

ВИРОБНИЦТВО АДГЕЗІЙНОЇ ДОБАВКИ ДЛЯ ДОРОЖНІХ БІТУМІВ ШЛЯХОМ ПЕРЕРОБКИ ВТОРИННОГО ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ (PET)

© А.Б. Григоров¹

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Курличова, 2, Україна

¹ Григоров Андрій Борисович, докт. техн. наук, проф., проф. кафедри технологій переробки нафти, газу та твердого палива, ORCID: 0000-0001-5370-7016, Scopus ID: 55894206900, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

У роботі досліджено можливість використання вторинного поліетилентерефталату (PET) як сировини для отримання ефективною адгезійної добавки до дорожніх бітумів. Обґрунтовано доцільність фізико-хімічної активації PET фенолом з метою підвищення його сумісності з бітумною матрицею та інтенсифікації міжфазної взаємодії. Встановлено, що взаємодія PET із фенолом супроводжується процесами адсорбції, дифузії, набухання та зниження кристалічності полімеру, що призводить до формування гелеподібної структури з підвищеною реакційною здатністю за рахунок утворення полярних груп (-OH, -COOH, -COOPh). Застосування додаткової механічної активації під дією інтенсивних механічних навантажень забезпечує ефективне руйнування полімерного каркасу, утворення активних радикалів та підвищення проникності для фенолу. Окрім цього, механічне активований PET, може використовуватися як самостійна адгезійна добавка або разом з PET, активованим фенолом. Показано, що введення отриманої PET/фенольної добавки в бітум супроводжується комплексом взаємопов'язаних фізико-хімічних процесів, зокрема змочуванням, дифузійною мальтенових компонентів, набуханням полімерної фази, адсорбцією полярних сполук бітуму та формуванням міжмолекулярних взаємодій. Встановлено, що внаслідок модифікації відбувається структурна перебудова бітуму, яка проявляється у зміні співвідношення між дисперсною та дисперсійною фазами і формуванні просторово організованої системи з рівномірно розподіленими набряклими частинками полімеру. Наявність у складі добавки полярних функціональних груп сприяє утворенню водневих зв'язків, π - π взаємодій та донорно-акцепторних комплексів, що підвищує адгезію бітуму до поверхні мінеральних матеріалів. Запропонована структурна схема процесу модифікації забезпечує ефективну реалізацію всіх стадій виробництва та застосування адгезійної добавки на основі вторинного PET та може бути адаптована до промислових умов. Отримані результати свідчать про перспективність використання вторинного PET як модифікатора бітумів та сприяють вирішенню екологічних проблем, пов'язаних з утилізацією небезпечних полімерних відходів.

Ключові слова: поліетилентерефталат; модифікація бітуму; адгезійна добавка; стічні води; фенол; активація; мікрогетерогенна структура.

Автор для листування А.Б. Григоров, e-mail: grigorovandrey@ukr.net

Рукопис надійшов до редакції 30.04.2026

Прийнято до публікації 25.05.2026

Опубліковано 29.05.2026

Як цитувати:

1. Григоров А.Б. Виробництво адгезійної добавки для дорожніх бітумів шляхом переробки вторинного поліетилентерефталату (PET) / А.Б. Григоров // Вуглехімічний журнал. – 2026. – № 3. – С. 59-68. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2026-0-3-59-68>

2. Hryhorov, A. V. Vyrobnystvo adheziinoi dobavky dlia dorozhnikh bitumiv shliakhom pererobky vtorynnoho polietylentereftalatu (PET) (2026). Vuhlekhimichnyi Zhurnal, (3), 59-68. <https://doi.org/10.31081/1681-309X-2026-0-3-59-68>

Як отримати повний текст статті:

- протягом 2-х років від дати опублікування – за запитом на e-mail: post@ukhin.org.ua

- після 2-х років від дати опублікування – вільний доступ у базі даних «Наукова періодика України» НБУ ім.

Вернадського за посиланням:

http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis-nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=juu_all&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=0&S21COLORTERMS=0&S21STR=uhj

Ця стаття ліцензується відповідно до міжнародної ліцензії Creative Commons Attribution 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Бібліографічний список

1. Поляк О.Є. Властивості бітуму, модифікованого адгезійними добавками на основі відновлюваної сировини / О.Є. Поляк, В.М. Гунька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2024. – № 2(12). – С. 45-49. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.02.08>

