

Machine learning-driven mineral prospectivity mapping: A predictive performance analysis in Janja, Iran

Mapowanie perspektywiczne minerałów oparte na uczeniu maszynowym: predykcyjna analiza efektywności obliczeniowej w regionie Janja, Iran

Mohammad Ebdali¹, Ardeshir Hezarkhani¹, Adel Shirazy¹, Amin Beiranvand Pour²

¹ Amirkabir University of Technology, Iran

² University Malaysia Terengganu (UMT), Malaysia

ABSTRACT: Geochemical analysis is an effective technique for detecting mineral deposits by examining element concentrations. Various statistical techniques have been developed to differentiate abnormal values from background values. A more accurate analysis can be obtained by employing multivariate statistical methods. The use of these methods enables the simultaneous analysis of changes in multiple variables. This research utilized correlation coefficients, cluster analysis, and factor analysis to demonstrate the genetic connections among various elements. The factor analysis method was additionally applied to generate multivariable maps and comprehensive multivariable results. Moreover, the stepwise factor analysis (SFA) method, an enhanced version of traditional factor analysis, was utilized to produce geochemical distribution maps. This technique entails initially recognizing and removing non-representative elements, followed by identifying the most important and impactful representative factors. This study demonstrates the efficacy of the SFA method when applied to geochemical data. This approach removes superfluous elements and increases the variance attributed to the predictive mineralization factor, thereby improving the geochemical halos. Additionally, this research evaluated multivariate analysis approaches alongside machine learning techniques. To achieve this, a multilayer perceptron neural network (MLP) was used to evaluate the levels of gold, silver, copper, lead, and zinc in the study area. The output variable represented the grade of a particular element individually, whereas the input variables encompassed the grades of the remaining four elements. To optimize the model, different quantities of hidden layers and a range of activation functions were applied. Ultimately, an ideal model was developed for each element. The model achieved accuracies of 95%, 88%, 73%, 80%, and 72% for the gold, silver, copper, lead, and zinc, respectively. The results show the significant computational efficiency of this method in assessing element grades. Finally, the element distribution maps generated by both methods indicate that the MLP approach identified the anomalous areas with higher accuracy.

Key words: cluster analysis, correlation coefficients, multivariate statistical methods, stepwise factor analysis, multilayer perceptron.

STRESZCZENIE: Analiza geochemiczna jest skuteczną techniką wykrywania złóż mineralnych poprzez badanie stężeń pierwiastków. Opracowano różne techniki statystyczne w celu odróżnienia nieprawidłowych wartości od wartości tła. Dokładniejszą analizę można uzyskać stosując wielowymiarowe metody statystyczne. Zastosowanie tych metod umożliwia jednoczesną analizę zmian wielu zmiennych. W niniejszym badaniu wykorzystano współczynniki korelacji, analizę skupień i analizę czynnikową w celu wykazania powiązań genetycznych między różnymi pierwiastkami. Metoda analizy czynnikowej została dodatkowo zastosowana do wygenerowania map wielu zmiennych i kompleksowych wyników wielu zmiennych. Co więcej, zastosowano metodę stopniowej analizy czynnikowej (SFA), ulepszoną wersję tradycyjnej analizy czynnikowej, w celu stworzenia map rozkładu geochemicznego. Technika ta polega na wstępnym rozpoznaniu i usunięciu pierwiastków niereprezentatywnych, a następnie zidentyfikowaniu najważniejszych i najbardziej wpływowych czynników reprezentatywnych. Przeprowadzone badania wykazały skuteczność metody SFA w analizie danych geochemicznych. Podejście to pozwala na eliminację zbędnych elementów oraz zwiększenie wariancji przypisanej predykcyjnemu czynnikowi mineralizacji, co prowadzi do lepszego zdefiniowania aureoli geochemicznych. Dodatkowo, w badaniu tym oceniono wielowymiarowe podejścia analityczne wraz z technikami uczenia maszynowego. Ponadto, w badaniu oceniono metody analizy wielowymiarowej w połączeniu z technikami uczenia maszynowego. W tym celu wykorzystano sieć neuronową – perceptron wielowarstwowy (MLP) do oceny zawartości złota, srebra, miedzi, ołowiu i cynku w badanym obszarze. Zmienną wyjściową była zawartość konkretnego pierwiastka, natomiast zmiennymi wejściowymi – zawartości pozostałych czterech pierwiastków. W celu optymalizacji modelu zastosowano różne liczby warstw ukrytych oraz szereg funkcji aktywacji. Ostatecznie opracowano model optymalny dla każdego pierwiastka. Modele osiągnęły dokładności wynoszące odpowiednio 95%, 88%, 73%, 80% i 72% dla złota, srebra, miedzi, ołowiu i cynku. Wyniki te wskazują na wysoką efektywność obliczeniową tej metody w ocenie zawartości pierwiastków. Ponadto mapy rozmieszczenia pierwiastków wygenerowane obiema metodami wykazały, że podejście oparte na MLP identyfikowało obszary anomalii z większą dokładnością.

Słowa kluczowe: analiza skupień, współczynniki korelacji, wielowymiarowe metody statystyczne, krokowa analiza czynnikowa, perceptron wielowarstwowy.

References

- Agard P., Omrani J., Jolivet L., Whitechurch H., Vrielynck B., Spakman W., Monié P., Meyer B., Wortel R., 2011. Zagros orogeny: A subduction-dominated process. *Geological Magazine*, 148(5–6): 692–725. DOI: 10.1017/S001675681100046X.
- Aghanabati A., 2004. Geology of Iran, Tehran, Iran. *Geological Survey*.
- Arinze I.J., Emedo C.O., Ugbor C.C., 2019. A scalar-geometric approach for the probable estimation of the reserve of some Pb-Zn deposits in Ameri, southeastern Nigeria. *Journal of Sustainable Mining*, 18(4): 208–225. DOI: 10.1016/j.jsm.2019.07.004.

