

Wykorzystanie pyłu gumowego w zaczynach do prac geotermalnych

The use of rubber dust in cement slurries for geothermal applications

Marcin Kremieniewski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule zaprezentowano wyniki kompleksowych badań nad zastosowaniem pyłu gumowego, będącego produktem recyklingu opon, jako innowacyjnego dodatku do zaczynów cementowych wykorzystywanych w geotermii. Pył gumowy dzięki swoim unikalnym właściwościom fizykochemicznym stanowi obiecujący materiał modyfikujący, który może znacząco wpływać na jego parametry termiczne i mechaniczne, jednocześnie przyczyniając się do zrównoważonego gospodarowania odpadami przemysłowymi. Celem badań było określenie wpływu różnych stężeń pyłu gumowego (0%, 5%, 10%, 15%) na przewodność cieplną, wytrzymałość na ściskanie oraz elastyczność płaszcza cementowego. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów wykazały, że dodatek pyłu gumowego skutecznie obniża przewodność cieplną zaczynu cementowego, co przekłada się na poprawę izolacji termicznej w górnych partiach odwiertów geotermalnych. Największa redukcja przewodności cieplnej, wynosząca 33%, została odnotowana dla maksymalnego badanego stężenia pyłu gumowego (15%). Zmniejszenie przewodności cieplnej wskazuje na potencjalne zastosowanie pyłu gumowego jako skutecznego izolatora termicznego, co może mieć istotne znaczenie dla poprawy efektywności energetycznej odwiertów geotermalnych. Jednocześnie zaobserwowano umiarkowany spadek wytrzymałości na ściskanie, który nie przekraczał 16%, co nadal mieści się w zakresie dopuszczalnym dla zastosowań inżynierskich. Istotnym aspektem wyników badań jest także zwiększona elastyczność płaszcza cementowego, wynikająca z obecności pyłu gumowego w jego strukturze. Właściwość ta może znacząco poprawić odporność cementu na ekstremalne zmiany temperatury i ciśnienia, które są charakterystyczne dla środowiska geotermalnego. Elastyczniejszy cement może skuteczniej kompensować naprężenia termiczne, co zmniejsza ryzyko powstawania mikropęknięć i degradacji strukturalnej w długim okresie eksploatacji. Dodatkowym atutem zastosowania pyłu gumowego w zaczynach cementowych jest jego pozytywny wpływ na środowisko, gdyż wykorzystanie odpadu gumowego pozwala na ograniczenie ilości składowanych odpadów, zmniejszenie zapotrzebowania na surowce pierwotne oraz redukcję emisji związanych z procesem produkcji cementu. Praca obejmuje szczegółowe analizy laboratoryjne, w których określono kluczowe parametry termiczne i mechaniczne modyfikowanych zaczynów cementowych. Wyniki badań porównano z danymi literaturowymi, co pozwoliło na lepsze zrozumienie potencjalnych mechanizmów oddziaływania pyłu gumowego na strukturę cementu oraz wskazanie kierunków dalszych badań. Omówiono również praktyczne rekomendacje dotyczące zastosowania tego rozwiązania w geotermii oraz potencjalne możliwości optymalizacji składu cementów geotermalnych, m.in. poprzez połączenie pyłu gumowego z innymi dodatkami mineralnymi. Wskazano także możliwości dostosowania receptur cementowych do pracy w ekstremalnych warunkach geotermalnych, co mogłoby jeszcze bardziej zwiększyć trwałość i efektywność stosowanych materiałów.

Słowa kluczowe: pył gumowy, zaczyny cementowe, geotermia, przewodność cieplna, wytrzymałość na ściskanie, izolacja termiczna, recykling materiałów, elastyczność płaszcza cementowego.

ABSTRACT: This article presents the results of comprehensive research on the application of rubber dust, a recycled tire product, as an innovative additive to cement slurries for geothermal applications. Due to its unique physicochemical properties, rubber dust is a promising modifying material that can significantly influence the thermal and mechanical properties of cement, while contributing to sustainable waste management. The aim of the study was to determine the effect of different rubber dust concentrations (0%, 5%, 10%, 15%) on thermal conductivity, compressive strength, and the flexibility of the cement sheath. The results of the experiments showed that the addition of rubber dust effectively reduces the thermal conductivity of cement slurry, leading to improved thermal insulation in the upper sections of geothermal wells. The highest reduction in thermal conductivity, reaching 33%, was observed at the maximum applied rubber dust concentration (15%). This decrease in thermal conductivity indicates the potential use of rubber dust as an efficient thermal insulator, which can play a crucial role in enhancing the energy efficiency of geothermal wells. At the same time, a moderate decrease in compressive strength was observed, not exceeding 16%, which remains within the acceptable range for engineering applications. Another important finding is the increased flexibility of the cement sheath due to the presence of rubber dust in its structure. This property can significantly improve the material's resistance to extreme temperature and pressure variations, which are characteristic of the geothermal environment. A more flexible cement sheath can better compensate for thermal stresses, reducing the risk of microcracks and structural degradation during long-term operation. An additional advantage of using rubber dust in cement slurries is its positive environmental impact – utilizing waste rubber helps reduce landfill waste, decreases the demand for primary raw materials, and lowers emissions associated with cement production. The study includes detailed laboratory analyses in which key thermal and mechanical parameters of modified cement slurries were determined. The research findings were compared with existing literature data, providing a better understanding of the potential mechanisms through which rubber dust interacts with the cement structure and indicating directions for further studies. Practical recommendations for implementing this solution in geothermal applications are also discussed, along with perspectives on optimizing the composition of geothermal cement. This includes potential synergies between rubber dust and other mineral additives, as well as adapting cement formulations for extreme geothermal conditions, which could further enhance the durability and efficiency of the applied materials.

Key words: rubber dust, cement slurries, geothermal energy, thermal conductivity, compressive strength, thermal insulation, material recycling, cement sheath flexibility.

Literatura

- Abdelmoteleb M., Kurish M., Al-Nasrallah A., Ong L., Saitova A., Al-Saadi D., Monteiro K., Shadad N., Kamal A., Tolga M., 2025. Development and Field Application of a Flexible Cement System for High-Temperature Steam Injection Wells to Enhance Well Integrity. *SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show, Muscat, Oman*. DOI: 10.2118/225159-MS.
- Atahan H.N., Arslan K.M., 2016. Improved durability of cement mortars exposed to external sulfate attack: The role of nano & micro additives. *Sustainable Cities and Society*, 22: 40–48. DOI: 10.1016/j.scs.2016.01.008.
- Ba Saloom S., Ba Geri M., Suhail M., Ge X., 2024. Advancements in Drilling Fluid Optimization for Enhanced Geothermal Energy Extraction. *SPE Eastern Regional Meeting, Wheeling, West Virginia, USA*. DOI: 10.2118/221370-MS.
- Bergen S.L., Zemberecki L., Nair S.D., 2022. A review of conventional and alternative cementitious materials for geothermal wells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161(34): 112347. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112347.
- Dincer I., Ozturk M., 2021. Geothermal energy systems. *Elsevier*.
- Feder J., 2021. Geothermal Well Construction: A Step Change in Oil and Gas Technologies. *Journal of Petroleum Technology*, 73(01): 32–35. DOI: 10.2118/0121-0032-JPT.
- Kremieniewski M., 2019. O konieczności prowadzenia serwisowych badań parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających. *Nafta-Gaz*, 75(1): 48–55. DOI: 10.18668/NG.2019.01.07.
- Lakatos K., Kovács Z., 2021. Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods. *Energy and Buildings*, 236: 110771. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110771.
- Limbachiya M., Meddah M.S., Ouchagour Y., 2012. Performance of Portland/Silica Fume Cement Concrete Produced with Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, 109(1): 91–100. DOI: 10.14359/51683574.
- Myhre M., Saiwari S., Dierkes W., Noordermeer J., 2012. Rubber recycling: chemistry, processing, and applications. *Rubber Chemistry and Technology*, 85(3): 408–449. DOI: 10.5254/rct.12.87973.
- Nelson E.B., 2006. Well Cementing. *Elsevier*.
- Sliwa T., Ciepielowska M., 2022. Cement Slurries with Modified Thermal Conductivity for Geothermal Applications. *Proceedings of the 47th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*.
- Thomas B.S., Gupta R.Ch., 2016. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54: 1323–1333. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.092.
- Xianzhi S., Rui Z., Ruixia L., Gensheng L., Baojiang S., Yu S., Gaosheng W., Shijie Z., 2019. Study on thermal conductivity of cement with thermal conductive materials in geothermal well. *Geothermics*, 81: 1–11. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.04.001.

Akty prawne i dokumenty normatywne

API RP 10B-2, 2013. Recommended Practice for Testing Well Cements. *API Publishing*.

