

СТІЙКІСТЬ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ІНДУСТРІЇ 4.0

ГРИШОВА І.Ю. – доктор економічних наук,
професор, член-кореспондент Національної академії аграрних наук України
orcid.org/0000-0001-6276-7619

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України

ЯКОВЕНКО А.О. – кандидат економічних наук, доцент
orcid.org/0000-0002-7158-8310

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України

СТЕПАНОВА М.М. – кандидат економічних наук
orcid.org/0009-0008-5650-9232

Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства
Національної академії аграрних наук України

Постановка проблеми. Відповідно до концепції циркулярної економіки (ЦЕ), необхідно створити сучасну стійку і комплексну екосистему, яка враховуватиме наступні аспекти сталого розвитку: економічні, соціальні та екологічні. Сутність та теоретичний підхід циркулярної економіки полягає у сприянні зменшенню використання ресурсів та енергії через реалізацію інноваційних механізмів, таких як ресурсозаощадження та енергозбереження. В мету циркулярної економіки покладено досягнення сталого розвитку, що мають забезпечити баланс між економікою, навколишнім середовищем та соціально-економічними інтересами суспільства, та сприятимуть гармонійному розвитку зазначених аспектів.

В економічних умовах сьогодення, циркулярна економіка та Індустрія 4.0 (I 4.0) відіграють важливу роль в розвитку національних економік. Циркулярна економіка спрямована на максимально ефективне використання ресурсів та мінімізацію відходів, забезпечуючи рівновагу в сферах виробництва, обігу та споживання. У свою чергу, Індустрія 4.0 використовує цифрові технології, щоб автоматизувати виробничі процеси та збільшити продуктивність діяльності. Концепція Індустрії 4.0 описує використання передових цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), робототехніка та штучний інтелект (ШІ) для покращення виробничих та промислових процесів. З іншого боку, економіка циркулярного розвитку спрямована на створення системи використання ресурсів, де відходи мінімізовані, а матеріали переробляються та використовуються повторно, утворюючи замкнутий цикл. За останні роки зацікавленість у застосуванні цифрових технологій у циркулярній економіці значно зросла, і велика кількість компаній та урядів держав почали активно їх використовувати в різних сферах. Також варто відзначити, що зростає зацікавленість компаній та організацій в використанні цифрових технологій, з метою поліпшення екологічної продуктивності. Наприклад, згідно з даними звіту European

Environmental Agency (2020), понад 50% підприємств у Європейському союзі вже впровадили цифрові технології для покращення своєї екологічної ефективності [1].

Мета дослідження полягає у розгляді взаємозв'язку між двома концепціями – циркулярної економіки та Індустрією 4.0, а також в ідентифікації нових можливостей та завдань, пов'язаних з їх взаємодією.

Для досягнення цієї мети було поставлено наступні завдання:

1. Вивчення основних концепцій циркулярної економіки та індустрії 4.0.
2. Аналіз прикладів успішної інтеграції цифрових технологій у циркулярній економіці.
3. Визначення можливих викликів та перешкод, що виникають при взаємодії концепцій циркулярної економіки та Індустрії 4.0.

Оригінальність та цінність даного дослідження полягає у визначенні нових шляхів та проблем на тлі технологічного прогресу Індустрії 4.0 та його інтерфейсів з циркулярною економікою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки, Індустрія 4.0 та циркулярна економіка здобули все більшу популярність серед академічних та бізнес-спільнот. Дослідники даної теми обговорювали інтегрований підхід, який поєднує ідеї цих двох концепцій взаємодоповнюючим та синергетичним способом. У своїй статті вони приводять приклади успішної реалізації цього підходу в різних промислових секторах, таких як текстильний, харчовий та енергетичний] 2]. У статті "Circular Economy 4.0: An Emerging Paradigm for Digital Transformation in Production and Consumption Systems" автори описують роль цифрових технологій у реалізації циркулярної економіки, обґрунтовують важливість використання цифрових технологій за для зростання продуктивності використання ресурсів та зниження відходів [3]. Систематичний огляд наукової літератури, що описує інтеграцію циркулярної економіки та Індустрії 4.0 демонструє приклади успішної реалізації цього під-

ходу в різних секторах економіки, де науковці виділяють чималий потенціал для підвищення ефективності виробничих процесів та зниження негативного впливу на довкілля. [4-6, 17-18]

Автори С. Filippetti та Е. Marzi вивчають приклад успішної реалізації циркулярної економіки у харчовій промисловості з використанням цифрових технологій, таких як інтернет речей (IoT), Big Data та машинне навчання [7].