- Barnett R.M., Manchuk J.G., Deutsch C.V., 2014. Projection pursuit multivariate transform. *Mathematical Geosciences*, 46: 337–359. DOI: 10.1007/s11004-013-9497-7.
- Barrie A., Agodzo S., Frazer-Williams R., Awuah E., Bessah E., 2023. A multivariate statistical approach and water quality index for water quality assessment for the Rokel river in Sierra Leone. *Heliyon*, 9(6): e16196. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16196.
- Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P., Wright D.F., 1989. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Digital Geology and Geographic Information Systems*, 10: 15–23.
- Borovec Z., 1996. Evaluation of the concentrations of trace elements in stream sediments by factor and cluster analysis and the sequential extraction procedure. *Science of the Total Environment*, 177(1–3): 237–250. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04901-0.
- Carman G.D., 2005. Geology, mineralization, and hydrothermal evolution of the Ladolam gold deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. [In:] Simmons S.F., Graham I. (ed.), Volcanic, geothermal, and ore-forming fluids: rulers and witnesses of processes within the earth. *Society of Economic Geologists*, 10, 247–284. DOI: 10.5382/SP.10.14.
- Carranza E.J.M., 2004. Usefulness of stream order to detect stream sediment geochemical anomalies. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(4): 341–352. DOI: 10.1144/1467-7873/03-040.
- Carranza E.J.M., 2010. Improved wildcat modelling of mineral prospectivity. *Resource Geology*, 60(2): 129–149. DOI: 10.1111/j.1751-3928.2010.00121.x.
- Carranza E.J.M., Hale M., 1997. A catchment basin approach to the analysis of reconnaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines. *Journal of Geochemical Exploration*, 60(2): 157–171. DOI: 10.1016/S0375-6742(97)00032-0.
- Chandrajith R., Dissanayake C.B., Tobschall H.J., 2001. Application of multi-element relationships in stream sediments to mineral exploration: a case study of Walawe Ganga Basin, Sri Lanka. *Applied Geochemistry*, 16(3): 339–350. DOI: 10.1016/S0883-2927(00)00038-X.
- Chatterjee S., Bandopadhyay S., 2011. Goodnews Bay Platinum resource estimation using least squares support vector regression with selection of input space dimension and hyperparameters. *Natural Resources Research*, 20: 117–129. DOI: 10.1007/s11053-011-9140-6.
- Chatterjee S., Bandopadhyay S., Rai P., 2008. Genetic algorithm-based neural network learning parameter selection for ore grade evaluation of limestone deposit. *Mining Technology*, 117(4): 178–190. DOI: 10.1179/037178409X405732.
- Chatterjee S., Mastalerz M., Drobnik A., Karacan C.Ö., 2022. Machine learning and data augmentation approach for identification of rare earth element potential in Indiana Coals, USA. *International Journal of Coal Geology*, 259(1–10): 104054. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104054.
- Denis D.J., 2021. Applied univariate, bivariate, and multivariate statistics: Understanding statistics for social and natural scientists, with applications in SPSS and R. *John Wiley & Sons*.
- Dieleman S., Willett K.W., Dambre J., 2015. Rotation-invariant convolutional neural networks for galaxy morphology prediction. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(2): 1441–1459. DOI: 10.1093/mnras/stv632.
- Dill H.G., 1998. A review of heavy minerals in clastic sediments with case studies from the alluvial-fan through the nearshore-marine environments. *Earth-Science Reviews*, 45(1–2): 103–132. DOI: 10.1016/S0012-8252(98)00030-0.
- Dutta S., Bandopadhyay S., Ganguli R., Misra D., 2010. Machine learning algorithms and their application to ore reserve estimation of sparse and imprecise data. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 2(2): 86–96. DOI: 10.4236/jilsa.2010.22012.
- Ebdali M., Hezarkhani A., 2024. A comparative study of decision tree and support vector machine methods for gold prospectivity mapping. *Mineralia Slovaca*, 56(2): 165–180. DOI: 10.56623/ms.2024.56.2.4.
- Eilu P., Mikucki E.J., Dugdale A.L., 2001. Alteration zoning and primary geochemical dispersion at the Bronzewing lode-gold deposit, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 36(1): 13–31. DOI: 10.1007/s001260050283.
- Eyles N., Kocsis S.P., 1989. Sedimentological controls on gold in a late Pleistocene glacial placer deposit, Cariboo Mining District, British Columbia, Canada. *Sedimentary Geology*, 65(1–2): 45–68. DOI: 10.1016/0037-0738(89)90005-5.
- Garrett R.G., Grunsky E.C., 2001. Weighted sums – knowledge based empirical indices for use in exploration geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1(2): 135–141. DOI: 10.1144/geochem.1.2.135.
- Ghannadpour S.S., Hezarkhani A., 2015. Introducing a software to calculate the grade and ore deposit probability related problems. *Global Journal of Computer Sciences*, 5(1): 01–06.
- Ghannadpour S.S., Hezarkhani A., Sabetmobarhan A., 2015. Some statistical analyses of Cu and Mo variates and geological interpretations for Parkam porphyry copper system, Kerman, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(1): 345–355. DOI: 10.1007/s12517-013-1096-x.
- Govett G.J.S., 2013. Rock geochemistry in mineral exploration. *Elsevier*.
- Grunsky E.C., Drew L.J., Sutphin D.M., 2009. Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data. *Applied Geochemistry*, 24(8): 1602–1616. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2009.04.024.
- Halfpenny R., Mazzucchelli R.H., 1999. Regional multi-element drainage geochemistry in the Himalayan Mountains, northern Pakistan. *Journal of Geochemical Exploration*, 67(1–3): 223–233. DOI: 10.1016/S0375-6742(99)00069-2.
- Hinton G., Deng L., Yu D., Dahl G.E., Mohamed A.-r., Jaitly N., Senior A., Vanhoucke V., Nguyen P., Sainath T.N., 2012. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(6): 82–97. DOI: 10.1109/MSP.2012.2205597.
- Kaiser H.F., 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3): 187–200. DOI: 10.1007/BF02289233.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E., 2012. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25(2). DOI: 10.1145/3065386.
- Krose B., Smagt P., 1996. An introduction to neural networks. *The University of Amsterdam*.
- Kumru M., Bakaç M., 2003. R-mode factor analysis applied to the distribution of elements in soils from the Aydin basin, Turkey. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2–3): 81–91. DOI: 10.1016/S0375-6742(02)00271-6.
- Lacassie J.P., Del Solar J.R., Roser B., Hervé F., 2006. Visualization of volcanic rock geochemical data and classification with artificial neural networks. *Mathematical Geology*, 38: 697–710. DOI: 10.1007/s11004-006-9042-z.
- Lacassie J.P., Roser B., Del Solar J.R., Hervé F., 2004. Discovering geochemical patterns using self-organizing neural networks: a new perspective for sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 165(1–2): 175–191.
- Mahmoudabadi H., Izadi M., Menhaj M.B., 2009. A hybrid method for grade estimation using genetic algorithm and neural networks. *Computational Geosciences*, 13: 91–101. DOI: 10.1007/s10596-008-9107-9.
- Maiti J., 2022. Multivariate statistical modeling in engineering and management. *CRC Press*. DOI: 10.1201/9781003303060.
- Mardia K.V., Kent J.T., Taylor C.C., 2024. Multivariate analysis. *John Wiley & Sons*. DOI: 10.1093/jrssa/qnae103.
- Mostafaei K., Maleki S., Jodeiri Shokri B., Yousefi M., 2023. Predicting gold grade by using support vector machine and neural network to generate an evidence layer for 3D prospectivity analysis. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 57(4): 435–444. DOI: 10.22059/ijmge.2023.362951.595087.

- Parsons S., Clegg W., 2009. Random and systematic errors. [In:] William C., and others (ed.) *Crystal Structure Analysis: Principles and Practice*, 2nd eds. *International Union of Crystallography Texts on Crystallography*. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199219469.003.0016.
- Pawlowsky-Glahn V., Egozcue J.J., Tolosana-Delgado R., 2015. Modeling and Analysis of Compositional Data. *John Wiley & Sons*. DOI: 10.1002/9781119003144.
- Prendergast K., 2007. Application of lithogeochemistry to gold exploration in the St Ives goldfield, Western Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 7(2): 99–108. DOI: 10.1144/1467-7873/07-134.
- Reimann C., Filzmoser P., 2000. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39: 1001–1014. DOI: 10.1007/s002549900081.
- Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G., 2002. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 17(3): 185–206. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00066-X.
- Samanta B., Bandyopadhyay S., 2009. Construction of a radial basis function network using an evolutionary algorithm for grade estimation in a placer gold deposit. *Computers & Geosciences*, 35(8): 1592–1602. DOI: 10.1016/j.cageo.2009.01.006.
- Sanford R.F., Pierson C.T., Crovelli R.A., 1993. An objective replacement method for censored geochemical data. *Mathematical Geology*, 25: 59–80. DOI: 10.1007/BF00890676.
- Shirazy A., Ziaii M., Hezarkhani A., 2020. Geochemical Behavior Investigation Based on K-means and Artificial Neural Network Prediction for Copper, in Kivi region, Ardabil province, IRAN. *Journal of Mining Engineering*, 14(45): 96–112. DOI: 10.22034/ijme.2020.37388.
- Simard P.Y., Steinkraus D., Platt J.C., 2003. Best practices for convolutional neural networks applied to visual document analysis. *7th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2003)*, Edinburgh, Scotland, UK. DOI: 10.1109/ICDAR.2003.1227801.
- Singer D.A., 2006. Typing mineral deposits using their associated rocks, grades and tonnages using a probabilistic neural network. *Mathematical Geology*, 38: 465–474. DOI: 10.1007/s11004-005-9023-7.
- Singer D.A., Kouda R., 1996. Application of a feedforward neural network in the search for Kuroko deposits in the Hokuroku District, Japan. *Mathematical Geology*, 28: 1017–1023. DOI: 10.1007/BF02068587.
- Sun X., Deng J., Gong Q., Wang Q., Yang L., Zhao Z., 2009. Kohonen neural network and factor analysis based approach to geochemical data pattern recognition. *Journal of Geochemical Exploration*, 103(1): 6–16. DOI: 10.1016/j.gexplo.2009.04.002.
- Tahmasbi P., Hezarkhani A., 2011. Presentation a Method for Optimization of Neural Network for Ore Grade Estimation Based on the Porphyry Copper System of Sonajil-Ahar. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 21(81): 31–36. DOI: 10.22071/gsj.2011.54200.
- Tripathi V.S., 1979. Factor analysis in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 11(3): 263–275. DOI: 10.1016/0375-6742(79)90004-9.
- Tutmez B., 2009. Use of hybrid intelligent computing in mineral resources evaluation. *Applied Soft Computing*, 9(3): 1023–1028. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.02.001.
- Valizadeh N., Sharghi Y., 2014. Performance Comparison of Estimators Based on Artificial Intelligence for Ore Grade Estimation in Masjed Daghi Copper Deposit. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 4(8): 29–37.
- Van Helvoort P.-J., Filzmoser P., van Gaans P.F., 2005. Sequential factor analysis as a new approach to multivariate analysis of heterogeneous geochemical datasets: an application to a bulk chemical characterization of fluvial deposits (Rhine–Meuse delta, The Netherlands). *Applied Geochemistry*, 20(12): 2233–2251. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.08.009.
- Venkataraman G., Madhavan B.B., Ratha D., Antony J.P., Goyal R., Banglani S., Roy S.S., 2000. Spatial modeling for base-metal mineral exploration through integration of geological data sets. *Natural Resources Research*, 9(1): 27–42. DOI: 10.1023/A:1010157613023.
- Weller A.F., Corcoran J., Harris A.J., Ware J.A., 2005. The semi-automated classification of sedimentary organic matter in palynological preparations. *Computers & Geosciences*, 31(10): 1213–1223. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.03.011.
- Westerhof A.B., 1986. Heavy minerals in exploration the present state of an old art. *ITC Journal*, 4: 290–296.
- Youngson J., Craw D., 1996. Recycling and chemical mobility of alluvial gold in Tertiary and Quaternary sediments, Central and East Otago, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 39(4): 493–508. DOI: 10.1080/00288306.1996.9514728.
- Yousefi M., Kamkar-Rouhani A., Carranza E.J.M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 115: 24–35. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.08.009.