Nafta-Gaz 2025, nr 6, s. 381–388, DOI: 10.18668/NG.2025.06.02

Ocena skuteczności biodegradacji wspomaganej inokulacją biopreparatem z dodatkiem surfaktantu w procesie oczyszczania gleby historycznie zanieczyszczonej węglowodorami ropopochodnymi

Assessment of the effectiveness of biodegradation enhanced by inoculation with a biopreparation and surfactant addition in the remediation of historically petroleum hydrocarbon-contaminated soil

Katarzyna Wojtowicz, Teresa Steliga

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem techniki biodegradacji wspomaganej środkami powierzchniowo-czynnymi w celu oczyszczania gleb zanieczyszczonych węglowodorami ropopochodnymi. W badaniach wykorzystano glebę pobraną z terenu historycznie zanieczyszczonego ropą naftową (gleba G6), którą zaszczerpiono mieszaniną biopreparatu opracowanego na bazie autochtonicznych bakterii i grzybów z roztworem środka powierzchniowo-czynnego NanoSurf EOR. Test biodegradacji prowadzono w skali półtechnicznej metodą pryzmowania *ex situ* z comiesięcznym monitoringiem poziomu stężeń węglowodorów alifatycznych i wielopierścieniowych węglowodorów ropopochodnych oraz stopnia toksyczności gleby. W wyniku sześciomiesięcznego procesu oczyszczania uzyskano obniżenie stężenia TPH (ang. *total petroleum hydrocarbons* – całkowite węglowodory ropopochodne) z 6062,59 mg/kg s.m. gleby do 768,11 mg/kg s.m. gleby (87,34%) oraz WWA (wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne) z 12,05 mg/kg s.m. gleby do 1,60 mg/kg s.m. gleby (86,73%). Przeprowadzone analizy toksykologiczne z wykorzystaniem testów Phytotoxkit™, Ostracodtoxkit F™ oraz Microtox®SPT potwierdziły zależność pomiędzy poziomem zanieczyszczeń ropopochodnych w glebie a stopniem jej toksyczności. Ponadto, w trakcie procesu oczyszczania nie stwierdzono powstawania toksycznych produktów ubocznych, o czym świadczy sukcesywne obniżanie poziomu toksyczności badanej gleby względem organizmów testowych należących do różnych grup troficznych (bakterie, pierwotniaki, rośliny wyższe). Badania prowadzone w warunkach półtechnicznych pozwoliły na ocenę skuteczności biodegradacji wspomaganej inokulacją biopreparatem i środkiem powierzchniowo-czynnym NanoSurf EOR w rekultywacji gleby zanieczyszczanej substancjami ropopochodnymi.

Słowa kluczowe: biopreparat, biodegradacja, surfaktanty, węglowodory ropopochodne.

ABSTRACT: This article addresses the use of biodegradation technique supported by surfactants to remediate soils contaminated with petroleum hydrocarbons. The study was conducted using soil collected from an area historically polluted with crude oil (G6 soil). The soil was inoculated with a mixture comprising a biopreparation based on autochthonous bacteria and fungi, along with a solution of NanoSurf EOR surfactant. The biodegradation test was carried out on a semi-technical scale using the *ex situ* pile method, with monthly monitoring of aliphatic hydrocarbons and polycyclic petroleum hydrocarbon concentrations, as well as soil toxicity levels. Over the six-month remediation process, the TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) concentration decreased from 6062.59 mg/kg d.m. soil to 768.11 mg/kg d.m. soil (87.34%), while the PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) concentration – from 12.05 mg/kg d.m. soil to 1.60 mg/kg d.m. soil (86.73%). Toxicological analyzes conducted using Phytotoxkit™, Ostracodtoxkit™ and Microtox®STP tests confirmed a relationship between the level of petroleum contamination and soil toxicity. Furthermore, no toxic by-products were formed during the remediation process, as evidenced by the gradual reduction in soil toxicity towards test organisms from various trophic groups (bacteria, protozoa, and higher plants). The research conducted under semi-technical conditions enabled the assessment of the effectiveness of biodegradation supported by inoculation with a biopreparation and the NanoSurf EOR surfactant in remediating petroleum-contaminated soil.

Key words: biopreparation, biodegradation, surfactants, petroleum hydrocarbons.

Literatura

- Alcántara M.T., Gómez J., Pazos M., Sanromán M.A., 2009. PAHs soil decontamination in two steps: Desorption and electrochemical treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 166: 462–468. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.050.
- Bognolo G., 1999. Biosurfactants as emulsifying agents for hydrocarbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 152: 41–52. DOI: 10.1016/S0927-7757(98)00684-0.
- Chowdhury S., Rakshit A., Acharjee A., Saha B., 2021. Biodegradability and biocompatibility: Advancements in synthetic surfactants. *Journal of Molecular Liquids*, 324: 115105. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.115105.
- Danial W.H., 2023. Surfactant Biodegradation. [W:] Ali G.A.M., Makhoulf A.S.H. (eds.), *Handbook of Biodegradable Materials*. Springer International Publishing, Cham, 1621–1649. DOI: 10.1007/978-3-031-09710-2_26.
- Davin M., Starren A., Deleu M., Lognay G., Colinet G., Fauconnier M.-L., 2018. Could saponins be used to enhance bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in aged-contaminated soils? *Chemosphere*, 194: 414–421. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.11.174.
- Di Trapani D., De Marines F., Lucchina P.G., Viviani G., 2023. Surfactant-enhanced mobilization of hydrocarbons from soil: Comparison between anionic and nonionic surfactants in terms of remediation efficiency and residual phytotoxicity. *Process Safety and Environmental Protection*, 180: 1–9. DOI: 10.1016/j.psep.2023.09.071.
- Han D., Mao J., Zhao J., Zhang H., Yang X., Lin C., 2023. Effect of surfactant hydrophobic chain equivalence on the oil-water interface and emulsion stability: A dissipative particle dynamics and experimental study. *Journal of Molecular Liquids*, 382: 121781. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121781.
- Huesemann M.H., 2004. Biodegradation and Bioremediation of Petroleum Pollutants in Soil. [W:] Singh A., Ward O.P. (eds.), *Applied Bioremediation and Phytoremediation*. Springer Berlin Heidelberg, 1: 13–34.
- Karthick A., Roy B., Chattopadhyay P., 2019. A review on the application of chemical surfactant and surfactant foam for remediation of petroleum oil contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 243: 187–205. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.092.
- Kluk D., Steliga T., 2017. Efektywna metoda identyfikacji zanieczyszczeń ropopochodnych (TPH) i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w glebach. *Nafta-Gaz*, 73(7): 488–495. DOI: 10.18668/NG.2017.07.06.
- Lai C.-C., Huang Y.-C., Wei Y.-H., Chang J.-S., 2009. Biosurfactant-enhanced removal of total petroleum hydrocarbons from contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 167: 609–614. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.017.
- Leharne S., 2022. Risk assessment and remediation of NAPL contaminated soil and groundwater. *ChemTexts*, 8, 5. DOI: 10.1007/s40828-021-00156-9.
- Li P., Sun T., Stagnitti F., Zhang C., Zhang H., Xiong X., Allinson G., Ma X., Allinson M., 2002. Field-Scale Bioremediation of Soil Contaminated with Crude Oil. *Environmental Engineering Science*, 19: 277–289. DOI: 10.1089/10928750260418926.
- Liu J.-W., Wei K.-H., Xu S.-W., Cui J., Ma J., Xiao X.-L., Xi B.-D., He X.-S., 2021. Surfactant-enhanced remediation of oil-contaminated soil and groundwater: A review. *Science of the Total Environment*, 756: 144142. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144142.
- Mohanty S., Jasmine J., Mukherji S., 2013. Practical Considerations and Challenges Involved in Surfactant Enhanced Bioremediation of Oil. *BioMed Research International*, 1–16. DOI: 10.1155/2013/328608.
- Mulligan C.N., Yong R.N., Gibbs B.F., 2001. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. *Engineering Geology*, 60: 371–380. DOI: 10.1016/S0013-7952(00)00117-4.
- Nikolova C., Gutierrez T., 2021. Biosurfactants and Their Applications in the Oil and Gas Industry: Current State of Knowledge and Future Perspectives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9: 626639. DOI: 10.3389/fbioe.2021.626639.
- Pei G., Zhu Y., Cai X., Shi W., Li H., 2017. Surfactant flushing remediation of o-dichlorobenzene and p-dichlorobenzene contaminated soil. *Chemosphere*, 185: 1112–1121. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.098.
- Scott M.J., Jones M.N., 2000. The biodegradation of surfactants in the environment. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*, 1508: 235–251. DOI: 10.1016/S0304-4157(00)00013-7.
- Song B., Zeng G., Gong J., Liang J., Xu P., Liu Z., Zhang Y., Zhang C., Cheng M., Liu Y., Ye S., Yi H., Ren X., 2017. Evaluation methods for assessing effectiveness of *in situ* remediation of soil and sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals. *Environment International*, 105: 43–55. DOI: 10.1016/j.envint.2017.05.001.
- St. Germain R., 2024. High-Resolution Delineation of Petroleum NAPLs. [W:] García-Rincón J., Gatsios E., Lenhard R.J., Atekwana E.A., Naidu R. (eds.), *Advances in the Characterisation and Remediation of Sites Contaminated with Petroleum Hydrocarbons*. Springer International Publishing, Cham, 213–286. DOI: 10.1007/978-3-031-34447-3_8.
- Steliga T., Wojtowicz K., Kapusta P., Brzeszcz J., 2020. Assessment of Biodegradation Efficiency of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Petroleum Hydrocarbons (TPH) in Soil Using Three Individual Bacterial Strains and Their Mixed Culture. *Molecules*, 25: 709. DOI: 10.3390/molecules25030709.
- Venkatraman G., Giribabu N., Mohan P.S., Muttiah B., Govindarajan V.K., Alagiri M., Abdul Rahman P.S., Karsani S.A., 2024. Environmental impact and human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons and remedial strategies: A detailed review. *Chemosphere*, 351: 141227. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141227.
- Venosa A.D., Zhu X., 2003. Biodegradation of Crude Oil Contaminating Marine Shorelines and Freshwater Wetlands. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8: 163–178. DOI: 10.1016/S1353-2561(03)00019-7.