Українські вчені обґрунтовують необхідність впровадження концепції циркулярної економіки у харчовій промисловості та аграрній сфері, особливо у світлі зростаючої проблеми відходів харчових продуктів та неефективного використання ресурсів. При цьому вони зазначають, що впровадження циркулярної економіки в аграрну сферу може мати деякі труднощі, такі як необхідність балансування між продуктивністю та стійкістю, а також з високими інвестиційними витратами [8].

Проектування ланцюжків створення товарно-матеріальних цінностей (ТМЦ), які включають принципи Індустрії 4.0 і циркулярної економіки, може призвести до численних переваг, таких як підвищення ефективності, скорочення відходів і зростання стійкості.

Філіппетті, Ельгаїд, Марці, Тавана та ін. у своїх наукових статтях також досліджували взаємодію між Індустрією 4.0 та циркулярною економікою [7, 4-5, 15-16]. Вони виявили, що інтеграція цих двох концепцій, як наслідок створить синергетичні ефекти, покращить ефективність використання ресурсів, підвищить економічну продуктивність та зменшить відходи. Однак автори зазначають, що існує низка бар'єрів для успішної реалізації цього підходу, таких як брак знань та фінансових ресурсів, тому пропонують комплексний підхід, який враховує технічні, економічні та екологічні аспекти, щоб забезпечити успішну інтеграцію Індустрії 4.0 та циркулярної економіки.

Таким чином, інтеграція Індустрії 4.0 та циркулярної економіки має багато переваг, включаючи збільшення ефективності, зменшення відходів та забезпечення стійкості. Однак, все ще існують проблеми, які потребують вирішення, такі як недостатня інформованість та навички серед малих та середніх підприємств, а також необхідність глобального підходу до проектування ланцюга створення цінностей.

Матеріали та методика досліджень. У процесі дослідження використано наступні методи: порівняльного аналізу (оцінка результатів взаємодії між концепціями циркулярної економіки та Індустрії 4.0, дослідження прикладів інтеграції цифрових технологій у циркулярній економіці); абстрактно-логічний (постановка проблеми, обґрунтування висновків); монографічний (аналіз еволюції наукових напрацювань з проблем та можливостей використання Індустрії 4.0 для сприяння переходу до циркулярної економіки); діалектичні пізнання.

Результати досліджень. За останні роки нові технології, такі як Індустрія 4.0 та циркулярна економіка, стали дедалі більш популярними, і можна спостерігати, що ці концепції інтегруються між собою досить органічно. Концепції спрямовані на забезпечення сталого розвитку, оптимізацію економічних процесів, що пов'язані з виробництвом, використанням та відновлюваною утилізацією товарів і ресурсів.

зані з виробництвом, використанням та відновлюваною утилізацією товарів і ресурсів.

Циркулярна економіка передбачає створення системи використання ресурсів, в якій зменшують відходи, а матеріали можуть бути перероблені та використані повторно. Основними поняттями є оптимізація використання матеріальних та нематеріальних цінностей, переробка відходів та повторне їх використання, а також збільшення екологічної ефективності. Циркулярна економіка є комплексною концепцією, яка сприяє досягненню екологічних, соціальних та економічних цілей. Вона дозволяє економити кошти на закупівлі нових ресурсів та задовольняти потреби населення в органічній продукції, тим самим стимулюючи сталий розвиток.

З іншого боку, концепція виробництва, Індустрія 4.0, заснована на використанні передових технологій, таких як штучний інтелект, інтернет речей та автоматизація. Ці технології сприяють оптимізації виробничих процесів, збільшенню ефективності, зниженню витрат та зменшенню впливу на довкілля.

Циркулярна економіка та Індустрія 4.0 можуть взаємодіяти для створення сталої екосистеми, яка пропонує інтегрований підхід до економічних, соціальних та екологічних ефектів. Останні дослідження свідчать, що поєднання концепцій Індустрії 4.0 та циркулярної економіки допомагають перетворити традиційні лінійні виробничі процеси на стійкі та циркулярні. Така інтеграція може сприяти зменшенню негативного впливу на довкілля та підвищенню загальної конкурентоспроможності підприємств за рахунок більш ефективного використання ресурсів. Також, дана інтеграція може сприяти створенню більш стійкої економічної системи, що дозволяє відкривати нові можливості для інновацій та розвитку. Перехід до циркулярної економіки є впливовим чинником щодо ведення економічної діяльності, який замінює традиційну лінійну модель на регенеративний та відновлювальний підхід. Незважаючи на зростаючу популярність концепції циркулярної економіки, наразі вона потребує розвитку додаткових інструментів і змін в бізнес-методах для повної реалізації свого потенціалу. Один з основних викликів, які стоять перед циркулярною економікою, полягає у розробці та застосуванні ефективних інструментів, зокрема, у сфері цифрових технологій.

