зменшують відходи, дозволяють закривати потоки ресурсів і створюють цінність, одночасно зменшуючи витрати та збільшуючи доходи. Комбінація технологій, яка може означати значний стрибок вперед з точки зору ефективності процесів виробництва та ланцюга постачання, складається з великих даних, штучного інтелекту через його різні галузі (наприклад, машинне навчання, комп'ютерне бачення, можливості автоматизації) та Інтернету речей [13]. З точки зору високого рівня: штучний інтелект забезпечує логіку й обробку даних, які надаються в реальному часі датчиками Інтернету речей або на основі історичної продуктивності (великі дані) [28].

Доступні дослідження на цю тему зосереджені на використанні блокчейну для віртуалізації та автоматизації контрактів і використання технологій доповненої реальності (AR) або віртуальної реальності (VR) для моделювання реального виробничого об'єкта або процесу перед створенням/впровадженням це [26], яке може бути використано при розробці продуктів для обслуговування, довговічності та можливості оновлення. Обмін Сфера дій «Обмін» охоплює зрушення в бік заміни застарілих способів виробництва та споживання шляхом використання більш досконалих невідновлюваних матеріалів, застосування нових технологій

та вибору нових продуктів або послуг [26]. Нанотехнології разом із машинами та системами 3D-друку пропонують багатообіцяючі шляхи трансформації. Використання нанотехнологій для покращення характеристик пластикових матеріалів або покращення бетону шляхом поєднання його з непереробним пластиком демонструє, як нові методи та матеріали можуть покращити застарілі системи [27].

Висновки. На основі даних, отриманих шляхом систематичного огляду літератури, досліджено як нові технології потенційно сприяють переходу до циркулярної економіки в ланцюжках доданої вартості пластикових матеріалів. Огляд літератури підкреслює взаємодоповнюваність між різними технологіями. Огляд визначив, що замість окремих технологій існує чотири набори технологій, які мають потенціал для підвищення циркулярності в ланцюжку створення вартості пластикових матеріалів: «Промисловість 4.0», розподілена економіка, системи на основі біотехнологій і технології переробки хімічних речовин.

З різних точок зору та в різному масштабі кожен із цих наборів технологій може втілити в життя принципи циркулярної економіки та представляти фундаментальний зсув у поточному способі дій соціально-технічного режиму, про який йдеться, у визначених сферах дій «Regenerate, Share, Optimize, Loop, Virtualize, Exchange» Регенерувати, ділитися, оптимізувати, зацікловувати, віртуалізувати, обмінюватися. Хоча жоден із визначених наборів технологій не забезпечує повністю циклічного рішення, технології, які сприяють оптимізованому використанню пластикових матеріалів за рахунок підвищення ефективності та продуктивності на всіх етапах ланцюжка створення вартості, пропонують багатообіцяючі шляхи трансформації. Очевидно, це стосується Індустрії 4.0.

Основні механізми, за допомогою яких ці технології покращують циркулярність, – це ті, які забезпечують обмін даними та інформацією між зацікавленими сторонами, а також автоматизацію процесів на етапах виробництва, споживання та переробки. Крім того, у переході до ЦЕ у сфері пластикових матеріалів важливу роль відіграють нові технології, спрямовані на повторне введення матеріалів у систему або «закриття циклу». Ці технології, які є результатом злиття кількох галузей знань (наприклад, хімічна інженерія, промислова біотехнологія), можуть уможливити виробництво, модернізацію та (повторну) обробку нових і існуючих типів полімерів, щоб краще підходити для циклічних життєвих циклів. Хоча технології, які охоплюють відновлення природних екосистем, спільне використання активів і обмін успадкованими способами виробництва та споживання, для порівняння, кількісно не пов'язані з багатьма технологіями, вони стосуються деяких із найбільш потенційно руйнівних на системному рівні. Це підкреслює багаторівневу та загальносистемну зміну, яка необхідна для процвітання цих галузей та їхніх галузей, що розвиваються.

Як і в будь-якій соціотехнічній системі, розвиток, впровадження та поширення нових технологій значною мірою залежать від того, як люди з ними взаємодіють. З одного боку, це означає, що ці інструменти також, ймовірно, будуть розгорнуті та використані способами, які не сприятимуть циркулярності, тому вкрай важливо уважно стежити за розвитком цих технологій,

щоб переконатися, що їхній циркулярний потенціал належним чином матеріалізований. З іншого боку, це означає, що вони стикаються з перешкодами для впровадження та розширення, пов'язаними не тільки з природою технологічного розвитку, але й з когнітивною,

перцептивною, організаційною, ринковою та системною точки зору. Майбутні дослідження повинні вивчати спільну еволюцію технологічних і нетехнологічних інновацій під час переходу до циркулярної економіки в ланцюжку створення вартості пластикових матеріалів.

