WASTE MANAGEMENT AND CIRCULAR ECONOMY: AN ENGINEERING-ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL APPROACHES AND SUSTAINABILITY*

SECHKIN H. MEHMED, YORDANKA I. YANKOVA-YORDANOVA

ABSTRACT: *This paper examines waste management as a central component of the transition towards a circular economy, with emphasis on the engineering and environmental dimensions of contemporary treatment, recycling and recovery technologies. The study is based on a critical literature review and a qualitative comparative analysis of scientific publications, regulatory documents and standards related to waste management, life-cycle assessment and digitalisation. Mechanical, thermal, biological and chemical approaches are considered, including mechanical-biological treatment, anaerobic digestion, pyrolysis, gasification, chemical recycling and plastic upcycling. A comparative engineering-environmental framework is proposed to organise the technological alternatives according to resource efficiency, material recovery potential, energy intensity, technological maturity and compatibility with circular-economy principles. The analysis indicates that no single technological option is optimal for all waste streams; technology selection should reflect waste characteristics, the quality of recovered secondary resources and verified life-cycle environmental performance. Industry 4.0 technologies create additional opportunities for traceability, automated sorting and system optimisation. The paper concludes that sustainable waste management requires integrated engineering, environmental, logistical and regulatory solutions.*

KEYWORDS: *circular economy, waste management, environmental engineering, recycling, recovery, life-cycle assessment, Industry 4.0*

DOI: https://doi.org/10.46687/MT26SHM

УПРАВЛЕНИЕ НА ОТПАДЪЦИТЕ И КРЪГОВА ИКОНОМИКА: ИНЖЕНЕРНО-ЕКОЛОГИЧЕН АНАЛИЗ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПОДХОДИ И УСТОЙЧИВОСТТА

СЕЧКИН Х. МЕХМЕД, ЙОРДАНКА И. ЯНКОВА-ЙОРДАНОВА

АБСТРАКТ: *Настоящата публикация анализира управлението на отпадъците като ключов елемент на прехода към кръгова икономика, с акцент върху инженерно-екологичните аспекти на съвременните технологии за третиране, рециклиране и оползотворяване. Изследването е разработено като критичен обзор и качествен сравнителен анализ на научна литература, нормативни документи и стандарти в областта на управлението на отпадъците, оценката на жизнения цикъл и дигитализацията. Разгледани са механични, термични, биологични и химични подходи, включително механо-биологично третиране, анаеробно разграждане, пиролиза, газификация, химично рециклиране и надграждащо оползотворяване на пластмаси. Предложена е сравнителна инженерно-екологична рамка, която систематизира технологичните решения според ресурсна ефективност, потенциал за материално оползотворяване, енергийна интензивност, технологична зрялост и приложимост към принципите на кръговата икономика. Анализът показва, че не съществува универсално решение за всички отпадъчни потоци и че изборът на технология трябва да се основава на характеристиките на отпадъка, качеството на получаваните вторични ресурси и доказаното екологично представяне през жизнения цикъл. Дигиталните технологии на Индустрия 4.0 разширяват възможностите за проследимост, автоматизирано сортиране и оптимизация на системите. Изведена е необходимостта от интегриране на инженерни, екологични,*

* Докладът е частично финансиран по проект № РД-08-113/05.02.2026 г. „Научна конференция с международно участие МАТТЕХ 2026 – ФТН“

логистични и регулаторни решения при проектирането на устойчиви системи за управление на отпадъците.

1 Въведение

Управлението на отпадъците се превръща от преимуществено санитарна и екологична дейност в комплексна инженерна система, свързана с ресурсната ефективност, енергийната политика, логистиката и дизайна на продуктите. Тази промяна е пряко свързана с развитието на концепцията за кръгова икономика, която поставя акцент върху предотвратяването на отпадъци, удължаването на жизнения цикъл на продуктите и връщането на материалите в икономическия оборот.

