

ABSTRACT AND REFERENCES

TECHNOLOGY ORGANIC AND INORGANIC SUBSTANCES

DOI 10.15587/1729-4061.2025.331134

ESTIMATING THE INFLUENCE OF POLYORGANOSILOXANES ON THE PROPERTIES OF FIRE-RETARDANT HALOGEN-FREE POLYMER COMPOSITIONS FOR CABLE ARTICLES (p. 6–14)

Volodymyr Zolotaryov

PJSC «YUZHicable WORKS», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3886-4993>

Olena Chulieieva

PJSC «YUZHicable WORKS», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7310-0788>

Taras Antonets

PJSC «YUZHicable WORKS», Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2388-2252>

The object of this study is the processes of supramolecular structure formation and the thermophysical, rheological, physical-mechanical, and electrophysical properties of halogen-free fire-resistant polymer compositions. Aluminum oxide trihydrate is used as a flame retardant. The effect of the flame-retardant filler becomes noticeable only with a significant filling (60%), when the rheological and operational properties of polymer compositions deteriorate. The use of polyorganosiloxanes makes it possible to reduce the negative impact of the filler on the thermophysical, rheological, physical-mechanical, and electrophysical properties. Therefore, the effective use of polyorganosiloxanes to regulate the properties of fire-resistant polymer compositions is an urgent task under consideration.

Fire-retardant halogen-free polymer compositions were studied. The content of the flame-retardant filler is 60%. The samples under study additionally contain polyorganosiloxanes, which were used as modifiers for the directed regulation of properties of fire-retardant compositions. The effect of polyorganosiloxanes on the formation of the supramolecular structure of filled polymer compositions for cable articles has been established. Due to this, the phase transition temperatures increase by 2–4°C, the temperature of the beginning of decomposition by 12–17°C and the end of decomposition by 5–6°C. The effect of the influence of polyorganosiloxanes with a viscosity of 50–500 Pa·s on a decrease in the melt viscosity of fire-retardant polymer compositions from 5.342 to 4.330 Pa·s with an increase in the shear rate from 20 to 60 s⁻¹ has been shown.

The results make it possible to use polyorganosiloxanes for targeted regulation of rheological and operational characteristics of fire-resistant polymer compositions for the manufacture of insulation and sheath of power cables.

Keywords: cable articles, fire-resistant polymer compositions, polyorganosiloxanes, rheological properties, thermophysical properties.

References

- Meinier, R., Sonnier, R., Zavaleta, P., Suard, S., Ferry, L. (2018). Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter. *Journal of Hazardous Materials*, 342, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.027>
- Gupta, R., Singh, M. K., Rangappa, S. M., Siengchin, S., Dhakal, H. N., Zafar, S. (2024). Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. *Heliyon*, 10 (21), e39662. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39662>
- Semenyuk, K. A. (2017). Tehnologicheskie aspekty v reshenii voprosa snizheniya goryuchesti kompozicionnykh materialov. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka. Materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsiyi kursantiv i studentiv. Cherkasy*, 92–93. Available at: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2017/2.pdf>
- Lu, S.-Y., Hamerton, I. (2002). Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers. *Progress in Polymer Science*, 27 (8), 1661–1712. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(02\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(02)00018-7)
- Sonnier, R., Viretto, A., Dumazert, L., Longerey, M., Buonomo, S., Gallard, B. et al. (2016). Fire retardant benefits of combining aluminum hydroxide and silica in ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA). *Polymer Degradation and Stability*, 128, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.030>
- Nazir, R., Gooneie, A., Lehner, S., Jovic, M., Rupper, P., Ott, N. et al. (2021). Alkyl sulfone bridged phosphorus flame-retardants for polypropylene. *Materials & Design*, 200, 109459. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109459>
- Chulieieva, O. V., Plavan, V. P. (2019). Modeliuvannia teplofizychnykh vlastyivostei napovniuvachiv pozhezhobezpechnykh polimernykh kompozytsiy. *Materialy IX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsiyi «Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system»*. Vol. 2. Chernihiv, 19–21. Available at: <https://drive.google.com/file/d/107ctOF8LwQWSF8W2yECrXrQm9etpkMF5/view>
- Ye, L., Miao, Y., Yan, H., Li, Z., Zhou, Y., Liu, J., Liu, H. (2013). The synergistic effects of boroxo siloxanes with magnesium hydroxide in halogen-free flame retardant EVA/MH blends. *Polymer Degradation and Stability*, 98 (4), 868–874. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.01.001>
- VISCOSPEED in HFFR compounds: Big impact with minimal dosage (2020). *Compounding World*. Available at: https://viscospeed.com/wp-content/uploads/2021/05/Compounding_World_Article_VISCO-SPEED.pdf
- El Omari, Y., Yousfi, M., Duchet-Rumeau, J., Maazouz, A. (2023). Interfacial rheology for probing the in-situ chemical reaction at interfaces of molten polymer systems. *Materials Today Communications*, 35, 105640. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105640>
- Xu, J., Chen, C., Li, Y., Zhou, H., Hao, X., Ou, R., Wang, Q. (2024). Optimizing the rheological and mechanical properties of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites through binary alloy matrix strategy. *Composites Science and Technology*, 256, 110740. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110740>
- Bashirgonbadi, A., Delva, L., Caron, E., Marchesini, F. H., Van Geem, K. M., Ragaert, K. (2024). The interplay between macromolecular structure, rheology, processing condition, and morphology for (linear) low density polyethylenes in film blowing. *Polymer*, 290, 126566. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126566>
- Cardelli, A., Ruggeri, G., Calderisi, M., Lednev, O., Cardelli, C., Tomba, E. (2012). Effects of poly(dimethylsiloxane) and inorganic fillers in halogen free flame retardant poly(ethylene-co-vinyl acetate) compound: A chemometric approach. *Polymer Degradation and Stability*, 97 (12), 2536–2544. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.02.018>
- Rusanova, S., Stoyanov, O., Sofina, S., Zaikov, G. (2013). IR-Study of Silanol Modification of Ethylene Copolymers. *Chemistry & Chemical Technology*, 7 (1), 23–26. <https://doi.org/10.23939/chcht07.01.023>
- Rueda, M. M., Auscher, M.-C., Fulchiron, R., Périé, T., Martin, G., Sonntag, P., Cassagnau, P. (2017). Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. *Progress in Polymer Science*, 66, 22–53. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007>