Недавні наукові розвідки вказують на можливості використання Індустрії 4.0 для сприяння переходу до циркулярної економіки [9]. Індустрія 4.0 – це технологічна стратегія, що передбачає використання цифрових інструментів у промислових процесах, таких як штучний інтелект, Інтернет речей (IoT), робототехніка та інші. Об'єднання технологій Індустрії 4.0 з ЦЕ може стати проривом для підприємств у зменшенні негативного впливу на навколишнє середовище, поліпшенні ефективності використання ресурсів та створенні додаткових цінностей за рахунок переробки відходів.

Вплив Індустрії 4.0 та механізмів, що сприяють розвитку циркулярної економіки, на ланцюжки поставок є вагомим, особливо важливу роль у цьому процесі відіграють постачальники, оскільки їх діяльність безпосередньо впливає на стабільність ланцюжка. Інтегрування

цифрових технологій, таких як штучний інтелект, IoT та блокчейн може покращити прозорість ланцюжка поставок, зменшити кількість відходів та збільшити ефективність використання ресурсів. Наприклад, за даними звіту McKinsey (2020), у 2019 році глобальний ринок цифрових технологій для циркулярної економіки становив близько 5 мільярдів доларів, і очікується, що до 2025 року він зросте до 20 мільярдів доларів. Крім того, звіт Global Circular Economy Coalition (2021) зазначає, що застосування цифрових технологій може призвести до збільшення матеріалів, що переробляються, на 20-30% і зниження викидів парникових газів на 25-30% [11].

Останнім часом світову спільноту вразив вплив пандемії COVID-19 на глобальні ланцюжки поставок. Вірус спричинив порушення та затримки в їх роботі, що вказує на потребу в забезпеченні стійкості та гнучкості цієї екосистеми. Внаслідок пандемії COVID-19 компанії переглядають свої інвестиційні стратегії та розміщення, розглядаючи можливість реорганізації ланцюжків постачання, збільшення місцевого виробництва. Широко аналізується можливість застосування решорінгу або ближнього шорінгу, щоб зменшити ризики ланцюжка постачання та забезпечити більшу стійкість (табл. 1).

Дані таблиці свідчать, що компанії зіткнулися з серйозними проблемами під час пандемії, пов'язаними з порушенням ланцюжків постачання. Дослідження McKinsey & Company показує, що 73% компаній відчували порушення постачання, що призвело до серйозних проблем у виробництві та продажах. Крім того, звіт Resilience360 вказує на збільшення інцидентів порушень ланцюжків постачання на 47% у перші три місяці 2020 року. Додатково дослідження World Customs Org. показує, що обсяг світової торгівлі знизився на 5,3% у 2021 році, що є серйозними проблемами міжнародної торгівлі. Звіт Accenture демонструє, що 80% керівників компаній готові змінити свої бізнес-моделі та стратегії, щоб підвищити стійкість ланцюжків поставок, що слугує підставою для внесення змін у бізнес-процеси [12].

Таким чином, пандемія COVID-19 виявилася складним випробуванням для ланцюжків поставок, і бізнес змушений знайти способи збільшення їх стійкості та гнучкості. Більшість підприємств визнають необхідність

перегляду своїх стратегій та бізнес-моделей, а також інвестування у цифрові технології, щоб забезпечити стійкість та ефективність діяльності.

Поєднання концепцій Індустрії 4.0 та циркулярної економіки може стати ефективним рішенням для компаній, які стикаються з наслідками пандемії. Використання цифрових технологій допоможе у забезпеченні ефективної віддаленої роботи та співпраці, прозорості ланцюжка поставок та аналізі даних у реальному часі для прийняття більш інформованих рішень. Тому важливо враховувати Індустрію 4.0, циркулярну економіку та наслідки пандемії COVID-19 при формуванні стратегій логістичних шляхів. Для ефективного вирішення проблем, пов'язаних з логістикою, необхідний цілісний та проактивний підхід, який забезпечує збалансовану увагу до ризиків і можливостей, включаючи екологічну стійкість та стійкість до глобальних криз.

Це дослідження є важливим внеском у розробку практичних стратегій для підприємств, які бажають забезпечити стійкість своїх логістичних шляхів. Воно допомагає визначити нові напрями та проблеми, які потрібно враховувати при розробці таких стратегій; акцентує увагу на важливості аналізу потенційних залежностей між концепціями циркулярної економіки та Індустрії 4.0 при розробці нових процесів та бізнес-моделей в суб'єктах господарювання.