- Wojtowicz K., Jakubowicz P., 2024. Badania fitoremediacji gleby zanieczyszczonej węglowodorami ropopochodnymi z zastosowaniem *Glechoma hederacea*. *Nafta-Gaz*, 80(6): 352–360. DOI: 10.18668/NG.2024.06.04.
- Wojtowicz K., Steliga T., 2024. Wpływ mieszaniny biosurfaktantów na efektywność bioremediacji gruntu zanieczyszczonego węglowodorami ropopochodnymi. *Nafta-Gaz*, 80(5): 269–278. DOI: 10.18668/NG.2024.05.02.
- Wojtowicz K., Steliga T., Kapusta P., 2023. Evaluation of the Effectiveness of Bioaugmentation-Assisted Phytoremediation of Soils Contaminated with Petroleum Hydrocarbons Using *Echinacea purpurea*. *Applied Sciences*, 13: 13077. DOI: 10.3390/app132413077.
- Wu L., Zhang J., Chen F., Li J., Wang W., Li S., Hu L., 2024. Mechanisms, Applications, and Risk Analysis of Surfactant-Enhanced Remediation of Hydrophobic Organic Contaminated Soil. *Water*, 16: 2093. DOI: 10.3390/w16152093.

Nafta-Gaz 2025, no. 6, pp. 389–396, DOI: 10.18668/NG.2025.06.03

Waste tire-based pyrolysis for synthetic fuel and study of its properties

Piroliza zużytych opon na potrzeby produkcji paliwa syntetycznego wraz z badaniem jego właściwości

Abdugaffor M. Khurmamatov¹, Kumush Sh. Akhmedova², Giyosiddin O. Sidikov^{3,4}, Abror A. Xudoyberganov⁵

¹ *Almalyk Branch of the Tashkent State Technical University named I. Karimov, Uzbekistan*

² *Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences, Uzbekistan*

³ *LLC SANEG (Industrial and Energy Group), Uzbekistan*

⁴ *Namangan State Technical University, Uzbekistan*

⁵ *JSC “Uzbekneftegaz”, Uzbekistan*

ABSTRACT: Thermal pyrolysis of waste tires is an economically viable industrial method for material recovery and energy production. This article presents the results of research on the processing of used car tires by the pyrolysis method in a nitrogen-free environment under atmospheric pressure. Tires sourced from a local vulcanization center were used as raw material. The pyrolysis process was conducted using an experimental setup consisting of a pyrolysis reactor, a collector for gases and liquids, and a condenser. For the experiment, 4180 g of tire fragments were used. The process was carried out at a temperature of 500°C and atmospheric pressure for one hour. As a result, 1800 ml of pyrolysis oil, 1320 g of carbon black, 600 g of metallic cord, and 630 g of pyrolysis gas were obtained. The physical properties of the pyrolysis oil were studied: the density was 0.906 kg/m³, the kinematic viscosity was 0.75 mm²/s, and the acidity was 104.4 mg/dm³. Infrared spectroscopy analysis of the oil revealed the presence of aromatic, alkene, and alkyne groups. Liquid fuel was obtained from the pyrolysis oil using a distillation unit. From 150 ml of pyrolysis oil, 60 ml of liquid fuel was produced. Elemental analysis indicated that the pyrolysis oil contained nitrogen (2.57%) and sulfur (1.27%).

Key words: waste tire, pyrolysis, pyrolysis oil, carbon black, metal cord, IR spectra, elemental analysis.

STRESZCZENIE: Piroliza termiczna zużytych opon stanowi ekonomicznie opłacalną metodę przemysłową odzysku surowców i produkcji energii. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad przetwarzaniem zużytych opon samochodowych metodą pirolizy w środowisku pozbawionym azotu pod ciśnieniem atmosferycznym. Jako surowiec wykorzystano opony pozyskane z lokalnego zakładu wulkanizacyjnego. Proces pirolizy przeprowadzono z wykorzystaniem stanowiska eksperymentalnego składającego się z reaktora pirolitycznego, zbiornika na gazy i ciecze oraz skraplacza. Do eksperymentu użyto 4180 g fragmentów opon. Proces prowadzono w temperaturze 500°C i przy ciśnieniu atmosferycznym przez jedną godzinę. W wyniku pirolizy uzyskano: 1800 ml oleju pirolitycznego, 1320 g sadzy technicznej, 600 g metalowego wzmocnienia kordowego oraz 630 g gazu pirolitycznego. Przeprowadzono badanie właściwości fizycznych oleju pirolitycznego: gęstość wyniosła 0,906 kg/m³, lepkość kinematyczna – 0,75 mm²/s, a kwasowość – 104,4 mg/dm³. Analiza oleju wykonana metodą spektroskopii w podczerwieni wykazała obecność grup aromatycznych, alkenowych i alkinowych w jego strukturze. W wyniku destylacji oleju pirolitycznego uzyskano paliwo ciekłe. Z 150 ml oleju otrzymano 60 ml paliwa. Analiza elementarna wykazała, że olej pirolityczny zawierał azot (2,57%) oraz siarkę (1,27%).

Słowa kluczowe: zużyte opony, piroliza, olej pirolityczny, sadza techniczna, kord metalowy, widma IR, analiza elementarna.

References

- Achillas D.S., Roupakias C., Megalokonomos P., Lappas A.A., Antonatou E.V., 2007. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polyethylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, 149(3): 536–542. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.06.076.
- Akhmedova K.Sh., Khurmamatov A.M., Khudoyberganov A., 2024a. Innovative approaches to hydrotreating for improving fuel purification efficiency. *Journal of Experimental Studies*, 2(5): 50–57.
- Akhmedova K.Sh., Khurmamatov A.M., Sidikov G.O., 2024b. Results of obtaining pyrolysis distillate – synthetic fuel from worn tires. *Universum: Tekhnicheskije Nauki*, 123(6): 30–35. DOI: 10.32743/UniTech.2024.123.6.17737.
- Akiba M., Hashim A.S., 1997. Vulcanization and crosslinking in elastomers. *Progress in Polymer Science*, 22(3): 475–521. DOI: 10.1016/S0079-6700(96)00015-9.
- Azikhonov S.S., Petrov I.Ya., Ushakov K.Yu., Gorina V.Z., Bogomolov A.R., 2022. Pyrolysis of Crumb Tire Rubber Obtained from Waste Largesized Tires of Trucks. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 95: 872–886. DOI: 10.1134/S107042722206012X.
- Babayemi J.O., Dauda K.T., 2009. Evaluation of solid waste generation, categories, and disposal options in developing countries: a case study of Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 13(3): 83–88. DOI: 10.4314/jasem.v13i3.55370.