16. Adesina, A. A., Nasser, M. N., Teixeira, P., Hilliou, L., Covas, J. A., Hussein, I. A. (2015). Rheology of organoclay assisted extrusion of HDPE using Particle Image Velocimetry. *Chemical Engineering Research and Design*, 100, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.018>
17. Faker, M., Razavi Aghjeh, M. K., Ghaffari, M., Seyyedi, S. A. (2008). Rheology, morphology and mechanical properties of polyethylene/ethylene vinyl acetate copolymer (PE/EVA) blends. *European Polymer Journal*, 44 (6), 1834–1842. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.04.002>
18. Durmus, A., Kasgoz, A., Macosko, C. W. (2007). Linear low density polyethylene (LLDPE)/clay nanocomposites. Part I: Structural characterization and quantifying clay dispersion by melt rheology. *Polymer*, 48 (15), 4492–4502. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.05.074>
19. Münstedt, H. (2021). Rheological Measurements and Structural Analysis of Polymeric Materials. *Polymers*, 13 (7), 1123. <https://doi.org/10.3390/polym13071123>
20. Münstedt, H. (2016). Rheological and Morphological Properties of Dispersed Polymeric Materials. *Rheological and Morphological Properties of Dispersed Polymeric Materials, I–XVI*. <https://doi.org/10.3139/9781569906088.fm>
21. Agassant, J.-F., Avenas, P., Carreau, P. J., Vergnes, B., Vincent, M. (2017). *Polymer Processing*. Verlag: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9781569906064>
22. Zhou, C., Yi, H., Dong, X. (2017). Review of recent research towards power cable life cycle management. *High Voltage*, 2 (3), 179–187. <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0037>
23. Karaki, A., Hammoud, A., Masad, E., Khraisheh, M., Abdala, A., Ouederni, M. (2024). A review on material extrusion (MEX) of polyethylene - Challenges, opportunities, and future prospects. *Polymer*, 307, 127333. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127333>
24. Morsalin, S., Phung, B. T. (2020). Dielectric response study of service-aged XLPE cable based on polarisation and depolarisation current method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 27 (1), 58–66. <https://doi.org/10.1109/tdel.2019.008306>
25. Morsalin, S., Phung, T. B., Danikas, M., Mawad, D. (2019). Diagnostic challenges in dielectric loss assessment and interpretation: a review. *IET Science, Measurement & Technology*, 13 (6), 767–782. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5597>
26. Holoborodko, L. V., Zhurenko, A. Yu., Kutsomelia, Yu. Yu., Litsman, Yu. V. (2007). Poliorhanosyloksany i materialy na yikh osnovi. *Materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii vykladachiv, spivrobnykiv, aspirantiv i studentiv inzhenernoho fakultetu*. Sumy, 10–11. Available at: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/19009>
27. Schramm, G. (1994). *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Gebrueder Haake, 290.
28. Kuzyaev, I. M., Sviderskiy, V. A., Petuhov, A. D. (2016). Modelirovanie ekstruzii i ekstruderov pri pererabotke polimerov. Ch. 1. Kyiv: NTUU«KPI», 414. Available at: <https://ela.kpi.ua/items/8bd0c55e-f776-41a9-9682-9eccc574c3fd>
29. Chulieieva, O., Zolotaryov, V. (2018). Regulation of electrophysical properties of fireproof polymer compositions filled with hydromagnesite for cable products. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (46)), 21–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.161856>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.330564

MODIFICATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE EXTRUDATE BY ENRICHMENT WITH FOOD FIBERS AND LIPIDS (p. 15–21)

Ihor Petik

Ukrainian Scientific Research Institute of Oils and Fats of the
National Academy of Agricultural Sciences of Ukraine,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1630-4215>

Serhii Stankevych

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8300-2591>

Volodymyr Panasenko

Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3928-9473>

Kostiantyn Siedyk

A Separate Structural Unit «Kharkiv Trade and Economic Vocational
College State University of Trade and Economics», Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5720-8430>

Maryna Ponomarova

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8463-821X>

Olesia Filenko

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0277-6633>

Iryna Balandina

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3964-4447>

Anton Ryabev

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2220-3282>

Svitlana Zolotarova

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7275-5603>

Viktoriia Novikova

State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0403-3590>

The object of the study is the composition of the feed extrudate modified by the addition of dietary fiber and lipid sources. The problem to be solved is the optimization of the structural and mechanical properties of the feed extrudate through the rationalization of the addition of components. Regression models have been developed to accurately predict the ratio of modifying additives that provides the specified water resistance and swelling index. It has been experimentally established that the rational ratio of components – $4.0 \pm 0.1\%$ chicken fat and $6.0 \pm 0.2\%$ wheat bran – provides water resistance of 190.0 ± 7.5 min, swelling index of $55.0 \pm 2.1\%$ and porosity of $60.0 \pm 2.2\%$. The results are achieved due to the complex interaction between the components, where lipids form a hydrophobic barrier, and dietary fibers create a stable porous matrix, which is confirmed by regression models. Comparative analysis with a commercial analogue (“Roycher™ AQUA Carp Finish”) revealed competitive advantages of the developed extrudate: lower cost (310 USD/t versus 1050 USD/t). Structural and mechanical characteristics of the studied extrudates were similar. This makes the developed composition promising for industrial application. The results obtained are explained by the interaction of the protein-starch matrix with lipids and dietary fibers during extrusion, which is confirmed by statistically significant models. A distinctive feature of the study is a comprehensive approach to rationalizing the composition of the extrudate, which combines technological efficiency with economic feasibility. The extrudate of the developed composition can be used in the production of feed for aquaculture. Further research should be aimed at studying the long-term stability of product properties and adapting the technology to industrial conditions.