Nafta-Gaz 2025, nr 5, s. 318–324, DOI: 10.18668/NG.2025.05.02

Optymalizacja analizy elementarnej cieczy o wysokiej lotności

Optimization of elemental analysis of highly volatile liquids

Aleksandra Duda

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Analiza elementarna jest jedną z powszechnie wykonywanych analiz w laboratoriach. Pozwala ona na określenie składu pierwiastkowego badanej próbki. Szerokie spektrum dostępnych technik analitycznych powoduje, że można oznaczyć bardzo wiele pierwiastków. Dużą popularnością cieszą się analizatory elementarne CHNS, w różnej konfiguracji, w których dokonuje się analizy kilku wybranych pierwiastków w zależności od potrzeb danego laboratorium. W laboratorium Geochemii Nafty i Gazu bada się różne próbki pod kątem analizy elementarnej. Są to przede wszystkim skały, kerogen oraz ropy. Wyzwaniem jest oznaczanie próbek o znacznie wyższej lotności niż ropa. Bardzo lotne próbki sprawiają trudności w oznaczaniu składu elementarnego, ze względu na ubytek ich masy w czasie. Uzyskanie jak najbardziej miarodajnych wyników wymaga wielu powtórzeń. W celu poprawy wyników takich próbek poszukiwano sposobów przygotowania próbki, które umożliwią pozbycie się tego problemu. Jednym ze znalezionych rozwiązań jest przygotowanie próbki z zastosowaniem adsorbentu. Adsorbent nie wchodzi w reakcję z próbką i nie wpływa na końcowy wynik. W celu optymalizacji metodyki oznaczania próbek lotnych dokonano porównania między dwoma sposobami przygotowania próbki. Do badań wykorzystano metanol i toluen. Są to

ciecze o wysokiej lotności, które są szeroko stosowane w przemyśle. Porównano wyniki badań uzyskane po klasycznym przygotowaniu próbek ciekłych i z zastosowaniem adsorbentu. Wykonano dziesięć powtórzeń dla każdego ze sposobów i substancji. Obliczone zostały parametry – m.in. średnia arytmetyczna, względne odchylenie standardowe, współczynnik zmienności. Wyniki badań wskazują na znacznie lepsze rezultaty dla metodyki z użyciem adsorbentu. Względne odchylenie standardowe dla sposobu z użyciem adsorbentu wynosi 0,01. Użycie adsorbentu pozwoliło na optymalizację analizy elementarnej próbek charakteryzujących się wysoką lotnością.

Słowa kluczowe: analiza elementarna, adsorbent, ciecze o wysokiej lotności.

ABSTRACT: Elemental analysis is one of the most common analyses performed in various laboratories, allowing to determine the elemental composition of the tested sample. The wide spectrum of available analytical techniques enables the determination of numerous elements. CHNS elemental analyzers are widely used in various configurations, analyzing depending on the needs of a given laboratory. In the Petroleum and Gas Geochemistry Laboratory, various samples are tested for elemental analysis. These are primarily rocks, kerogen, and crude oil. The challenge is to determine samples that are much more volatile than crude oil. Highly volatile samples present difficulties in determining the elemental composition due to mass loss over time, requiring multiple repetitions to obtain the most reliable results. To improve the accuracy of such analyses, methods of sample preparation were explored to mitigate this issue. One established method involves preparing the sample using an adsorbent, which does not react with the sample or affect the final result. To optimize the methodology for determining volatile samples, a comparison was made between two sample preparation methods. The tests used methanol and toluene, highly volatile liquids widely used in industry. The results obtained from conventional liquid sample preparation were compared with those using an adsorbent. Ten repetitions were performed for each method and substance. Parameters such as the mean, relative standard deviation, and coefficient of variation were calculated. The test results indicate significantly better results when an adsorbent is used. The relative standard deviation for the adsorbent method is 0.01. The use of an adsorbent allowed for the optimization of elemental analysis for highly volatile samples.

Key words: elemental analysis, adsorbent, highly volatile liquids.

Literatura

- Aiken A.C., DeCarlon P.F., Jimenez J.L., 2007. Elemental Analysis of Organic Species with Electron Ionization High-Resolution Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 79(21): 8350–8358. DOI: 10.1021/ac071150w.
- Baranov V.I., Quinn Z.A., Bandura D.R., Tanner S.D., 2002. The potential for elemental analysis in biotechnology. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 17: 1148–1152.
- Bieleń W., Matyasik I., Janiga M., Jankowski L., 2012. Geochemiczna charakterystyka naturalnych powierzchniowych wycieków węglowodorowych na podstawie badań GC oraz GC-MS. *Nafta-Gaz*, 68(11): 788–779.
- El-TaHER A., Abdelhalim M.A.K., 2014. Elemental analysis of limestone by instrumental neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299(3): 1949–1953. DOI: 10.1007/s10967-014-2925-4.
- Helaluddin A.B.M., Khalid R.S., Alaama M., Abbas S.A., 2016. Main Analytical Techniques Used for Elemental Analysis in Various Matrices. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 15: 427–434. DOI: 10.4314/tjpr.v15i2.29.
- Matyasik I., Zapala M., Wcislak A., 2020. Analiza porównawcza metod badania zawartości siarki w rdzeniach wiertniczych, węgla i ropach naftowych. *Nafta-Gaz*, 76(7): 449–456. DOI: 10.18668/NG.2020.07.03.
- Portal produktowy Grupy PCC. Metanol i etanol <<https://www.products.pcc.eu/pl/blog/wlasciwosci-metanolu-i-etanolu-czym-sie-roznia/>> (dostęp: 24.11.2024).
- Portal produktowy Grupy PCC. Toluen <<https://www.products.pcc.eu/pl/blog/toluen-zastosowanie-i-wlasciwosci/>> (dostęp: 24.11.2024).
- Skupio R., 2014. Wykorzystanie przenośnego spektrometru XRF do pomiarów składu chemicznego skał. *Nafta-Gaz*, 70(11): 771–777.
- Skupio R., Zagórska U., Kowalska K., 2020. Kalibracja wyników analiz chemicznych piaskowców czerwonego spągowca wykonanych przenośnym spektrometrem XRF. *Nafta-Gaz*, 76(1): 12–17. DOI: 10.18668/NG.2020.01.02.
- Śmigiera E., Kijęński J., Osawaru O., Zgudka A., Migdał A.R., 2013. Metanol jako donor wodoru w syntezie paliw alternatywnych. *Chemik*, 67(6): 502–513.
- Thermo Fisher Scientific Inc., 2020. FlashSmart Elemental Analyzer Organic Elemental Analyzers Operating Manual.
- Wencel K., 2022. Siarka organiczna i pirytowa: metody wydzielania i oceny ilościowej. Wpływ zawartości siarki organicznej na energię aktywacji kerogenu. *Nafta-Gaz*, 78(2): 97–109. DOI: 10.18668/NG.2022.02.02.
- Wencel K., Bieleń W., 2023. Ilościowa ocena i wydzielenie różnych form siarki w próbkach geologicznych wraz z zastosowaniem do badań pochodzenia związków siarki w systemach naftowych. *Nafta-Gaz*, 79(6): 371–384. DOI: 10.18668/NG.2023.06.01.