У сучасному світі цифрові технології, такі як IoT, Big Data, Machine Learning, Blockchain та інші вже активно використовуються в галузі циркулярної економіки (ЦЕ). Відповідно до даних звіту McKinsey [10], використання цих технологій у циркулярній економіці призвело до значного зниження витрат на виробництво та утилізацію відходів, а також покращення екологічних показників підприємств. Дані також підтверджуються звітом European Environmental Agency [1], який вказує на те, що понад 50% підприємств у різних секторах економіки Європейського Союзу впровадили цифрові технології для покращення своєї екологічної ефективності. Наприклад, завдяки застосуванню IoT та Big Data у секторі транспорту вдалося знизити викиди шкідливих речовин на 5-10%, а в секторі сільського господарства та продовольчої промисловості застосування Machine Learning дозволило скоротити витрати на виробництво та зменшити обсяг відходів [11].

Таблиця 1

Статистика порушень ланцюжків поставок під час пандемії COVID-19

Дослідження/Звіт	Рік	Показник	Відсоток/Кількість
1	2	3	4
McKinsey & Company	2021	Компанії з порушеннями постачання	73%
Resilience360	2020	Інциденти порушення ланцюжків поставок (перші три місяці 2020 року)	17 000
		Збільшення інцидентів порушень ланцюжків постачання	47%
World Customs Org.	2021	Зниження обсягу світової торгівлі	5,3%
Accenture	2020	Керівники компаній готові змінити бізнес-моделі та стратегії для підвищення стійкості	80%

Source: За даними звітів Accenture, McKinsey & Company [10 – 12]

Систематизація прикладів успішної інтеграції цифрових технологій у циркулярній економіці, показують, що такі інновації можуть значно підвищити ефективність використання ресурсів та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Наприклад, компанія Philips впровадила цифрові технології у свій бізнес для покращення керування життєвим циклом своїх продуктів. За допомогою системи взаємодії з клієнтами Philips може збирати інформацію про продукти після продажу та включати її в подальше проектування та виробництво, що дозволяє компанії підвищити ефективність використання ресурсів та скоротити відходи. Ще одним прикладом успішної інтеграції цифрових технологій у циркулярну економіку є компанія Dell. Вона запровадила систему управління життєвим циклом своїх продуктів, що дозволяє компанії використовувати матеріали з утилізованих комп'ютерів для нових продуктів. Система також дозволяє Dell відстежувати процес переробки та відновлення продуктів, що зменшує потребу в нових ресурсах та скорочує викиди парникових газів. Компанія Apple використовує цифрові технології для управління своїми ланцюжками постачання, що дозволяє компанії більш ефективно використовувати ресурси, вчасно оцінювати наявні відхилення, попереджати про надмірні витрати та скорочувати відходи виробництва. У 2020 році Apple оголосила про свою мету стати повністю вуглецево-нейтральною до 2030 року, і цифрові технології відіграють ключову роль у досягненні цієї мети.

Ефективність та продуктивність виробничих процесів можуть бути значно підвищені за допомогою впровадження таких технологій як хмарні обчислення, Інтернет речей (IoT), аналітика даних, штучний інтелект (ШІ) та інші, більш того, вони сприяють покращенню якості, надійності та екологічності продукції.

Отже, можна узагальнити роль Індустрії 4.0 у підвищенні ефективності циркулярної економіки: приклади та інновації (табл. 2).

Концепція циркулярної економіки націлена на зменшення відходів та попиту на первинні матеріали, що допомагає уникнути використання навколишнього середовища як смітника. Крім того, метою є зменшення втрат та руйнування ресурсів шляхом зниження забруднення та збереження біорізноманіття в місцях, де проводиться видобуток ресурсів.

Ця модель пропонує сталі рішення для проблеми відходів та зменшує потребу в первинних матеріалах для виробництва. Ідея стала популярною в усьому світі як засіб забезпечення більш екологічної економіки та ефективного використання природних ресурсів.

Отже, співіснування концепцій циркулярної економіки та Індустрії 4.0 може виникнути з кількох проблем, таких як обмеженість ресурсів, високі фінансові витрати, потреба у зміні культури та менталітету, безпека даних, необхідність нових знань та навичок, а також регуляторні обмеження. Однак, з правильним управлінням та підходом, ці проблеми можуть бути подолані, що дозволить створити ефективну, стійку та інноваційну економіку.

Загалом, застосування циркулярної економіки є перспективним шляхом досягнення сталого розвитку, забезпечуючи більш ефективне та раціональне використання ресурсів. Імплементация циркулярної економіки допомагає забезпечити баланс між економічним зростанням, соціальною справедливістю та якістю довкілля, сприяючи створенню більш стійкого та життєздатного суспільства.

