

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358315

DETERMINATION OF MULTI-CRITERION OPTIMIZATION FEATURES IN CREATING SYSTEMS FOR RECOMPLEXING ANHYDROUS COSMETICS (p. 6–16)**Tetiana Ivanishena**Khmelnyskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3206-9307>**Zoriana Chereshnia**Khmelnyskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9412-4388>**Anna Mahdiichuk**Khmelnyskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6719-2148>

This study explores formulation systems for anhydrous cosmetics, specifically, solid shampoos. They have predicted quality indicators and a high level of resource efficiency.

The main issue in designing such systems is the high complexity of optimization, due to technological contradictions between the product's functional effect, physicochemical stability, environmental safety indicators, and composition. This work identifies features of the multi-criteria optimization method based on the Harrington desirability function for such systems. It involves normalizing experimental indicators and aggregating them into an integrated quality indicator D. Based on this indicator, the formulation composition of sample S2 is the most balanced across all criteria.

The results are attributed to synergistic interactions among composition components and the establishment of a nonlinear dependence between the composition and properties. It has been shown that the desirability function successfully describes such interactions. It is shown that the deviation of at least one criterion beyond the limits of acceptability leads to a sharp decrease in the integrated assessment. The use of multi-criteria optimization based on the Harrington desirability function minimizes subjectivity and enables the comparison of alternative compositions of formulation technological systems.

Multi-criteria optimization using the Harrington desirability function could be applied at the stage of laboratory design of environmentally friendly formulation systems, provided that technological regimes are adhered to and an identical raw material base is used.

Keywords: multi-criteria optimization, formulation technological systems, Harrington desirability function, eco-oriented design.

References

1. Pro zatverdzhennia tekhnichnoho rehlamentu na kosmetychnu produktsiyu (2021). Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy No. 65. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/65-2021-%D0%BF#Text>
2. Kröhnert, H., Stucki, M. (2021). Life Cycle Assessment of a Plant-Based, Regionally Marketed Shampoo and Analysis of Refill Options. *Sustainability*, 13 (15), 8478. <https://doi.org/10.3390/su13158478>
3. Bom, S., Jorge, J., Ribeiro, H. M., Marto, J. (2019). A step forward on sustainability in the cosmetics industry: A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 270–290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.255>
4. Razzouk, K., Elharouni, F., Aamouche, A. (2025). Integrating Sustainability into Cosmetic Product Development: An ANP-QFD Framework for Balancing Technical Excellence and Environmental Performance. *Sustainability*, 17 (23), 10705. <https://doi.org/10.3390/su172310705>
5. Technical regulation on cosmetic products and its requirements (2024). Available at: <https://eba.com.ua/tehnichnyj-reglament-nakosmetychnu-produktsiyu-ta-jogo-vymogy/>
6. Escamilla, M., Ferrer, A., Fuentes, N., Hidalgo, C., Kaps, R., Kougoulis, J. S. (2012). Preliminary results from the technical analysis: Revision of European Ecolabel Criteria for Soaps, Shampoos and Hair Conditioners. European Commission.
7. Aguiar, J. B., Martins, A. M., Almeida, C., Ribeiro, H. M., Marto, J. (2022). Water sustainability: A waterless life cycle for cosmetic products. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 35–51. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.008>
8. Lukić, M., Krajišnik, D. (2024). Challenges and advances in waterless cosmetic product development: Raising awareness of water sustainability. *Arhiv Za Farmaciju*, 74 (6), 735–757. <https://doi.org/10.5937/arhifarm74-52750>
9. Ogorzałek, M., Klimaszewska, E., Małysa, A., Czerwonka, D., Tomasiuk, R. (2024). Research on Waterless Cosmetics in the Form of Scrub Bars Based on Natural Exfoliants. *Applied Sciences*, 14 (23), 11329. <https://doi.org/10.3390/app142311329>
10. Zero-Waste Shampoo (2025). Technavio. Available at: <https://www.technavio.com/report/zero-waste-shampoo-market-industry-analysis>
11. Anastas, P. T., Warner, J. C. (2000). *Green Chemistry*. Oxford University Press/Oxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>
12. Sheldon, R. A. (2017). The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, 19 (1), 18–43. <https://doi.org/10.1039/c6gc02157c>
13. Eckelman, M. J., Moroney, M. S., Zimmerman, J. B., Anastas, P. T., Thompson, E., Scott, P. et al. (2022). Applying green chemistry to raw material selection and product formulation at The Estée Lauder Companies. *Green Chemistry*, 24 (6), 2397–2408. <https://doi.org/10.1039/d1gc03081g>
14. Samadi, S., Amani, H., Najafpour, G. D., Kariminezhad, H., Banaei, A. (2024). Development of shampoo formulations using plant/microbial biosurfactants as an alternative to shampoos formulated with harsh synthetic surfactants. *Journal of Surfactants and Detergents*, 28 (3), 463–478. <https://doi.org/10.1002/jsde.12814>
15. Thompson, E. C., Anastas, P., Bialk, H., D'Alessandro, D., Hoven, V. P., Kedwards, T. J. et al. (2025). Advancing green chemistry performance assessment: the Estée Lauder Companies' continuing journey towards meaningful transparency. *Green Chemistry*, 27 (18), 5015–5026. <https://doi.org/10.1039/d4gc04670f>
16. Golsteijn, L., Lessard, L., Campion, J.-F., Capelli, A., D'Enfert, V., King, H. et al. (2018). Developing Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for shampoos: The basis for comparable life cycle assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14 (5), 649–659. <https://doi.org/10.1002/ieam.4064>
17. Cavalcanti, A. P. B., Araújo, G. P. de, Almeida, F. C. G. de, Bezerra, K. G. O., Silva, M. da G. C. da, Sarubbo, A. et al. (2026). Ecofriendly

- Biosurfactant-Containing Solid Shampoo Formulation for Pets. *Cosmetics*, 13 (1), 11. <https://doi.org/10.3390/cosmetics13010011>
18. Pawar, R. S., Chandakavathe, B. N. (2025). A Polyherbal Approach to Hair Care: Development and Evaluation of a Solid Shampoo Bar. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10 (6), 2228–2232. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25jun1508>
 19. Mahmoud, M., Abdellatif, T. M. M., Aydin, R., Abdelkareem, M. A. (2025). Multi-Criteria Decision-Making for Selecting Renewable and Sustainable Gasoline Biofuel Additives Based on an Integrated AHP-TOPSIS Model. *Renewable and Sustainable Energy Technology*, 1. <https://doi.org/10.53941/rset.2025.100001>
 20. Howari, H., Parvez, M., Khan, O., Alhodaib, A., Mallah, A., Yahya, Z. (2023). Multi-Objective Optimization for Ranking Waste Biomass Materials Based on Performance and Emission Parameters in a Pyrolysis Process – An AHP-TOPSIS Approach. *Sustainability*, 15 (4), 3690. <https://doi.org/10.3390/su15043690>
 21. Nizhenkovska, I. V., Polova, Zh. M., Roik, O. M. (2021). Pat. No. 149642 UA. Sposib otrymannia tverdoho shampuniu dlia zhyrnoho volossia. No. u202103761; declared: 01.07.2021; published: 24.07.2021.
 22. Woźniak, B., Wawrzyńczak, A., Nowak, I. (2025). Analysis of Foaming Properties, Foam Stability, and Basic Physicochemical and Application Parameters of Bio-Based Car Shampoos. *Coatings*, 15 (8), 907. <https://doi.org/10.3390/coatings15080907>
 23. DSTU ISO 696:2005. Rechovyny poverkhnevo-aktyvni. Vyznachennia pinoutvoriuvalnoi zdatnosti modyfikovanykh metodom Ross-Mailsa (ISO 696-1975, IDT).
 24. Somavanshi, D., Sonawane, G., Pansare, K., Saad, M. (2023). Formulation evaluation of the multifunctional paraben free herbal shampoo from household herbs and comparison with the commercial shampoos. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 14, 2483–2490. [https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.14\(5\).2483-90](https://doi.org/10.13040/ijpsr.0975-8232.14(5).2483-90)
 25. DSTU EN 1262:2007. Rechovyny poverkhnevo-aktyvni. Metod vyznachennia rN rozchyniv chy dyspersiy (EN 1262:2003, IDT).
 26. Harrington, E. C. (1965). The desirable function. *Industrial Quality Control*, 21 (10), 494–498.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354824

ADSORPTION PURIFICATION OF SUNFLOWER OIL USING ACID-ACTIVATED MONTMORILLONITE AND QUALITY ASSESSMENT (p. 17–26)

Larisa Fialkovska

Vinnitsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Vinnitsia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4353-0963>

Valentyna Bandura

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8074-3020>

Marina Serdyuk

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6504-4093>

Maksym Hudzenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7959-3627>

Artem Antonenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9397-1209>

Vitalii Mihailik

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7604-4403>

Olga Vasylyshyna

Vinnitsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics, Vinnitsia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9906-516X>

This study investigates the process of sunflower oil adsorption purification using acid-activated montmorillonite from the Cherkasy deposit. The paper considers the change in sunflower oil quality indicators resulting from adsorption treatment with natural dispersed minerals.

This work reports a comprehensive solution to the problem of substantiating and devising efficient technology for vegetable oil purification that simultaneously removes impurities, oxidation products, as well as heavy metal cations. Process efficiency was evaluated using physicochemical methods, including determination of acid, color, peroxide values, mass fraction of phosphorus-containing substances, moisture, volatile matter, as well as chromatographic-mass spectrometric analysis of oil composition.

The results of experimental and pilot-scale studies demonstrate that the use of acid-activated montmorillonite at a dosage of 1% by oil mass, a temperature of 90–110°C, and a contact time of 20–30 min, ensures a reduction in the peroxide value to 3.0–3.9 mmol O₂/kg, the color value to 6–9 mg I₂, and the mass fraction of phosphorus-containing substances to 0.01–0.05%.

It has been shown that adsorption purification does not affect the basic triacylglycerol composition of the oil but promotes the removal of oxidized compounds that deteriorate its consumer properties and oxidative stability. The proposed technology could be implemented in industrial settings without significant modifications to existing production schemes; it represents a cost-effective alternative to imported bleaching clays.

Keywords: sunflower oil, adsorption purification, bleaching, peroxide value, color value, gas chromatography-mass spectrometry.