В европейската политика йерархията на отпадъците поставя на първо място предотвратяването, следвано от подготовка за повторна употреба, рециклиране, друго оползотворяване и, като най-нископриоритетна възможност, обезвреждане [1]. Тази последователност не следва да се възприема като механично правило, а като принцип за вземане на решения, който трябва да бъде съчетан с оценка на конкретния отпадъчен поток и неговото въздействие през жизнения цикъл. Схематично йерархията е представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Йерархия на управлението на отпадъците *(авторска схема по [1])*

Съвременните инженерни решения включват автоматизирано сортиране, механично рециклиране, компостиране, анаеробно разграждане, пиролиза, газификация, технологии за химично рециклиране и различни форми на upcycling. Развитието на сензорни системи,

изкуствен интелект, Интернет на нещата и аналитични платформи допълнително променя начина, по който се събират, проследяват и третират отпадъчните потоци [2, 3].

Целта на настоящата публикация е да систематизира основните инженерни подходи за управление на отпадъците в контекста на кръговата икономика и да предложи сравнителна инженерно-екологична рамка за оценяване на тяхната приложимост. Акцентът е поставен върху връзката между технологичната ефективност, възстановяването на ресурси, екологичното въздействие и възможностите за цифрово подпомагане на системите.

2 Методология на изследването

Изследването е разработено като критичен обзор на научната литература и нормативно-стандартната рамка. Анализирани са публикации, посветени на съвременни технологии за третиране и оползотворяване на отпадъци, кръгова икономика, пластмасови отпадъци, ресурсно възстановяване, дигитализация и оценка на жизнения цикъл. Като първични нормативни и методологични източници са използвани Директива 2008/98/ЕО относно отпадъците и стандартите ISO 14040 и ISO 14044 за оценка на жизнения цикъл [1, 4, 5].

За сравнителния анализ технологиите са групирани в пет основни категории: механично третиране и рециклиране; биологично третиране; термохимично преобразуване; енергийно оползотворяване; химично рециклиране и надграждащо оползотворяване. Оценката е качествена и не замества конкретно LCA изследване. Критериите включват: (1) потенциал за запазване на материалната стойност; (2) ресурсна ефективност; (3) енергийна интензивност; (4) технологична зрялост; (5) чувствителност към качеството и състава на входящия поток; (6) съответствие с принципите на кръговата икономика.

Този подход позволява да се избегне директното ранжиране на технологии без отчитане на контекста. Една технология може да бъде ефективна за определен вид отпадък и неподходяща за друг. Поради това резултатите са представени като сравнителна аналитична рамка, а не като универсална йерархия на техническите решения.

3 Кръговата икономика като инженерна рамка за управление на отпадъците

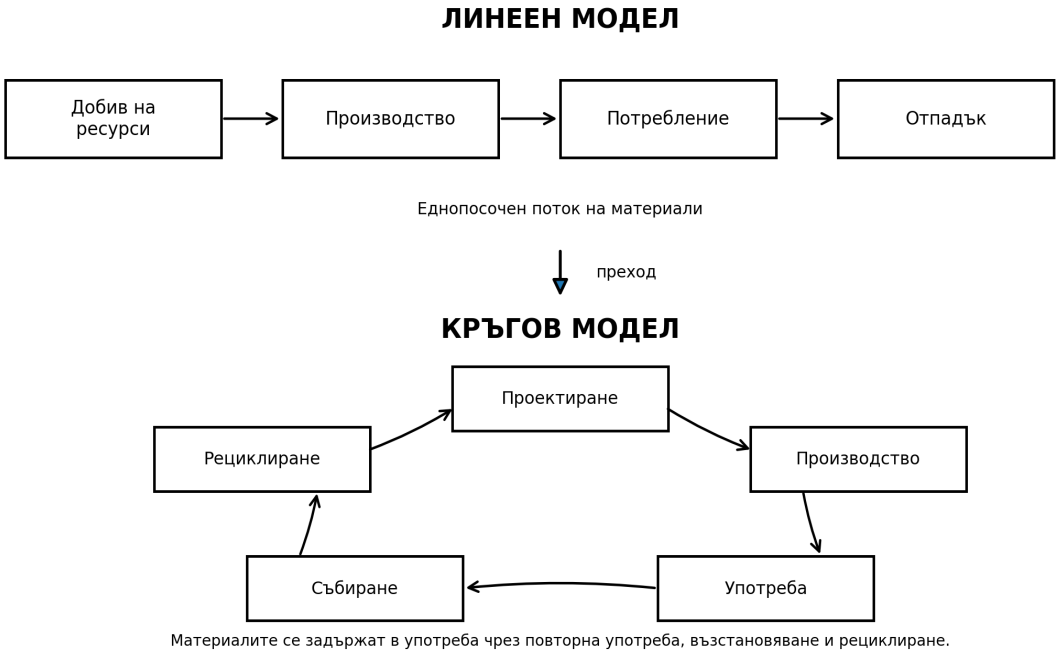
Линейният модел „добив – производство – потребление – изхвърляне“ предполага непрекъснато въвеждане на първични ресурси и натрупване на отпадъци. Кръговата икономика се стреми да ограничи тези загуби чрез повторна употреба, ремонт, реманифактуриране, рециклиране и възстановяване на ресурси. В инженерно отношение това означава промяна не само на крайните операции с отпадъците, но и на дизайна на продуктите, избора на материали, производствените процеси и обратната логистика [6, 7].