Перехід до циркулярної моделі виробництва дозволяє зменшити кількість відходів або перетворити їх на використовувані ресурси, що сприяє збільшенню ефективності та стійкості. Основна ідея полягає у підтримці

Таблиця 2

Систематизація інструментів Індустрії 4.0 в контексті нарощення ефективності циркулярної економіки

П/п	Інструменти Індустрії 4.0	Вплив на ефективність реалізації циркулярної економіки
1	2	3
1.	Розумний контроль якості:	технології Індустрії 4.0 можуть бути використані для створення систем, які надають змогу контролювати якість продукції в режимі реального часу за допомогою різних датчиків та штучного інтелекту. Це дозволяє виявляти можливі проблеми з якістю продукції на ранніх етапах та уникнути їх подальшого поширення.
2.	Автоматизовані системи керування:	шляхом використання IoT і хмарних обчислень, можна розробити автоматичні системи управління виробничими процесами, що сприяє зменшенню ризику помилок та підвищенню продуктивності.
3.	Оптимізація енергоспоживання:	за допомогою технологій Індустрії 4.0 можна створити системи, які можуть оптимізувати енергоспоживання у виробничому процесі. Це дозволяє знизити витрати на енергію та зменшити негативний вплив на довкілля.
4.	Роботизовані системи:	технології Індустрії 4.0 дозволяють створювати автоматизовані системи, які здатні виконувати різні завдання на виробництві, наприклад, переміщувати товари або керувати обладнанням. Застосування IoT та штучного інтелекту допомагає знизити витрати на робочу силу та підвищити продуктивність.
5.	Цифрова двійка:	за допомогою технологій І 4.0 можна використовувати концепцію цифрової двійки (Digital Twin) для створення віртуальних копій виробничих процесів та обладнання. Це дозволяє покращити ефективність та передбачуваність виробничих процесів.

Source: Розробка авторів Hilario da Silva, T. H., & Sehnem, S. [13]

Таблиця 3

Можливі виклики та перешкоди при взаємодії концепцій циркулярної економіки та Індустрії 4.0

Можливі виклики та перешкоди	Опис
1	2
Фінансові витрати	Введення нових технологій та зміну бізнес-моделей може бути вартісними заходами, які потребують значних інвестицій.
Обмеженість ресурсів	Циркулярна економіка передбачає зменшення споживання ресурсів, що може створити проблеми з нестачею деяких матеріалів та компонентів для виробництва.
Зміна культури та менталітету	Для реалізації концепції циркулярної економіки потрібна зміна підходу до виробництва та споживання, що може вимагати кардинальної зміни культурної та соціальної поведінки.
Проблеми з безпекою даних	Реалізація цифрових технологій може викликати проблеми забезпечення безпеки даних, які можуть підірвати конфіденційність та захист інформації.
Необхідність нових навичок та знань	Впровадження цифрових технологій може вимагати від працівників нових компетенцій та знань, що призводить до необхідності перепідготовки та підвищення кваліфікації персоналу.
Регуляторні обмеження	Певні аспекти циркулярної економіки, такі як утилізація відходів, можуть бути обмежені законодавчими нормами, що ускладнить їх впровадження.

Source: Узагальнено авторами за даними [7, 9, 14, 19].

продуктів, компонентів та матеріалів, що мають високу корисність та цінність, які можна розподілити на біологічні ресурси, технічні та оптимізації їх використання. Крім того, у циркулярній економіці приділяється увага соціальним та економічним аспектам стійкості, щоб забезпечити рівновагу між трьома компонентами – екологічним, соціальним та економічним. Це надзвичайно важливо для досягнення стійкого майбутнього, оскільки він сприяє переходу від традиційної лінійної моделі «взяти – зробити – викинути» до економічної моделі, яка є більш стійкою та спроможною до регенерації.

Висновки: Включення цифрових технологій в циркулярну економіку може покращити використання ресурсів та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Успішні приклади впровадження таких технологій в циркулярну економіку вбачають використання блокчейн-технології для забезпечення прозорості та контролю ланцюжка поставок, використання Інтернету речей для моніторингу та оптимізації процесів переробки та утилізації відходів, а також застосування штучного інтелекту для оптимізації виробничих процесів.

Однак, поєднання концепцій циркулярної економіки та Індустрії 4.0 може зіткнутися з викликами та перешкодами, такими як значні витрати на впровадження цифрових технологій, необхідність переосмислення компетенцій персоналу та проблеми безпеки даних. Щоб успішно інтегрувати цифрові технології у циркулярну економіку, потрібно провести системну роботу, співпрацювати між галузями, секторами діяльності та компаніями, а також отримувати державну підтримку на стимулювання інновацій.