References

1. Lee, Y.-Ying, Tang, T.-K., Phuah, E.-T., Lai, O.-M. (Eds.) (2022). *Recent Advances in Edible Fats and Oils Technology*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-5113-7>
2. Gharby, S. (2022). Refining Vegetable Oils: Chemical and Physical Refining. *The Scientific World Journal*, 2022, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/6627013>
3. Susik, J., Ptasznik, S. (2023). Effect of bleaching with different clay on the final composition of post-fermentation corn oil with high content of β-sitosterol. *LWT*, 184, 114958. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114958>
4. O'Brien, R. D. (2008). *Fats and Oils*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420061673>
5. Hoffmann, G. (1989). Refining. *The Chemistry and Technology of Edible Oils and Fats and Their High Fat Products*, 139–200. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-352055-5.50011-5>
6. Bandura, V., Fialkovska, L., Osadchuk, P., Levtrynskaia, Y., Palvashova, A. (2022). Investigation of properties of sunflower and rapeseed

- oils obtained by the Soxhlet and microwave extraction methods. *Agraarteadus*, 33 (1), 48–58. <https://doi.org/10.15159/jas.22.17>
7. Burdo, O., Bandura, V., Kolianovska, L., Dukulis, I. (2017). Experimental research of oil extraction from canola by using microwave technology. *Engineering for Rural Development*. <https://doi.org/10.22616/erdev2017.16.n056>
 8. Osadchuk, P., Enakiev, Y., Domuschi, D., Mortev, I., Bandura, V. (2024). Increasing of the Vegetable Oils Purification Efficiency in an Electromagnetic Field. 2024 32nd National Conference with International Participation (TELECOM), 1–4. <https://doi.org/10.1109/telecom63374.2024.10812287>
 9. Osadchuk, P. I., Bandura, V. N., Enakiev, Y. I., Elenov, B. P., Domuschi, D. P. (2024). Engineering Methods for Calculating the Process of Filtration of Vegetable Oils under Ultrasonic Cavitation Conditions. 2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/eeae60309.2024.10600604>
 10. Rhazi, L., Depeint, F., Ayerdi Gotor, A. (2022). Loss in the Intrinsic Quality and the Antioxidant Activity of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Oil during an Industrial Refining Process. *Molecules*, 27 (3), 916. <https://doi.org/10.3390/molecules27030916>
 11. Łaska-Zieja, B., Marcinkowski, D., Golimowski, W., Niedbała, G., Wojciechowska, E. (2020). Low-Cost Investment with High Quality Performance. Bleaching Earths for Phosphorus Reduction in the Low-Temperature Bleaching Process of Rapeseed Oil. *Foods*, 9 (5), 603. <https://doi.org/10.3390/foods9050603>
 12. Sedaghat Boroujeni, L., Ghavami, M., Piravi Vanak, Z., Ghasemi Pirbalouti, A. (2020). Optimization of sunflower oil bleaching parameters: using Response Surface Methodology (RSM). *Food Science and Technology*, 40 (suppl 1), 322–330. <https://doi.org/10.1590/fst.10919>
 13. Fialkowska, L. (2021). Effective ways of cleaning sunflower oil from impurities. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 11 (2), 26. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2021-2-26>
 14. Vuorte, M., Vierros, S., Kuitunen, S., Sammalkorpi, M. (2020). Adsorption of impurities in vegetable oil: A molecular modelling study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 571, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.012>
 15. Vasiljević, N., Yusup, S., Mičić, V., Tadić, G., Lazić, D., Kostić, D. (2025). Optimization of The Bleaching Process of Sunflower Oil. *Acta Chimica Slovenica*, 72 (3), 478–490. <https://doi.org/10.17344/acsi.2024.8816>
 16. Guseinova, E. A. (2022). Adsorption Purification of Used Industrial Oil Using Natural Aluminosilicates. *Bulletin of the Karaganda University. "Chemistry" Series*, 108 (4), 162–170. <https://doi.org/10.31489/2022ch4/4-22-1>
 17. Bhattacharyya, K. G., Gupta, S. S. (2008). Influence of acid activation on adsorption of Ni(II) and Cu(II) on kaolinite and montmorillonite: Kinetic and thermodynamic study. *Chemical Engineering Journal*, 136 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.005>
 18. Yilmaz, E., Yüce-tepe, E. (2023). Bazi Natural Ve Asit-Aktive Natural Killerin, Sentetik Adsorbanların Ve Metal-Organik Çerçevelerin Alkali-Nötrale Ayciçeği Yağı Ağartma Yeteneklerinin İncelenmesi. *Gıda*, 48 (3), 653–669. <https://doi.org/10.15237/gida.gd23046>
 19. Kooli, F., Khimyak, Y. Z., Alshahateet, S. F., Chen, F. (2005). Effect of the Acid Activation Levels of Montmorillonite Clay on the Cetyltrimethylammonium Cations Adsorption. *Langmuir*, 21 (19), 8717–8723. <https://doi.org/10.1021/la050774z>
 20. Petrović, Z., Mihajlović, J., Botić, T., Lazić, D., Fazlić, A., Čebić, A. (2023). Possibility of bleaching sunflower oil with synthetic zeolite. *Technologica Acta*, 15 (2), 25–31. <https://doi.org/10.51558/2232-7568.2022.15.2.25>
 21. Maulana, M. R., Parlindungan, J. Y. (2025). Characterization of clay from Merauke Regency and its utilization as an adsorbent of free fatty acids in the purification of waste cooking oil. *Fullerene Journal of Chemistry*, 10 (2), 128–135. Available at: <https://indochembull.com/index.php/fullerene/article/view/747>
 22. ISO 5508:1990. Animal and vegetable fats and oils – Analysis by gas chromatography of methyl esters of fatty acids. ISO. Available at: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>
 23. Andreeva, O., Shunko, V., Grechanovska, O. (2016). Comparative analysis of the mineral composition of bentonite from Cherkassy bentonitic area. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (73), 13–19. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.73.02>
 24. CXS 210-1999. Standard for named vegetable oils. Codex Alimentarius. Available at: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/tr/?lnk=1&url=https%25A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B210-1999%252FCXS_210e.pdf
 25. Shattar, S. F. A., Zakaria, N. A., Foo, K. Y. (2020). One step acid activation of bentonite derived adsorbent for the effective remediation of the new generation of industrial pesticides. *Scientific Reports*, 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76723-w>
 26. Abedi, E., Akhavan, H., Hashemi, S. M. B., Oliyai, N., Sourghali, M., Karimzadeh, A., Rownaghi, M. (2025). Comparison Between Emerging and Conventional Methods for Edible Oils Bleaching. *Food Science & Nutrition*, 13 (11). <https://doi.org/10.1002/fsn3.71121>
 27. Huda, M. S., Wilson, P., Sarker, N. C., Monono, E. (2024). Optimizing Bleaching Process Parameters of Distillers Corn Oil for edible applications using a response surface methodology. *LWT*, 212, 116991. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116991>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358837

DETERMINING THE EFFECT OF SOY METHYL ETHER ADDITIVES TO COMMERCIAL DIESEL FUELS ON OIL CHANGE INTERVAL IN A 1.5 RENAULT DIESEL ENGINE, MODEL K9K (p. 27–35)

Vasyl Melnyk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5793-5486>

Mariia Hnyk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3662-0941>

Ihor Zakhara

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6214-6548>

Ivan Mykytii

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Ivano-Frankivsk, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8925-6349>

This study explores viscosity-temperature characteristics of Castrol GTX RN-Spec 5W-30 engine oil and its oxidation resistance. The task addressed investigates the effect of adding SME to diesel fuels on the timing of oil changes in the engine.

The results showed that the maximum service life of Castrol GTX RN-Spec 5W-30 oil under specified conditions is 12 thousand km when operating on commercial diesel fuel. In the case of using mixtures of diesel fuel and 10, 20, and 50 vol. % SME, the maximum service life of cars before oil replacement according to viscosity-temperature characteristics is reduced from 9 to 6 thousand km, respectively.

The total base number (TBN) indicator of all experimental samples of engine oils reaches a critical value after a run of 9 thousand km. In general, the use of fuel mixtures with biodiesel based on soybean methyl ether in an amount of up to 50 vol. % does not require a significant reduction in the oil replacement period according to the TBN indicator.

The deterioration in the viscosity-temperature characteristics of Castrol GTX RN-Spec 5W-30 engine oil is explained by the fact that biodiesel fuel based on soybean methyl ether has a lower heat of combustion. The fuel mixtures do not have time to completely burn in the engine cylinders and, being washed away with the oil into the sump, partially dilute it.

The accumulation of biodiesel fuel in engine oil also contributes to a decrease in the alkaline number of Castrol GTX RN-Spec 5W-30 engine oil and accelerates its oxidation process.

The findings made it possible to move from general assumptions to specific regulations – reducing oil change intervals by 20–50% or introducing specialized engine oils.

The results of this work could be used in the field of car service to adjust the mileage limits before oil change when operating cars on biodiesel fuel.

Keywords: alternative fuels, biodiesel, replacement terms, service life.