Keywords: extrudate, dietary fiber, chicken fat, protein-starch matrix, structural and mechanical properties, swelling index.

References

- Aschemann-Witzel, J., Gantriis, R. F., Fraga, P., Perez-Cueto, F. J. A. (2020). Plant-based food and protein trend from a business perspective: markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61 (18), 3119–3128. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793730>
- Petik, I., Litvinenko, O., Kalyina, V., Ilinska, O., Raiko, V., Filenko, O. et al. (2023). Development of extruded animal feed based on fat and oil industry waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (122)), 112–120. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275509>
- Singh, J. P., Kaur, A., Singh, B., Singh, N., Singh, B. (2019). Physico-chemical evaluation of corn extrudates containing varying buckwheat flour levels prepared at various extrusion temperatures. *Journal of Food Science and Technology*, 56 (4), 2205–2212. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03703-y>
- Bochkarev, S., Chaika, T., Stankevych, S., Zabrodina, I., Balandina, I., Obolentseva, L. et al. (2024). Development of an extruded system with enhanced content of alpha-linolenic polyunsaturated fatty acid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (11 (132)), 15–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315246>
- Stankevych, S., Gorbunov, K., Zabrodina, I., Popov, M., Kalyina, V., Novozhylova, T. et al. (2024). Identification of the oxidation and hydrolysis products content influence on the rapeseed oil oxidation induction period. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (6 (130)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308907>
- Belinska, A., Ryshchenko, I., Bliznjuk, O., Masalitina, N., Siedyk, K., Zolotarova, S. et al. (2024). Development of a method for inactivating lipoxygenases in linseed using chemical reagents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (6 (130)), 14–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309079>
- Siddiqui, S. A., Kamran, F., Stankov, S., Rathod, N. B., Teixeira-Costa, B. E., Fidan, H. et al. (2024). Unveiling the Diversity of Non Conventional Proteins - From Sources, Extraction, Technofunctionality, Nutraceutical Potential to Advancement in Food Applications - A Systematic Review. *Waste and Biomass Valorization*, 16 (1), 29–51. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02614-0>
- Papchenko, V., Stepankova, G., Karatieieva, O., Balandina, I., Shapovalenko, D., Kariuk, A., Statyva, Y., Bakumenko, O., Melnyk, A., Horbas, S. (2023). Determining the effect of raw materials moisture and lipid content on the technological properties of the extruded protein-fat system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (11 (124)), 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285132>
- Luthra, A., Kajla, P., Chhikara, N., Khatkar, B. S., Malik, M. (2025). Food and Dairy By-products Utilization. *Engineering Solutions for Sustainable Food and Dairy Production*, 331–344. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75834-8_12
- Gutierrez-Montiel, E., Ávila-Orta, C. A., Cabrera-Canales, Z. E., Covarrubias-Gordillo, C. A., Reyes-Rodríguez, P. Y., Rodríguez-Velázquez, J. G. et al. (2023). Effect of oxidized, maleate and dual chemical modification through extrusion on thermoplastic starch properties. *Polymer Bulletin*, 81 (3), 2525–2544. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04857-8>
- Wang, B., Dong, Y., Fang, Y., Gao, W., Kang, X., Liu, P. et al. (2022). Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion. *Food Chemistry*, 368, 130804. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130804>
- Gomes, K. S., Berwian, G. F., Batistella, V. M. C., Bender, L. E., Reinehr, C. O., Colla, L. M. (2022). Nutritional and Technological Aspects of the Production of Proteic Extruded Snacks Added of Novel Raw Materials. *Food and Bioprocess Technology*, 16 (2), 247–267. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02887-0>
- Cervantes-Ramírez, J. E., Cabrera-Ramírez, A. H., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., Reyes-Vega, M. de la L., Ramírez-Jiménez, A. K. et al. (2020). Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. *Carbohydrate Polymers*, 246, 116555. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116555>
- Cabrera-Ramírez, A. H., Cervantes-Ramírez, E., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., Reyes-Vega, M. de la L., Gaytán-Martínez, M. (2021). Effect of Extrusion on the Crystalline Structure of Starch during RS5 Formation. *Polysaccharides*, 2 (1), 187–201. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2010013>
- Qi, M., Jiang, L., Song, J., Han, F., Xu, M., Li, Y. et al. (2024). Investigating the Impact of Moisture Levels on Structural Alterations and Physicochemical Properties of Cassava Flour through Extrusion: A Comprehensive Study. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79 (4), 909–914. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01237-z>
- Tiwari, A., Jha, S. K. (2017). Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. *International Journal of Food Studies*, 6 (1), 113–128. <https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10>
- Banjac, V., Vukmirović, Đ., Pezo, L., Draganovic, V., Đuragić, O., Čolović, R. (2021). Impact of variability in protein content of sunflower meal on the extrusion process and physical quality of the extruded salmonid feed. *Journal of Food Process Engineering*, 44 (3). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13640>
- Petik, I., Litvinenko, O., Stankevych, S., Zabrodina, I., Ponomarova, M., Kotliar, O. et al. (2024). Determination of the cellulose- and lipid-containing components influence on the extrudate technological indicators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (6 (128)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301843>
- Pennells, J., Bless, I., Juliano, P., Ying, D. (2024). Extrusion Processing of Biomass By-Products for Sustainable Food Production. *From Biomass to Biobased Products*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111943>
- Roycher Aqua fish feed. Roycher Aqua. Available at: <https://roycher-aqua.com/ua/>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.331223