Інтеграція цифрових технологій у циркулярну економіку є важливим кроком для покращення стійкості та ефективності використання ресурсів, через подолання наявних перешкод, ризиків та викликів. Комплексна стратегія взаємодії між концепціями циркулярної економіки та Індустрії 4.0 також є необхідною для успішної інтеграції цифрових технологій у циркулярну економіку. Останні тенденції показують зростання застосування

цифрових технологій у циркулярній економіці та підвищений інтерес до цієї теми, що свідчить про її чималий потенціал для майбутнього.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. European Environmental Agency. *The European environment – state and outlook 2020: knowledge for transition to a sustainable Europe*. Publications Office of the European Union. 2020. URL: <https://www.eea.europa.eu/soer/2020>. (Last accessed: 15.04.2024).
2. Elgaaied, L., Ayadi O. F., Pires A. J., & Eldabi T. Industry 4.0 and circular economy integration: A review of practices and enabling technologies. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126678. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126678>. (Last accessed: 16.04.2024).
3. Tavana, M., Di Caprio, D., Santos-Arteaga, F. J., & Gandara, A. Circular Economy 4.0: An Emerging Paradigm for Digital Transformation in Production and Consumption Systems. *Sustainability*, 11(22), 6197. URL: <https://doi.org/10.3390/su11226197>. (Last accessed: 16.04.2024).
4. Elgaaied, L., Gharbi, A., Pellerin, R., & Pesant, J. P. Circular economy and industry 4.0 integration: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 285, 125422. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production>. (Last accessed: 17.04.2024).
5. Tavana M., Di Caprio, D., Santos-Arteaga F. J., Shamshiri-Pour M., & Hajmohammad S. Circular economy 4.0: An emerging paradigm for digital transformation in production and consumption systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 155-163. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/technological-forecasting-and-social-change>. (Last accessed: 18.04.2024).
6. Zeng S., Shi J., Lou G., & Zhang H. Circular economy meets Industry 4.0: Introduction to the book. *Circular economy and Industry 4.0*, 1-16.
7. Filippetti, C., & Marzi, E. Industry 4.0 and Circular Economy: The Case of Food Manufacturing Industry. *Sustainability*, 12(11), 4653. URL: <https://doi.org/10.3390/su12114653>. (Last accessed: 20.04.2024).

8. Нестерова К. С., Щербата М. Ю., Гришова Р. В. Ризики розвитку циркулярної моделі економіки в умовах нестабільності світового ринку. *Бізнес Інформ*. 2023. №1. С. 48–53. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-1-48-53> (дата звернення 21.04.2024).
9. Abid, S., Sahin, A., Sarstedt, M., Singh, S., & Borowiecki, M. The potential of Industry 4.0 technologies for transitioning to a circular economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 13 (7), 3865.
10. McKinsey & Company. Circular economy practices: Opportunities for growth. [Online report]. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/circular-economy-practices-opportunities-for-growth>. (Last accessed: 05.06.2024).
11. Global Circular Economy Coalition. The Role of Digital Technologies in Accelerating the Transition to a Circular Economy. [Online]. URL: https://docs.wbcsd.org/2021/03/The_Role_of_Digital_Technologies_in_Accelerating_the_Transition_to_a_Circular_Economy.pdf. (Last accessed: 20.04.2024).
12. Accenture. Resilient and Agile Supply Chains: Maximizing the Potential of Industry 4.0 in a Circular Economy. [Online report]. URL: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-144/Accenture-Resilient-and-Agile-Supply-Chains.pdf. (Last accessed: 21.04.2024).
13. Hilario da Silva, T. H., & Sehnem, S. The circular economy and Industry 4.0: synergies and challenges. Department of PPGA, UNISUL, Florianópolis, Brazil and Department of Management, Unoesc, Chapecó, Brazil and Department of Management, UNISUL, Florianópolis, Brazil. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/REGE-07-2021-0121/full/html> (Last accessed: 19.04.2024).
14. Гришова, І., Гришова, Р. Державна політика сталого розвитку у контексті циркулярної моделі економіки. *Перспективи розвитку освіти, науки та бізнесу у глобальній середовищі*. Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції. Тернопіль, 2020. С. 45-47.
15. Гришова І. Ю., Нестерова К. С. Концепт циркулярної економіки у контексті забезпечення сталого розвитку. *Економіка АПК*. 2021. № 4. С. 88 – 94. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202104088>. (дата звернення 03.05.2024).
16. Balian A., Gryshova I., Shabatura TS. Realities of state support for development of agricultural production in Ukraine. *Scientific Papers of Legislation Institute of Verkhovna Rada of Ukraine*, (2), 156-167. URL: <https://doi.org/10.32886/instzak.2021.02.16>. (Last accessed: 02.05.2024).
17. Кошкалда І. В., Ряснянська А. М., Руденко С. В. Розвиток біоорієнтованої економіки: досвід Європейського Союзу. *Економіка АПК*. 2021. № 12. С. 55-64. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202112055>. (дата звернення 01.05.2024).
18. Khaustova, V., Gryshova, I., Kostenko, D., & Butenko, T. State policy in the field of implementation of bioenergy technologies in the context of its regulatory and legal support. *Економіка АПК*, 28(11), 70-82. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202111070>. (Last accessed: 04.05.2024).
19. Gryshova, I., & Nesterova, K. The concept of a circular economy in the context of sustainable development. *Економіка АПК*, 28(4). URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202104088>. (Last accessed: 04.05.2024).