References

- Kryshtopa, S., Górski, K., Longwic, R., Smigins, R., Kryshtopa, L. (2021). Increasing Parameters of Diesel Engines by Their Transformation for Methanol Conversion Products. *Energies*, 14 (6), 1710. <https://doi.org/10.3390/en14061710>
- Bembenek, M., Karwat, B., Melnyk, V., Mosora, Y. (2023). Research on the Impact of Supplying the Air-Cooled D21A1 Engine with RME B100 Biodiesel on Its Operating Parameters. *Energies*, 16 (18), 6430. <https://doi.org/10.3390/en16186430>
- Kryshtopa, S., Górski, K., Longwic, R., Smigins, R., Kryshtopa, L., Matijošius, J. (2022). Using Hydrogen Reactors to Improve the Diesel Engine Performance. *Energies*, 15 (9), 3024. <https://doi.org/10.3390/en15093024>
- Bembenek, M., Melnyk, V., Mo, Y. (2024). Study of Parameters of the Mixture and Heat Generation of the DD15 Diesel Engine of the Sandvik LH514 Loader in the Process of Using Alternative Fuels Based on RME. *Acta Mechanica et Automatica*, 18 (2), 169–176. <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0021>
- Kryshtopa, S., Kryshtopa, L., Melnyk, V., Dolishnii, B., Prunko, I., Demianchuk, Y. (2017). Experimental research on diesel engine working on a mixture of diesel fuel and fusel oils. *Transport Problems*, 12 (2), 53–63. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.2.6>
- Kryshtopa, S., Kryshtopa, L., Panchuk, M., Smigins, R., Dolishnii, B. (2021). Composition and energy value research of pyrolysis gases. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 628 (1), 12008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/628/1/012008>
- Bembenek, M., Melnyk, V., Karwat, B., Hnyp, M., Kowalski, Ł., Mosora, Y. (2024). Jerusalem Artichoke as a Raw Material for Manufacturing Alternative Fuels for Gasoline Internal Combustion Engines. *Energies*, 17 (10), 2378. <https://doi.org/10.3390/en17102378>
- Bembenek, M., Melnyk, V., Karwat, B., Rokita, T., Hnyp, M., Mosora, Y., Warguła, Ł. (2024). Study of the Technical and Operational Parameters of Injectors Using Biogas Fuel. *Energies*, 17 (21), 5445. <https://doi.org/10.3390/en17215445>
- Idzior, M. (2021). Aging of engine oils and their influence on the wear of an internal combustion engine. *Combustion Engines*, 185 (2), 15–20. <https://doi.org/10.19206/ce-138033>
- Sala, R., Węglarz, K., Suchecki, A. (2023). Analysis of lubricating oil degradation and its influence on brake specific fuel consumption of a light-duty compression-ignition engine running a durability cycle on a test stand. *Combustion Engines*. <https://doi.org/10.19206/ce-169488>
- Rostek, E., Babiak, M. (2019). The experimental analysis of engine oil degradation utilizing selected thermoanalytical methods. *Transportation Research Procedia*, 40, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.014>
- Carrera-Rodríguez, M., Villegas-Alcaraz, J. F., Salazar-Hernández, C., Mendoza-Miranda, J. M., Jiménez-Islas, H., Segovia Hernández, J. G. et al. (2022). Monitoring of oil lubrication limits, fuel consumption, and excess CO₂ production on civilian vehicles in Mexico. *Energy*, 257, 124765. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124765>
- Lee, P., Stark, M. S., Wilkinson, J. J., Priest, M., Lindsay Smith, J. R. et al. (2005). The Degradation of Lubricants in Gasoline Engines: Development of a Test Procedure to Evaluate Engine Oil Degradation and its Consequences for Rheology. *Tribology and Interface Engineering Series*, 593–602. [https://doi.org/10.1016/s0167-8922\(05\)80061-6](https://doi.org/10.1016/s0167-8922(05)80061-6)
- Gołębowski, W., Wolak, A., Zajac, G. (2018). Definition of oil change intervals based on the analysis of selected physicochemical properties of used engine oils. *Combustion Engines*, 172 (1), 44–50. <https://doi.org/10.19206/ce-2018-105>
- Zaharia, C., Niculescu, R., Năstase, M., Clenci, A., Iorga-Simăn, V. (2022). Engine oil analysis to evaluate the degree of its wear during the period of operation of the vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1220 (1), 12037. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1220/1/012037>
- Gupta, J. G., Agarwal, A. K. (2021). Engine durability and lubricating oil tribology study of a biodiesel fuelled common rail direct injection medium-duty transportation diesel engine. *Wear*, 486–487, 204104. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204104>
- Agocs, A., Budnyk, S., Frauscher, M., Ronai, B., Besser, C., Dörr, N. (2020). Comparing oil condition in diesel and gasoline engines. *Industrial Lubrication and Tribology*, 72 (8), 1033–1039. <https://doi.org/10.1108/ilt-10-2019-0457>
- Smigins, R., Amatnieks, K., Birkavs, A., Górski, K., Kryshtopa, S. (2023). Studies on Engine Oil Degradation Characteristics in a Field Test with Passenger Cars. *Energies*, 16 (24), 7955. <https://doi.org/10.3390/en16247955>
- Zdrodowski, R., Gangopadhyay, A., Anderson, J. E., Ruona, W. C., Uy, D., Simko, S. J. (2010). Effect of Biodiesel (B20) on Vehicle-Aged Engine Oil Properties. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 03 (2), 579–597. <https://doi.org/10.4271/2010-01-2103>
- Costa, H. L., Spikes, H. (2014). Effects of Ethanol Contamination on Friction and Elastohydrodynamic Film Thickness of Engine Oils.

- Tribology Transactions, 58 (1), 158–168. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.957369>
21. Nagy, A. L., Agocs, A., Ronai, B., Raffai, P., Rohde-Brandenburg, J., Besser, C., Dörr, N. (2021). Rapid Fleet Condition Analysis through Correlating Basic Vehicle Tracking Data with Engine Oil FT-IR Spectra. *Lubricants*, 9 (12), 114. <https://doi.org/10.3390/lubricants9120114>
 22. Hazar, H., Telceken, T., Sevinc, H. (2022). An experimental study on emission of a diesel engine fuelled with SME (safflower methyl ester) and diesel fuel. *Energy*, 241, 122915. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122915>
 23. Zhao, J., He, Y., Wang, Y., Wang, W., Yan, L., Luo, J. (2016). An investigation on the tribological properties of multilayer graphene and MoS₂ nanosheets as additives used in hydraulic applications. *Tribology International*, 97, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.12.006>
 24. Melnyk, V., Romanyshyn, L., Mosora, Y., Kotwica, K. (2023). Technology of Obtaining Mixed Alternative Fuel Based on Organic Substances for Mining Technological Transport Engines. *Management Systems in Production Engineering*, 31 (1), 71–77. <https://doi.org/10.2478/mspe-2023-0009>
 25. CASTROL. Available at: <https://castroil.com.ua>
 26. ASTM STANDARD D4052. Available at: <https://www.scribd.com/document/706293661/ASTM-D4052>
 27. ASTM STANDARD D445. Available at: <https://www.scribd.com/document/506667547/ASTM-D445>
 28. ASTM STANDARD D2270. Available at: <https://www.scribd.com/document/767645400/D2270>
 29. ASTM STANDARD D93. Available at: <https://www.scribd.com/document/761580223/ASTM-D93>
 30. ASTM STANDARD D4739. Available at: <https://www.scribd.com/document/731083705/ASTM-D4739>
 31. Blanco-Rodríguez, J., Simón-Montero, X., Cortada-García, M., Maroto, S., Porteiro, J. (2024). Modelling the impact of reducing lubricant viscosity on a conventional passenger car fuel economy and wear protection. *Results in Engineering*, 24, 103159. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103159>
 32. Kalogiannis, K., Desai, P., Mian, O., Mainwaring, R. (2018). Simulated Bearing Durability and Friction Reduction with Ultra-Low Viscosity Oils. *SAE Technical Paper Series*, 1. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1802>
 33. Lee, P., Zhmud, B. (2021). Low Friction Powertrains: Current Advances in Lubricants and Coatings. *Lubricants*, 9 (8), 74. <https://doi.org/10.3390/lubricants9080074>
 34. Tomanik, E., Profito, F., Sheets, B., Souza, R. (2020). Combined lubricant–surface system approach for potential passenger car CO₂ reduction on piston-ring-cylinder bore assembly. *Tribology International*, 149, 105514. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.014>
 35. Zhang, Y., Ma, Z., Feng, Y., Diao, Z., Liu, Z. (2021). The Effects of Ultra-Low Viscosity Engine Oil on Mechanical Efficiency and Fuel Economy. *Energies*, 14 (8), 2320. <https://doi.org/10.3390/en14082320>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352281

SYNGAS QUALITY IMPROVEMENT IN CORNCOB UPDRAFT GASIFICATION USING CAO/ACTIVATED CARBON PALM FIBER CATALYST (p. 36–50)

Purbo Suwandono

Widya Gama University, Malang, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4085-1291>

Widya Wijayanti

Brawijaya University, Malang, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4215-5943>

Nova Risdiyanto Ismail

Widya Gama University, Malang, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8439-6919>

Dzulfikar Johan Akbar

Brawijaya University, Malang, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4652-8516>

Muhammad Reza

Widya Gama University, Malang, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9258-0586>

The object of the study is updraft fixed-bed gasification process of corncob biomass with dual catalytic system calcium oxide (CaO) and palm-fiber-derived activated carbon (AC-PF). This study addresses the low heating value of corn cob syngas and the high cost of upgrading catalysts. This study using dual catalyst system characterization along with both equivalence ratio (0.2, 0.25, 0.3, and 0.35), catalyst loading (4%, 6%, 8% and 10%) and finally CaO/AC–PF mass ratio (0:1, 1:0, 1:1, 2:1), in addition to this the final products obtained were analyzed for dual catalyst systems further through Scanning Electron Microscope, Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Brunauer-Emmett-Teller. These results indicate that by increasing the ER, H₂ and CH₄ fractions increase, whereas CO₂ decreases, and the lower heating value of syngas increases, however CO reaches an optimum at ER = 0.3. Higher catalyst loading tends to decrease H₂ and CH₄ but increase CO, which potentially lowers the heating value at high loadings. Characterization of the catalyst shows that AC-PF has a porous structure and greater gas-solid contact with enhanced secondary reactions while addition of CaO creates a composite with surface species associated with CO₂ sorption. Low Heating Value of syngas rises at high ER while decreases with the increase in catalyst loadings due to the minimal contribution of CH₄. Our obtained results feature the demonstrated functional synergetic mechanism between porous AC–PF and CaO-based CO₂ sorption, allowing simultaneous catalytic upgrading and CO₂ capture in one cheap dual catalyst system. Such empirical observations would provide an appropriate foundation for future potential designs and operation of small-scale biomass gasification units, specifically updraft reactors to convert corn cob waste at the ER and catalyst loadings investigated in this study.

Keywords: gasification, updraft, corncob, syngas, CaO, activated carbon.