EVALUATING OF THE SUDDEN HEAT IMPACT ON VOLATILE GASES RELEASE DURING THE GASIFICATION PROCESS OF WEAKLY GRADE METAMORPHIZED COAL (p. 22–34)

Alexandra Atyaksheva

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2523-3890>

Anastassiya Dashevskaya

«Samruk-Energy» Joint-Stock Company, Block B, Business Center «Q», Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5599-8117>

Almagul Mergalimova

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5990-8182>

Sultan Ybray

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-2149>

Maralgul Aitmagambetova

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7443-9708>

Ruslan Umirzakov

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-9046>

Zhenis Sultanbek

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana,
Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5482-4782>

The object of research is a low-temperature gasification technology of weakly grade metamorphized coals. One of the outstanding issues of the low-temperature gasification technology of weakly grade metamorphized coals remains the long processing period due to the coal weak energy activation directly dependent on the release of volatile gases, which depend on isotropic state of coal. The problem that was solved is to scale up coal activation energy through the sudden heat during thermal processing. The results obtained show a shift of the volatile gases release beginning to a temperature of 410°C in the same quantity as with the step-by-step heating to a temperature of 500°C. In addition, the sudden heat contributes to a reduction of CO₂ emissions by 12%, indicating an improvement in environmental performance. These results are explained by the fact that a sharp difference in temperatures of 20°C and 400°C creates conditions for the appearance of energy distortion in the isotropic zones of the coal body heating. This energy weakens and destroys the internal bonds between the coal particles and creates conditions for the release of new volatile elements at lower temperatures.

The main features of the results obtained, which made it possible to solve the problem studied are the results on transformation of thermal stresses into energy of distortion at the sudden heat in the relationship between the mechanics and physics of anisotropic coal. The scope and conditions of practical use of the results obtained is will allow for the adjustment of gasification techniques for coals with low degree of metamorphism and the establishment of gasification regimes, taking into account the design and capacity of the gasifiers.

Keywords: weakly grade metamorphized coal, sudden heat, distortion energy, thermogravimetric analysis, thermal stress.

References

- Wang, Y., Schaffers, W. C., Tan, S., Kim, J. S., Boardman, R. D., Bell, D. A. (2020). Low temperature heating and oxidation to prevent spontaneous combustion using Powder River Basin coal. *Fuel Processing Technology*, 199, 106221. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106221>
- Wang, Y., Sun, Y., Dai, L., Wang, K., Cheng, G. (2023). Mechanisms of CO and CO₂ Production during the Low-Temperature Oxidation of Coal: Molecular Simulations and Experimental Research. *Fire*, 6 (12), 475. <https://doi.org/10.3390/fire6120475>
- Song, H., Liu, G., Zhang, J., Wu, J. (2017). Pyrolysis characteristics and kinetics of low rank coals by TG-FTIR method. *Fuel Processing Technology*, 156, 454–460. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.008>
- Zhu, Y., Li, K., Wang, Q., Cen, J., Fang, M., Luo, Z. (2022). Low-rank coal pyrolysis polygeneration technology with semi-coke heat carrier based on the dual-fluidized bed to co-produce electricity, oil and chemical products: Process simulation and techno-economic evaluation. *Fuel Processing Technology*, 230, 107217. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107217>
- Zang, C., Zhou, J., Chen, M., Bai, F., Zhao, Z. (2023). Study on the Instability Mechanism of Coal and Rock Mining under a Residual Coal Pillar in Gently Inclined Short-Distance Coal Seam with the Discrete Element. *Sustainability*, 15 (7), 6294. <https://doi.org/10.3390/su15076294>
- Zhou, H., Yao, J., Chen, S., Li, H., Chen, Y., Wu, X. (2024). Effect of moisture content on charging and triboelectrostatic separation of coal gasification fine ash. *Separation and Purification Technology*, 333, 125976. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125976>
- Liu, H., Li, M., Zhao, S., Jiang, L., Xu, Q., Majlingová, A. (2024). Applications of distributed activation energy model on the pyrolysis of green renewable wood. *Fuel*, 359, 130457. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130457>
- Zhang, T., Zhang, C., Ren, H., Huang, Z., Feng, J., Liu, N. et al. (2025). Co-pyrolysis of coal-derived sludge and low-rank coal: Thermal behaviour and char yield prediction. *Fuel Processing Technology*, 267, 108165. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108165>
- Xu, D., Yang, L., Liu, H., Sun, S., Ma, M., Zhi, Y. (2024). Co-pyrolysis characteristics and kinetics of rice straw and low rank coal. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 183, 106741. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106741>
- Atyaksheva, A., Rozhkova, O., Sarsikejev, Y., Atyaksheva, A., Yermekov, M., Smagulov, A., Ryvkina, N. (2022). Determination of rational parameters for heat treatment of concrete mixture based on a hollow aluminosilicate microsphere. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (115)), 64–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251004>
- Zhang, L., Wang, G., Xue, Q., Zuo, H., She, X., Wang, J. (2021). Effect of preheating on coking coal and metallurgical coke properties: A review. *Fuel Processing Technology*, 221, 106942. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106942>
- Zhang, J., Zhu, J., Liu, J. (2023). Experimental Studies on Preheating Combustion Characteristics of Low-Rank Coal with Different Particle Sizes and Kinetic Simulation of Nitrogen Oxide. *Energies*, 16 (20), 7078. <https://doi.org/10.3390/en16207078>
- Mergalimova, A., Atyaksheva, A., Sultan, Y., Nursultan, S. (2024). Identification of the low-rank coals thermal heating behavior. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (6 (128)), 39–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299538>
- Atyaksheva, A. V., Atyaksheva, A. D., Ryvkina, N. V., Yermekov, M. T., Rozhkova, O. V., Smagulov, A. S. (2022). Effectiveness analysis of Maikuben brown coal combustion in the heating boiler “Kamkor-300.” *Journal of Physics: Conference Series*, 2211 (1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2211/1/012003>
- Fu, D., Yu, Z., Gao, K., Duan, Z., Wang, Z., Guo, W., Yang, P. et al. (2023). Thermodynamic Analysis on In Situ Underground Pyrolysis of Tar-Rich Coal: Secondary Reactions. *ACS Omega*, 8 (14), 12805–12819. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c08033>
- Zhang, W., Zeng, Q. (2023). Characteristics of coal oxidation and spontaneous combustion in Baishihu Mine, Xinjiang, China. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1208803>
- Kijo-Kleczkowska, A., Szumera, M., Gnatowski, A., Sadkowski, D. (2022). Comparative thermal analysis of coal fuels, biomass, fly ash and polyamide. *Energy*, 258, 124840. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124840>
- Deng, H., Zhou, H., Li, L. (2022). Fractional creep model of temperature-stress-time coupled damage for deep coal based on temperature-equivalent stress. *Results in Physics*, 39, 105765. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2022.105765>
- Chao, J., Liu, S., Pan, R., Yuan, Y., Hu, D. (2024). Study on the thermal effect of coal oxidation under different stresses. *Science of The Total Environment*, 915, 169843. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169843>
- Wang, X., Qi, X., Ma, H., Li, S. (2023). Experimental Investigation on the Influence of Temperature on Coal and Gas Outbursts. *Processes*, 11 (6), 1687. <https://doi.org/10.3390/pr11061687>
- Ul'yanova, E. V., Malinnikova, O. N., Pashichev, B. N., Malinnikova, E. V. (2019). Microstructure of Coal before and after Gas-Dynamic Phenomena. *Journal of Mining Science*, 55 (5), 701–707. <https://doi.org/10.1134/s1062739119056063>
- Rothleutner, L. (2018). Distortion during heating. Minimizing distortion involves more than just optimizing cooling. Thermal processing. Available at: <https://thermalprocessing.com/metal-urgency-distortion-during-heating>