Nafta-Gaz 2025, nr 5, s. 325–333, DOI: 10.18668/NG.2025.05.03

Badania kamieni cementowych powstałych z zaczynów przeznaczonych do uszczelniania podziemnych magazynów wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów

Tests of cement stones derived from cement slurries for sealing casing in underground hydrogen storage in depleted hydrocarbon reservoirs

Marcin Rzepka, Miłosz Kędzierski

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule omówiono zagadnienia dotyczące technologii zaczynów i kamieni cementowych, które mogą być wykorzystane do uszczelniania rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru. Testy laboratoryjne prowadzone były dla dziesięciu receptur

cementowych. Do zaczynów wprowadzano różne dodatki modyfikujące (m.in. nanomateriały w postaci nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, lateks oraz środek polimerowy). Ponadto w skład zaczynów cementowych wchodziły domieszki odpieniające, upłynniające, antyfiltracyjne oraz opóźniacz czasu wiązania. Badania prowadzono w temperaturze 60°C w autoklawach ciśnieniowych, jak i w naczyniach deponowanych w ciśnieniu atmosferycznym. Do sporządzania receptur używano cementu wiertniczego klasy G. Określano parametry technologiczne stwardniałych zaczynów cementowych, tj. wytrzymałość na ściskanie, przyczepność do rur stalowych oraz porowatość. Zaczyny cementowe zaprezentowane w artykule miały gęstość z przedziału około 1840–1935 kg/m³. Spośród testowanych receptur najkorzystniejsze parametry technologiczne uzyskano dla próbki zawierającej w swym składzie 0,5% nano-Al₂O₃ (nanoglinu) oraz 20% mikrocementu. Kamień cementowy powstały po związaniu tego zaczynu cechował się niezwykle wysoką wytrzymałością mechaniczną. W warunkach cyklicznych zmian ciśnienia próbki kamienia osiągały wytrzymałość na ściskanie powyżej 55 MPa po 9 miesiącach hydratacji (te same próbki deponowane w ciśnieniu atmosferycznym uzyskały wytrzymałość powyżej 51 MPa). Przyczepność do rur stalowych próbek cementowych również była bardzo wysoka, dochodziła do 12 MPa. Omawiana receptura posiadała również najniższą porowatość spośród badanych próbek (jej porowatość po deponowaniu w autoklawie wyniosła 23,8%). Pory o najmniejszych rozmiarach (poniżej 100 nm) stanowiły zdecydowaną większość z ogólnej ilości porów występujących w matrycy cementowej (było to 94–95% ogólnej ilości porów). Bardzo dobre parametry technologiczne uzyskano również dla zaczynu zawierającego w składzie 0,5% nano-Al₂O₃ oraz 5% mikrocementu, a także zaczynu, w którego składzie znalazło się 0,3% nano-SiO₂ oraz 20% mikrocementu. Wytrzymałość na ściskanie i przyczepność do rur stalowych (dla stwardniałych zaczynów cementowych badanych w okresie od 28 dni do 9 miesięcy) wzrastały wraz z upływem czasu deponowania próbek. Zaczyny cementowe o najlepszych parametrach technologicznych, zawierające nanokomponenty w odpowiednio dobranych ilościach, będą mogły znaleźć zastosowanie podczas prac związanych z uszczelnianiem rur okładzinowych w otworach wierconych w celu magazynowania wodoru w szcherpanych złożach węglowodorów.

Słowa kluczowe: zaczyn cementowy, kamień cementowy, magazynowanie wodoru.

ABSTRACT: This article discusses issues related to the technology of cement slurries and cement stones that can be used to seal casing in underground hydrogen storage facilities. Laboratory tests were conducted for ten cement formulations. Various modifying additives were introduced into the slurries (including nanomaterials in the form of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, latex, and a polymer agent). In addition, the cement slurries contained defoaming, fluidizing and filtration control admixtures, as well as a setting time retardant. The tests were carried out at 60°C in pressure autoclaves and in containers stored at atmospheric pressure. Class G drilling cement was used to prepare the formulations. The technological parameters of hardened cement slurries were determined, namely compressive strength, adhesion to steel pipes, and porosity. The cement slurries presented in this article had densities ranging from approximately 1840 to 1935 kg/m³. Among the tested formulations, the most favorable technological parameters were obtained for the sample containing 0.5% nano-Al₂O₃ (nanoaluminum) and 20% microcement. The cement stone formed after setting this slurry was characterized by extremely high mechanical strength. Under conditions of cyclic pressure changes, stone samples achieved compressive strength above 55 MPa after 9 months of hydration (the same samples stored at atmospheric pressure achieved strength above 51 MPa). The adhesion of cement samples to steel pipes was also very high, reaching 12 MPa. This formulation also had the lowest porosity among the tested samples (its porosity after deposition in the autoclave was 23.8%). The smallest pores (below 100 nm) accounted for the vast majority of the total pore population in the cement matrix (94–95% of the total number of pores). Very good technological parameters were also obtained for the slurry containing 0.5% nano-Al₂O₃ and 5% microcement, as well as for the slurry containing 0.3% nano-SiO₂ and 20% microcement. The compressive strength and adhesion to steel pipes (for hardened cement slurries tested over a period of 28 days to 9 months) increased with the duration of sample deposition. Cement slurries with the best technological parameters, containing nanocomponents in appropriately selected amounts, may be used in operations related to sealing casing in wells drilled for hydrogen storage in depleted hydrocarbon reservoirs.

Key words: cement slurry, cement stone, hydrogen storage.

Literatura

- Aftab A., Hassanpouryouzband A., Martin A., Kendrick J.E., Thaysen E.M., Heinemann N., Utley J., Wilkinson M., Stuart Haszeldine R., Edlmann K., 2023. Geochemical integrity of wellbore cements during geological hydrogen storage. *Environmental Science and Technology Letters*, 10(7): 551–556. DOI: 10.1021/acs.estlett.3c00303.
- Al-Yaseri A., Fatah A., Zeng L., Al-Ramadhan A., Sarmadivaleh M., Xie Q., 2023. On hydrogen-cement reaction: investigation on well integrity during underground hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(91): 35610–35623. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.304.
- Bayanak M., Zarinabadi S., Shahbazi K., Azimi A., 2020. Reduction of fluid migration in well cement slurry using nanoparticles. *Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies*, 75(8): 67. DOI: 10.2516/ogst/2020044.
- Biricik I.H., Sarier N., 2014. Comparative Study of the Characteristics of Nano Silica-, Silica Fume- and Fly Ash – Incorporated Cement Mortars. *Materials Research*, 17(3): 570–582. DOI: 10.1590/S1516-14392014005000054.
- Dębińska E., Rzepka M., Kremieniowski M., 2016. Nanocząsteczki – nowa droga w kształtowaniu parametrów świeżych i stwardniałych zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 72(12): 1084–1091. DOI: 10.18668/NG.2016.12.11.
- Gaitero J.J., Campillo I., Guerrero A., 2008. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, 38(8–9): 1112–1118. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.021.
- Hadi H.A., Ameer H.A., 2017. Experimental Investigation of Nano Alumina and Nano Silica on Strength and Consistency of Oil Well Cement. *Journal of Engineering*, 23(12): 51–69. DOI: 10.31026/j.eng.2017.12.04.
- Labus K., Leśniak G., Cicha-Szot R., 2022. Geochemiczne modelowanie wpływu magazynowania wodoru na porowate skały zbiornikowe. [W:] Wyzwania dla sektora naftowego i gazowniczego w dobie transformacji energetycznej. *Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL 2022. Materiały konferencyjne. Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*, 201–208.
- Miziołek M., Filar B., Kwilosz T., 2022. Magazynowanie wodoru w szcherpanych złożach gazu ziemnego. *Nafta-Gaz*, 78(3): 219–239. DOI: 10.18668/NG.2022.03.06.
- Patil R., Deshpande A., 2012. Use of Nanomaterials in Cementing Applications. *SPE International Oilfield Nanotechnology Conference and Exhibition, Noordwijk, The Netherlands*. DOI: 10.2118/155607-MS.
- Rzepka M., Kędzierski M., 2019. Zaczyny cementowe z dodatkiem nanokomponentów do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych o głębokości końcowej około 1000–2000 metrów. *Nafta-Gaz*, 75(11): 674–682. DOI: 10.18668/NG.2019.11.02.
- Rzepka M., Kędzierski M., 2020. Możliwości zastosowania nanotlenku glinu w zaczynach cementowych przeznaczonych do uszczelniania rur okładzinowych w otworach wiertniczych. *Nafta-Gaz*, 76(1): 46–56. DOI: 10.18668/NG.2020.01.06.

- Rzepka M., Kędzierski M., 2023. Badania zaczynów cementowych przeznaczonych do uszczelniania kolumn rur okładzinowych w podziemnych magazynach wodoru w szcerpanych złożach węglowodorów. *Nafta-Gaz*, 79(4): 244–251. DOI: 10.18668/NG.2023.04.02.
- Such P., 2020. Magazynowanie wodoru w obiektach geologicznych. *Nafta-Gaz*, 76(11): 794–798. DOI: 10.18668/NG.2020.11.04.
- Tavares F., Rocha J.S., Calado V., 2013. Study of the Influence of Cement Slurry Composition in the Gas Migration. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference 2, Rio de Janeiro, Brazil*. DOI: 10.4043/24420-MS.
- Underground Sun Storage. Final Report Public, 2017, 172. <https://www.underground-sun-storage.at/fileadmin/bilder/03_NEU_SUNSTORAGE/Downloads/Underground_Sun.Storage_Publizierbar_Endbericht_English.pdf> (dostęp: 4.10.2024).
- Velayati A., Kazemzadeh E., Soltanian H., Tokhmechi B., 2015. Gas migration through cement slurries analysis: A comparative laboratory study. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 49(2): 281–288. DOI: 10.22059/ijmge.2015.56113.
- Zeng L., Sarmadivaleh M., Saeedi A., Chen Y., Zhong Z., Xie Q., 2023. Storage integrity during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs. *Earth-Science Reviews*, 247: 10462. DOI: 10.13140/RG.2.2.21039.82083.