Ключово значение има качеството на вторичния ресурс. Формалното „рециклиране“ не е достатъчно, ако многократната обработка води до силно влошаване на материалните свойства или ако крайният продукт няма реален пазар. При пластмасите например механичното рециклиране остава широко приложимо, но при определени полимери и замърсени или смесени потоци се появяват ограничения, което стимулира развитието на химично рециклиране и upcycling [8].

Инженерната екология допълва кръговия подход чрез количествена оценка на въздействията и чрез оптимизиране на взаимодействието между технологичната система и околната среда. Разглеждането на ресурсното възстановяване като част от системното инженерство е съществено за прилагането на кръгови модели [9]. LCA е особено важен

инструмент, тъй като позволява да се оценят преносите на въздействие между етапите и да се избегнат решения, които намаляват един проблем, но увеличават друг [4, 5].

На фиг. 2 е представена концептуална схема на прехода от линеен към кръгов модел, при който материалите се задържат по-дълго в икономическия цикъл чрез повторна употреба, възстановяване и рециклиране.



Фиг. 2. Преход от линейна към кръгова икономика *(авторска схема по [6, 7])*

4 Инженерни технологии за третиране и оползотворяване

4.1 Механично третиране и сортиране

Механичното третиране включва раздробяване, пресяване, магнитна и вихровотокова сепарация, оптични системи и други физични методи за отделяне на фракции. То е основа за последващо материално оползотворяване, тъй като качеството на сортирането пряко влияе върху чистотата и пазарната стойност на вторичните суровини.

Развитието на автоматизирано разпознаване, машинно зрение и изкуствен интелект подобрява способността за разделяне на сложни потоци. Съвременните интелигентни системи позволяват по-добър контрол върху състава, по-ниско съдържание на примеси и оптимизация на работата на сортировъчните линии [2, 3].

4.2 Биологични методи

Компостирането и анаеробното разграждане са утвърдени подходи за биоразградими отпадъци. При компостирането органичната материя се стабилизира при аеробни условия, като се получава материал, който при спазване на изискванията за качество може да бъде използван като почвоподобрител. Анаеробното разграждане позволява едновременно стабилизиране на органичния поток и производство на биогаз, като оставащият дигестат изисква контрол на качеството преди употреба.

Предимството на биологичните технологии е възможността за връщане на хранителни вещества и органична материя в биологичния цикъл. Практическото им прилагане изисква контрол върху качеството на входящите органични потоци и върху наличието на нежелани примеси и замърсители [10].