- Bridgwater A.V., 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy*, 38: 68–94. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.
- dos Santos R.G., Rocha C.L., Felipe F.L., Cezario F.T., Correia P.J., Gomari S.R., 2020. Tire waste management: an overview from chemical compounding to the pyrolysis-derived fuels. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22: 628–641. DOI: 10.1007/s10163-020-00986-8.
- Ibrahim H., Marini S., Desidery L., Lanotte M.A., 2023. Recycled plastics and rubber for green roads: The case study of devulcanized tire rubber and waste plastics compounds to enhance bitumen performance. *Resources Conservation & Recycling Advances*, 18: 200157. DOI: 10.1016/j.rcradv.2023.200157.
- Jerzak W., Wądrzyk M., Sieradzka M., Magdziarz A., 2024. Experimental investigations using pyrolysis–gas chromatography–mass spectrometry and drop-tube–fixed-bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 313: 118642. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118642.
- Khurmamatov A.M., Akhmedova K.Sh., 2025. Development of hydrotreatment technology to reduce the amount of sulfur and nitrogen in pyrolysis distillate using the TG-550 catalyst. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(5): 101690. DOI: 10.1016/j.jics.2025.101690.
- Khurmamatov A.M., Yusupova N.K., Alimov N.P., Berdimbetov S.B., Khametov Z.M., 2024a. Method for Increasing the Volume of Hydrocarbon Raw Materials through Waste Processing. *Doklady Chemistry*, 515(1–2): 63–69. DOI: 10.1134/S0012500824600627.
- Khurmamatov A.M., Yusupova N.K., Auesbaev A.U., 2024b. Possibilities for producing secondary materials from hydrocarbon waste. *Nafta-Gaz*, 80(11): 225–231. DOI: 10.18668/NG.2024.11.07.
- Khurmamatov A.M., Yusupova N.K., Mallabayev O.T., Mirhamitova D.X., 2021. Physicochemical Properties of Light Ractions Which Released During the Distillation of Diluted Oil Sludge. *Natural Volatiles & Essential Oils*, 8(5): 10688–10693.
- Kovalev A.V., Mogil'ner A.S., Kalatskiy N.I., 2003. Sposob pererabotki iznoshennykh shin i ustroystvo yego dlya realizatsii. Patent RU 2251 483.
- Kumar S., Singh R.K., 2011. Recovery of hydrocarbon liquid from waste high-density polyethylene by thermal pyrolysis. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(4): 659–667. DOI: 10.1590/S0104-66322011000400011.
- Lindenmuth B.E., 2006. An overview of tire technology. Chapter 1. [In:] The pneumatic tire. *US Department of Transportation*, 13136.
- Lv W., Guo B., Wen Y., Hu H., Jin J., 2025. Fast co-pyrolysis of Naomaohu coal with waste tire under negative pressure. *Fuel*, 379: 132988. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132988.
- Ourak M., Gallego M.M., Burnens G., Largeau J.F., Kordoghli S., Zagrouba F., Tazerout M., 2021. Experimental Study of Pyrolytic Oils from Used Tires: Impact of Secondary Reactions on Liquid Composition. *Waste and Biomass Valorization*, 12(8): 4663–4678. DOI: 10.1007/s12649-020-01313-w.
- Pavia D.L., Lampman G.M., Kriz G.S., Vyvyan J.R., 2015. Introduction to Spectroscopy. Fifth Edition. *Cengage Learning*.
- Quek A., Balasubramanian R., 2013. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals – a review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101: 1–16. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.02.016.
- Rogachuk B.E., Okolie J.A., 2023. Waste tires based biorefinery for biofuels and value-added materials production. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14: 100476. DOI: 10.1016/j.cej.2023.100476.
- Rogachuk B.E., Okolie J.A., 2024. Comparative assessment of pyrolysis and gasification-Fischer Tropsch for sustainable aviation fuel production from waste tires. *Energy Conversion and Management Journal*, 302: 118110. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118110.
- Sathish S., Nirmala R., Yong-Ho Ra, Navamathavan R., 2023. Factors influencing the pyrolysis products of waste tires and its practical applications: a mini topical review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(4): 3117–3131. DOI: 10.1007/s10163-023-01758-w.
- Sharuddin S.D.A., Abnisa F., Daud W.M.A.W., Aroua M.K., 2018. Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 334(1): 012001. DOI: 10.1088/1757-899X/334/1/012001.
- Syamsiro M., Saptoadi H., Norsujianto T., Cheng S., Alimuddin Z., Yoshikawa K., 2014. Fuel oil production from Municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors. *Energy Procedia*, 47: 180–188. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.01.212.
- Tsipa P.C., Phiri M.M., Iwarere S.A., Mkhize N.M., Phiri M.J., Hlangothi Sh.P., 2024. A novel chemical pre-pyrolysis treatment of waste tyre crumbs: A viable way for low temperature waste tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 181: 106631. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106631.
- Williams P.T., Besler S., Taylor D.T., Bottrill R.P., 1995. Pyrolysis of automotive tyre waste. *Journal of The Institute Energy*, 68: 11–21. DOI: 10.1016/0140-6701(95)80589-3.
- Zhang M., Li J., Yin H., Wang X., Qin Y., Yang Z., Wen Y., Luo J., Yin D., Ge Y., Wang Ch., Sun X., Xu L., 2024. Pilot analysis of tire tread characteristics and associated tire-wear particles in vehicles produced across distinct time periods. *Science of The Total Environment*, 932: 172760. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172760.

Legislative acts and normative documents

GOST 2177-99. Nefteprodukty. Metody opredeleniya fraktsionnogo sostava. Mezhhgosudarstvennyy standart. Standartinform.

Nafta-Gaz 2025, no. 6, pp. 397–407, DOI: 10.18668/NG.2025.06.04

Results of experimental studies on the properties of peanut shell-based biosorbent for wastewater treatment in oil and gas refining plant

Wyniki badań eksperymentalnych nad właściwościami biosorbentu na bazie łupin orzechów arachidowych do oczyszczania ścieków w zakładzie rafinacji ropy naftowej i gazu ziemnego

ABSTRACT: The use of biosorbents for wastewater treatment offers a cost-effective alternative to activated charcoal. This study investigates the potential of peanut shells, a by-product of the food industry, as a bioadsorbent. Due to their cellulose network and functional groups, peanut shells exhibit significant adsorption capacity, particularly following chemical modification. The experimental research focused on the preparation and characterization of the bioadsorbent BA-1 from peanut shells, involving washing, drying, grinding, and thermal processing. The BET method revealed a high specific surface area of 8.9704 m²/g, indicating a highly porous structure predominantly composed of micropores and mesopores. Adsorption properties were tested using a static method for treating wastewater from a gas processing plant. Analysis of nitrogen adsorption-desorption isotherms confirmed a heterogeneous pore structure of the material. X-ray fluorescence (XRF) spectra and chemical analyses before and after treatment showed significant reductions in elemental contaminants, including potassium, calcium, iron, zinc, copper, and lead, demonstrating the bioadsorbent's effectiveness. In addition, the treatment substantially reduced sulfates (71%), chlorides (72%), nitrates (53%), nitrites (79%), and water hardness (67%). It also adjusted the pH towards neutrality. Copper ion concentration was reduced by 95%; however, trace amounts of lead ions were detected post-treatment, warranting further investigation. The study confirms the high potential of peanut shell-derived bioadsorbents for wastewater purification, emphasizing their capacity to reduce a broad spectrum of contaminants and support sustainable waste management practices. Further research is recommended to optimize the material's application in gas storage, catalysis, and separation processes, thereby enhancing its practical utility in industrial settings.

Key words: metal ions, bioadsorbent, thermal processing, peanut shells, wastewater.

STRESZCZENIE: Zastosowanie biosorbentów do oczyszczania ścieków stanowi tańszą alternatywę dla węgla aktywnego. W niniejszej pracy oceniono potencjał łupin orzechów arachidowych – produktu ubocznego w przemyśle spożywczym – jako bioadsorbentu. Ze względu na zawartość włókien celulozowych i grup funkcyjnych, łupiny orzechów arachidowych wykazują znaczną zdolność adsorpcyjną, szczególnie po modyfikacji chemicznej. Badania eksperymentalne polegały na przygotowaniu i charakterystyce bioadsorbentu BA-1 pochodzącego z łupin orzechów arachidowych i obejmowały ich płukanie, suszenie, rozdrabnianie i obróbkę termiczną. Metoda BET wykazała wysoką powierzchnię właściwą bioadsorbentu BA-1 wynoszącą 8.9704 m²/g, co wskazuje na wysoce porowatą strukturę złożoną głównie z mikroporów i mezoporów. Właściwości adsorpcyjne zostały przetestowane przy użyciu statycznej metody oczyszczania ścieków z zakładu przetwórstwa gazu. Analiza izoterm adsorpcji i desorpcji azotu potwierdziła heterogeniczną strukturę porów analizowanego materiału. Widma fluorescencji rentgenowskiej (XRF) i analizy chemiczne przed i po oczyszczeniu ścieków wykazały znaczną redukcję zanieczyszczeń pierwiastkami, w tym potasem, wapniem, żelazem, cynkiem, miedzią i ołowiem, co potwierdza skuteczność bioadsorbentu. Ponadto, w wyniku oczyszczania nastąpiła znaczna redukcja siarczanów (o 71%), chlorków (o 72%), azotanów (o 53%), azotynów (o 79%) i twardości wody (o 67%), a także zmiana odczynu pH do wartości zbliżonej do obojętnej. Jony miedzi zostały zredukowane o 95%; jednak po oczyszczeniu wykryto śladowe ilości jonów ołowiu, co wymaga dalszych badań. Badanie potwierdza wysoki potencjał bioadsorbentów na bazie łupin orzechów arachidowych do oczyszczania ścieków, podkreślając ich zdolność do usuwania szerokiego spektrum zanieczyszczeń i wspierania zrównoważonych praktyk gospodarki odpadami. Zaleca się dalsze badania w celu optymalizacji zastosowania tego materiału w magazynowaniu gazu, katalizie i procesach separacji, zwiększając tym samym jego praktyczną użyteczność w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: jony metali, bioadsorbent, obróbka termiczna, łupiny orzechów arachidowych, ścieki.