Akty prawne i dokumenty normatywne

PN-EN ISO 10426-1:2009 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 1: Specyfikacja.

PN-EN ISO 10426-2:2003 Przemysł naftowy i gazowniczy – Cementy i materiały do cementowania otworów wiertniczych – Część 2: Badania cementów wiertniczych.

Nafta-Gaz 2025, nr 5, s. 334–341, DOI: 10.18668/NG.2025.05.04

Środek pochodzenia roślinnego do zastosowania w płuczkach wiertniczych przy wykonywaniu otworów geotermalnych

Plant-derived agent for use in drilling muds for geothermal well drilling

Grzegorz Zima, Sławomir Błaż, Bartłomiej Jasiński

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nowego rodzaju środka do płuczek wiertniczych. Badania te przeprowadzono na płuczkach o składach opartych na kompozycji środków pochodzenia naturalnego, takich jak zwiększające lepkość, regulujące filtrację i inhibujące hydratację skał. Opisane badania umożliwiły opracowanie składu płuczki nietoksycznej o właściwościach pozwalających na zastosowanie jej do odwiercenia otworu. Wykonano badania na płuczkach o różnym stopniu zmineralizowania i zawartości fazy stałej. Przeprowadzono również badania w kierunku opracowania płuczki wiertniczej charakteryzującej się skutecznym inhibitowaniem hydratacji skał przy zastosowaniu nietoksycznych środków. Uzyskane wyniki badań pozwoliły na dobór nowych środków chemicznych do płuczek wiertniczych. Przeprowadzone badania umożliwiły opracowanie skutecznego sposobu regulowania filtracji, parametrów reologicznych i właściwości inhibicyjnych płuczek wiertniczych podczas wiercenia otworów geotermalnych, gdzie występuje ryzyko skażenia wód. Wyniki badań otrzymane w proponowanej pracy przyczyniają się ponadto do poszerzenia zakresu materiałów stosowanych w technologii płuczkowej. W ramach opisanej pracy wykonano badania płuczek, w których składach zastosowano dodatek *Psyllium* pozyskanego z rośliny *Plantago ovata* (babka jajowata). Płuczki te w swoich składach zawierały również inne materiały i środki pochodzenia naturalnego. Jako koloid ochronny zastosowano skrobię kleikowaną, jako środek strukturotwórczy – ksantan, welan lub skleroglukan, inhibitor jonowy – KCl oraz blokator węglanowy. Następnie dla uzyskania poprawy inhibicyjnych właściwości płuczek wiertniczych wprowadzono do składu dodatek inhibitora polimerowego w postaci pochodnej alkoholu tłuszczowego. Dotychczas uzyskane wyniki badań wskazują na możliwość wdrożenia do praktyki przemysłowej nowego środka pozyskiwanego z materiału roślinnego do płuczek wiertniczych, szczególnie przeznaczonych do warunków, w których istnieje ryzyko skażenia wód.

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, *Psyllium*, biopolimery, analiza dyspersyjna, wiercenia geotermalne.

ABSTRACT: The article presents the results of laboratory tests of a new type of drilling fluid agent. These tests were conducted using mud formulations based on the compositions containing agents of natural origin, such as viscosifiers, filtration control agents, and rock hydration inhibitors. The described tests led to the development of a non-toxic fluid composition with properties suitable for use in well drilling. Tests were also carried out on muds with varying degrees of mineralization and solid phase content. Research was also carried out to develop a drilling mud with effective rock hydration inhibition, using non-toxic agents. The results enabled the selection of new chemical agents for drilling fluids. The study led to the development of an effective method for controlling filtration, rheological parameters, and inhibition properties of drilling fluids during geothermal well drilling, where there is a risk of water contamination. Moreover, the research results obtained in this study contribute to expanding the range of materials used in mud technology. In the described work, tests were carried out on drilling muds containing *Psyllium* derived from the *Plantago ovata* plant. These muds also contained other natural materials and agents. Starch was used as a filtration-reducing agent; xanthan, welan, or scleroglucan as a structure-forming agents; KCl as an ion inhibitor; and a calcium carbonate blocker. To improve the inhibitory properties of drilling muds, a polymer inhibitor in the form of a fatty alcohol derivative was added to the mud composition. The test results indicate the potential for introducing a new agent derived from plant material into industrial practice for drilling muds, particularly under conditions where there is a risk of water contamination.

Key words: drilling fluid, *Psyllium*, biopolymers, dispersion analysis, geothermal drilling.

Literatura

- Akbari I., Ghoreishi S.M., 2017. Generation of porous structure from basil seed mucilage via supercritical fluid assisted process for biomedical applications. *Pharmaceutical Sciences and Developmental Research*, 3(1): 30–35.
- Al-Hameedi A.T., Alkinani H.H., Dunn-Norman S., Alashwak N.A., Alshammari A.F., Alkhamis M.M., Albazzaz H.W., Mutar R.A., Alsaba M.T., 2019a. Environmentally friendly drilling fluid additives: can food waste products be used as thinners and fluid loss control agents for drilling fluid? *SPE Symposium: Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social Responsibility, Malaysia*. DOI: 10.2118/195410-MS.
- Al-Hameedi A.T., Alkinani H.H., Dunn-Norman S., Alshammari A.F., Mutar R., 2019b. Laboratory study of environmentally friendly drilling fluid additive to be exploited as a multifunctional bio-enhancer additive in water-based drilling fluid. *AADE Fluids Technical Conference and Exhibition, Denver*. AADE-19-NTCE-SPP-01.
- Behnamanhar H., Noorbakhsh S.S., Maghsoudloojaafari H., 2014. Environmentally Friendly Water-Based Drilling Fluid for Drilling of Water-Sensitive Formations. *Journal of Petroleum and Gas Exploration Research*, 4: 60–71. DOI: 10.14303/jpger.2014.018.
- Chen X., Gao X., Chen J., Liu Y., Song C., Liu W., Wan Y., Kong X., Guan Y., Qiu Z., Zhong H., Yang J., Cui L., 2022. Application of Psyllium Husk as a Friendly Filtrate Reducer for High-Temperature Water-Based Drilling Fluids. *ACS Omega*, 7(32): 27787–27797, DOI: 10.1021/acsomega.1c04999.
- de Oliveira V.A.V., dos Santos Alves K., da Silva-Junior A.A., Araújo R.M., Balaban R.C., Hilliou L., 2020. Testing carrageenans with different chemical structures for water-based drilling fluid application. *Journal of Molecular Liquids*, 299: 112139. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.112139.
- Gao X., Zhong H.-Y., Zhang X.-B., Chen A.-L., Qiu Z.-S., Huang W.-A., 2021. Application of sustainable basil seed as an eco-friendly multifunctional additive for water-based drilling fluids. *Petroleum Science*, 18: 1163–1181. DOI: 10.1016/j.petsci.2021.05.005.
- Guo Q., Cui S.W., Wang Q., Goff H.D., Smith A., 2009. Microstructure and rheological properties of psyllium polysaccharide gel. *Food Hydrocolloids*, 23: 1542–1547. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2008.10.012.
- Jasiński B., 2021. Analiza możliwości podwyższenia stabilności termicznej płuczek wiertniczych poprzez dobór środków chemicznych. *Nafta-Gaz*, 77(3): 152–163. DOI: 10.18668/NG.2021.03.02.
- Jasiński B., Uliasz M., Budak P., Majkrzak M., Kłyż Ł., 2022. Badania nad dobozem materiałów blokujących do tymczasowego uszczelnienia ściany otworu. *Nafta-Gaz*, 78(5): 358–374. DOI: 10.18668/NG.2022.05.04.
- Kaialy W., Emami P., Asare-Addo K., Shojae S., Nokhodchi A., 2014. Psyllium: a promising polymer for sustained release formulations in combination with HPMC polymers. *Pharmaceutical Development and Technology*, 19: 269–277. DOI: 10.3109/10837450.2013.775156.
- Okon A.N., Akpabio J.U., Tugwell K.W., 2020. Evaluating the locally sourced materials as fluid loss control additives in water-based drilling fluid. *Heliyon*, 6: e04091. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04091.
- Patel M.K., Tanna B., Gupta H., Mishra A., Jha B., 2019. Physicochemical, scavenging and anti-proliferative analyses of polysaccharides extracted from psyllium (*Plantago ovata* Forsk) husk and seeds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133: 190–201. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.04.062.
- Patel M.K., Tanna B., Mishra A., Jha B., 2018. Physicochemical characterization, antioxidant and anti-proliferative activities of a polysaccharide extracted from psyllium (*P. ovata*) leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118: 976–987. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.06.139.
- Salmachi A., Talemi P., Tooski Z.Y., 2016. Psyllium Husk in Water-Based Drilling Fluids: An Environmentally Friendly Viscosity and Filtration Agent. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE*. DOI: 10.2118/183308-MS.
- van Craeyveld V., Delcour J.A., Courtin C.M., 2009. Extractability and chemical and enzymic degradation of psyllium (*Plantago ovata* Forsk) seed husk arabinoxylans. *Food Chemistry*, 112: 812–819. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.06.035.
- Wei Z., Wang H., Chen X., Wang B., Rong Z., Wang B., Su B., Chen H., 2009. Time- and dose-dependent effect of psyllium on serum lipids in mild-to-moderate hypercholesterolemia: a meta-analysis of controlled clinical trials. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63: 821–827. DOI: 10.1038/ejcn.2008.49.
- Zhong H., Gao X., Zhang X., Chen A., Qiu Z., Kong X., Huang W., 2022. Minimizing the filtration loss of water-based drilling fluid with sustainable basil seed powder. *Petroleum*, 8(1): 39–52. DOI: 10.1016/j.petlm.2021.02.001.
- Zhou G., Qiu Z., Zhong H., Zhao X., Kong X., 2021. Study of Environmentally Friendly Wild Jujube Pit Powder as a Water-Based Drilling Fluid Additive. *ACS Omega*, 6(2): 1436–1444. DOI: 10.1021/acsomega.0c05108.