4.3 Термични и термохимични процеси

Пиролизата представлява термично разграждане в отсъствие или при силно ограничено количество кислород. В зависимост от суровината и процесните условия могат да се получат газова, течна и твърда фракция. Газификацията протича при високи температури и контролирано количество окислител и води до образуване на синтезен газ. Тези технологии могат да имат роля при отпадъчни потоци, които трудно се рециклират механично, но техните екологични ползи зависят от енергийните вложения, качеството на продуктите, контрола на емисиите и реалното заместване на първични суровини или горива.

При отпадъци с висока пластмасова компонента термохимичните технологии се разглеждат и като средство за получаване на химични суровини. Научната литература подчертава потенциала им, но и необходимостта от внимателна оценка на икономическата устойчивост, енергийните баланси и технологичната мащабируемост [8, 11].

4.4 Химично рециклиране и upcycling

Химичното рециклиране цели разграждане на полимерите до мономери или други химични суровини, които могат да бъдат върнати в производството. Подходите включват деполимеризация, солволиза, каталитични процеси и хидрогенолиза. Те са особено интересни за материали, чието механично рециклиране е затруднено или води до значима загуба на свойства.

Upcycling подходите се стремят не просто да запазят, а да увеличат функционалната или икономическата стойност на получения материал. Примери са витримеризацията, нанокомпозитното модифициране и използването на рециклирани полимери в адитивното производство [8]. Тези технологии са перспективни, но част от тях все още са на различни нива на технологична зрялост и не следва автоматично да се приемат като по-устойчиви без доказателства от LCA.

4.5 Енергийно оползотворяване

Енергийното оползотворяване може да има роля за остатъчни отпадъци, които не могат да бъдат подготвени за повторна употреба или рециклирани с приемливо качество и въздействие. То не трябва да се поставя наравно с материалното рециклиране, тъй като при изгарянето материалната стойност в голяма степен се губи. В съответствие с йерархията на отпадъците енергийното оползотворяване е по-ниско приоритетно от рециклирането [1].

Екологичната оценка на такива системи трябва да отчита състава на отпадъка, енергийната ефективност, заместваната енергия, емисиите и управлението на пепели и други остатъци. Поради това общи твърдения за „чиста“ или „възобновяема“ енергия от отпадъци са научно неточни без уточняване на конкретния поток и неговия биогенен дял.

5 Сравнителна инженерно-екологична оценка

На основата на разгледаната литература [2, 3, 8, 10–14] е предложена качествена сравнителна рамка. Тя има аналитичен характер и не представлява заместител на технологично проектиране, икономически анализ или LCA за конкретна инсталация. Систематизираните резултати са представени в табл. 1.

Сравнението показва, че най-висок кръгов потенциал имат решенията, които запазват материалната стойност и позволяват многократно използване на ресурса. Това обаче е валидно само когато вторичният материал има достатъчно качество и реална възможност да замести първична суровина. При силно замърсени или многокомпонентни потоци комбинираните системи често са по-реалистични от една единствена технология.

От инженерна гледна точка оптималната система следва да бъде проектирана като последователност: предотвратяване и разделно събиране; висококачествено сортиране; материално оползотворяване на подходящите фракции; биологично третиране на чистите органични потоци; специализирани химични или термохимични процеси за трудно рециклируеми материали; остатъчно енергийно оползотворяване или обезвреждане само за неприложимите за по-високо ниво фракции.

Таблица 1. Качествена сравнителна рамка за инженерно-екологична оценка на технологични подходи

Технологичен подход	Материално оползотворяване	Енергийна интензивност	Технологична зрялост	Чувствителност към входа	Кръгов потенциал	Основно ограничение
Механично рециклиране	Високо при чисти фракции	Ниска–средна	Висока	Висока	Висок	Деградация на качеството и замърсяване
Биологично третиране	Високо за органични потоци	Ниска–средна	Висока	Висока	Висок	Необходима е чиста биоразградима фракция
Пиролиза / газификация	Средно; зависи от продукта	Висока	Средна–висока	Средна	Среден	Енергийни баланси, качество на продуктите, емисии
Енергийно оползотворяване	Ниско	Средна	Висока	Средна	Ограничен	Загуба на материална стойност; остатъчни продукти
Химично рециклиране / upcycling	Потенциално високо	Средна–висока	Различна според процеса	Средна–висока	Потенциално висок	Цена, мащабируемост, нужда от доказано LCA предимство