References

1. Yadav, V. K., Sharma, A. K., Gacem, A., Pandit, J., Wany, A., Kumar, A. et al. (2025). Emerging Trends in the Valorization of Agricultural Waste and Their Utilization in Agricultural, Pharmaceuticals, and Environmental Cleanup. *Waste and Biomass Valorization*, 16 (6), 2779–2833. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03002-y>
2. Lewandowski, W. M., Rym, M., Kosakowski, W. (2020). Thermal Biomass Conversion: A Review. *Processes*, 8 (5), 516. <https://doi.org/10.3390/pr8050516>
3. Ariyanti, D., Rimantho, D., Leonardus, M., Ardyani, T., Lisnawati, Fiviyanti, S. et al. (2025). Valorization of corn cob waste for furfural production: A circular economy approach. *Biomass and Bioenergy*, 194, 107665. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107665>

4. Zhang, J., Chu, Z., Cao, R., Wu, X., Han, K. (2026). A review of resource recovery from waste plastics via pyrolysis and gasification. *Fuel*, 404, 136319. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136319>
5. Tangke Tosuli, Y., Cahyadi, Dafiqurrohman, H., Hermawan, R., Surjosaty, A. (2024). Gasification of sago dreg waste in a top-lit updraft fixed bed gasifier: Syngas composition and its effect with additional Al_2O_3 as catalyst. *Energy Conversion and Management: X*, 24, 100775. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100775>
6. Tuan, P. D., Minh Quan, L., Nhi, V. T., Huong, H. M., Phung, L. T. K., Feng, D. (2022). Enrichment of hydrogen in product gas from a pilot-scale rice husk updraft gasification system. *Carbon Resources Conversion*, 5 (3), 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2022.07.003>
7. Yousef, S., Eimontas, J., Zakarauskas, K., Striūgas, N. (2025). Oxygen updraft gasification-catalytic reforming of cigarettes butts for hydrogen-rich syngas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 171, 150650. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.150650>
8. Bilbao, D. C., Machin, E. B., Pedrosa, D. T., Hernández, D., Aburto-Hole, J., Muñoz, L. (2025). Experimental assessment of the energy potential of pellets produced from beekeeping wastes by updraft gasification. *Energy Conversion and Management*, 343, 120206. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120206>
9. Yesilova, N., Tezer, O., Ongen, A., Ayol, A. (2024). Enhancing biomass gasification: A comparative study of catalyst applications in updraft and modifiable-downdraft fixed bed reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 76, 290–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.075>
10. Jančauskas, A., Striūgas, N., Zakarauskas, K., Skvorčinskienė, R., Eimontas, J., Buinevičius, K. (2024). Experimental investigation of sorted municipal solid wastes producer gas composition in an updraft fixed bed gasifier. *Energy*, 289, 130063. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130063>
11. Junga, R., Tańczuk, M., Sobek, S., Chabiński, M., Ziółkowski, L., Werle, S. (2023). Effect of the addition of laying hens manure to the straw on gasification efficiency in updraft gasifier under air atmosphere. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120269. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120269>
12. Tezer, Ö., Karabağ, N., Öngen, A., Ayol, A. (2023). Gasification performance of olive pomace in updraft and downdraft fixed bed reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (60), 22909–22920. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.088>
13. Işik, K. E., Dogru, M., Erdem, A. (2023). Gasification of MDF residue in an updraft fixed bed gasifier to produce heat and power via an ORC turbine. *Waste Management*, 169, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.06.025>
14. Gorthy, S., Verma, S., Sinha, N., Shetty, S., Nguyen, H., Neurock, M. (2023). Theoretical Insights into the Effects of KOH Concentration and the Role of OH⁻ in the Electrocatalytic Reduction of CO₂ on Au. *ACS Catalysis*, 13 (19), 12924–12940. <https://doi.org/10.1021/acscatal.2c06115>
15. Wang, X., Zeng, W., Xin, C., Kong, X., Hu, X., Guo, Q. (2022). The development of activated carbon from corncob for CO₂ capture. *RSC Advances*, 12 (51), 33069–33078. <https://doi.org/10.1039/d2ra05979g>
16. Zhou, B., Bai, B., Zhu, X., Guo, J., Wang, Y., Chen, J. et al. (2024). Insights into effects of grain boundary engineering in composite metal oxide catalysts for improving catalytic performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 653, 1177–1187. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.148>
17. Zhu, Y., Wu, J., Zhang, Y., Miao, Z., Niu, Y., Guo, F., Xi, Y. (2024). Preparation of hierarchically porous carbon ash composite material from fine slag of coal gasification and ash slag of biomass combustion for CO₂ capture. *Separation and Purification Technology*, 330, 125452. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125452>
18. Ilić, M., Haegel, F.-H., Lolić, A., Nedić, Z., Tosti, T., Ignjatović, I. S. et al. (2022). Surface functional groups and degree of carbonization of selected chars from different processes and feedstock. *PLOS ONE*, 17 (11), e0277365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277365>
19. Ali, R., Aslam, Z., Shawabkeh, R. A., Asghar, A., Hussein, I. A. (2020). BET, FTIR, and RAMAN characterizations of activated carbon from wasteoil fly ash. *Turkish Journal of Chemistry*, 44 (2), 279–295. <https://doi.org/10.3906/kim-1909-20>
20. Stanienda-Pilecki, K. J. (2019). The importance of Fourier-Transform Infrared Spectroscopy in the identification of carbonate phases differentiated in magnesium content. *Spectroscopy*, 34 (6). Available at: <https://www.spectroscopyonline.com/view/spec0619-pilecki>
21. Dai, F., Zhuang, Q., Huang, G., Deng, H., Zhang, X. (2023). Infrared Spectrum Characteristics and Quantification of OH Groups in Coal. *ACS Omega*, 8 (19), 17064–17076. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01336>
22. Martínez de Salazar Martínez, E., Alexandre-Franco, M. F., Nieto-Sánchez, A. J., Cuerda-Correa, E. M. (2024). Exploring the role of surface and porosity in CO₂ capture by CaO-based adsorbents through response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN). *Journal of CO₂ Utilization*, 83, 102773. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102773>
23. Tavizón-Pozos, J. A., Cervantes-Cuevas, H., Garcia-Camacho, G. G., Chavez-Esquivel, G., Acosta-Najarro, D. R. (2025). Biodiesel Production Using K–Sr/CaO and CaO Catalysts Derived from Eggshells by Canola Oil Transesterification. *ACS Omega*, 10 (7), 6827–6838. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09118>
24. Koo-amornpattana, W., Phadungbut, P., Kunthakudee, N., Jonglertjanya, W., Ratchahat, S., Hunsom, M. (2023). Innovative metal oxides (CaO, SrO, MgO) impregnated waste-derived activated carbon for biohydrogen purification. *Scientific Reports*, 13 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31723-4>
25. Quan, C., Wang, M., Gao, N., Yang, T., Li, R. (2023). In situ adsorption of CO₂ to enhance biomass gasification for hydrogen production using Ca/Ni based composites. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101229. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101229>
26. Micheli, F., Mattucci, E., Courson, C., Gallucci, K. (2021). Bi-Functional Catalyst/Sorbent for a H₂-Rich Gas from Biomass Gasification. *Processes*, 9 (7), 1249. <https://doi.org/10.3390/pr9071249>
27. Zhu, M., Wang, Q., Wang, S. (2025). Recent Advances and Future Perspectives in Catalyst Development for Efficient and Sustainable Biomass Gasification: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 17 (16), 7370. <https://doi.org/10.3390/su17167370>
28. Cerone, N., Zimbardi, F., Contuzzi, L., Baleta, J., Cerinski, D., Skvorčinskienė, R. (2020). Experimental investigation of syngas composition variation along updraft fixed bed gasifier. *Energy Conversion and Management*, 221, 113116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113116>
29. Mohanty, R., Mahanta, P., Mahapatro, A., Sharma, R. P. (2025). Catalytic gasification of pinewood biomass in a fluidized bed reactor with dolomite, limestone, and activated carbon: An experimental study. *Energy*, 325, 136131. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136131>

30. Liu, C., Huang, Y., Niu, M., Pei, H., Liu, L., Wang, Y. et al. (2018). Influences of equivalence ratio, oxygen concentration and fluidization velocity on the characteristics of oxygen-enriched gasification products from biomass in a pilot-scale fluidized bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(31), 14214–14225. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.154>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357229

EFFECT OF MODIFYING THE SURFACE OF CARDBOARD WITH ALUMINUM HYDROXYL CHLORIDE SOLUTION ON THE INDICATORS OF THE CONTACT ANGLE AND SURFACE ENERGY (p. 51–61)

Tetiana Roik

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4930-0173>

Yevheniia Bychkar

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0351-4966>

Volodymyr Oliynyk

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3117-2780>

This study investigates the process of cardboard surface modification with an aqueous solution of $Al_2(OH)_nCl_{6-n}$ and its effect on the indicators of contact angle and surface charge of dissolved substances in cardboard for the manufacture of packaging and disposable tableware.

The task addressed relates to the lack of a technological approach to modifying the surface of cardboard, which would simultaneously enable high adhesion between cardboard and polymer by controlled change in wettability and surface energy without loss of its barrier properties. A solution option is to improve the technology of modifying cardboard for the production of disposable tableware with an aqueous solution of $Al_2(OH)_nCl_{6-n}$

The experimental studies involved manufacturing a series of cardboard samples with different compositions, determining the contact angle by the lying drop method and the surface charge of dissolved substances. The effect of surface treatment on the indicators of the contact angle and surface charge of dissolved substances of cardboard for the manufacture of packaging and disposable tableware has been established. It was found that the contact angle decreases to $82.8\text{--}84.7^\circ$ compared to $91.8\text{--}93.4^\circ$ for unmodified samples (without applied polymer) and $116.1\text{--}116.6^\circ$ versus $112.1\text{--}115.9^\circ$, respectively, for samples with a polymer coating. At the same time, the surface charge of dissolved substances increases from $-18.3\text{--}25.9$ to $-51.3\text{--}54.1$ $\mu\text{g-equiv./l}$, that is, by 2–3 times.

The results indicate that the treated cardboard samples have better wettability. This property will contribute to better contact between the cardboard surface and the polymer melt during its application and subsequent gluing of the structural elements of an article.

The proposed approach to modifying the cardboard sheet is promising for further implementation in industrial processes, in particular to produce packaging materials and disposable tableware. This will make it possible to influence the barrier properties of the finished cardboard paper, as well as to improve the functional properties of packaging and disposable tableware made of modified cardboard

Keywords: laminated cardboard, raw material modification, contact angle, cationic charge

