

ПОКАЗНИК ЦИРКУЛЯРНОСТІ ЯК СТУПІНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛІСОВОГО СЕКТОРУ

Gayda S.V.

CIRCULARITY INDICATOR AS A MEASURE OF THE EFFECTIVENESS OF THE FOREST SECTOR

Розраховано показник циркулярності як інтегральний критерій оцінювання ефективності лісового сектору в контексті принципів циркулярної економіки. На основі ієрархії стратегій 10R та трьох сценаріїв розвитку визначено рівні циркулярності для лісозаготівлі, виробництва виробів з деревини та перероблення вживаної деревини. Отримані результати дають змогу кількісно оцінити ступінь сталості лісового сектору та окреслити напрями підвищення ефективності використання деревинних ресурсів.

Ключові слова: циркулярна економіка, показник циркулярності, ступінь ефективності лісового сектору, ієрархія стратегій 10R, вживана деревина, лісозаготівля, перероблення.

Актуальність. Сучасний лісовий сектор функціонує переважно за лінійною моделлю «взяти – виробити – використати – викинути», що призводить до виснаження лісових ресурсів, накопичення деревинних відходів і недовикористання потенціалу вживаної деревини. Перехід до циркулярної економіки дає можливість мінімізувати втрати матеріалу на всіх етапах життєвого циклу деревини, підвищити ефективність використання ресурсів та зменшити екологічний тиск на лісові екосистеми.

Для обґрунтованого управління таким переходом потрібен інтегральний кількісний показник, який би відображав ступінь реалізації принципів циркулярної економіки в лісовому секторі. Таким показником пропонується показник циркулярності, що розглядається як ступінь ефективності лісового сектору в контексті економіки замкнутого циклу.

Мета роботи – обґрунтувати та розрахувати показник циркулярності як узагальнений індикатор ефективності лісового сектору за принципами циркулярної економіки, використовуючи ієрархію стратегій 10R та формування сценаріїв зростання циркулярності для лісозаготівлі, виробництва виробів з деревини та перероблення вживаної деревини.

Показник циркулярності в загальному вигляді може визначатися як відношення обсягів переробленої або повторно використаної деревини до загальних обсягів використаних лісових ресурсів, %: $P_{\text{ц}} = O_{\text{п}} / O_{\text{в}} \times 100\%$. У роботі реалізовано теоретичний підхід на основі ієрархії стратегій 10R, яка формує «лійку» пріоритетів циркулярних дій. Для лісового сектору здійснено

ранжування та визначено відсоткову важливість кожної стратегії як внесок у досягнення максимальної циркулярності: Refuse – 18,72 %; Rethink – 17,05 %; Reduce – 15,05 %; Reuse – 13,05 %; Repair – 11,04 %; Repurpose – 9,03 %; Remanufacture – 7,03 %; Refurbish – 5,02 %; Recycle – 3,01 %; Recover – 1,00 %; Dispose – 0,00 %. Найвищий внесок припадає на Refuse, Rethink, Reduce, які забезпечують запобігання утворенню відходів і зменшення матеріаломісткості на початку життєвого циклу. Стратегії нижчих рівнів (Recycle, Recover) мають менший вплив на циркулярність, а Dispose є небажаним завершальним станом.

Методика теоретичного визначення показника циркулярності включала формування трьох сценаріїв циркулярної економіки, що відрізняються часткою реалізації кожної R-стратегії: сценарій №1 – традиційна модель, мінімальна циркулярність (низький ступінь ефективності); сценарій №2 – перехідна модель з акцентом на продовження терміну служби виробів та прогресивні технології (середній ступінь ефективності); сценарій №3 – розвинена циркулярна економіка, «розумне виробництво» та «розумне споживання» (максимальний ступінь ефективності). І відповідно, Розрахунок часткових показників циркулярності для кожної підсекції (лісозаготівля, виробництво виробів, перероблення вживаної деревини) за кожним сценарієм як суми добутків «важливість стратегії × частка її реалізації».

Результати. Визначено показник циркулярності як вимір ефективності для підсекторів: 1. «Лісозаготівля»: сценарій №1 – 6,02 % (переважання Recover та Dispose, практично відсутні Refuse, Rethink, Reuse); сценарій №2 – 26,09 %; сценарій №3 – 43,15 %. 2. «Виробництво виробів з деревини»: сценарій №1 – 10,03 % (традиційна схема: основний акцент на енергетичному використанні відходів); сценарій №2 – 43,14 %; сценарій №3 – 76,24 % (широка задіяність Rethink, Reduce, частково Refuse). 3. «Перероблення вживаної деревини»: сценарій №1 – 25,09 %; сценарій №2 – 61,71 %; сценарій №3 – 93,15 % (максимальна концентрація R-стратегій, включаючи Refuse, Rethink, Reuse, Repair, Repurpose). Розраховано, що середньозважений показник циркулярності лісового сектору України за трьома сценаріями становив: №1 – 13,71 % – відображає поточний стан: низький ступінь ефективності, домінування нижчих R-стратегій і значних обсягів Dispose; №2 – 43,65 % – ціль на найближчі 10–15 років за умов впровадження прогресивних технологій, продовження життєвого циклу виробів, розвитку інфраструктури перероблення; №3 – 70,85 % – перспектива до 2050 року при системному впровадженні циркулярної економіки, Industry 5.0, повному використанні потенціалу вживаної деревини та високопріоритетних R-стратегій.