Nafta-Gaz 2025, nr 5, s. 342–354, DOI: 10.18668/NG.2025.05.05

Biówęgiel jako innowacyjny środek mostkujący w płuczkach wiertniczych

Biochar as an innovative bridging agent in drilling muds

Bartłomiej Jasiński, Grzegorz Zima, Sławomir Błaż

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Biowęgiel powstaje w procesie pirolizy w temperaturze 350–700°C przy ograniczonym dostępie powietrza z pozostałości biomasowych pochodzących z produkcji drzewnej, przetwórstwa owocowo-warzywnego czy produkcji rolnej. Do jego produkcji wykorzystuje się także wysegregowane biodegradowalne odpady komunalne czy też osady ściekowe. Z uwagi na właściwości fizyczne biowęgla, takie jak duża wytrzymałość oraz możliwość uzyskiwania różnych granulacji, przeprowadzono badania nad możliwością zastosowania tego materiału w technologii płuczkowej jako materiału blokującego. Zastosowanie w płuczce wiertniczej zmielonego biowęgla o odpowiednio dobranych rozmiarach ziaren może pozwolić na utworzenie na ścianie otworu wiertniczego szczelnego osadu, co z kolei może przyczynić się do ograniczenia inwazji filtratu z płuczki do strefy przyodwiertowej. W artykule zaprezentowano wyniki badań nad wpływem dodatku biowęgla o zróżnicowanych pod względem wielkości ziaren frakcjach na parametry technologiczne płuczek wiertniczych ze szczególnym uwzględnieniem filtracji. W pierwszej kolejności przeprowadzono dobór składu płuczki wiertniczej, której parametry reologiczne zapewnią

zawieszenie fazy stałej w postaci środków blokujących, tj. biowęgla oraz tradycyjnego blokatora węglanowego. Po opracowaniu płuczki bazowej jej skład modyfikowano poprzez dodatek różnych konfiguracji środków blokujących, ze względu na ich budowę chemiczną, jak i wielkość ziaren. Tak zmodyfikowane płuczki poddano badaniom właściwości technologicznych, takich jak: parametry reologiczne, filtracja, pH. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań w realizowanej pracy określono, które z badanych składów są najbardziej efektywne w obniżaniu filtracji płuczek wiertniczych.

Słowa kluczowe: biowęgiel, płuczka wiertnicza, materiał mostkujący, filtracja.

ABSTRACT: Biochar is produced by pyrolysis at 350–700°C under limited air supply from biomass derived from wood production, fruit and vegetable processing, or agricultural operations. Segregated biodegradable municipal waste or sewage sludge is also used in its production. Due to the physical properties of biochar, such as high strength and the possibility of obtaining various grain sizes, research has been conducted into the potential use of this material in drilling mud technology as a bridging agent. The use of ground biochar with appropriately sized grains in drilling mud may enable the formation of an impenetrable filter cake on the borehole wall, which, in turn, can help reduce the invasion of mud filtrate into the near-wellbore zone. This article presents the results of a study on the effect of adding biochar with different grain size fractions on the technological parameters of drilling muds, with particular emphasis on filtration. Initially, the composition of the drilling mud was selected to ensure rheological parameters that allow for the suspension of the solid phase in the form of bridging agents, i.e. biochar and carbonate blocker. Once the base mud was developed, its composition was modified by adding different configurations of bridging agents, taking into account their chemical structure and grain size. The modified muds were subjected to tests of technological properties, including rheological parameters, filtration, and pH. Based on the results of the study, the compositions most effective in reducing the filtration of drilling muds were identified.

Key words: biochar, drilling mud, bridging agent, filtration.

Literatura

- Aboelela D., Saleh H., Attia A.M., Elhenawy Y., Majozi T., Bassyouni M., 2023. Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*, 15: 11238. DOI: 10.3390/su151411238.
- Adel M., Ragab S., Noah A., 2014. Reduction of formation damage and fluid loss using nano-sized silica drilling fluids. *Petroleum Technology Development Journal: An International Journal*, 7(2): 75–88.
- Alvarez L.A., Cedeno M.D., Villon P.V., Pinoargote R.C., 2019. Design of a fluid for workover operations in the Gustavo Galindo Oilfield, Ecuador. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(11): 2118–2124.
- Best Drilling Chemicals. <<http://bdc.com.pl>> (dostęp: październik 2024).
- Biochar: A Sustainable Solution for Food Safety and Packaging. <<https://biochartoday.com/2024/01/24/biochar-a-sustainable-solution-for-food-safety-and-packaging/>> (dostęp: 12.10.2024).
- Bis Z., 2012. Biowęgiel – powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości. *Czysta Energia*, 6: 28–31.
- 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.
- Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R., 2011. Composition and properties of drilling and completion fluids. *Sixth Edition. Gulf Professional Publishing*.
- Contreras O., Hareland G., Husein M., Nygaard R., Al-Saba M., 2014. Application of in-house prepared nanoparticles as filtration control additive to reduce formation damage. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/168116-MS.
- Demirbas A., Arin G., 2002. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24: 471–482. DOI: 10.1080/00908310252889979.
- Dębińska E., 2015. Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki. *Nafta-Gaz*, 71(5): 290–300.
- Elkhilfi Z., Iftikhar J., Sarraf M., Ali B., Saleem M.H., Ibranshabib I., Bispo M.D., Meili L., Ercisli S., Torun Kayabasi E., 2023. Potential Role of Biochar on Capturing Soil Nutrients, Carbon Sequestration and Managing Environmental Challenges: A Review. *Sustainability*, 15: 2527. DOI: 10.3390/su15032527.
- Energy Glossary. <<http://www.glossary.oilfield.slb.com>> (dostęp: październik 2024).
- Giorcelli M., Khan A., Pugno N.M., 2019a. Biochar as a cheap and environmental friendly filler able to improve polymer mechanical properties. *Biomass Bioenergy*, 120: 219–223. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.036.
- Giorcelli M., Savi P., Khan A., Tagliaferro A., 2019b. Analysis of biochar with different pyrolysis temperatures used as filler in epoxy resin composites. *Biomass Bioenergy*, 122: 466–471. DOI: 10.1016/j.biombioe.
- Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W., 2001. The ‘Terra Preta’ phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1): 37–41.
- Ingle S.R., Kamble B.M., Patil V.S., 2024. Biochar: A comprehensive review of production, properties and applications. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8: 21–29. DOI: 10.33545/26174693.2024.v8.i1Sa.282.
- Jankiewicz B.J., Choma J., Jamiola D., Jaroniec M., 2010. Nanostruktury krzemionkowo-metaliczne. Otrzymywanie i modyfikacja nanocząstek krzemionkowych. *Wiadomości Chemiczne*, 64: 913–942.
- Jasiński B., 2018. Określenie dynamicznej filtracji płuczek wiertniczych w warunkach HPHT z użyciem nowatorskiej metody pomiarowej. *Nafta-Gaz*, 74(2): 85–95. DOI: 10.18668/NG.2018.02.02.
- Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1): 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.
- Jerzak W., Acha E., Li B., 2024. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis. *Energies*, 17: 5082. DOI: 10.3390/en17205082.
- Kalus K., Koziel J.A., Opaliński S., 2019. A Review of Biochar Properties and Their Utilization in Crop Agriculture and Livestock Production. *Applied Sciences*, 9: 3494. DOI: 10.3390/app9173494.
- Krzyszczak A., Dybowski M.P., Kończak M., Czech B., 2022. Low bioavailability of derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar obtained from different feedstock. *Environmental Research*, 214: 113787. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113787.
- Liu Q., Liu B., Ambus P., Zhang Y., Hansen V., Lin Z., Shen D., Liu G., Bei Q., Zhu J., 2015. Carbon footprint of rice production under biochar amendment – A case study in a Chinese rice cropping system. *GCB Bioenergy*, 8: 148–159. DOI: 10.1111/gcbb.12248.
- Manya J.J., 2012. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science & Technology*, 46: 7939–7954. DOI: 10.1021/s301029g.
- Medyńska-Juraszek A., 2016. Biowęgiel jako dodatek do gleb. *Soil Science Annual*, 67(3): 151–157. DOI: 10.1515/ssa-2016-0018.