References

- Yenidoğan, S. (2020). Nanocrystalline Cellulose and Polyvinyl Alcohol Coating Application to Cardboard Packaging Papers and Investigation of the Effects on Paper Properties. *Materials Science*, 26 (3), 317–322. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.26.3.21499>
- Taboada-Rodríguez, A., García-García, I., Cava-Roda, R., López-Gómez, A., Marín-Iniesta, F. (2013). Hydrophobic properties of cardboard coated with polylactic acid and ethylene scavengers. *Journal of Coatings Technology and Research*, 10 (5), 749–755. <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9493-3>
- Osyka, V. A., Koptiukh, L. A. (2018). Paperovi pakuvalni materialy. Kyiv: KNTEU, 464. <https://doi.org/10.31617/m.knute.2018-302>
- Yu, F., Wang, K., Li, H., Peng, L. (2023). Superhydrophobic and ethylene scavenging paper doped with halloysite nanotubes for food packaging applications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 656, 130457. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130457>
- Lev, R., Tanninen, P., Lyytikäinen, J., Leminen, V. (2023). Converting and its effects on barrier properties of coated packaging materials: A Review. *BioResources*, 18 (4). <https://doi.org/10.15376/biores.18.4.lev>
- Ghahrani, N., Nazarnezhad, N., Ramezani, O., Asadpour, G. (2023). The impact of an acidic post-treatment on surface-modified old corrugated cardboard (OCC) with NaOH-urea as a reinforcing agent. *BioResources*, 18 (2), 4153–4167. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.4153-4167>
- Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Melo, R. R. de, Mendonça, M. C., Tonoli, G. H. D. (2022). Association of cellulose micro/nanofibrils and silicates for cardboard coating: Technological aspects for packaging. *Industrial Crops and Products*, 188, 115667. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115667>
- Beketov, G. V., Shynkarenko, O. V. (2022). Surface wetting and contact angle: basics and characterisation. *Himia, Fizika Ta Tehnologija Poverhni*, 13 (1), 3–35. <https://doi.org/10.15407/hftp13.01.003>
- Madeira, D. M. F., Vieira, O., Pinheiro, L. A., de Melo Carvalho, B. (2018). Correlation between Surface Energy and Adhesion Force of Polyethylene/Paperboard: A Predictive Tool for Quality Control in Laminated Packaging. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/2709037>
- Tian, D., Song, Y., Jiang, L. (2013). Patterning of controllable surface wettability for printing techniques. *Chemical Society Reviews*, 42 (12), 5184. <https://doi.org/10.1039/c3cs35501b>
- Feng, X., Liu, B. (2024). Preparation, Characterization, and Application of P(aluminum chloride-co-diallyldimethylammonium chloride) Hybrid Flocculant. *Applied Sciences*, 14 (19), 8708. <https://doi.org/10.3390/app14198708>
- Chen, H., Wang, B., Li, J., Ying, G., Chen, K. (2022). High-strength and super-hydrophobic multilayered paper based on nano-silica coating and micro-fibrillated cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 288, 119371. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119371>
- Halysh, V. V. (2023). Kompleksni resursoefektyvni tekhnolohiyi ochyshchennia vod paperovykh vyrobnytstv. Kyiv, 417. Available at: <https://ela.kpi.ua/items/5006803c-88c2-46b3-973a-eeec71160af93>
- Keresztes, J., Csóka, L. (2023). Characterisation of the Surface Free Energy of the Recycled Cellulose Layer that Comprises the Middle Component of Corrugated Paperboards. *Coatings*, 13 (2), 259. <https://doi.org/10.3390/coatings13020259>

15. Obradovic, D., Mishra, L. N. (2020). Mechanical Properties Of Recycled Paper And Cardboard. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 6 (3), 0429–0434. <https://doi.org/10.18540/jcecvl6is-s3pp0429-0434>
16. Kordbacheh, F., Heidari, G. (2023). Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*, 2 (2), 139–153. <https://doi.org/10.22128/mch.2023.684.1039>
17. Liu, Z., Li, W., Qin, Z., Jin, L., Sun, Z., Wu, H. (2024). Research on the Stability of Different Polar Surfaces in Aluminum Nitride Single Crystals. *Crystals*, 14 (4), 337. <https://doi.org/10.3390/cryst14040337>
18. Buchkar, E., Roik, T., Khokhlova, R. (2023). Adhesion Features of Polymer Films to Cardboard. V International Scientific and Theoretical Conference «The current state of development of world science: characteristics and features». Lisbon. Available at: https://previous.scientia.report/index.php/archive/issue/view/02.06.2023?utm_source=eSputnik-promo&utm_medium=email&utm_campaign=SCIENTIA_Konferenc%D1%96ja_%7C_Status. :_opubl%D1%96kovano&utm_content=1121625536
19. Bychkar, Ye. (2025). Analiz kraiovoho kuta zmochuvannia pry poverkhnevyi obrobtisi kartonu dlia odnorazovoho posudu. Tezy dopovidi «Drukarstvo molode–2025». Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
20. Roik, T. A., Bychkar, Ye. S. (2025). Vplyv poperednoi obrobky poverkhni kartonnoho polotna na pokaznyky zmochuvanosti pry nanessenii bariernoho polimernoho pokryttia. *Tekhnolohiya i Tekhnika Drukarstva*, 1 (87), 36–47. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(87\).2025.322199](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(87).2025.322199)
21. Roik, T. A., Bychkar, Ye. S. (2025). Analiz vplyvu poverkhnevoi obrobky na zminu poverkhnevoi vilnoi enerhiyi ta dzeta-potentsialu kartonu dlia vyhotovlennia odnorazovoho posudu. *Tekhnolohiya i Tekhnika Drukarstva*, 3 (89), 22–33. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(89\).2025.342986](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(89).2025.342986)
22. Khadzhyanova, S. Ye., Zolotukhina, K. I., Kushlyk, B. R., Kushlyk-Dyvulska, O. I. (2018). Vyiavlennia zalezhnosti eksperymentalnykh doslidzhen kraiovoho kuta zmochuvannia. *Tekhnolohiya i Tekhnika Drukarstva*, 4 (62), 27–38. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(62\).2018.167228](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(62).2018.167228)
23. Shen, Z., Rajabi-Abhari, A., Oh, K., Yang, G., Youn, H. J., Lee, H. L. (2021). Improving the Barrier Properties of Packaging Paper by Polyvinyl Alcohol Based Polymer Coating – Effect of the Base Paper and Nanoclay. *Polymers*, 13 (8), 1334. <https://doi.org/10.3390/polym13081334>
24. Ghahremannezhad, F., Mohammadhosseini, B., Khani, M. R., Khanjani, J., Shokri, B. (2025). Plasma treatment of high-density polyethylene blow moulded substrates to improve surface adhesion properties: Increase in bondability to label films. *Journal of Elastomers & Plastics*, 57 (6), 897–916. <https://doi.org/10.1177/00952443251339830>
25. Hurhal, N. S., Repeta, V. B., Novosad, I. V., Marshalok, I. Y., Shybanov, V. V. (2012). Vzaiemozviazok mizh pokaznykom odnostoronnoho zmochuvannia i poverkhnevoiu enerhieiu etyketkovykh papieriv. *Naukovi zapysky [Ukrainskoi akademiyi druzarstva]*, 2, 163–167. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz_2012_2_27
26. Ahmed, A., Sanedrin, R., Willers, T., Waghmare, P. R. (2022). The effect of dynamic wetting pressure on contact angle measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 608, 1086–1093. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.10.003>
27. Kisil, I. S., Barna, O. B. (2015). Vymiriuvannia kraiovoho kuta zmochuvannia metodom aproksymatsiyi polinomamy konturu lezhachoi krapli. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, 2 (35), 38–41. Available at: https://search.library.nung.edu.ua/DocDescription?doc_id=421512
28. Adibi, A., Valdesueiro, D., Mok, J., Behabtu, N., Lenges, C., Simon, L., Mekonnen, T. H. (2022). Sustainable barrier paper coating based on alpha-1,3 glucan and natural rubber latex. *Carbohydrate Polymers*, 282, 119121. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119121>
29. Ilchenko, A. M., Kotvytska, K. A. (2023). Zastosuvannia znan pro elektrolitychnu dysotsiatsiu. The XV International Scientific and Practical Conference «Scientific fundamentals of solving modern scientific problems». Varna, 152–158. Available at: <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2023/04/Scientific-fundamentals-of-solving-modern-scientific-problems.pdf>
30. Grasso, D., Subramaniam, K., Butkus, M., Strevett, K., Bergendahl, J. (2002). A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 1 (1), 17–38. <https://doi.org/10.1023/a:1015146710500>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358469

DETERMINATION OF THE FORMATION MECHANISM OF ZINC AND NICKEL LAYERED DOUBLE HYDROXIDES (p. 62–71)

Vadym Kovalenko

Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8012-6732>

Anastasiia Borysenko

Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2732-5660>

Dmytro Andreiev

Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1636-1671>

Anton Dopira

Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9391-3543>

Oleksii Demchenko

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8676-734X>

Valerii Kotok

Ukrainian State University of Science and Technologies,
Dnipro, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8879-7189>

Volodymyr Medianyuk

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5403-5338>

Dmytro Sukhomlyn

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5714-3454>

German Shuklin

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute”, Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2507-384X>

Volodymyr Verbitskiy

National Ecology and Nature Center, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7045-8293>

The object of the study – the formation mechanism of Zn-Al nitrate, Zn-Al tripolyphosphate, Ni-Al carbonate and Ni(II)-Ni(III) carbonate layered-double hydroxides (LDHs).

To calculate the composition of the precipitate at the LDH formation stage, the following hypotheses were proposed:

1) basic salt hypothesis (BSH): all cations completely precipitate, then OH⁻ ions replace the anions;

2) variable cation composition hypothesis (VCCH): the precipitate is formed by a saturated “guest” cation, and subsequently the amount of the “host” cation increases.

Potentiometric titration with a glass electrode was used to determine the LDH formation mechanism.

A two-stage formation mechanism was observed for Zn-Al-NO₃ LDH. At the first stage, aluminum hydroxide forms (pH = 6.47) via the formation of the hydroxo salt Al(OH)_{0,667}(NO₃)_{2,333} (pH = 4.98). At the second stage, LDH formation proceeds through intermediate stages: at pH = 7.36, the composition is Zn_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{1,20}(NO₃)_{1,00} (BSH) or Zn_{0,667}Al_{0,333}(OH)₂(NO₃)_{1,667} (VCCH), at pH = 9.35, the composition is Zn_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{1,93}(NO₃)_{0,27} (BSH) or Zn_{0,793}Al_{0,207}(OH)₂(NO₃)_{0,204} (VCCH).

A two-stage mechanism is characteristic of Zn-Al-P₃O₁₀ LDH. At pH = 6.25, the hydroxo salt Al(OH)_{2,66}(P₃O₁₀)_{0,667} is formed, whereas at pH = 9.25, LDH with the composition Zn_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{2,00}(P₃O₁₀)_{0,040} is obtained. For Zn-Al LDH, a pH range of 7–10 is recommended.

It was found that during the formation of Ni-Al-CO₃ LDH, the stage of Al hydroxocompound formation is absent due to the complete irreversible hydrolysis of Al³⁺ in the presence of CO₃²⁻. At pH = 6.5, the precipitate Ni_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{1,066}(CO₃)_{0,567} (BSH) or Ni_{0,624}Al_{0,376}(OH)₂(CO₃)_{0,376} (VCCH) is formed, which is transformed into LDH upon further alkalization. The synthesis of Ni-Al-CO₃ LDH should be carried out at pH = 8–11.

A single-stage formation mechanism is determined for Ni(II)-Ni(III)-CO₃ LDH, with a recommended synthesis pH range of 10–11.