6 Оценка на жизнения цикъл като основа за технологичен избор

ISO 14040 и ISO 14044 определят принципите, рамката, изискванията и насоките за оценка на жизнения цикъл. Основните фази включват определяне на целта и обхвата, инвентаризационен анализ, оценка на въздействията и интерпретация [4, 5]. За управлението на отпадъците това позволява сравнение между различни сценарии при ясно дефинирана функционална единица и системни граници.

LCA е особено необходим при сравнение на технологии, при които част от въздействията се преместват между етапите. Например по-сложен процес може да консумира повече енергия, но да произведе вторичен материал, който замества ресурсоемко първично производство. Обратно, решение с ниски директни емисии може да доведе до по-нискокачествен материал и последваща загуба на ресурсна стойност. Следователно инженерната оценка трябва да бъде системна, а не ограничена до една операция.

7 Дигитализация и Индустрия 4.0 в управлението на отпадъците

Дигитализацията променя управлението на отпадъците по три основни направления: проследимост на материалните потоци, автоматизация на обработката и оптимизация на логистиката. IoT сензори могат да предоставят данни за запълване на контейнери, състояние на оборудването и количествени характеристики на потоците; аналитичните платформи могат да подпомагат маршрутизацията и планирането; машинното зрение и изкуственият интелект намират приложение в автоматизираното сортиране [2, 3].

Интеграцията между кръгова икономика и Индустрия 4.0 създава възможности за по-точни материални баланси и за по-добро свързване между генериращи отпадъци предприятия и потенциални потребители на вторични ресурси. Въпреки това цифровата технология не компенсира лошо проектирана материална система. Данните имат стойност само когато се използват за реално намаляване на ресурсните загуби, повишаване на качеството на рециклирането и по-добър контрол на въздействията.

8 Дискусия

Резултатите от обзора потвърждават необходимостта управлението на отпадъците да се разглежда като интегрирана инженерна система. Подходът, при който всяка технология се оценява самостоятелно, може да доведе до неправилни заключения. Реалните системи включват събиране, транспорт, предварително третиране, сепарация, основен технологичен процес, управление на остатъчни продукти и пазарна реализация на получените материали или енергия.

Съществено значение има и взаимодействието между техническите и икономическите фактори. Вторичният ресурс трябва да има предвидимо качество, проследимост и пазар, в противен случай технически възможното рециклиране може да остане формално [13–15]. От тази гледна точка екодизайнът, разширената отговорност на производителя и системите за събиране и връщане на продукти и материали са важна част от инфраструктурата на кръговата икономика [1, 7].

Предложената сравнителна рамка показва и ограничението на универсалните оценки. Механичното рециклиране има висока кръгова стойност при чисти и добре сортирани термопластични потоци, но е значително по-слабо приложимо при сложни композити. Анаеробното разграждане е подходящо за биоразградими потоци, но не решава проблема със смесени отпадъци. Термохимичните и химичните процеси могат да разширят обхвата на оползотворяване, но тяхното предимство трябва да се доказва чрез конкретни енергийни, икономически и LCA показатели.

Практическият извод е, че кръговата икономика не трябва да се свежда до максимизиране на процента „третирани“ или „оползотворени“ отпадъци. По-съществени са запазването на функционалната стойност на материалите, реалното заместване на първични ресурси и минимизирането на общото въздействие през жизнения цикъл.

9 Заключение

Преходът към кръгова икономика изисква промяна в начина, по който се проектират и управляват системите за отпадъци. Инженерният подход трябва да започва с предотвратяването и качественото разделяне на потоците и да продължава с избор на технология, която запазва максимално материалната стойност при приемливо екологично и икономическо представяне.