23. Bryan, W. A., Calvert, C. R., King, R. B., Nemeth, G. R. A. J., Greenwood, J. B., Williams, I. D., Newell, W. R. (2010). Quasi-classical model of non-destructive wavepacket manipulation by intense ultrashort nonresonant laser pulses. *New Journal of Physics*, 12 (7), 073019. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/12/7/073019>
24. Kou, B., Shi, Q., Wang, S., Sun, Q., Cui, S., Yang, X. et al. (2025). Axial pressure impact on pyrolysis behavior of Xinjiang coal: An inspiration for in-situ pyrolysis of tar-rich coal. *Fuel Processing Technology*, 267, 108175. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2024.108175>
25. Su, C., Qiu, J., Wu, Q., Weng, L. (2020). Effects of high temperature on the microstructure and mechanical behavior of hard coal. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30 (5), 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.021>
26. Donskoy, I. G. (2014). Modelirovanie i optimizaciya rezhimov raboty gazogenerators plotnogo sloya dlya parogenerators mini-TES. FB-GUN. Irkutsk.
27. Ybray, S. (2022). Otchet po nauchnoj stazhirovke v Institute uglekhi-mii i himicheskogo materialovedeniya Federal'nogo issledovatel'skogo centra uglya i uglekhi-mii SO RAN.
28. Li, W., Yu, Z., Guan, G. (2021). Catalytic coal gasification for methane production: A review. *Carbon Resources Conversion*, 4, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.02.001>
29. Mishra, A., Gautam, S., Sharma, T. (2018). Effect of operating parameters on coal gasification. *International Journal of Coal Science & Technology*, 5 (2), 113–125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.330654

IMPROVING THE MODEL FOR DETERMINING THE COMPOSITION OF GUNPOWDER GASES DURING THERMAL DESTRUCTION OF GUNPOWDER IN A LIMITED VOLUME SPACE (p. 35–45)

Olexander Brunetkin

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6701-8737>

Oleksandr Sidelnykov

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0657-0215>

Maksym Maksymov

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7536-2570>

Yevhenii Dobrynin

Naval Institute of the National University “Odessa Maritime Academy”, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2777-3137>

The object of this study is a model of the process of formation of products of thermal destruction of nitrocellulose powder at different values of pressure of the mixture of powder gases.

The work is aimed at eliminating the uncertainty in the list of powder combustion products. In many cases, the formation of condensed carbon during the shot is not taken into account, which does not correspond to the real process.

The process of formation of powder combustion products has been studied both under experimental conditions at a pressure of several MPa, and under shot conditions at a pressure of ~300 MPa and more. The proposed model makes it possible to explain the cause and conditions of condensed carbon formation. The possibility of formation of up to 10 % of condensed carbon from the initial mass of powder during the shot has been shown.

An improved model was built using the molar composition of the combustion products. The calculation of the specific volumes of gaseous reaction products with a change in the pressure of the gas

mixture was carried out taking into account the change in their compressibility coefficient based on the Peng-Robinson equation. Within the limits of pressure values change during the shot process, the possibility of changing the equilibrium constant values in the range from ~40% to twofold has been shown. The formation of condensed carbon is explained by the reaction of carbon monoxide disproportionation. The range of values of thermodynamic parameters of powder gases that ensure the possibility of this reaction was identified.

The proposed model could be used in the experimental determination of the composition and energy characteristics of a powder sample in the field based on the library method. Given the identified powder composition, the problem of internal ballistics could be solved for the prompt determination of shot parameters.