References

- Abdolali A., Ngo H.H., Guo W., Zhou J.L., Zhang J., Liang S., Chang S.W., Nguyen D.D., Liu Y., 2017. Application of a breakthrough biosorbent for removing heavy metals from synthetic and real wastewaters in a lab-scale continuous fixed-bed column. *Bioresource Technology*, 229: 78–87. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.016.
- Adegoke K.A., Bello O.S., 2015. Dye sequestration using agricultural wastes as adsorbents. *Water Resources and Industry*, 12: 8–24. DOI: 10.1016/j.wri.2015.09.002.
- Agarry S.E., 2016. Anthracene bioadsorption from simulated wastewater by chemically-treated unripe plantain peel bioadsorbent: Batch kinetics and isothermal modeling studies. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 39(1): 23–43. DOI: 10.1080/10406638.2016.1255650.
- Agzamov A.K., Omonov S.P., Ibotov O.K., Matniyazov O.P., Auesbaev A.U., 2025. Analysis of well workover results at the fields of the Oil and Gas Production Department “Mubarekneftgaz”. *Nafta-Gaz*, 81(4): 253–262. DOI: 10.18668/NG.2025.04.04.
- Ahmad T., Danish M., 2022. A review of avocado waste-derived adsorbents: Characterizations, adsorption characteristics, and surface mechanism. *Chemosphere*, 296: 134036. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134036.
- Asiagwu A.K., Okposo M.A., Peretomo-Clark M.A., Ojebah C.K., 2017. Kinetic model for the removal of amaranth dye from aqueous solution using avocado pear seed as biomass. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics*, 5: 119–123.
- Asiagwu A.K., Omuku P.E., Alisa C.O., 2013. Kinetic model for the removal of methyl orange (dye) from aqueous solution using avocado pear (*Persea Americana*) seed. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, 3(2): 48–57.
- Auesbaev A.U., Khurmamatov A.M., Ismaylov O.Y., Khametov Z.M., 2024. Study of the thickness of the boundary layer of hydrocarbons in horizontal tubes of heat exchangers. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 25(3): 931–941. DOI: 10.62972/1726-4685.2024.3.931.
- Bahsaine K., Chakhtouna H., Mekhzoum M.E.M., Zari N., Benzeid H., Qaiss A. el Kacem, Bouhfid R., 2023. Efficient cadmium removal from industrial phosphoric acid using banana pseudostem-derived biochar. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(15): 1–15. DOI: 10.1007/s13399-023-04130-y.
- Balbay S., Acikgoz C., 2022. New method for producing carbon sphere from waste tyre (NEWCSWT). *Waste and Biomass Valorization*, 13: 4951–4962. DOI: 10.1007/s12649-022-01765-2.
- Bazzo A., Adebayo M.A., Dias S.L.P., Lima E.C., Vaghetti J.C.P., de Oliveira E.R., Leite A.J.B., Pavan F.A., 2015. Avocado seed powder: Characterization and its application for crystal violet dye removal from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 57(34): 1–16. DOI: 10.1080/19443994.2015.1074621.

- Boeykens S.P., Redondo N., Alvarado O.R., Caracciolo N., Vázquez C., 2019. Chromium and lead adsorption by avocado seed biomass study through the use of total reflection X-ray fluorescence analysis. *Applied Radiation and Isotopes*, 153: 108809. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.108809.
- Boeykens S.P., Saralegui A., Caracciolo N., Piol M.N., 2018. Agroindustrial waste for lead and chromium biosorption. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6: 341–350. DOI: 10.13044/j.sdewes.d5.0184.
- di Bitonto L., Reynel-Ávila H.E., Mendoza-Castillo D.I., Bonilla-Petriciolet A., Pastore C., 2021. Residual Mexican biomasses for bionergy and fine chemical production: correlation between composition and specific applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11: 619–631. DOI: 10.1007/s13399-020-00616-1.
- Elizalde-González M.P., Mattusch J., Peláez-Cid A.A., Wennrich R., 2007. Characterization of adsorbent materials prepared from avocado kernel seeds: Natural, activated and carbonized forms. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78(1): 185–193. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.06.008.
- Fatimah I., Huda B.N., Yusuf I.L., Hartono B., 2018. Enhanced adsorption capacity of peanut shell toward rhodamine b via sodium dodecyl sulfate modification. *Rasayan Journal of Chemistry*, 11(3): 1166–1176. DOI: 10.31788/RJC.2018.1134021.
- Foroutan R., Mohammadi R., Farjadfar Z., Esmaeili H., Saberi M., Sahebi S., Dobaradaran S., Ramavan B., 2019. Characteristics and performance of Cd, Ni, and Pb bio-adsorption using *Callinectes sapidus* biomass: Real wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(7): 6336–6347. DOI: 10.1007/s11356-018-04108-8.
- Gupta S., Jain A.K., 2021. Biosorption of Ni(II) from aqueous solutions and real industrial wastewater using modified *A. barbadensis* Miller leaves residue powder in a lab scale continuous fixed bed column. *Cleaner Engineering and Technology*, 5: 100349. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100349.
- Huang G., Wang D., Ma S., Chen J., Jiang L., Wang P., 2015. A new, low-cost adsorbent: preparation, characterization, and adsorption behavior of Pb(II) and Cu(II). *Journal of Colloid and Interface Science*, 445: 294–302. DOI: 10.1016/j.jcis.2014.12.099.
- Ibrahim F.M., Najeeb D.A., Thamer H.S., 2023. Green preparation of Cu nanoparticles of the avocado seed extract as an adsorbent surface. *Materials Science for Energy Technologies*, 6: 130–136. DOI: 10.1016/j.mset.2022.12.006.
- Ismaylov O.Y., Khurmamatov A.M., Ismaylov M.K., Auesbaev A.U., Utegenov U.A., 2024. Investigations of the impact of the magnetic field on the process of formation of scaling in thermal devices. *Nafta-Gaz*, 80(2):115–121. DOI: 10.18668/NG.2024.02.07.
- Kang F., Yan-Bing H., Baohua L., Du H-D., 2011. Carbon for energy storage and conversion. *New Carbon Materials*. 26(4): 246–254. DOI:10.1016/j.carbon.2011.08.023.
- Khurmamatov A.M., Auesbaev A.U., 2023. Analysis of the operating mode of the existing desorber and its modernization using additional contact devices. *Nafta-Gaz*, 79(6): 412–419. DOI: 10.18668/NG.2023.06.05.
- Khurmamatov A.M., Auesbaev A.U., Ismaylov O.Y., Begzhanova G.B., 2023a. Effect of temperature on the physico-chemical properties of n-methyldiethanolamine. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 24(1): 99–107.
- Khurmamatov A.M., Ismaylov O.Y., Auesbaev A.U., Rakhimov G.B., Muminov J.A., Khametov Z.M., 2025. Increasing the efficiency of heat exchange by improving the design of heat exchangers. *Nafta-Gaz*, 1: 73–83. DOI: 10.18668/NG.2025.01.07.
- Khurmamatov A.M., Matkarimov A.M., Auesbaev A.U., Utegenov U.A., 2023b. Results of experiments on studying the composition and purification of technical water of oil and gas processing plant. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 24(4): 671–678.
- Khurmamatov A.M., Yusupova N.K., Auesbaev A.U., 2024. Possibilities for producing secondary materials from hydrocarbon waste. *Nafta-Gaz*, 11: 723–728. DOI: 10.18668/NG.2024.11.07.
- Khurmamatov A.M., Yusupova N.K., Auesbaev A.U., Abdurakhimov S.S., 2023c. Results of a study on the treatment and separation of water from hydrocarbon waste. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 24(3): 421–430.
- Leite A.J.B., Carmalin S.A., Thuea P.S., dos Reisa G.S., Dias S.L.P., Lima E.C., Vaghetta J.C.P., Pavan F.A., de Alencar W.S., 2017. Activated carbon from avocado seeds for the removal of phenolic compounds from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 71: 168–181. DOI: 10.5004/dwt.2017.20540.
- Ligas B., Warchol J., Skrzypczak D., Witek-Krowiak A., Chojnacka K., 2022. Valorization of biomass residues by biosorption of microelements in a closed-loop cycle. *Waste and Biomass Valorization*, 13: 1913–1929. DOI: 10.1007/s12649-021-01639-z.
- Lokeshwari M., Swamy C.N., 2010. Waste to wealth – Agriculture solid waste management study. *Pollution Research*, 29(3): 513–517.
- Mahmoud M.E., El-Said G.F., Ibrahim G.A.A., Elnashar A.A.S., 2022. Effective removal of hexavalent chromium from water by sustainable nano-scaled waste avocado seeds: Adsorption isotherm, thermodynamics, kinetics, and error function. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(3): 14725–14743. DOI: 10.1007/s13399-022-03619-2.
- Mallampati R., Xuanjun L., Adin A., Valiyaveetil S., 2015. Fruit peels as efficient renewable adsorbents for removal of dissolved heavy metals and dyes from water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3: 1117–1124. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00207.
- Pereira J.E.S., Ferreira R.L.S., Nascimento P.F.P., Silva A.J.F., Padilha C.E.A., Neto E.L.B., 2021. Valorization of carnauba straw and cashew leaf as bio-adsorbents to remove copper (II) ions from aqueous solution. *Environmental Technology and Innovation*, 23: 101706. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101706.
- Permal R., Chia T., Arena G., Fleming C., Chen J., Chen T., Chang W.L., Seale B., Hamid N., Kam R., 2023. Converting avocado seeds into a ready to eat snack and analysing for persin and amygdalin. *Food Chemistry*, 399: 134011. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134011.
- Piedrahita-Rodríguez S., Cardona Urrea S., Escobar García D.A., Ortiz-Sánchez M., Solarte-Toro J.C., Cardona Alzate C.A., 2023. Life cycle assessment and potential geolocation of a multi-feedstock biorefinery: Integration of the avocado and plantain value chains in rural zones. *Bioresource Technology Reports*, 21: 101318. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101318.
- Rashama C., Ijoma G.N., Matambo T.S., 2022. Elucidating biodegradation kinetics and biomethane potential trends in substrates containing high levels of phytochemicals: The case of avocado oil processing by-products. *Waste and Biomass Valorization*, 13: 2071–2081. DOI: 10.1007/s12649-021-01663-z.
- Rivas B.L., Urbano B.F., Sánchez J., 2018. Water-soluble and insoluble polymers, nanoparticles, nanocomposites and hybrids with ability to remove hazardous inorganic pollutants in water. *Frontiers in Chemistry*, 6: 320. DOI: 10.3389/fchem.2018.00320.
- Sabzehmeidani M.M., Mahnaee S., Ghaedi M., Heidari H., Roy V.A., 2021. Carbon based materials: a review of adsorbents for inorganic and organic compounds. *Materials Advances*, 2(2): 598–627. DOI: 10.1039/D0MA00087F.
- San José M.J., Alvarez S., López R., 2023. Conical spouted bed combustor to obtain clean energy from avocado waste. *Fuel Processing Technology*, 239: 107543. DOI: 10.1016/j.fuproc.2022.107543.
- Sangaré D., Moscota-Santillan M., Aragón Piña A., Bostyn S., Belandria V., Gokalp I., 2022. Hydrothermal carbonization of biomass: Experimental study, energy balance, process simulation, design, and techno-economic analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(4): 2561–2576. DOI: 10.1007/s13399-022-02484-3.