- Mungan N., 1965. Permeability reduction through changes in pH and salinity. *Journal of Petroleum Technology*, 17(12): 1449–1453. DOI: 10.2118/1283-PA.
- Murawska K., Fastyn J., Drożdżyński A., 2021. Zastosowanie w sektorze przemysłowym biokarbonizatu otrzymywanego metodami przetwarzania biomasy. *Technologia i Jakość Wytwarzania*, 66: 185–197.
- Nan N., DeVallance D.B., 2017. Development of poly(vinyl alcohol)/wood-derived biochar composites for use in pressure sensor applications. *Journal of Material Science*, 52: 8247–8257. DOI: 10.1007/s10853-017-1040-7.
- Polski Serwis Płynów Wiertniczych. <<http://www.pspw-krosno.com.pl>> (dostęp: październik 2024).
- Ponmani S., Nagarajan R., Sangwai J.S., 2016. Effect of nanofluids of CuO and ZnO in polyethylene glycol and polyvinylpyrrolidone on the thermal, electrical, and filtration-loss properties of water-based drilling fluids. *SPE Journal*, 21(2): 405–415. DOI: 10.2118/178919-PA.
- Prochnow F.D., Cavali M., Dresch A.P., Belli I.M., Libardi N., Junior; de Castilhos A.B., Junior, 2024. Biochar: From Laboratory to Industry Scale – An Overview of Scientific and Industrial Advances. *Opportunities in the Brazilian Context and Contributions to Sustainable Development. Processes*, 12: 1006. DOI: 10.3390/pr12051006.
- Raczkowski J., Półchłopek T., 1998. Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych. *Prace Instytutu Górnictwa Naftowego i Gazownictwa*, 95: 1–319.
- Rahman S.S., Rahman M.M., Khan F.A., 1995. Response of low-permeability, illitic sand-stone to drilling and completion fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 12(4): 309–322. DOI: 10.1016/0920-4105(94)00052-6.
- Salih A.H., Bilgesu H., 2017. Investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids using various anionic nanoparticles. *SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California*. DOI: 10.2118/185638-MS.
- Salih A.H., Elshehabi T.A., Bilgesu H.I., 2016. Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids. *SPE Eastern Regional Meeting, Canton, Ohio, USA*. DOI: 10.2118/184067-MS.
- Sharma T., Hakeem I.G., Gupta A.B., Joshi J., Shah K., Vuppalaadiyam A.K., Sharma A., 2024. Parametric influence of process conditions on thermochemical techniques for biochar production: A state-of-the-art review. *Journal of the Energy Institute*, 113: 101559. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101559.
- Shon C.S., Mukashev T., Lee D., 2019. Can common reed fiber become an effective construction material? Physical, mechanical, and thermal properties of mortar mixture containing common reed fiber. *Sustainability*, 11(3): 903. DOI: 10.3390/su11030903.
- Sohi S.P., Krull R., Lopez-Capel E., Bol R., 2010. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy*, 105: 47–82. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)05002-9.
- Stec M., 2017. Opracowanie nowych receptur płuczek mrówczanowych w aspekcie ograniczenia uszkodzenia strefy przyodwiertowej. Rozprawa doktorska. *Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie*.
- Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P., 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 467–481. DOI: 10.1016/J.RSER.2015.10.122.
- Uliasz M., 2021. Ciecze robocze – ich właściwości technologiczne i rola w procesie rekonstrukcji odwiertów. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 235: 1–160. DOI: 10.18668/PN2021.235.
- Wang L., Chen S.S., Tsang D.C.W., 2016. Recycling contaminated wood into eco-friendly particleboard using green cement and carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*, 137: 861–870. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.180.
- Wykorzystanie paliw z odpadów, biomasy oraz osadów ściekowych w ciepłownictwie. <<https://nowa-energia.com.pl/2022/09/30/wykorzystanie-paliw-z-odpadow-biomasy-oraz-osadow-sciekowych-w-cieplownictwie/>> (dostęp: 10.10.2024).
- Yadav R., Ramakrishna W., 2023. Biochar as an Environment-Friendly Alternative for Multiple Applications. *Sustainability*, 15: 13421. DOI: 10.3390/su151813421.
- Zhang Y., He M., Wang L., 2022. Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar*, 4: 59. DOI: 10.1007/s42773-022-00182-x.
- Zima G., 2017. Analiza wpływu nanomateriałów na właściwości osadu filtracyjnego. *Nafta-Gaz*, 73(5): 312–320. DOI: 10.18668/NG.2017.05.03.

Nafta-Gaz 2025, no. 5, pp. 355–358, DOI: 10.18668/NG.2025.05.06

Determination of hydraulic fracturing pressure during drilling by an analytical method

Wyznaczanie ciśnienia szczelinowania hydraulicznego podczas wiercenia metodą analityczną

Yusif A. Orujo

Azerbaijan State Oil and Industry University

ABSTRACT: As well depth increases during drilling, the likelihood of various complications rises. These complications include drilling fluid loss, gas-oil-water influxes, wellbore stability issues, and pipe sticking. If appropriate preventive and corrective measures are not implemented, many of these complications may escalate into accidents. One such complication arising during well drilling is hydraulic fracturing of the formation. Hydraulic fracturing pressure is the pressure at which the integrity of the rock in the wellbore walls is compromised, leading to the formation of artificial fractures. Hydraulic fracturing during drilling is highly undesirable, as it results in the loss of drilling fluid into the surrounding formation. Hydraulic fracturing pressure depends on formation pressure, the natural fracturing of the rock, pore pressure, and the permeability of the rock and the fracturing fluid. As well depth increases, hydraulic fracturing pressure also increases and approaches formation pressure. Accurate determination of hydraulic fracturing pressure is therefore essential. The proposed method for determining a formation's hydraulic fracturing pressure is economically advantageous. This research paper presents a method for determining hydraulic fracturing pressure based on the energy condition of destruction, taking into account the mechanical properties of the rock and formation pressure.

Key words: well drilling, bottom-hole pressure, hydraulic fracturing pressure, hydrostatic head, free fall acceleration, energy condition of destruction, back pressure at the wellhead, stress state.

STRESZCZENIE: Wraz ze wzrostem głębokości odwiertu wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia różnych komplikacji, takich jak ubytki płuczki wiertniczej, dopływy gazu, ropy lub wody, problemy ze stabilnością odwiertu oraz zakleszczenie przewodu wiertniczego. Brak wdrożenia odpowiednich środków zapobiegawczych i naprawczych może skutkować przerodzeniem się wielu z tych komplikacji w wypadki. Jedną z takich trudności pojawiających się podczas wiercenia otworów jest szczelinowanie hydrauliczne skały. Ciśnienie szczelinowania hydraulicznego to ciśnienie, przy którym dochodzi do osłabienia ciągłości skał w ścianach odwiertu, co prowadzi do powstawania sztucznych szczelin. Szczelinowanie hydrauliczne podczas wiercenia jest zjawiskiem wysoce niepożądanym, ponieważ powoduje wyciek płynu wiertniczego do otaczającej formacji. Ciśnienie szczelinowania hydraulicznego zależy od ciśnienia złożowego, obecności naturalnych spękań w skałach, ciśnienia porowego, przepuszczalności skały oraz rodzaju płynu szczelinującego. Wraz ze wzrostem głębokości odwiertu, ciśnienie szczelinowania hydraulicznego również wzrasta i zbliża się do ciśnienia złożowego. Dlatego tak istotne jest precyzyjne określenie ciśnienia szczelinowania hydraulicznego. Proponowana metoda wyznaczania ciśnienia szczelinowania hydraulicznego formacji jest korzystna ekonomicznie. W niniejszej pracy zaprezentowano metodę wyznaczania ciśnienia szczelinowania hydraulicznego w oparciu o kryterium energetyczne zniszczenia, uwzględniając właściwości mechaniczne skały oraz ciśnienie złożowe.

Słowa kluczowe: wiercenie otworu, ciśnienie przy dnie odwiertu, ciśnienie szczelinowania hydraulicznego, słup hydrostatyczny, przyspieszenie swobodnego spadania, kryterium energetyczne zniszczenia, przeciwcisnienie na głowicy odwiertu, stan naprężenia.