Keywords: thermal destruction of powder, powder gases, compressibility coefficient, equilibrium model, condensed carbon.

References

1. Paraschiv, T., Tiganeşcu, T. V., Iorga, G. O., Gînghină, R. E., Grigoriu, O. C. (2020). Experimental and Theoretical Study on Three Combustion Models for the Determination of the Performance Parameters of Nitrocellulose - Based Propellants. *Revista de Chimie*, 71 (9), 87–97. <https://doi.org/10.37358/rc.20.9.8320>
2. Kazandjian, L., Danel, J. (2006). A Discussion of the Kamlet-Jacobs Formula for the Detonation Pressure. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 31 (1), 20–24. <https://doi.org/10.1002/prep.200600002>
3. Appleton, R. J., Salek, P., Casey, A. D., Barnes, B. C., Son, S. F., Strachan, A. (2024). Interpretable Performance Models for Energetic Materials using Parsimonious Neural Networks. *The Journal of Physical Chemistry A*, 128 (6), 1142–1153. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.3c06159>
4. Politzer, P., Murray, J. (2011). Some perspectives on estimating detonation properties of C, H, N, O compounds. *Central European Journal of Energetic Materials*, 8 (3), 209–220. Available at: https://www.researchgate.net/publication/279594253_Some_perspectives_on_estimating_detonation_properties_of_C_H_N_O_compounds
5. Jensen, T. L., Moxnes, J. F., Unneberg, E., Dullum, O. (2014). Calculation of Decomposition Products from Components of Gunpowder by using ReaxFF Reactive Force Field Molecular Dynamics and Thermodynamic Calculations of Equilibrium Composition. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 39 (6), 830–837. <https://doi.org/10.1002/prep.201300198>
6. Pantea, D., Brochu, S., Thiboutot, S., Ampleman, G., Scholz, G. (2006). A morphological investigation of soot produced by the detonation of munitions. *Chemosphere*, 65 (5), 821–831. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.027>
7. Podlesak, D. W., Huber, R. C., Amato, R. S., Dattelbaum, D. M., Firestone, M. A., Gustavsen, R. L. et al. (2017). Characterization of detonation soot produced during steady and overdriven conditions for three high explosive formulations. *AIP Conference Proceedings*, 1793, 030006. <https://doi.org/10.1063/1.4971464>
8. Yan, C., Zhu, C. (2023). Quantitative assessment method of muzzle flash and smoke at high noise level on field environment. *Scientific Reports*, 13 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27722-0>
9. Harries, M., Ang, H.-G. (2008). Software Development for the Detonation Product Analysis of High Energetic Materials - Part I. *Central European Journal of Energetic Materials*, 5 (3-4), 19–35. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=87178de51c47f3241bac52650b0952ac65a4b383>
10. Brunetkin, O., Maksymov, M., Brunetkin, V., Maksymov, O., Dobrynin, Y., Kuzmenko, V., Gultsov, P. (2021). Development of the model and the method for determining the influence of the temperature of gunpowder gases in the gun barrel for explaining visualizations of free carbon at shot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (112)), 41–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239150>

11. Brunetkin, O., Maksymov, M., Dobrynin, Y., Demydenko, V., Sidelynykov, O. (2024). Development of a process model for determining the composition and energy characteristics of a pyrotechnic mixture using the library method. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 99–112. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003453>
12. Brunetkin, O., Maksymov, M. V., Maksymenko, A., Maksymov, M. M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (6 (100)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422>
13. Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products (1974). Israel Program for Scientific Translations. Available at: <https://searchworks.stanford.edu/view/892711>
14. Brunetkin, O., Davydov, V., Butenko, O., Lysiuk, G., Bondarenko, A. (2019). Determining the composition of burned gas using the method of constraints as a problem of model interpretation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (6 (99)), 22–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.169219>
15. Mianowski, A., Robak, Z., Tomaszewicz, M., Stelmach, S. (2012). The Boudouard–Bell reaction analysis under high pressure conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 110 (1), 93–102. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2334-2>
16. Kotov, V. G., Sviatenko, O. M., Khovavko, A. I., Nebesniy, A. A., Filonenko, D. S. (2014). Thermodynamics of Carbon-Black Formation Process at High Hydrogen Concentration in Gas which Contains Carbon Monoxide. *Energy technologies and resource savings*, 1, 38–43. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127270>
17. Karaeva, A. R., Khaskov, M. A., Mitberg, E. B., Kulnitskiy, B. A., Perzhogin, I. A., Ivanov, L. A. et al. (2012). Longer Carbon Nanotubes by Controlled Catalytic Growth in the Presence of Water Vapor. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 20 (4-7), 411–418. <https://doi.org/10.1080/1536383x.2012.655229>
18. Rout, K. R., Gil, M. V., Chen, D. (2019). Highly selective CO removal by sorption enhanced Boudouard reaction for hydrogen production. *Catalysis Science & Technology*, 9 (15), 4100–4107. <https://doi.org/10.1039/c9cy00851a>
19. Maksimov, M. V., Brunetkin, O. I., Lysyuk, O. V., Tarakhtiy, O. S. (2017). Pat. No. 120216 UA. Installation for Determining the Composition of Combustible Gas in the Process of Combustion. No. a201712785; declared: 22.12.2017; published: 11.06.2018.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.324608

ELECTROLYSIS AND PRECIPITATION-BASED PURIFICATION OF FERRONICKEL FOR HIGH-PURITY NICKEL PRODUCTION (p. 46–53)

Vita Astini

Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1499-8364>

Anne Zulfia Syahrial

Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3949-8437>

Johny Wahyuadi M.S

Universitas Indonesia, Depok, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6051-2866>