REFERENCES:

- European Environmental Agency. (2020), The European environment – state and outlook 2020: knowledge for transition to a sustainable Europe. *Publications Office of the European Union*.
- Elgaaied, L., Ayadi, O. F., Pires, A. J., & Eldabi, T. (2021). Industry 4.0 and circular economy integration: A review of practices and enabling technologies. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126678>.
- Tavana, M., Di Caprio, D., Santos-Arteaga, F. J., & Gandara, A. (2019). Circular Economy 4.0: An Emerging Paradigm for Digital Transformation in Production and Consumption Systems. *Sustainability*, 11(22), 6197. URL: <https://doi.org/10.3390/su11226197>.
- Elgaaied, L., Gharbi, A., Pellerin, R., & Pesant, J. P. (2021). Circular economy and industry 4.0 integration: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 285, 125422.
- Tavana, M., Di Caprio, D., Santos-Arteaga, F. J., Shamshiri-Pour, M., & Hajmohammad, S. (2019). Circular economy 4.0: An emerging paradigm for digital transformation in production and consumption systems. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 155-163.
- Zeng, S., Shi, J., Lou, G., & Zhang, H. (2019). Circular economy meets Industry 4.0: Introduction to the book. *Circular economy and Industry 4.0*, 1-16.
- Filippetti, C., & Marzi, E. (2020). Industry 4.0 and Circular Economy: The Case of Food Manufacturing Industry. *Sustainability*, 12(11), 4653. URL: <https://doi.org/10.3390/su12114653>.
- Nesterova K. S., Shcherbata M. Yu., Gryshova R. V. Ryzky rozvytku tsyrkuliarnoi modeli ekonomiky v umovakh nestabilnosti svitovoho rynku. [Risks of the development of the circular model of the economy in conditions of instability of the world market]. *Biznes Inform*. 2023. 1., 48–53. URL: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2023-1-48-53>. [in Ukrainian].
- Abid, S., Sahin, A., Sarstedt, M., Singh, S., & Borowiecki, M. (2021). The potential of Industry 4.0 technologies for transitioning to a circular economy: A systematic literature review. *Sustainability*, 13 (7), 3865.
- McKinsey & Company. (2020). Circular economy practices: Opportunities for growth. [Online report]. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/circular-economy-practices-opportunities-for-growth>.
- Global Circular Economy Coalition. (2021). The Role of Digital Technologies in Accelerating the Transition to a Circular Economy. [Online]. URL: https://docs.wbcsd.org/2021/03/The_Role_of_Digital_Technologies_in_Accelerating_the_Transition_to_a_Circular_Economy.pdf. [Accessed: March 24, 2023].
- Accenture. (2021). Resilient and Agile Supply Chains: Maximizing the Potential of Industry 4.0 in a Circular Economy. [Online report]. Available at: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-144/Accenture-Resilient-and-Agile-Supply-Chains.pdf [Accessed 24 Mar. 2023].
- Hilario da Silva, T. H., & Sehnem, S. (2020). The circular economy and Industry 4.0: synergies and challenges.

- Department of PPGA, UNISUL, Florianópolis, Brazil and Department of Management, Unoesc, Chapecó, Brazil and Department of Management, UNISUL, Florianópolis, Brazil.
14. Gryshova, I., Gryshova, R. (2020). Derzhavna polityka staloho rozvytku u konteksti tsyrkuliarnoi modeli ekonomiky. [State policy for sustainable development in the context of the circular model of the economy]. *Perspektyvy rozvytku osvity, nauky ta biznesu u hlobalnii seredovyschi.* Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii (23 zhovtnia 2020 r., m. Ternopil), 45-47. [in Ukrainian].
 15. Gryshova I.Yu., Nesterova K.S. Kontsept tsyrkuliarnoi ekonomiky u konteksti zabezpechennia staloho rozvytku. [The concept of circular economy in the context of sustainable development]. *Ekonomika APK.* 2021. 4. S. 88-94. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202104088>. [in Ukrainian].
 16. Balian, A., Gryshova, I., Shabaturova, TS (2021). Realities of state support for development agricultural production in Ukraine. *Scientific Papers of Legislation Institute of Verkhovna Rada of Ukraine*, (2), 156-167. URL: <https://doi.org/10.32886/instzak.2021.02.16>.
 17. Koshkaldia I. V., Riasnianska A. M., Rudenko S. V. (2021). [Development of a bio-oriented economy: the experience of the European Union]. *Rozvytok bioorientovanoi ekonomiky: dosvid Yevropeiskoho Soiuzu.* *Ekonomika APK.* 2021. № 12. S. 55-64. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202112055>. [in Ukrainian].
 18. Khaustova, V., Gryshova, I., Kostenko, D., & Butenko, T. (2021). State policy in the field of implementation of bio-energy technologies in the context of its regulatory and legal support. *Ekonomika APK*, 28(11), 70-82. URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202111070>.
 19. Gryshova, I., & Nesterova, K. (2021). The concept of a circular economy in the context of sustainable development. *Ekonomika APK*, 28(4), – URL: <https://doi.org/10.32317/2221-1055.202104088>.