- Shomansurov F.F., Auesbaev A.U., Ismaylov O.Y., Khurmamatov A.M., Khametov Z.M., Muminov J.A., 2024. Optimization of the process of heating an oil and gas condensate mixture by light naphtha vapor in heat – exchanger condenser 10E04. *Nafta-Gaz*, 80(8): 501–510. DOI: 10.18668/NG.2024.08.05.
- Singh H., Singh N.K., Kardam D.K., 2014. Economic analysis of groundnut crop in Jaipur district of Rajasthan. *Agriculture Update*, 9(1): 59–63.
- Souza F.H.M., Leme V.F.C., Costa G.O.B., Castro K.C., Giraldo T.R., Andrade G.S.S., 2020. Biosorption of rhodamine B using a low-cost biosorbent prepared from inactivated *Aspergillus oryzae* cells: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(5). DOI: 10.1007/s11270-020-04633-8.
- Villaescusa I., Fiol N., Poch J., Bianchi A., Bazzicalupi C., 2011. Mechanism of paracetamol removal by vegetable wastes: The contribution of π - π interactions, hydrogen bonding and hydrophobic effect. *Desalination*, 270: 135–142. DOI: 10.1016/j.desal.2010.11.037.
- Wei X., Wan S., Jiang X., Wang Z., Gao S., 2015. Peanut-shell-like porous carbon from nitrogen-containing Poly-*N*-phenylethanolamine for high-performance supercapacitor. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 40(7): 22238–22245. DOI: 10.1021/acsami.5b05022.
- Wilson K., Yang H., Seo C.W., Marshall W.E., 2006. Select metal adsorption by activated carbon made from peanut shells. *Bioresource Technology*, 97(18): 2266–2270. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.10.043.
- Wu M., Li R., He X., Zhang H., Sui W., Tan M., 2015. Microwave-assisted preparation of peanut shell-based activated carbons and their use in electrochemical capacitors. *New Carbon Materials*, 30(1): 86–91. DOI: 10.1016/S1872-5805(15) 60178-0.
- Xiao Z., Chen W., Lin K., Cui P., Zhan D., 2018. Porous biomass carbon derived from peanut shells as electrode materials with enhanced electrochemical performance for supercapacitors. *International Journal and Electrochemical Science*, 13(6): 5370–5381. DOI: 10.20964/2018.06.54.
- Xing W., Ngo H.H., Kim S.H., Guo W.S., Hagare P., 2008. Adsorption and bioadsorption of granular activated carbon (GAC) for dissolved organic carbon (DOC) removal in wastewater. *Bioresource Technology*, 99(18): 8674–8678. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.04.012.
- Yadav N., Singh M.K., Yadav N., Hashmi S.A., 2018. High performance quasi-solid-state supercapacitors with peanut-shell-derived porous carbon. *Journal of Power Sources*, 402: 133–146, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.09.032.
- Yu J.-G., Yue B.-Y., Wu X.-W., Liu Q., Jiao F.-P., Jiao X.-Y., Chen X.-Q., 2016. Removal of mercury by adsorption: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 5056–5076. DOI: 10.1007/s11356-015-5880-x.

Nafta-Gaz 2025, no. 6, pp. 408–416, DOI: 10.18668/NG.2025.06.05

Assessment of piles reinforcing telescopic water intake

Ocena pali wzmacniających teleskopowe ujęcia wody

Seymur R. Bashirzade¹, Andrey A. Lipin²

¹ *Azerbaijan University of Architecture and Construction*

² *Water and Amelioration Complex Design Institute, Azerbaijan*

ABSTRACT: Telescopic water intake structures enable selective extraction of water from the upper layers of a reservoir. These intakes are highly versatile, offer extensive applicability, and are easy to operate. This study investigates the structural performance of telescopic water intake systems externally supported by various pile configurations and cross-sectional profiles. Pushover analysis was used to investigate the influence of pile arrangement (tripod, quadpod, and pentapod), cross-section type (hollow circular, box-, and H-profiles), and operational depth on the lateral load-bearing capacity and material efficiency. The results indicate that the structural performance and steel consumption increase gradually from the tripod to pentapod configurations, with the pentapod presenting the best load resistance owing to its stability improvement and redundancy. Cross-sectional variations in the structural profiles indicate different performance characteristics depending on the depth range and loading conditions. The box-profile exhibited the best stability at various depths because its geometry was closed. The H-profile is effective at shallow depths because the reduced lateral stiffness has less effect on the load-carrying capacity. However, with increasing depth, the H-profile exhibits lower lateral stability owing to the open profile, which decreases the overall capacity of the structural member. In contrast, the hollow circular section shows a higher initial stiffness, but its ultimate strength is not as high, and it behaves differently when a load is applied. Having a lower ultimate strength compared to the others, a high initial stiffness can make it ideal for applications where flexibility is a key consideration. The operational depth has a profound effect on the yielding points; shallow piles exhibit higher base forces and better load resistance. Therefore, the results indicate the need to select the appropriate pile configuration, cross-sectional profile, and depth to optimize structural performance with material efficiency for marine infrastructure applications.

Key words: telescopic water intake, piles, reinforcement, structural performance, surface water intake, pushover analysis, SAP2000 software.