This study investigates the purification of ferronickel through electrolysis and precipitation processes to produce high-purity nickel. Ferronickel has yet to find extensive applications in industries requiring high-purity nickel. So, it is imperative to develop technologies that can upgrade ferronickel through electrolytic processes. Ferronickel, consisting of approximately 18% Ni and 80% Fe, represents an abundant but underutilized resource for high-grade nickel applications. Electrolysis was conducted using ferronickel anodes and graphite

cathodes in 2 M HCl, followed by oxidation with H₂O₂ and precipitation with NaOH under varying pH (4.4 and 4.7) and temperature (40–70°C) conditions. Results demonstrated that the Ni concentration increased linearly from 5.36 g/L to 32.57 g/L over 8 hours of electrolysis, while Fe concentration rapidly increased and stabilized around 84.8 g/L after 3 hours. XRD analysis revealed improved crystallinity at higher temperatures, predominantly forming FeO₂ and NiO phases at 70°C. XRF analysis confirmed effective iron removal, achieving 78.91% Fe precipitation at pH 4.4 and 70°C, while nickel recovery was maximized at 14.60% at pH 4.7 and 70°C, but this pH is not favorable due to the Ni loss. SEM indicated finer, more homogeneous precipitate morphology at elevated temperatures. SEM imaging revealed that at pH 4.4 the precipitate formed at 40°C had a coarse, loosely packed structure with large, irregular particles (average size ≈6.50 μm). By contrast, at 70°C the precipitate was much finer and more homogeneous, with particles ≈916.8 nm. The findings highlight that electrolysis follow by optimized precipitation enables efficient separation of nickel from iron, offering a promising alternative route for upgrading ferronickel without relying on HPAL or matte processes. This approach contributes to diversifying nickel supply chains and promoting sustainable raw material utilization using local content.

Keywords: ferronickel, secondary, resources, local, content, electrolysis, precipitation, pH, temperature, time.

References

1. Chung, J. (2025). The Mineral Industry of Indonesia. U.S. Geological Survey. Available at: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol3/2022/myb3-2022-indonesia.pdf>
2. Arif, I. (2018). *Nikel Indonesia*. Gramedia Pustaka Utama, 276.
3. Handayani, L. (2024). Ditjen ILMATE: 44 Smelter Nikel Beroperasi di Indonesia. *Media Nikel Indonesia*. Available at: <https://nikel.co.id/2024/03/20/ditjen-ilmate-44-smelter-nikel-beroperasi-di-indonesia/>
4. Xue, Y., Zhu, D., Pan, J., Guo, Z., Yang, C., Tian, H. et al. (2020). Effective Utilization of Limonitic Nickel Laterite via Pressurized Densification Process and Its Relevant Mechanism. *Minerals*, 10 (9), 750. <https://doi.org/10.3390/min10090750>
5. Moussoulou, L. (1975). A process for the production of electrolytic nickel from ferronickel. *Metallurgical Transactions B*, 6 (4), 641–645. <https://doi.org/10.1007/bf02913860>
6. Han, H., Sun, W., Hu, Y., Cao, X., Tang, H., Liu, R., Yue, T. (2016). Magnetite precipitation for iron removal from nickel-rich solutions in hydrometallurgy process. *Hydrometallurgy*, 165, 318–322. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.006>
7. Das, G. K., Li, J. (2023). Iron Removal as Goethite from Synthetic Laterite Leach Solutions. *ACS Omega*, 8 (13), 11931–11940. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07595>
8. Zunaidi, M. A., Setiawan, I., Oediyani, S., Irawan, J., Rhamdani, A. R., Syahid, A. N. (2022). Iron removal process from nickel pregnant leach solution using sodium hydroxide. *Metalurgi*, 37 (3). <https://doi.org/10.14203/metalurgi.v37i3.665>
9. Viswanath, S. G., Jachak, M. M. (2013). Electrodeposition of nickel powder from nickel sulphate solution in presence of glycerol and sulphuric acid. *Metall. Mater. Eng.*, 19 (3), 233–248.
10. Shih, Y.-J., Chien, S.-K., Jhang, S.-R., Lin, Y.-C. (2019). Chemical leaching, precipitation and solvent extraction for sequential separation of valuable metals in cathode material of spent lithium ion batteries. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 100, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.04.017>
11. Partinen, J., Halli, P., Wilson, B. P., Lundström, M. (2023). The impact of chlorides on NMC leaching in hydrometallurgical battery recycling. *Minerals Engineering*, 202, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108244>