2. Taha B.A. Enhancing moisture resistance in hot mix asphalt: evaluating the effectiveness of amine-free anti-stripping agents / B.A. Taha, S.K. Rasheed, Z.H. Al-Saffar // *J Build Rehabil.* – 2025. –Vol. 10. – 146. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00657-x>
3. Shaobai Wang. Benign oxidation of PVA for configuration of reversible polyketal networks / Shaobai Wang, Kangzhou Xie, Donglin Tang // *European Polymer Journal.* – 2020. –Vol. 140. – 110050. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110050>
4. Suhaimi N.A.S. Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications / N.A.S. Suhaimi, F. Muhamad, N.A. Abd Razak, E. Zeimaran // *Polym. Eng. Sci.* – 2022. – Vol. 62. – Iss. 8. – 2355. <https://doi.org/10.1002/pen.26017>
5. Mengqing Kan. Environmental impacts of plastic packaging of food products / Mengqing Kan, Shelie A. Miller // *Resources, Conservation and Recycling.* – 2022. – Vol. 180. – 106156. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106156>
6. Alireza Rahimi. Chemical recycling of waste plastics for new materials production / Alireza Rahimi, Jeannette Garcia // *Nature Reviews Chemistry.* – 2017. – Vol. 1. – Iss. 6. – 0046. <https://doi.org/10.1038/s41570-017-0046>
7. Vollmer I. Beyond Mechanical Recycling: Giving New Life to Plastic Waste / I. Vollmer, M.J.F. Jenks, M.C.P. Roelands et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2020. – Vol. 59. – Iss. 36. – 15402-15423. <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
8. Webb H.K. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate) / H.K. Webb, J. Arnott, R.J. Crawford, E.P. Ivanova // *Polymers.* – 2013. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 1-18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>
9. Wei R. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we? / R. Wei, W. Zimmermann // *Microb Biotechnol.* – 2017. – Vol. 10. – Iss. 6. – P. 1308-1322. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12710>
10. Jefferson Hopewell. Plastics recycling: challenges and opportunities / Jefferson Hopewell, Robert Dvorak, Edward Kosior // *Philos Trans R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* – 2009; 364 (1526): 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
11. Roland Geyer. Production, use, and fate of all plastics ever made / Roland Geyer et al. // *Sci. Adv.* – 2017. – Vol. 3. – e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
12. Pan Dang. Distribution, sources, and ecological risks of potentially toxic elements in the Laizhou Bay, Bohai Sea: Under the long-term impact of the Yellow River input. / Pan Dang, Xiang Gu, Chunye Lin, Ming Xin, He Zhang, Wei Ouyang, Xitao Liu, Mengchang He, Baodong Wang // *Journal of Hazardous Materials.* – 2021. – Vol. 413. – 125429. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125429>
13. Narinder Singh. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications / Narinder Singh, David Hui, Roopkaran Singh, Inderpreet Singh Ahuja // *Composites Part B Engineering.* – 2016. – Vol. 115. – P. 409-422. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.09.013
14. Te Yang. Upcycling of PET waste: from one polymer to another polymer/ Te Yang, Zhenjie Yang, Yulu Zhang, Chenyang Hu, Zhenbiao Xie, Zhiqiang Sun, Xuan Pang, Xuesi Chen // *Polym. Chem.* – 2026. – Vol. 17. – P. 7-20. <https://doi.org/10.1039/D5PY00861A>
15. Luon Tan Nguyen. Upcycling polyethylene terephthalate (PET) plastic waste into multifunctional aerogel-inspired materials / Luon Tan Nguyen, Tianliang Bai, Zhao Bin Lu, Nick You Ren Woo, Xue Yang Goh, Anh Duc Tran, Canh-Dung Tran, Hai M. Duong // *Construction and Building Materials.* – 2025. – Vol. 493. – 143161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143161>
16. Di Lorenzo M.L. Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): A Review / Di Lorenzo M.L. // *Polymers.* – 2024. – Vol. 16. – Iss. 14. – 1975. <https://doi.org/10.3390/polym16141975>
17. Felföldi T. Biological treatment of coke plant effluents: from a microbiological perspective / T. Felföldi, Z. Nagymáté, A.J. Székely et al. // *Biologia Futura.* – 2020. – Vol. 71. – P. 359–370. <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00028-2>
18. Ruichao Peng. Coke Plant Wastewater Posttreatment by Fenton and Electro-Fenton Processes / Ruichao Peng, Ping Yu, Yunbai Luo // *Environmental Engineering Science.* – 2017. – Vol. 34. – Iss. 2. – P. 89-95. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0520>
19. Chi Wang, Ming-Feng Lee, Chuan-Hsin Jao. Phase transition of poly(ethylene terephthalate) in nanofibers electrospun from phenol-based solution / Chi Wang, Ming-Feng Lee, Chuan-Hsin Jao // *European Polymer Journal.* – 2014. – Vol. 52. – P. 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.12.013>
20. Thore Bach Thomsen. Standardized method for controlled modification of poly(ethylene terephthalate) (PET) crystallinity for assaying PET degrading enzymes / Thore Bach Thomsen, Cameron J. Hunt, Anne S. Meyer // *MethodsX.* – 2022. – Vol. 9. – 101815. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101815>
21. Chen S. Crystallization and Thermal Behaviors of Poly(ethylene terephthalate)/Bisphenols Complexes through Melt Post-Polycondensation / S. Chen, S. Xie, S. Guang, J. Bao, X. Zhang, W.Chen // *Polymers (Basel).* – 2020. – Vol. 12. – Iss. 12. – 3053. <https://doi.org/10.3390/polym12123053>
22. Didier Lesueur. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification / Didier Lesueur // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2009. – Vol. 145. – Iss. 1–2. – P. 42-82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
23. Zhuo Xu. Comprehensive kinetic study of thermal degradation of polyvinylchloride (PVC) / Zhuo Xu, Shreyas S. Kolapkar, Stas Zinchik, Ezra Bar-Ziv, Armando G. McDonald // *Polymer Degradation and Stability.* – 2020. – Vol. 176. – 109148. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109148>

24. Jiayang Wu. Kinetic Study of Polyvinyl Chloride Pyrolysis with Characterization of Dehydrochlorinated PVC / Jiayang Wu, Konstantinos G. Papanikolaou, Feng Cheng, Bennett Addison, Amy A. Cuthbertson, Manos Mavrikakis, George W. Huber // *CS Sustainable Chem. Eng.* – 2024. – Vol. 12. – Iss. 19. – P. 7402–7413.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c00564>