На основі проведених розрахунків окреслено такі пріоритетні **шляхи підвищення** ступеня ефективності лісового сектору: **оптимізація лісозаготівлі** (зниження частки Recover і Dispose за рахунок залучення відходів лісозаготівлі в матеріальні потоки (плити, композити, біопродукти), а не лише в енергетику; впровадження сертифікованого сталого лісокористування); **поглиблена переробка первинної деревини** (максимізація виходу готових виробів з однієї одиниці сировини; використання технологій, що мінімізують обрізки та шліфувальні втрати; високоякісний рециклінг технологічних відходів у ДСП,

МДФ, брикети, гранули); **розвиток системи перероблення вживаної деревини** (створення мережі збору та сортування вживаної деревини; розвиток технологій очищення, підготовки та повторного використання PCW у виробництві плитних матеріалів, конструкцій та меблів; стимулювання повторного використання виробів (Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose)).

Висновки. Запропоновано показник циркулярності як кількісний вимір ступеня ефективності лісового сектору в умовах циркулярної економіки. Розроблено методику теоретичного розрахунку показника циркулярності на основі ієрархії стратегій 10R з урахуванням їх вагової важливості для лісового сектору. Для лісозаготівлі, виробництва виробів і перероблення вживаної деревини визначено часткові показники циркулярності за трьома сценаріями (від 6,02–25,09 % до 43,15–93,15 %). Отримано середньозважені показники циркулярності лісового сектору України: 13,71 % (поточний стан), 43,65 % (горизонт 10–15 років), 70,85 % (перспектива до 2050 року). Показано, що підвищення показника циркулярності пов'язане з переходом від традиційної моделі «спалити або захоронити» до каскадного, багатоциклового використання деревини з домінуванням високопріоритетних R-стратегій. Сформульовано ключові напрями підвищення ступеня ефективності лісового сектору: оптимізація лісозаготівлі, поглиблена переробка, розвиток інфраструктури для вживаної деревини, екодизайн, інноваційні технології та цілеспрямована політика підтримки циркулярних рішень.

Список використаних джерел

1. Gayda, S. V. (2018), MDF Facade Technologies. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 72-82. <https://doi.org/10.36930/42184410>
2. Gayda, S. V., & Ferents, O. B. (2025). Comparative analysis of alternative technologies for wooden house construction. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 49-63. <https://doi.org/10.36930/42255104>
3. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2020). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. *Poznan , Drewno*, 63(206), 77-102. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
4. Gayda, S. V. (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 73–79. <https://doi.org/10.36930/42073312>
5. Gayda, S. V. (2007). A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 60–63. <https://doi.org/10.36930/42073314>
6. Gayda, S. V. (2016). Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools. *Bulletin of KhNTUA*, 178, 3–11. [In Ukrainian]. URL: <https://repo.btu.kharkiv.ua/items/1cd3f001-fcc1-4b17-8b02-c81061b98bb3>.
7. Gayda, S. V. (2017). Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 43, 5–20. https://doi.org/10.36930/4217430_1
8. Gayda, S. V. (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 99–114. <https://doi.org/10.36930/42234908>

9. Gayda, S. V. (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 4–19. <https://doi.org/10.36930/42234901>
10. Gayda, S. V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 50, 4–15. <https://doi.org/10.36930/42245001>
11. Gayda, S. V. (2025). Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 33–48. <https://doi.org/10.36930/42255103>
12. Gayda, S. V. (2025). Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 4–16. <https://doi.org/10.36930/42255101>
13. Gayda, S. V., & Bilyy Ya. M. (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 42, 69–79. <https://doi.org/10.36930/42164211>
14. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2021). Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 23, 152–162. <https://doi.org/10.15421/412135>
15. Gayda, S. V., & Kiyko, O. A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 66(212), article ID 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>
16. Gayda, S. V., & Kyyanka, V. V. (2025). Development of approaches for the utilization of wood residues and waste from the processing of wood and composite structural materials in furniture manufacturing at LLC "Fortuna-Mebli". *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 51, 109–123. <https://doi.org/10.36930/42255108>
17. Gayda, S. V., & Lesiv, L. E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 33–47. <https://doi.org/10.36930/42234903>
18. Gayda, S. V., & Medvid, L. V. (2024). Construction of the mathematical model of the strength of post-consumer wood made blockboard of different designs. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 27, 189–198. <https://doi.org/10.15421/412424>
19. Gayda, S. V., Kiyko, O. A., & Guz, M. M. (2022). Comparative studies of the macro- and microstructures of stump-root wood and stemwood. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 64(3), 131–142. <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0013>
20. Gayda, S. V., Kushpit, A. S., & Huber, Yu. M. (2023). Analysis of implementation of Industry 4.0 principles in furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 73–84. <https://doi.org/10.36930/42234906>
21. Medvid, L. V., & Gayda, S. V. (2023). Determination of the strength indicators of normal blockboard made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 49, 85–98. <https://doi.org/10.36930/42234907>
22. Заячук, В.Я. (2003). Дендрологія. Хвойні: навч. посібн. Львів: Фірма Камула, 128 с. https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=PmXnWewAAAAJ&citation_for_view=PmXnWewAAAAJ:O3NaXMp0MMsC
23. Заячук, В.Я. (2005). Дендрологія. Голонасінні. Львів: Фірма Камула, 176 с. https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=uk&user=PmXnWewAAAAJ&citation_for_view=PmXnWewAAAAJ:YFjsv_pGBYC
24. Іванюк, А.П., Заячук, В.Я., Лисюк, Р.М., Дармограй, Р.Є. (2023). Перспективи використання деревини *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud. *Вісник Сумського національного аграрного університету*, 2, 38–46. <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.2.5>
25. Іванюк, А.П., Заячук, В.Я., Харачко, Т.І., Колодій, Т.В., М'якуш, Б.М. (2021). Фізичні властивості деревини павлової повстистої (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud.). *Науковий вісник НЛТУ України*, 31(4), 71–75. <https://doi.org/10.36930/40310411>