STRESZCZENIE: Teleskopowe ujęcia wody umożliwiają pobór wody z powierzchniowych warstw zbiornika. Konstrukcje te cechują się wysoką wszechstronnością, szerokimi możliwościami zastosowania oraz łatwością obsługi. W niniejszej pracy przeanalizowano wytrzymałość konstrukcyjną systemów ujęć wody z czerpnią pływającą z podparciem w postaci różnych konfiguracji pali i profili. Zbadano wpływ rozmieszczenia pali (trójnóg, czwórnóg i pięcionóg), rodzajów zastosowanych profili (rurowy zamknięty, skrzynkowy i dwuteownik) oraz głębokości roboczej na nośność boczną i wydajność materiałową za pomocą analizy pushover. Uzyskane wyniki wskazują, że zarówno nośność konstrukcji, jak i zużycie stali wzrastają stopniowo od konfiguracji trójnogu do pięcionogu, przy czym pięcionóg zapewnia najlepszą odporność na obciążenia dzięki poprawie stabilności i nadmiarowości układu. Różnice w przekrojach poprzecznych profili konstrukcyjnych wskazują na różne charakterystyki wydajności w zależności od zakresu głębokości i warunków obciążenia. Przekrój dwuteowy (przekrój H) sprawdza się na małych głębokościach, gdyż obniżona sztywność boczna ma wówczas mniejszy wpływ na nośność. Jednak wraz ze wzrostem głębokości przekrój H traci stabilność boczną ze względu na otwartą konstrukcję, co zmniejsza całkowitą nośność elementu. Dla porównania, przekrój rurowy zamknięty cechuje się wyższą początkową sztywnością, lecz jego wytrzymałość graniczna jest

niższa, a sposób zachowania pod obciążeniem odmienny. Dzięki wysokiej początkowej sztywności przy niższej wytrzymałości granicznej przekrój rurowy sprawdza się szczególnie tam, gdzie kluczowym wymaganiem jest elastyczność konstrukcji. Głębokość eksploatacji ma istotny wpływ na punkty uplastycznienia: płytko osadzone pale wykazują wyższe siły podporowe i lepszą odporność na obciążenia. Wyniki wskazują zatem na konieczność odpowiedniego doboru konfiguracji pali, przekroju poprzecznego oraz głębokości, aby dostosować wytrzymałość konstrukcji do efektywności wykorzystania materiału w zastosowaniach związanych z infrastrukturą morską.

Słowa kluczowe: teleskopowe ujęcie wody, pale, zbrojenie, właściwości konstrukcyjne, powierzchniowe ujęcie wody, analiza pushover, oprogramowanie SAP2000.

References

- ANSI/AISC 360-16, 2016. Specification for structural steel buildings. *American Institute of Steel Construction, Chicago*, 610.
- Bashirzade S., Ozcan O., Cagdas I.U., 2024. Internal force transfer in segmental RC structures. *Research on Engineering Structures & Materials*, 10(4): 1639–1662. DOI: 10.17515/resm2024.146st0109rs.
- Chaves I.A., Melchers R.E., 2014. Extreme value analysis for assessing structural reliability of welded offshore steel structures. *Structural safety*, 50: DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.03.007.
- Dhannur B., Sushmitha N., 2023. Performance assessment of composite steel building with considering plan irregularity before and after Retrofit – Pushover Analysis. *Materials Today: Proceedings*, 88: 71–76. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.613.
- FEMA P695, 2009. Quantification of building seismic performance factors. *Prepared by Applied Technology Council. US Department of Homeland Security, FEMA*.
- Garibov R.B., Bashirzade S.R., 2020. Techno-economic analysis of the same high and different rings Lamella domes using by Lrfd and Asd load combinations. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 7(4): 1–3.
- Gasanov S.T., Lipin A.A., 2021. Improving the Design and Increasing the Stability of a Telescopic Water Intake. *Power Technology and Engineering*, 55(3): 390–395. DOI: 10.1007/s10749-021-01371-7.
- Hartmann S., 2005. A remark on the application of the Newton-Raphson method in non-linear finite element analysis. *Computational Mechanics*, 36: 100–116. DOI: 10.1007/s00466-004-0630-9.
- Lipin A.A., 2020. Surface telescopic water intake: A review. *AlfaBuild*, 3: 1502–1502. DOI: 10.34910/ALF.15.2.
- Lipin A., 2022. Regulation of Telescopic Water Intake Operations. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 30(3): 27–32. DOI: 10.2478/sjce-2022-0018.
- Malathy R.B., Bhat G., Dewangan U.K., 2022. An improved iterative technique for inelastic time history analysis of single degree of freedom (SDOF) elasto-plastic system. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1): 102. DOI: 10.1007/s41024-022-00243-5.
- Mustafayev V.T., Nasirov C.R., 2024. Analysis of the influence of wave loads on offshore installations. *Nafta-Gaz*, 80(2): 91–95. DOI: 10.18668/NG.2024.02.03.
- Randolph M.F., 1981. The response of flexible piles to lateral loading. *Géotechnique*, 31(2): 247–259. DOI: 10.1680/geot.1981.31.2.247.
- Real E., Mirambell E., 2005. Flexural behaviour of stainless steel beams. *Engineering Structures*, 27(10): 1465–1475. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.04.008.
- Rodrigues T., Durand R., 2023. Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete using cohesive elements. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2): 69. DOI: 10.1007/s41024-023-00316-z.
- Saberi V., Saberi H., Sadeghi A., 2021. Collapse assessment of steel moment frames based on development of plastic hinges. *Journal of Science and Technology*, 52(11): 1–21. DOI: 10.22060/CEEJ.2020.16177.6146.
- SAP SCI, 2024. Integrated finite element analysis and design of structures. Analysis reference. *Computers and Structures Inc., University of California*.
- Shatarat N., 2012. Effect of plastic hinge properties in nonlinear analysis of highway bridges. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 6(4): 501–510.
- Vytyaz O., Ivasiv O., Rachkevych R., Deynega R., 2022. Badanie wpływu kompozytowych rękawów naprawczych na wytrzymałość i stan naprężenia-odkształcenia odcinka rurociągu. *Nafta-Gaz*, 78(10): 733–739. DOI: 10.18668/NG.2022.10.03.
- Wang Y.Z., Li G.Q., Wang Y.B., Lyu Y.F., 2021. Simplified method to identify full von Mises stress-strain curve of structural metals. *Journal of Constructional Steel Research*, 181, 106624. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106624.

Nafta-Gaz 2025, no. 6, pp. 417–423, DOI: 10.18668/NG.2025.06.06

An overview of the progress in the use of compressed natural gas in Nigeria

Analiza osiągnięć w wykorzystaniu sprężonego gazu ziemnego w Nigerii

Deborah O. Bolaji, Kazeem A. Bello, Bukola O. Bolaji

Federal University Oye-Ekiti, Nigeria

ABSTRACT: The world is shifting away from petrol and oil-based energy sources, which have been linked to environmental degradation and global warming. To address these environmental issues and reduce greenhouse gas emissions in the transportation sector, the transition from conventional gasoline-powered vehicles to natural gas (CNG) vehicles has recently gained traction. This paper presents an overview of the progress made in the use of compressed natural gas as viable and environmentally friendly alternative fuel in Nigeria. The efforts made thus far by the Nigerian government in embracing the use of CNG and the projects executed to ensure a smooth transition from the use of conventional fuels to natural gas fuels are discussed. In addition to the existing CNG stations across the country, twelve new stations were installed in two major cities, and the government officially launched hundreds of CNG intra- and inter-state buses in July 2024. It has also established centres for the conversion of existing petrol and diesel vehicles to CNG vehicles, with the goal of alleviating the hardships faced

by Nigerians as a consequence of the removal of petrol subsidies. It is suggested that the hazards associated with CNG storage, such as in vessels, tanks, and cylinders, should be critically assessed because their explosions are almost always unexpected and disastrous. Also, possible activities that could potentially lead to explosions should be identified for proper protection.

Key words: alternative fuel, CNG, natural gas, petroleum, safety.

STRESZCZENIE: Na całym świecie obserwuje się odchodzenie od źródeł energii opartych na benzynie i ropie naftowej, które przyczyniają się do degradacji środowiska i globalnego ocieplenia. W celu przeciwdziałania tym negatywnym zjawiskom i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych w sektorze transportu, coraz częściej rezygnuje się z konwencjonalnych pojazdów napędzanych benzyną na rzecz pojazdów zasilanych gazem ziemnym. W niniejszym artykule przedstawiono analizę postępów w zakresie wykorzystania sprężonego gazu ziemnego (CNG) jako realnego i ekologicznego paliwa alternatywnego w Nigerii. Omówiono działania podjęte przez rząd nigeryjski na rzecz rozwoju infrastruktury CNG oraz projekty realizowane w celu zapewnienia płynnego przejścia z paliw konwencjonalnych na paliwa gazowe. Oprócz funkcjonujących już na terenie kraju stacji CNG, uruchomiono dwanaście nowych obiektów w dwóch głównych miastach, a w lipcu 2024 roku rząd oficjalnie wprowadził do użytku setki międzymiastowych i miejskich autobusów zasilanych CNG. Ponadto, utworzono centra konwersji pojazdów benzynowych i wysokoprężnych na jednostki zasilane gazem ziemnym, aby złagodzić trudności ekonomiczne mieszkańców Nigerii wynikające z likwidacji subsydiów na benzynę. Zwrócono również uwagę na konieczność przeprowadzania dokładnej oceny zagrożeń związanych z magazynowaniem CNG w zbiornikach, zasobnikach i cylindrach, ponieważ ich eksplozje są niemal zawsze nieprzewidywalne i mogą mieć katastrofalne skutki. Podkreślono także potrzebę identyfikacji działań mogących prowadzić do takich zdarzeń w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: paliwo alternatywne, CNG, gaz ziemny, ropa naftowa, bezpieczeństwo.