Направеният обзор показва, че механичните, биологичните, химичните и термохимичните технологии имат различна приложимост и не могат да бъдат оценявани извън контекста на конкретния отпадъчен поток. Предложената сравнителна рамка систематизира основните фактори за инженерно-екологичен избор и подчертава необходимостта от съчетаване на ресурсна ефективност, технологична зрялост, качество на вторичния ресурс и LCA резултати.

Дигиталните технологии на Индустрия 4.0 имат потенциал да подобрят проследимостта, автоматизацията и логистичната ефективност, но техният принос към кръговата икономика зависи от интегрирането им в добре проектирани материални и технологични системи. Бъдещите изследвания следва да се насочат към количествено сравнение на конкретни технологични сценарии, включително чрез LCA, технико-икономически анализ и оценка на качеството на възстановените ресурси.

Основният научно-приложен принос на настоящото изследване е систематизирането на технологичните решения в единна инженерно-екологична рамка, която може да подпомогне предварителния избор и сравнението на подходи при проектиране на системи за устойчиво управление на отпадъците.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] European Parliament and Council. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Consolidated text, current version 16 October 2025, including Directive (EU) 2025/1892.

[2] Czekała W., Drozdowski J., Łabiak P. Modern Technologies for Waste Management: A Review. Applied Sciences, 13(15), 2023, 8847. https://doi.org/10.3390/app13158847

[3] Afshari H., Gurtu A., Jaber M. Y. Unlocking the potential of solid waste management with circular economy and Industry 4.0. Computers & Industrial Engineering, 195, 2024, 110457. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110457

[4] International Organization for Standardization. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO, Geneva, 2006; Amendment 1:2020.

[5] International Organization for Standardization. ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO, Geneva, 2006; Amendment 1:2017; Amendment 2:2020.

[6] Cano Londoño N. A., Cabezas H. Perspectives on circular economy in the context of chemical engineering and sustainable development. Current Opinion in Chemical Engineering, 34, 2021, 100738. https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100738

[7] European Commission. A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final, Brussels, 2020.

[8] Balu R., Dutta N. K., Roy Choudhury N. Plastic Waste Upcycling: A Sustainable Solution for Waste Management, Product Development, and Circular Economy. Polymers, 14(22), 2022, 4788. https://doi.org/10.3390/polym14224788

[9] Weissbrodt D. G., Winkler M. K. H., Wells G. F. Responsible science, engineering and education for water resource recovery and circularity. Environmental Science: Water Research & Technology, 6(8), 2020, pp. 1952–1966. https://doi.org/10.1039/D0EW00402B

[10] Taherzadeh M. J., Bolton K., Wong J. W. C., Pandey A. (eds.). Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches. Elsevier, 2019. https://doi.org/10.1016/C2017-0-04415-4

[11] Bint-e-Zahra, Qadri A. Waste valorization technologies and management: A review of traditional and advanced techniques. International Journal of Chemical and Biochemical Sciences, 26(20), 2024, pp. 241–259. https://doi.org/10.62877/31-IJCBS-24-26-20-31

[12] Mandpe A., Paliya S., Gedam V. V., Patel S., Tyagi L., Kumar S. Circular economy approach for sustainable solid waste management: A developing economy perspective. Waste Management & Research, 41(3), 2023, pp. 499–511. https://doi.org/10.1177/0734242X221126718

[13] Yu Z., Khan S. A. R., Ponce P., Zia-ul-haq H. M., Ponce K. Exploring essential factors to improve waste-to-resource recovery: A roadmap towards sustainability. Journal of Cleaner Production, 350, 2022, 131305. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131305

[14] Sarkady A., Egedy A., Kurdi R., Tóth E. Towards a Circular Economy – Changing Needs and Solutions for Waste Management Systems. Hungarian Journal of Industry and Chemistry, 52(1), 2024, pp. 45–53. https://doi.org/10.33927/hjic-2024-07

[15] Angelis-Dimakis A., et al. Waste Management and the Circular Economy in Cyprus–The Case of the SWAN Project. Environments, 9(2), 2022, 16. https://doi.org/10.3390/environments9020016