Comparative analysis shows that the VCCH better describes the change in the precipitate composition during LDH formation

Keywords: potentiometric titration, formation mechanism, Zn-Al LDH, Ni-Al LDH, Ni(II)-Ni(III) LDH

References

- Nalawade, P., Aware, B., Kadam, V., Hirlekar, R. (2009). Layered double hydroxides: A review. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68, 267–272. Available at: <https://www.hazemsakeek.net/wp-content/uploads/2021/06/LDH.pdf>
- Kovalenko, V., Kotok, V., Murashevych, B. (2023). Layered Double Hydroxides as the Unique Product of Target Ionic Construction for Energy, Chemical, Foods, Cosmetics, Medicine and Ecology Applications. *The Chemical Record*, 24 (2). <https://doi.org/10.1002/tcr.202300260>
- Kovalenko, V., Borysenko, A., Kotok, V., Nafeev, R., Verbitskiy, V., Melnyk, O. (2022). Determination of the dependence of the structure of Zn-Al layered double hydroxides, as a matrix for functional anions intercalation, on synthesis conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (12 (115)), 12–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252738>
- Sasai, R., Sato, H., Sugata, M., Fujimura, T., Ishihara, S., Deguchi, K. et al. (2019). Why Do Carbonate Anions Have Extremely High Stability in the Interlayer Space of Layered Double Hydroxides? Case Study of Layered Double Hydroxide Consisting of Mg and Al (Mg/Al = 2). *Inorganic Chemistry*, 58 (16), 10928–10935. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.9b01365>
- Wijitwongwan, R. (Ploy), Intasa-ard, S. (Grace), Ogawa, M. (2019). Preparation of Layered Double Hydroxides toward Precisely Designed Hierarchical Organization. *ChemEngineering*, 3 (3), 68. <https://doi.org/10.3390/chemengineering3030068>
- Khan, A. I., Ragavan, A., Fong, B., Markland, C., O'Brien, M., Dunbar, T. G. et al. (2009). Recent Developments in the Use of Layered Double Hydroxides as Host Materials for the Storage and Triggered Release of Functional Anions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48 (23), 10196–10205. <https://doi.org/10.1021/ie9012612>
- Izaddin Sheikh Mohd Ghazali, S. A., Dzulkifli, N. N., Abdullah, A., Fatimah, I., Biswas, H. S., Kovalenko, V., Poddar, S. (2025). Synthesis of novel ternary herbicide-layered double hydroxide hybrids via the ion exchange method. *Pure and Applied Chemistry*, 97 (5), 451–459. <https://doi.org/10.1515/pac-2024-0336>
- Mohd Shah, A. H., Izaddin Sheikh Ghazali, S. A., Md Norizan, N. E., Roslan, N. J., Dzulkifli, N. N., Zaki, H. M. et al. (2025). Design and evaluation of zinc-aluminium layered double hydroxide-palmitic acid nanocomposites: synthesis, characterization and antimicrobial properties. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 29 (3), 1304. Available at: https://mjas.analis.com.my/mjas/v29_n3/pdf/Mohd%20Shah_29_3_1304.pdf
- Burmistr, M. V., Boiko, V. S., Lipko, E. O., Gerasimenko, K. O., Gomza, Yu. P., Vesnin, R. L. et al. (2014). Antifriction and Construction Materials Based on Modified Phenol-Formaldehyde Resins Reinforced with Mineral and Synthetic Fibrous Fillers. *Mechanics of Composite Materials*, 50 (2), 213–222. <https://doi.org/10.1007/s11029-014-9408-0>
- Mohd Shah, A. H., Ahmad, A., Dzulkifli, N. N., Mohd Zaki, H., Fatimah, I., Kovalenko, V., Sheikh Mohd Ghazali, S. A. I. (2026). pH-responsive LDH-palmitic acid nanohybrids for controlled drug delivery. *Pure and Applied Chemistry*. <https://doi.org/10.1515/pac-2025-0602>
- Kesavan Pillai, S., Kleyi, P., de Beer, M., Mudaly, P. (2020). Layered double hydroxides: An advanced encapsulation and delivery system for cosmetic ingredients-an overview. *Applied Clay Science*, 199, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105868>
- Kameliya, J., Verma, A., Dutta, P., Arora, C., Vyas, S., Varma, R. S. (2023). Layered Double Hydroxide Materials: A Review on Their Preparation, Characterization, and Applications. *Inorganics*, 11 (3), 121. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030121>
- Zhang, G., Zhang, X., Meng, Y., Pan, G., Ni, Z., Xia, S. (2020). Layered double hydroxides-based photocatalysts and visible-light driven photodegradation of organic pollutants: A review. *Chemical Engineering Journal*, 392, 123684. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123684>
- Yousaf, M. H., Shahid, M., Ahmad, N., Ali, M., Yousaf, G. (2023). Catalytic Hydrogenation of Organic Polymers by Mixed Transition Metal Oxides. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 8 (5), 3234–3241. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8049671>
- Kotok, V., Kovalenko, V., Malyshev, V. (2017). Comparison of oxygen evolution parameters on different types of nickel hydroxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (89)), 12–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109770>
- Kovalenko, V., Kotok, V., Kovalenko, I. (2018). Activation of the nickel foam as a current collector for application in supercapacitors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (93)), 56–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.133472>
- Kotok, V. A., Kovalenko, V. L., Solovov, V. A., Kovalenko, P. V., Ananchenko, B. A. (2018). Effect of deposition time on properties of electrochromic nickel hydroxide films prepared by cathodic tem-

- plate synthesis. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13 (9), 3076–3086. Available at: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_0518_7034.pdf
18. Kotok, V. A., Kovalenko, V. L. (2019). Non-Metallic Films Electroplating on the Low-Conductivity Substrates: The Conscious Selection of Conditions Using Ni(OH)₂ Deposition as an Example. *Journal of The Electrochemical Society*, 166 (10), D395–D408. <https://doi.org/10.1149/2.0561910jes>
 19. Solovov, V. A., Nikolenko, N. V., Kovalenko, V. L., Kotok, V. A., Burkov, A. A., Kondrat'ev, D. A. et al. (2018). Synthesis of Ni(II)-Ti(IV) Layered Double Hydroxides Using Coprecipitation At High Supersaturation Method. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13 (24), 9652–9656. Available at: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2018/jeas_1218_7500.pdf
 20. Alibakhshi, E., Ghasemi, E., Mahdavian, M., Ramezanzadeh, B. (2017). A comparative study on corrosion inhibitive effect of nitrate and phosphate intercalated Zn-Al layered double hydroxides (LDHs) nanocontainers incorporated into a hybrid silane layer and their effect on cathodic delamination of epoxy topcoat. *Corrosion Science*, 115, 159–174. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.12.001>
 21. Roslan, N. J., Mohd Shah, A. H., Dzulkifli, N. N., Saharuddin, T. S. T., Rusmin, R., Jasni, A. H. et al. (2025). Interlayer Expansion and Morphological Transformation of Zinc-Aluminium Anionic Clay through Methyl Orange Intercalation. *Malaysian Journal of Chemistry*, 27 (3), 254–260. <https://doi.org/10.55373/mjchem.v27i3.254>
 22. Kovalenko, V., Kotok, V. (2020). Tartrazine-intercalated Zn-Al layered double hydroxide as a pigment for gel nail polish: synthesis and characterisation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (105)), 29–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205607>
 23. Vazquez, R. N. M., Nuñez, C. P., Kovalenko, V., Kotok, V., Moisés, F. P. P., Lamas, A. M. M., Arizaga, G. G. C. (2023). Electron Transfer within an Antioxidant Powder Composite with Layered Double Hydroxide Nanoparticles and Tomato Extract. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13 (3), 257. <https://doi.org/10.33263/briac133.257>
 24. Andrade, K. N., Pérez, A. M. P., Arizaga, G. G. C. (2019). Passive and active targeting strategies in hybrid layered double hydroxides nanoparticles for tumor bioimaging and therapy. *Applied Clay Science*, 181, 105214. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105214>
 25. Gao, S.-P., Lu, T.-H., Li, S.-P., Zhong, H. (2009). The mechanism on the pH value influencing the property of glutamic acid/layered double hydroxide compounds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 351 (1-3), 26–29. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.09.021>
 26. Bukhtiyarova, M. V. (2019). A review on effect of synthesis conditions on the formation of layered double hydroxides. *Journal of Solid State Chemistry*, 269, 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.10.018>
 27. Seron, A., Delorme, F. (2008). Synthesis of layered double hydroxides (LDHs) with varying pH: A valuable contribution to the study of Mg/Al LDH formation mechanism. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69 (5-6), 1088–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2007.10.054>
 28. Grégoire, B., Ruby, C., Carteret, C. (2013). Hydrolysis of mixed Ni²⁺-Fe³⁺ and Mg²⁺-Fe³⁺ solutions and mechanism of formation of layered double hydroxides. *Dalton Transactions*, 42(44), 15687. <https://doi.org/10.1039/c3dt51521d>
 29. Xu, Z. P., Braterman, P. S. (2014). Layered Double Hydroxides: Self-Assembly and Multiple Phases. *Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, Third Edition, 2056–2066. <https://doi.org/10.1081/e-enn3-120013852>
 30. Boclair, J. W., Braterman, P. S. (1999). Layered Double Hydroxide Stability. 1. Relative Stabilities of Layered Double Hydroxides and Their Simple Counterparts. *Chemistry of Materials*, 11 (2), 298–302. <https://doi.org/10.1021/cm980523u>
 31. Kovalenko, V., Kotok, V. (2019). “Smart” anticorrosion pigment based on layered double hydroxide: construction and characterization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (100)), 23–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176690>
 32. Kovalenko, V., Andreiev, D., Kotok, V., Baskevich, A., Medianyuk, V., Sukhomlyn, D., Verbitskiy, V. (2026). Determination of the possibility of obtaining ballastless Ni(II)-Ni(III) layered double hydroxides as promising active substances for supercapacitors and electrocatalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (139)), 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352268>
 33. Kovalenko, V., Kotok, V., Girenko, D., Nikolenko, M., Andreiev, D., Verbitskiy, V. et al. (2023). Investigation of the mechanism of nickel hydroxide formation from nickel nitrate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (121)), 58–65. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272673>
 34. Johari, N. A., Mahathir, N. F. A., Shah, N. A., Dzulkifli, N. N., Fatimah, I., Adam, N. et al. (2023). Zinc Layered Hydroxide 2-methyl-4-chlorophenoxyacetate: Synthesis via ZnO, Characterization and Effect on Seed Germination. *Trends in Sciences*, 20 (12), 6943. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.6943>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359439

IDENTIFYING THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF AN AMMONIA SYNTHESIS COLUMN, TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN THE OPERATING PARAMETERS OF THE PROCESS PLANT (p. 72–80)

Petro Yeliseyev

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9187-9094>

Maryna Loriai

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5589-8351>

Olexii Tselishchev

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4154-7734>

Liudmyla Karpiuk

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8447-0103>

Oleksandr Duryshch

Ravita Ukraine LLC, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4472-2697>

Yevgen Kobzarev

Investment-Construction Company Allians-Group Limited Liability Company, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8811-7488>

This study explores the technological process of ammonia synthesis in a synthesis column as a complex multi-tonnage chemical and technological facility with a transport delay and variable state parameters. The task addressed relates to the lack of quantitative assessment of the impact of catalyst degradation on the dynamic characteristics of the facility, in particular on the transport delay and the stability

margin, which complicates the determination of the limits of effective equipment operation and timely adoption of technological decisions.