References

- Aba M.M., Amado N.B., Rodrigues A.L., Sauer I.L., Richardson A.A.M., 2023. Energy transition pathways for the Nigerian Road Transport: Implication for energy carrier, Powertrain technology, and CO₂ emission. *Sustainable Production and Consumption*, 38: 55–68. DOI: 10.1016/j.spc.2023.03.019.
- Abu R., Patchigolla K., Simms N., 2023. A review on qualitative assessment of natural gas utilisation options for eliminating routine Nigerian gas flaring. *Gases*, 3(1): 1–24. DOI: 10.3390/gases3010001.
- Adeola A.O., Akingboye A.S., Ore O.T., Oluwajana O.A., Adewole A.H., Olawade D.B., Ogunyele A.C., 2022. Crude oil exploration in Africa: socio-economic implications, environmental impacts, and mitigation strategies. *Environment Systems and Decisions*, 42(1): 26–50. DOI: 10.1007/s10669-021-09827-x.
- Ali Y., Younus A., Khan A.U., Alrefai A.H., 2024. Compressed Natural Gas (CNG) as a fuel and the associated risks: A Quantitative Analysis in the scenario of a Developing Country. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(3): 306–316. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2024.05.001.
- Biose H., 2019. Gas production and utilization in Nigeria: A long term perspective. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 6(5): 58–72. DOI: 10.29121/ijetmr.v6.i5.2019.372.
- Chala G.T., Aziz A.A.R., Hagos F.Y., 2018. Natural gas engine technologies: Challenges and energy sustainability issue. *Energies*, 11(11): 2934. DOI: 10.3390/en11112934.
- Edo G.I., Samuel P.O., Jikah A.N., Ekokotu H.A., Ugbune U., Oghrro E.E.A., Emakpor O.L., Essaghah A.E.A., Ainyanbhor I.E., Ojulari A.E., Okoronkwo K.A., Owheruo J.O., 2024. Petroleum discovery, utilization and processing in the World and Nigeria: a comprehensive literature review. *Sustainable Chemical Engineering*, 5: 191–215. DOI: 10.37256/sce.5120243970.
- Emeke C., Chijioke N., Alwell N., 2023. A techno-economic analysis of using natural gas as alternative transport fuel in Nigeria. *Journal of Energy Technology and Environment*, 5(2): 187–201. DOI: 10.5281/zenodo.8025661.
- Fan S., Wang Y., Wang Y., Lang X., Wang S., 2021. Design and optimization of offshore ship-based natural gas storage technologies in the South China Sea. *Energy Conversion and Management*, 239: 114218. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114218.
- Fapetu O.F., Oladipo Z.O., Agge M.A., Ajayi O.B., Nenuwa I.O., Kehinde O., Adesina F., 2023. Analyzing the safety implications of the upsurge in domestic usage of liquefied petroleum gas (LPG) in Nigeria. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(2): 769–775. DOI: 10.30574/wjarr.2023.19.2.1658.
- Gerutu G.B., Greyson K.A., Chombo P.V., 2023. Compressed Natural Gas as an Alternative Vehicular Fuel in Tanzania: Implementation, Barriers, and Prospects. *Methane*, 2(1): 66–85. DOI: 10.3390/methane2010006.
- Ibeneme I.O., Ighalo J.O., 2020. Implementation of CNG as an alternative fuel for automobiles in Nigeria: Benefits and recommendations. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(7): 1516–1522. DOI: 10.17577/IJERTV9IS070654
- James R.T., Olaniyi T.K., Olatubosun P., 2023. Analysing the concept of environmental sustainability in oil and gas operations in the Global South: a case study of Nigeria – Niger Delta. *International Journal of Sustainable Energy Development*, 11(1): 523–532. DOI: 10.20533/ijesd.2046.3707.2023.00623.
- Kanakana-Katumba M.G., Bello K.A., Awogbemi O., Maladzi R.W., 2023. Evaluation of Alternative Fuels for Sustainable Road Transportation [online]. [Preprints], 2023091977. DOI: 10.20944/preprints202309.1977.v1.
- Leonardo A., Semin, 2022. Effect of CNG engine conversion on performance characteristic: A review. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 972(1): 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/972/1/012028.
- Li Q., Chen H., 2021. The relationship between human well-being and carbon emissions. *Sustainability*, 13(2): 547. DOI: 10.3390/su13020547.
- Li W., Shen X., Huang Z., Mao T., Hu Q., Ma C., 2024. Study of Leakage and Explosion Hazard Characteristics of a Compressed Natural Gas at a Gas Station. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 97: 387–396. DOI: 10.1007/s10891-024-02904-3.
- Mishra N.K., Biswas P., Patel S., 2024. Future of clean energy for cooking in India: a comprehensive analysis of fuel alternatives. *Energy for Sustainable Development*, 81: 101500. DOI: 10.1016/j.esd.2024.101500.
- Ogunlowo O.O., Sohail M., Bristow A.L., 2018. Stakeholder consensus on the use of compressed natural gas as automotive fuel in Nigeria. *Case Studies on Transport Policy*, 6(4): 613–628. DOI: 10.1016/j.cstp.2018.07.011.
- Ogunode N.J., Aregbesola B.G., 2023. Impact of subsidy removal on Nigerian educational system. *Middle European Scientific Bulletin*, 39: 105–116.
- Okoro E.E., Aimikhe V.J., Sanni S.E., Ogali O.I., 2024. Compressed natural gas storage and transmission. [In:] Rahimpour M.R., Makarem M.A., Meshksar M. (eds.). *Advances in Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Natural Gas Transportation and Storage*, Elsevier, 6: 81–106. DOI: 10.1016/B978-0-443-19225-8.00011-1.
- Olujobi O.J., Irumekhai O.S., 2024. An analysis of the abolition of premium motor spirit (PMS) subsidies in Nigeria: a breach of social contract or climate change action?. *Discover Sustainability*, 5(1): 71. DOI: 10.1007/s43621-024-00252-z.

- Oluwakoya A.O., 2024. A comprehensive assessment of transportation emissions in Nigeria: Trends, drivers, and impacts. *Proceedings of the Nigerian Academy of Science*, 16(1): 61–71. DOI: 10.57046/BQUV9709.
- Onolemhemen R., Laniran T., Isehunwa S., Adenikinju A., 2017. An evaluation of domestic gas utilization on the Nigerian economy. *British Journal of Economics, Management & Trade*, 16(1): 1–13. DOI: 10.9734/BJEMT/2017/30438.
- Rotaru S., Pana C., Negurescu N., Cernat A., Nutu C., Fuiiorescu D., Lazaroiu G., 2024. CNG impact on combustion quality of a diesel engine fueled in diesel-gas mode. *Heliyon*. 10(15): e35010. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e35010.
- Scheffran J., Felkers M., Froese R., 2020. Economic growth and the global energy demand. [In:] Vertès A.A, Qureshi N., Blaschek H.P, Yukawa H. (eds.). *Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries*, John Wiley & Sons Ltd., 1–44. DOI: 10.1002/9781119152057.ch1.
- Shaarawi S.I., Abutaleb K., Aboelmagd A.R., Temraz T., 2024. Reviewing Natural Gas Vehicle Fleet Growth in Egypt: A Study of Environmentally Friendly Transportation Fuel. *Egyptian Journal of Petroleum*, 33(3): 3. DOI: 10.62593/2090-2468.1031.
- Ukpaukure Y.H., Aimikhe V., Ojapah M., 2023. The evaluation of liquefied petroleum gas (LPG) utilization as an alternative automobile fuel in Nigeria. *Open Journal of Energy Efficiency*, 12(1): 1–12. DOI: 10.4236/ojee.2023.121001.
- Wang J., Azam W., 2024. Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2): 101757. DOI: 10.1016/j.gsf.2023.101757.
- Wang Q., Guo J., Li R., Jiang X.T., 2023. Exploring the role of nuclear energy in the energy transition: A comparative perspective of the effects of coal, oil, natural gas, renewable energy, and nuclear power on economic growth and carbon emissions. *Environmental research*, 221: 115290. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115290.
- Yang J., Yu Y., Ma T., Zhang C., Wang Q., 2021. Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 19(3): 256–264. DOI: 10.1016/j.cjpre.2021.12.028.
- Zakirova G., Krapivsky E., Berezovskaya A., Borisov A., 2023. Storage of compressed natural gases. *Energies*, 16(20): 7208. DOI: 10.3390/en16207208.