References

- Faergstad I. [Ed.], 2016. The Defining Series: *Formation Damage*. *Oilfield Review*, Schlumberger: <<https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/defining-formation-damage.pdf>>
- Koshelev V.N., 2004. General principles of inhibition of clay rocks and clay-filled formations. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea*, 1: 13–15.
- Ludvine L., LaFuenta M., Jellison M., Mechecourt P., Pixton D., Flores V., Howard T., Smith T., Mfoulou Y., 2012. The IADC Drilling Manual. *Published by International Association of Drilling Contractors, Houston, Texas, USA*.
- Ludvine L., LaFuenta M., Jellison M., Mechecourt P., Pixton D., Flores V., Howard T., Smith T., Mfoulou Y., 2014. The IADC Drilling Manual. *Published by International Association of Drilling Contractors, Houston, Texas, USA*.
- Marbun B., Somawijaya A., Novrianto A.R., Hasna H., Anshari M.R., 2016. Study of Prevention and Mitigation of Stuck Pipe. *41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California*.
- Orujov Y.A., Abbasov S.H., Abasova S.M., 2024. The influence of rock heterogeneity of the well wall. *Nafta-Gaz*, 80(9): 566–570. DOI: 10.18668/NG.2024.09.04.

Nafta-Gaz 2025, no. 5, pp. 359–369, DOI: 10.18668/NG.2025.05.07

Modeling, algorithmization, and solution of the optimal control problem for the ethylene production complex under conditions of incomplete information

Modelowanie, algorytmizacja i rozwiązanie problemu sterowania optymalnego dla kompleksu produkcyjnego etylenu w warunkach niepełnych informacji

Elchin Melikov

Azerbaijan State Oil and Industry University

ABSTRACT: As a result of a comprehensive study of the technological units in the multidimensional and multi-connected gas fractionation subsystem of the EP-300 large-scale ethylene and ethane production complex, a generalized formulation of the optimization problem for a sequentially connected block of technological apparatus – including elements with fuzzy described states – was developed. Specifically, a mathematical formulation of the optimization problem for a technological complex for commercial ethylene production under conditions of incomplete information was formulated. Statistical models were constructed that link output flows with the quality indicators of the input flow, loads, and operating parameters. The necessity of constructing fuzzy regression models for the selective hydrogenation reactor of acetylene in an ethane-ethylene fraction and for the ethylene fractionation column is demonstrated due to the lack of information for their identification. For this purpose, the fuzzy regression method, the $\tilde{E}$ – D-estimation method, is proposed. As a result, a multidimensional nonlinear mathematical programming problem with a fuzzy objective function and some fuzzy constraints is obtained. To solve this problem, a transition to its clear deterministic analog is performed. For this purpose, the present article applies a universal method for solving mathematical programming problems with fuzzy parameters – namely, the method of (L-R)-representation of fuzzy numbers. The resulting multi-criteria nonlinear vector optimization problem concerning the operation of the technological complex for commercial ethylene production under conditions of incomplete information is solved using established vector optimization methods, particularly the methods of rigid and flexible priorities with two different weights. It is shown that solving the fuzzy problem using any of the proposed multi-criteria optimization methods yields in the production of commercial ethylene compared to solving the corresponding problem with a clear objective function.

Key words: technological complex, commercial ethylene, optimal control, hydrogenation reactor, vector optimization, mathematical model.

STRESZCZENIE: W wyniku kompleksowego badania jednostek technologicznych w wielowymiarowym i wieloetapowym podsystemie frakcjonowania gazu w wielkoskalowym kompleksie produkcji etyleny i etanu EP-300, opracowano uogólnione sformułowanie problemu optymalizacji dla sekwencyjnie połączonego bloku aparatury technologicznej – w tym elementów o stanach opisanych w sposób nieprecyzyjny. W szczególności sformułowano matematyczny opis problemu optymalizacji dla kompleksu technologicznego produkującego komercyjny etylen w warunkach niepełnych informacji. Skonstruowano modele statystyczne, które łączą strumienie wyjściowe ze wskaźnikami jakościowymi strumienia wejściowego, obciążeniami i parametrami eksploatacyjnymi. Wykazano konieczność skonstruowania modeli regresji rozmytej dla reaktora selektywnego uwodornienia acetyleny we frakcji etanowo-etylenowej oraz dla kolumny frakcjonowania etyleny ze względu na brak informacji do ich identyfikacji. W tym celu zaproponowano metodę regresji rozmytej, a konkretnie metodę estymacji $\tilde{E} - D$. W rezultacie otrzymano wielowymiarowy, nieliniowy problem programowania matematycznego z rozmytą funkcją celu i pewnymi rozmytymi ograniczeniami. W celu jego rozwiązania dokonano przejścia do jednoznacznego, deterministycznego odpowiednika. W tym celu w niniejszym artykule zastosowano uniwersalną metodę rozwiązywania problemów programowania matematycznego z parametrami rozmytymi, a mianowicie metodę reprezentacji (L-R) liczb rozmytych. Ostatecznie wielokryterialny problem wektorowej optymalizacji nieliniowej dotyczący funkcjonowania kompleksu technologicznego produkującego komercyjny etylen w warunkach niepełnej informacji rozwiązano przy użyciu znanych metod optymalizacji wektorowej, w szczególności metod sztywnych i elastycznych priorytetów z zastosowaniem dwóch różnych wag. Wykazano, że rozwiązanie problemu rozmytego przy użyciu dowolnej z proponowanych metod optymalizacji wielokryterialnej prowadzi do poprawy wyników produkcji etyleny w porównaniu z rozwiązaniem odpowiadającego mu problemu z jednoznaczną funkcją celu.

Słowa kluczowe: kompleks technologiczny, etylen komercyjny, sterowanie optymalne, reaktor uwodornienia, optymalizacja wektorowa, model matematyczny.

References

- Dubois D., Prade H., 1979. Fuzzy real algebra: some results. *Fuzzy Sets and Systems*, 2(4): 327–348.
- Gubitoso F., Pinto J., 2007. A planning model for the optimal production of a real-world ethylene plant. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(11): 1141–1150. DOI: 10.1016/j.cep.2007.02.022.
- Ibragimov I.A., Efendiyev I.R., Kopyyskiy V.T., Melikov E.A., 1991. Design principles of self-learning automatic-control systems for complex technological processes under conditions of information deficiency. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 320(6): 1424–1427.
- Melikov E.A., 2018. Principles of catalytic process control in fuzzy conditions. *Materials of VIII International scientific and practical conference ("Readings of A.I. Bulatov")*, Publishing House – South, LLC, Russian Federation, Krasnodar, 5: 176–178.
- Melikov E.A., 2020. Principles of optimizing the control of propylene purification process from acetylene derivatives. *Proceedings of the 7th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, Baku, Azerbaijan*, 2: 272–275.
- Melikov E.A., Ibrahimli M., 2024. Control of the catalytic process with self-learning. *Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions (PAHTEI)*, 26(1): 59–65. DOI: 10.36962/PAHTEI147012024-59.
- Melikov E.A., Magerramova T.M., Safarova A.A., 2023. Logical–linguistic model for reactor cleaning from impurities. [In:] Aliev R.A., Kacprzyk J., Pedrycz W., Jamshidi M., Babanlı M.B., Sadikoglu F. (eds.), *15th International Conference on Applications of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools – ICAFS-2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer Cham*, 610: 321–329. DOI: 10.1007/978-3-031-25252-5_44.
- Merdanov E., Melikov E.A., 2023. Simulation of a reactor for the selective hydrogenation of acetylene-containing impurities. *Polish Journal of Science*, 59: 116–118. DOI: 10.5281/zenodo.7638458.
- Pisarenko E.V., Mazurenko A.A., Pisarenko V.N., 2016. Process optimization of ethylene purification in ethane-ethylene fraction of pyrolysis gas. *Advances in Chemistry and Chemical Technology: Collection of Scientific Works*, 30(4): 80–81.
- Sabri N.A., 2014. Modelling and Optimization of Sequencing of Processes for Ethylene Production. *Engineering, Chemistry*, 13526.
- Samedov F.A., Morozov A.Y., Samoilov N.A., Prosochkina T.R., 2019. Mathematical modeling of the unsteady hydrocarbon pyrolysis process. *Petroleum Chemistry*, 59(2): 151–159. DOI: 10.1134/S0028242119020138.
- Sardarova I.Z., Melikov E.A., Maharramova T.M., 2024. Fuzzy control algorithm for one class of technological complexes. *Proceedings of the 9th International Conference on Control and Optimization with Industrial Applications, COIA-2024, Istanbul, Türkiye*, 119–122.
- Tanaka H., Uejima S., Asai K., 1982. Linear Regression Analysis with Fuzzy Model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 12, 6: 903–907. DOI: 10.1109/TSMC.1982.4308925.
- Tovbin Y.K., 2023. Simulation Methods to Model Chemical Processes at Elevated Pressures and the Theory of Non-ideal Reaction Systems. *Teoretičeskie osnovy himičeskoj tehnologii*, 57(6): 736–755. DOI: 10.31857/S0040357123060192.
- Wang Z-Y, Li S-N., 1990. Fuzzy linear regression analysis of fuzzy valued variables. *Fuzzy Sets and Systems*, 36: 125–136.