References:

1. Acioli C, Scavarda A, Reis A (2021) Applying Industry 4.0 technologies in the COVID-19 sustainable chains. *Int J Product Perform Manag*, no. 70, pp. 988–1016. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2020-0137>
2. Vrchota J, Pech M, Rolínek L, Bednář J (2020) Sustainability outcomes of green processes in relation to industry 4.0 in manufacturing: systematic review. *Sustainability* (Switzerland), no. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12155968>
3. Zvarych, I., Brodovska, O., Krysovata, L., Gerchakivsky, S., Gerchakivska, O. (2024) Energy system decarbonization and circular economy: “bypass emission hotspots. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, no. 25(2), pp. 45–61.
4. Shevchenko, I., Liubokhynets, L., Zvarych, I., Brodovska, O., Bril, M. (2023) Antifragile in the global economy as an indicator of economic development. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, no. 6(53), pp. 274–286.
5. Osaulenko, O., Krysovaty, A., Zvarych, I., Brodovska, O., Krysovaty, I. (2023) Complementary approach to the analysis of countries' participation in global production networks. *Statistical Journal of the IAOS*, no. 39(3), pp. 649–658
6. Zeiss R, Ixmeier A, Recker J, Kranz J (2021) Mobilising information systems scholarship for a circular economy: review, synthesis, and directions for future research. *Inf Syst J*, no. 31, pp. 148–183. DOI: <https://doi.org/10.1111/isj.12305>
7. Hsu W-T, Domenech T, McDowall W (2021) How circular are plastics in the EU? MFA of plastics in the EU and pathways to circularity. *Clean Environ Syst*, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2020.100004>
8. Bauer F, Nielsen TD, Nilsson LJ et al (2022) Plastics and climate change—Breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways. *One Earth*, no. 5, pp. 361–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.03.007>
9. Bauer F, Fontenit G (2021) Plastic dinosaurs – digging deep into the accelerating carbon lock-in of plastics. *Energy Policy*, no. 156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112418>
10. Cabernard L, Pfister S, Oberschelp C, Hellweg S (2021) Growing environmental footprint of plastics driven by coal combustion. *Nat Sustain* 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00807-2>
11. Ragusa A, Svelato A, Santacroce C et al (2021) Plastics in the environment: First evidence of microplastics in human placenta. *Environ Int*, no. 146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
12. Ford HV, Jones NH, Davies AJ et al (2022) The fundamental links between climate change and marine plastic pollution. *Sci Total Environ*, no. 806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150392>
13. Bag S, Telukdarie A, Pretorius JHC, Gupta S (2021) Industry 4.0 and supply chain sustainability: framework and future research directions. *Benchmarking*, no. 28, pp. 1410–1450. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2018-0056>
14. Hanieh A (2021) Petrochemical empire. The geo-politics of fossil-fuelled production. *New Left Rev*, no. 130, pp. 25–51
15. Rosa P, Sassanelli C, Urbinati A et al (2020) Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *Int J Prod Res*, no. 58, pp. 1662–1687. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>
16. Kouhizadeh M, Zhu Q, Sarkis J (2020) Blockchain and the circular economy: potential tensions and critical reflections from practice. *Prod Plan Control*, no. 31, pp. 950–966. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1695925>
17. Esmailian B, Sarkis J, Behdad S (2020) Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resour Conserv Recycl*, no. 163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105064>
18. Böckel A, Nuzum A-K, Weissbrod I (2021) Blockchain for the circular economy: analysis of the research-practice gap. *Sustain Prod Consumpt*, no. 25, pp. 525–539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.006>
19. Ranta V, Aarikka-Stenroos L, Väisänen J-M (2021) Digital technologies catalyzing business model innovation for circular economy—multiple case study. *Resour Conserv Recycl*, no. 164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105155>
20. Braglia M, Marrazzini L, Padellini L, Rinaldi R (2021) Managerial and Industry 4.0 solutions for fashion supply chains. *J Fashion Market Manag*, no. 25, pp. 184–201. <https://doi.org/10.1108/JFMM-12-2019-0285>
21. Erickson J, Baker J, Barrett S et al (2021) End-to-end collaboration to transform biopharmaceutical development and manufacturing. *Biotechnol Bioeng*, no. 118, pp. 3302–3312. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.27688>
22. Howson P (2020) Building trust and equity in marine conservation and fisheries supply chain management with blockchain. *Mar Policy*, no. 115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103873>
23. Kazancoglu I, Kazancoglu Y, Yarimoglu E, Kahraman A (2020) A conceptual framework for barriers of circular supply chains for sustainability in the textile industry. *Sustain Dev*, no. 28, pp. 1477–1492. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.2100>
24. Dijkstra H, van Beukering P, Brouwer R (2021) In the business of dirty oceans: overview of startups and entrepreneurs managing marine plastic. *Mar Pollut Bull*, no. 162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111880>
25. Bauwens T, Hekkert M, Kirchherr J (2020) Circular futures: What Will They Look Like? *Ecol Econ*, no. 175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106703>
26. Sahajwalla V, Hossain R (2020) The science of microrecycling: a review of selective synthesis of materials from electronic waste. *Mater Today Sustain*, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100040>
27. Nilsen-Nygaard J, Fernández EN, Radusin T et al (2021) Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: impact on food quality and effect of innovative processing technologies. *Comprehens Rev Food Sci Food Saf*, no. 20, pp. 1333–1380. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12715>
28. Hussain Z, Mishra J, Vanacore E (2020) Waste to energy and circular economy: the case of anaerobic digestion. *J Enterp Inf Manag*, no. 33, pp. 817–838. DOI: <https://doi.org/10.1108/JEIM-02-2019-0049>
29. Žnidaršič-Plazl P (2021) Let the biocatalyst flow. *Acta Chim Slov*, no. 68, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.17344/acsi.2020.6488>
30. Basumatary IB, Mukherjee A, Katiyar V, Kumar S (2020) Biopolymer-based nanocomposite films and coatings: recent advances in shelf-life improvement of fruits and vegetables. *Crit Rev Food Sci Nutr*, no. 13, pp. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1848789>
31. Arun KB, Madhavan A, Sindhu R et al (2020) Remodeling agro-industrial and food wastes into value-added bioactives and biopolymers. *Ind Crops Prod*, no. 154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112621>