As a result of analysis, it was established that a decrease in the synthesis gas flow rate by 10% leads to an increase in the transport delay time from 61 s to 67 s and a decrease in the stability margin in terms of modulus from 15.7 dB to 15.0 dB. It is shown that restoring the stability margin to the base level is possible by reducing the gain factor by 8%, which, in turn, is accompanied by an increase in the steady-state error to 8.39%, that is, a deterioration in the control accuracy and deviation of technological parameters from the set values.

The results are based on the use of the stability margin in terms of the modulus as an integral indicator sensitive to changes in the parameters of the object's state, which makes it possible to quantitatively link the degradation of the catalyst with the dynamic characteristics of the control system. The established patterns are explained by the fact that an increase in the transport delay causes an additional phase shift in the system and reduces the stability margin, while a decrease in the gain factor increases stability, but leads to an increase in the steady-state error, forming a compromise between stability and accuracy.

The practical value of the results is the possibility of their use for assessing the technical condition of the ammonia synthesis column, determining the limit modes of its operation, and substantiating the time of catalyst replacement. The application of the findings is appropriate under conditions of quasi-stationarity of the process, limited disturbances, and the use of linearized mathematical models of the object.

Keywords: combined mathematical model, ammonia synthesis column, transport delay, stability margin, catalyst degradation, steady-state error.

References

1. Ellis, M., Durand, H., Christofides, P. D. (2014). A tutorial review of economic model predictive control methods. *Journal of Process Control*, 24 (8), 1156–1178. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.03.010>
2. Rosbo, J. W., Ritschel, T. K. S., Hørsholt, S., Huusom, J. K., Jørgensen, J. B. (2023). Flexible operation, optimisation and stabilising control of a quench cooled ammonia reactor for power-to-ammonia. *Computers & Chemical Engineering*, 176, 108316. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108316>
3. Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., Abel, D. (2021). Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117 (5-6), 1327–1349. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07682-3>
4. Qin, S. J. (2012). Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 36 (2), 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.004>
5. Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. A. G., Styring, P. (2021). Sustainable Ammonia Production Processes. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>
6. Wu, H., Zhao, J. (2020). Self-adaptive deep learning for multi-mode process monitoring. *Computers & Chemical Engineering*, 141, 107024. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107024>
7. Giraldo, S. A. C., Melo, P. A., Secchi, A. R. (2024). Enhanced control in time-delay processes: Diagnostic, monitoring, and self-tuning strategies for the filtered smith predictor in response to model-plant mismatch and abrupt load disturbances. *Control Engineering Practice*, 145, 105869. <https://doi.org/10.1016/j.coneng-prac.2024.105869>
8. Eliseyev, P., Loria, M., Tselishchev, O., Gurin, O., Kupina, O., Sotnikova, T. (2023). Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 94–104. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.003110>
9. Loria, M. G., Tselishchev, O. B., Yeliseyev, P. Y., Porkuian, O. V., Gurin, O. M., Loria, M. et al. (2022). Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (6 (120)), 20–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
10. Mayne, D. Q. (2014). Model predictive control: Recent developments and future promise. *Automatica*, 50 (12), 2967–2986. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.10.128>

Анотації

TECHNOLOGY ORGANIC AND INORGANIC SUBSTANCES

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358315

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ СТВОРЕННІ ФОРМУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ БЕЗВОДНИХ КОСМЕТИЧНИХ ЗАСОБІВ (с. 6–16)

Т. В. Іванішена, З. С. Черешня, А. П. Магдійчук

Об'єктом дослідження є формуляційні системи безводних косметичних засобів, а саме тверді шампуні. Вони мають прогнозовані показники якості та високий рівень ресурсоефективності.

Основною проблемою створення таких систем є висока складність оптимізації, що обумовлена технологічними суперечностями між функціональною дією продукту, його фізико-хімічною стабільністю, показниками екологічної безпеки та складом. У роботі визначенні особливості проведення методу багатокритеріальної оптимізації на основі функції бажаності Харрінгтона для таких систем. Він передбачає нормалізацію експериментальних показників та їх агрегування в інтегральний показник якості D. За інтегральним показником якості встановлено, що рецептурний склад зразку S2e найбільш збалансованим за всіма критеріям. Отримані результати пояснюються синергетичними взаємодіями компонентів складу та виникненням нелінійної залежності між складом і властивостями. Доведено, що такі взаємодії вдало описуються функцією бажаності. Показано, що відхилення хоча б одного критерію за межі прийнятності призводить до різкого зниження інтегральної оцінки. Використання багатокритеріальної оптимізації на основі функції бажаності Харрінгтона мінімізує суб'єктивність та надає можливість порівнювати альтернативні склади формуляційних технологічних систем. Багатокритеріальна оптимізація за допомогою функції бажаності Харрінгтона може бути використана на етапі лабораторного проектування екоорієнтованих формуляційних систем за умови дотримання технологічних режимів та використання ідентичної сировинної бази.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, формуляційні технологічні системи, функція бажаності Харрінгтона, екоорієнтоване проектування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354824

АДСОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ СОНЯШНИКОВОЇ ОЛІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ КИСЛОТНО-АКТИВОВАНОГО МОНТМОРИЛОНІТУ ТА ОЦІНКА ЯКОСТІ (с. 17–26)

Л. В. Фіалковська, В. М. Бандура, М. Є. Сердюк, М. М. Гудзенко, А. В. Антоненко, В. С. Михайлик, О. В. Василюшина

Об'єктом дослідження є адсорбційне очищення соняшникової олії із використанням кислотно-активованого монтморилоніту Черкаського родовища. Предметом дослідження є зміна якісних показників соняшникової олії внаслідок адсорбційної обробки природними дисперсними мінералами. У роботі розглянуто комплексне вирішення науково-прикладної проблеми обґрунтування та розробки ефективної технології очищення рослинних олій із одночасним видаленням характерних домішок, продуктів первинного та вторинного окислення, а також слідових кількостей катіонів важких металів. Для оцінки ефективності процесу використано комплекс фізико-хімічних методів аналізу, включаючи визначення кислотного, колірнього та пероксидного чисел, масової частки фосфоровмісних речовин, вологи й летких речовин, а також хромато-мас-спектрометричний аналіз якісного складу олії. За результатами експериментально-промислових досліджень було підтверджено ефективність застосування активованого монтморилоніту для очищення олії. Адсорбент вносився у кількості 1% до маси продукту за температури 90–110°C з тривалістю контакту 20–30 хв. За таких умов пероксидне число зменшувалося до 3,0–3,9 ммоль O₂/кг. Колірне число знижувалося до 6–9 мг І2. Масова частка фосфоровмісних речовин становила 0,01–0,05%.

Показано, що адсорбційне очищення не впливає на базовий тригліцеридний склад олії, але сприяє видаленню окиснених сполук, які погіршують її споживчі властивості та окиснювальну стабільність. Запропонована технологія адсорбційного очищення може бути реалізована у промислових умовах без суттєвих змін існуючих схем виробництва та є економічно доцільною альтернативою імпортним відбілювальним глинам.

Ключові слова: соняшникова олія, адсорбційне очищення, відбілювання, пероксидне число, колірне число, хром-мас-спектроскопія.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358837

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ДОБАВОК СОЄВОГО МЕТИЛОВОГО ЕФІРУ ДО ТОВАРНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ НА ТЕРМІНИ ЗАМІНИ ОЛИВИ В ДИЗЕЛЬНОМУ ДВИГУНІ 1,5 RENAULT МОДЕЛІ К9К (с. 27–35)

В. М. Мельник, М. М. Гнип, І. Я. Захара, І. М. Микитій

Об'єктом дослідження були в'язкісно-температурні показники моторної оливи *Castrol GTX RN-Spec 5W-30* та показники стійкості до окислення. В роботі вирішується проблема впливу додавання до дизельних палив *SME* на терміни заміни оливи в двигуні.

Результати досліджень показали, що максимальний термін експлуатації оливи *Castrol GTX RN-Spec 5W-30* в заданих умовах становить 12 тис. км за умови роботи на товарному дизельному паливі. У разі використання сумішей дизельного палива та 10, 20 і 50%

об. *SME* граничний термін експлуатації автомобілів до заміни оливи за в'язкісно-температурними показниками знижується від 9 до 6 тис. км відповідно.

Показник загального лужного числа (TBN) усіх дослідних зразків моторних оливок набуває критичного значення за пробігу 9 тис. км. Загалом, використання паливних сумішей з біодизельним паливом на основі соєвого метилового ефіру в кількості до 50% об. не вимагає суттєвого скорочення терміну заміни оливи за показником TBN.

Погіршення в'язкісно-температурних показників моторної оливи Castrol GTX RN-Spec 5W-30 пояснюється тим, що біодизельне паливо на основі соєвого метилового ефіру має нижчу теплоту згорання. Тоді паливні суміші не встигають повністю згоряти в циліндрах двигуна і змиваючись з оливою у піддон частково розріджують її.

Накопичення біодизельного палива в моторній оливі також сприяє зниженню лужного числа моторної оливи марки Castrol GTX RN-Spec 5W-30 та пришвидшує процес її окислення.

Результати дозволили перейти від загальних припущень до конкретних регламентів – скорочення інтервалів заміни оливи на 20–50% або впровадження спеціалізованих моторних оливок.

Отримані в роботі результати можуть бути використані в сфері автосервісу для корегування граничних термінів пробігу до заміни оливи при експлуатації автомобілів на біодизельному паливі.