Гришова І.Ю., Яковенко А.О., Степанова М.М. Стейкність циркулярної економіки в контексті розвитку Індустрії 4.0

Дослідження розкриває можливості інтеграції цифрових технологій в циркулярну економіку з метою підвищення ефективності використання ресурсів та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище в аграрному секторі. Ефективне використання цифрових технологій у циркулярній економіці реалізується через блокчейн-технології для забезпечення прозорості, контролю ланцюжків поставок, використання Інтернет речей, моніторингу та оптимізації процесів переробки та утилізації відходів, а також через використання штучного інтелекту для збільшення ефективності виробничих процесів. Однак, взаємодія між концепціями циркулярної економіки та Індустрії 4.0 може бути ускладнена певними проблемами та викликами. Можна виділити наступні перешкоди: високі витрати на впровадження цифрових технологій, необхідність перепідготовки персоналу, можливі ризики забезпечення безпеки даних тощо. Для успішного впровадження цифрових технологій у циркулярну економіку необхідна цілісна та системна робота, що базується на ефективній

співпраці суб'єктів господарювання різних галузей економіки та держави. Автори статті вважають, що впровадження цифрових технологій в концепцію циркулярної економіки дозволить досягти більш стійкого та ефективного використання ресурсів і в промисловості, і в споживанні. Проте, ефективна реалізація наявного потенціалу цифрових технологій в циркулярній економіці потребує усунення певних перешкод, та розробки комплексної стратегії взаємодії між концепціями циркулярної економіки та Індустрії 4.0. Успішна інтеграція цифрових технологій передбачає створення комплексної стратегії, що враховуватиме специфіку виробничих процесів та споживання ресурсів серед учасників різних галузей економіки, відповідати їх потребам та інтересам. Результати дослідження вказують на чималий потенціал взаємодії циркулярної економіки та Індустрії 4.0, розкривають нові можливості та визначають завдання для подальшої співпраці між цими концепціями. Подальші наукові дослідження повинні бути спрямовані на розв'язання представлених проблем та розробку ґрунтовних комплексних підходів до створення цінностей, які враховують принципи Індустрії 4.0 та циркулярної економіки.

Ключові слова: циркулярна економіка, Індустрія 4.0, інноваційні технології, сталий розвиток, стійкість екосистеми.

Hryshova I.Yu., Yakovenko A.O., Stepanova M.M. The resilience of a circular economy in the context of Industry 4.0 development

This research article is devoted to the study of the possibility of integrating digital technologies into the circular economy in order to increase the efficient use of resources and reduce the negative impact on the environment. The research results showed that the effective use of digital technologies in the circular economy is possible through the use of blockchain technology to ensure transparency, control of supply chains, using the Internet of Things to monitor and optimise waste recycling and disposal processes, and the use of artificial intelligence to increase the efficiency of production processes. However, the interaction between the concepts of circular economy and Industry 4.0 can be complicated due to some problems and challenges. These include the high costs of implementing digital technologies, the need to retrain staff, and possible data security risks. Successful implementation of digital technologies in the circular economy requires a holistic and systematic approach based on effective cooperation between different sectors and companies. In addition, active support from the state is needed to support and stimulate innovation in this area. The authors of the article believe that the combination of digital technologies with the concept of the circular economy helps to achieve more sustainable and efficient use of resources in industry and consumption. However, unlocking the potential of integrating digital technologies into the circular economy requires overcoming obstacles and addressing challenges, as well as developing a comprehensive strategy for interaction between the concepts of the circular economy and Industry 4.0. For the successful integration of digital technologies into the circular economy, it is necessary to create a comprehensive strategy that will take into account the specifics of production processes and resource consumption in various sectors of the economy and meet the needs and

interests of stakeholders, such as government agencies, industrial companies and consumers. The results of the study indicate the potential for interaction between the circular economy and Industry 4.0, and point to new opportunities and challenges for further cooperation between these concepts. Future research should aim to

address these challenges and develop more comprehensive approaches to value creation that take into account the principles of Industry 4.0 and the circular economy.

Key words: circular economy, Industry 4.0, innovative technologies, sustainable development, ecosystem sustainability.