Ключові слова: альтернативні палива, біодизельне паливо, терміни заміни, ресурс роботи.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352281

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ СИНТЕЗ-ГАЗУ ПРИ ВИСХІДНІЙ ГАЗИФІКАЦІЇ КУКУРУДЗЯНИХ КАЧАНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КАТАЛІЗАТОРА НА ОСНОВІ СаО/АКТИВОВАНОГО ВУГІЛЛЯ НА ПАЛЬМОВОМУ ВОЛОКНІ (с. 36–50)

Purbo Suwandono, Widya Wijayanti, Nova Risdiyanto Ismail, Dzulfikar Johan Akbar, Muhammad Reza

Об'єктом дослідження є процес газифікації біомаси кукурудзяних качанів у фіксованому шарі з висхідним потоком за допомогою подвійної каталітичної системи, що складається з оксиду кальцію (СаО) та активованого вугілля, отриманого з пальмового волокна (АС-РF). У цьому дослідженні розглядаються питання низької теплоти згорання синтез-газу з кукурудзяних качанів та високої вартості каталізаторів для його очищення. У цьому дослідженні використовується характеристика подвійної каталітичної системи разом із коефіцієнтом еквівалентності (0,2; 0,25; 0,3 та 0,35), завантаженням каталізатора (4%; 6%; 8% та 10%) і, нарешті, масовим співвідношенням СаО/АС-РF (0:1; 1:0; 1:1, 2:1), крім того, отримані кінцеві продукти були додатково проаналізовані для подвійних каталітичних систем за допомогою скануючого електронного мікроскопа, інфрачервоної спектроскопії з Фур'є-перетворенням та методу Брунауера-Еммета-Теллера. Ці результати вказують на те, що зі збільшенням коефіцієнта еквівалентності (ER) частки Н₂ та СН₄ зростають, тоді як СО₂ зменшується, а нижча теплота згорання синтез-газу збільшується, однак СО досягає оптимуму при ER = 0,3. Більше навантаження каталізатора, як правило, зменшує Н₂ та СН₄, але збільшує СО, що потенційно знижує теплоту згорання при високих навантаженнях. Характеристика каталізатора показує, що АС-РF має пористу структуру та більший контакт газу з твердим тілом з посиленнями вторинними реакціями, тоді як додавання СаО створює композит з поверхневими видами, пов'язаними з сорбцією СО₂. Низька теплотворна здатність синтез-газу зростає при високому коефіцієнті виходу (ER), тоді як при збільшенні завантаження каталізатора вона знижується через мінімальний внесок СН₄. Отримані нами результати демонструють функціональний синергетичний механізм між пористим АС-РF та сорбцією СО₂ на основі СаО, що дозволяє одночасно здійснювати каталітичне збагачення та уловлювання СО₂ в одній недорогій системі з подвійним каталізатором. Такі емпіричні спостереження стануть належним підґрунтям для майбутніх потенційних проектів та експлуатації маломасштабних установок газифікації біомаси, зокрема реакторів з висхідним потоком, для переробки відходів кукурудзяних качанів при КК та завантаженні каталізатора, досліджених у цьому дослідженні.

Ключові слова: газифікація, висхідний потік, кукурудзяні качани, синтез-газ, СаО, активоване вугілля.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357229

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХНІ КАРТОНУ РОЗЧИНОМ ГІДРОКСИХЛОРИДУ АЛЮМІНІЮ НА ПОКАЗНИКИ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ТА ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ (с. 51–61)

Т. А. Роїк, Є. С. Бичкар, В. Г. Олійник

Об'єктом дослідження є процес поверхневої модифікації картону водним розчином Al₂(OH)_nCl_{6-n} та її вплив на показники крайового кута змочування та заряду поверхні розчинених речовин картону для виготовлення паковань та одноразового посуду.

Вирішувалась проблема відсутності технологічного підходу модифікації поверхні картону, який дозволить одночасно забезпечити високу адгезію між картоном і полімером шляхом керованої зміни змочуваності та поверхневої енергії без втрати його бар'єрних властивостей. Варіантом вирішення є удосконалення технології модифікації картону для виробництва одноразового посуду водним розчином Al₂(OH)_nCl_{6-n}.

Експериментальні дослідження полягали у виготовленні серій зразків картону з різним складом, визначенні крайового кута змочування методом лежачої краплі та заряду поверхні розчинених речовин. Встановлено вплив поверхневої обробки на показники крайового кута змочування, заряду поверхні розчинених речовин картону для виготовлення паковань та одноразового посуду. Встановлено, що крайовий кут змочування зменшується до 82,8–84,7° порівняно з 91,8–93,4° для немодифікованих зразків (без нанесеного полімеру) та 116,1–116,6° проти 112,1–115,9° відповідно для зразків із полімерним покриттям. При цьому заряд поверхні розчинених речовин зростає з –18,3–25,9 до –51,3–54,1 мкг-екв./л, тобто у 2–3 рази.

Отримані результати свідчать, що оброблені зразки картону мають кращу змочуваність. Така властивість сприятиме кращому контакту між поверхнею картону та розплавом полімеру при його нанесенні та подальшому склеюванні конструктивних елементів виробу.

Запропонований підхід модифікації картонного полотна є перспективним для подальшого впровадження у виробничі процеси, зокрема у виробництво пакувальних матеріалів та одноразового посуду. Це дасть можливість впливати на бар'єрні властивості готового картонного виробу, дозволить підвищити функціональні властивості пакувань та одноразового посуду з модифікованого картону.

Ключові слова: ламінований картон, модифікація сировини, крайовий кут змочування, катіонний заряд.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.358469

ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ ЦИНКОВИХ ТА НІКЕЛЕВИХ ПОДВІЙНО-ШАРУВАТИХ ГІДРОКСИДІВ (с. 62–71)

В. Л. Коваленко, А. Ю. Борисенко, Д. А. Андреев, А. Ю. Допіра, О. О. Демченко, В. А. Коток, В. Ю. Медяник, Д. А. Сухомлин, Г. В. Шуклін, В. В. Вербицький

Об'єкт дослідження – механізм формування Zn-Al-нітратних, Zn-Al-триполіфосфатних, Ni-Al-карбонатних і Ni(II)-Ni(III)-карбонатних подвійно-шаруватих гідроксидів (ПШГ). Для розрахунку складу осаду на стадії формування ПШГ висунуто гіпотези:

1) гіпотеза основної солі (ГОС): всі катіони повністю переходять до осаду, надалі ОН-іони замінюють аніони;

2) гіпотеза змінного катіонного складу (ГЗКС): осад формується насиченим катіоном-«гостю», надалі кількість катіону-«господаря» збільшується.

Для визначення механізму формування ПШГ використовувалось потенціометричне титрування із скляним електродом.

Для Zn-Al-NO₃ ПШГ виявлено двохступеневий механізм формування. 1^ш – утворення гідроксид алюмінію (рН = 6,47) через формування гідроксосоли Al(OH)_{0,667}(NO₃)_{2,333} (рН = 4,98). 2^ш – формування ПШГ через проміжні стадії: при рН = 7,36 склад Zn_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{1,20}(NO₃)_{1,00} (ГОС) або Zn_{0,667}Al_{0,333}(OH)₂(NO₃)_{1,667} (ГЗКС), при рН = 9,35 склад Zn_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{1,93}(NO₃)_{0,27} (ГОС) або Zn_{0,793}Al_{0,207}(OH)₂(NO₃)_{0,204} (ГЗКС). Для Zn-Al-P₃O₁₀ ПШГ характерний двохступеневий механізм. 1^ш – при рН = 6,25 формується гідроксиль Al(OH)_{2,66}(P₃O₁₀)_{0,067}, 2^ш – при рН = 9,25 утворюється ПШГ складу Zn_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{2,00}(P₃O₁₀)_{0,040}. Для Zn-Al ПШГ рекомендований рН 7–10.

Виявлено, що при формуванні Ni-Al-CO₃ ПШГ ступінь утворення гідроксосолюк Al відсутня через повний необоротний гідроліз Al³⁺ в присутності CO₃²⁻. При рН = 6,5 формується осад Ni_{0,8}Al_{0,2}(OH)_{1,066}(CO₃)_{0,567} (ГОС) або Ni_{0,624}Al_{0,376}(OH)₂(CO₃)_{0,376} (ГЗКС), який при подальшому підлугуванні трансформується в ПШГ. Синтез Ni-Al-CO₃ ПШГ необхідно вести при рН = 8–11. Визначено одноступеневий механізм формування Ni(II)-Ni(III)-CO₃ СДГ, рекомендовано для синтезу рН = 10–11.

Порівняльний аналіз виявив, кращою для опису зміни складу осаду при формуванні ПШГ є ГЗКС.

Ключові слова: потенціометричне титрування, механізм формування, Zn-Al ПШГ, Ni-Al ПШГ, Ni(II)-Ni(III) ПШГ.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359439

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОЛОНИ СИНТЕЗУ АМІАКУ З УРАХУВАННЯМ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТА (с. 72–80)

П. Й. Єлісєєв, М. Г. Лорія, О. Б. Целіщев, Л. В. Карпюк, О. А. Дуришев, Є. В. Кобзарев

Об'єктом дослідження є технологічний процес синтезу аміаку в колоні синтезу як складного багатотоннажного хіміко-технологічного об'єкту із транспортним запізненням та змінними параметрами стану. Вирішувалась проблема, пов'язана з відсутністю кількісної оцінки впливу деградації каталізатора на динамічні характеристики об'єкта, зокрема на транспортне запізнення та запас стійкості, що ускладнює визначення меж ефективної експлуатації обладнання та своєчасне прийняття технологічних рішень.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що зниження витрати синтез-газу на 10% призводить до збільшення часу транспортного запізнення з 61 с до 67 с та зменшення запасу стійкості по модулю з 15,7 дБ до 15,0 дБ. Показано, що відновлення запасу стійкості до базового рівня можливе шляхом зменшення коефіцієнта підсилення на 8%, що, у свою чергу, супроводжується зростанням усталеної похибки до 8,39%, тобто погіршенням точності регулювання та відхиленням технологічних параметрів від заданих значень.

Отримані результати базуються на використанні запасу стійкості по модулю як інтегрального показника, чутливого до зміни параметрів стану об'єкта, що дозволяє кількісно пов'язати деградацію каталізатора з динамічними характеристиками системи керування. Встановлені закономірності пояснюються тим, що збільшення транспортного запізнення викликає додатковий фазовий зсув у системі та зменшує запас стійкості, тоді як зменшення коефіцієнта підсилення підвищує стійкість, але призводить до зростання усталеної похибки, формуючи компроміс між стійкістю та точністю.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості їх використання для оцінювання технічного стану колони синтезу аміаку, визначення граничних режимів її експлуатації та обґрунтування моменту заміни каталізатора. Застосування результатів є доцільним за умов квазістаціонарності процесу, обмежених збурень та використання лінеаризованих математичних моделей об'єкта.

Ключові слова: комбінована математична модель, колона синтезу аміаку, транспортне запізнення, запас стійкості, деградація каталізатора, усталена похибка.