12. Astini, V., Meirawati, S., Nengsih, S., -, A., -, H., Soedarsono, J. W. M., Zulfia, A. (2024). Influence of Electrolyte Molarity and Applied Voltage on the Purification of Ferronickel by Electrolysis Method. *Metalurgi*, 39 (1), 7. <https://doi.org/10.55981/metalurgi.2024.742>
13. Linnikov, O. D., Rodina, I. V., Zakharova, G. S., Mikhalev, K. N., Baklanova, I. V., Kuznetsova, Y. V. et al. (2022). Coagulation removal of nickel (II) ions by ferric chloride: Efficiency and mechanism. *Water Environment Research*, 94 (12). <https://doi.org/10.1002/wer.10827>
14. Sanz-Medel, A., Pereiro, R. (2014). Atomic absorption spectrometry: An introduction. Momentum Press, 205.
15. Luger, P. (2014). Modern X-Ray Analysis on Single Crystals. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110308280>
16. Speck, F. D., Dettelbach, K. E., Sherbo, R. S., Salvatore, D. A., Huang, A., Berlinguette, C. P. (2017). On the Electrolytic Stability of Iron-Nickel Oxides. *Chem*, 2 (4), 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2017.03.006>
17. Ali, A., Zhang, N., Santos, R. M. (2023). Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals, Advancements, and Research Directions. *Applied Sciences*, 13 (23), 12600. <https://doi.org/10.3390/app132312600>
18. P1: Standard Reduction Potentials by Element. LibreTexts. Available at: https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Reference/Reference_Tables/Electrochemistry_Tables/P1%3A_Standard_Reduction_Potentials_by_Element
19. Bösing, I. (2023). Modeling electrochemical oxide film growth-passive and transpassive behavior of iron electrodes in halide-free solution. *Npj Materials Degradation*, 7 (1). <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00369-y>
20. Shu, R., Zhang, Q., Ma, L., Xu, Y., Chen, P., Wang, C., Wang, T. (2016). Insight into the solvent, temperature and time effects on the hydrolysis of hydrolyzed lignin. *Bioresource Technology*, 221, 568–575. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.043>
21. Pangaribuan, R. H., Patrick, J., Prasetyo, A. B., Maksum, A., Munir, B., Soedarsono, J. W. (2018). The effect of NaOH (natrium hydroxide) to slag nickel pyrometallurgy in different temperature and additive ratio. *E3S Web of Conferences*, 67, 03052. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703052>
22. Takeno, N. (2005). Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report No. 419. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1808/ML18089A638.pdf>
23. Vajglová, Z., Gauli, B., Mäki-Arvela, P., Kumar, N., Eränen, K., Wärnå, J. et al. (2023). Interactions between Iron and Nickel in Fe–Ni Nanoparticles on Y Zeolite for Co-Processing of Fossil Feedstock with Lignin-Derived Isoeugenol. *ACS Applied Nano Materials*, 6 (12), 10064–10077. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c00620>

DOI 10.15587/1729-4061.2025.331134

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОЛІОРГАНОСИЛОКСАНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ, ЩО НЕ МІСТЯТЬ ГАЛОГЕНІВ ДЛЯ КАБЕЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ (с. 6–14)**В. М. Золотарьов, О. В. Чулеева, Т. Ю. Антоненц**

Об'єктом дослідження є процеси формування надмолекулярної структури та теплофізичні, реологічні, фізико-механічні і електрофізичні властивості пожежобезпечних полімерних композицій, що не містять галогенів. Як уповільнювач горіння використовують тригідрат оксиду алюмінію. Дія наповнювача антипірену стає відчутною лише за умови значного наповнення (60%), коли погіршуються реологічні та експлуатаційні властивості полімерних композицій. Зменшити негативний вплив наповнювача на теплофізичні, реологічні, фізико-механічні та електрофізичні властивості дозволяє використання поліорганосилоксанів. Тому ефективне використання поліорганосилоксанів для регулювання властивостей пожежобезпечних полімерних композицій є актуальною проблемою, що вирішується.

Досліджено пожежобезпечні полімерні композиції, що не містять галогенів. Вміст наповнювача антипірену становить 60%. Досліджувані зразки додатково містять поліорганосилоксани, які використовували як модифікатори спрямованого регулювання властивостей пожежобезпечних композицій. Встановлено вплив поліорганосилоксанів на формування надмолекулярної структури наповнених полімерних композицій для кабельної продукції. За рахунок цього підвищується температури фазових переходів на 2–4 °C, температури початку розкладу на 12–17 °C та кінця розкладу на 5–6 °C. Показано ефект впливу поліорганосилоксанів в'язкістю 50–500 Па·с на зниження в'язкості розплаву пожежобезпечних полімерних композицій з 5,342 до 4,330 Па·с зі зростанням швидкості зсуву від 20 до 60 с⁻¹.

Результати досліджень дають можливість використовувати поліорганосилоксани для направленого регулювання реологічних та експлуатаційних характеристик пожежобезпечних полімерних композицій для виготовлення ізоляції і оболонки силових кабелів.

Ключові слова: кабельна продукція, пожежобезпечні полімерні композиції, поліорганосилоксани, реологічні властивості, теплофізичні властивості.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.330564

МОДИФІКАЦІЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕКСТРУДАТУ ШЛЯХОМ ЗБАГАЧЕННЯ ХАРЧОВИМИ ВОЛОКНАМИ ТА ЛІПІДАМИ (с. 15–21)**І. П. Петік, С. В. Станкевич, В. В. Панасенко, К. В. Сєдих, М. С. Пономарьова, О. М. Філенко, І. С. Баландіна, А. А. Рябев, С. А. Золотарьова, В. Є. Новікова**

Об'єктом дослідження є склад кормового екструдату, модифікованого додаванням джерел харчових волокон та ліпідів. Проблемою, яка вирішується, є оптимізація структурно-механічних властивостей кормового екструдату через раціоналізацію додавання компонентів.

Розроблено регресійні моделі для точного прогнозування співвідношення модифікуючих добавок, яке забезпечує задані водостійкість та індекс набухання. Експериментально встановлено, що раціональне співвідношення компонентів – 4,0±0,1% курячого жиру та 6,0±0,2% пшеничних висівків – забезпечує водостійкість 190,0±7,5 хв, індекс набухання 55,0±2,1% та пористість 60,0±2,2%. Результати досягнуті завдяки комплексній взаємодії між компонентами, де ліпіди формують гідрофобний бар'єр, а харчові волокна створюють стабільну пористу матрицю, що підтверджено регресійними моделями. Порівняльний аналіз з комерційним аналогом («Roucher™ АКВА Короп Фінішний») виявив конкурентні переваги розробленого екструдату: нижчу собівартість (310 USD/т проти 1050 USD/т). Структурно-механічні характеристики досліджених екструдатів були подібними. Це робить розроблений склад перспективним для промислового застосування. Отримані результати пояснюються взаємодією білково-крохмальної матриці з ліпідами та харчовими волокнами під час екструдатування, що підтверджено статистично значущими моделями. Відмінною рисою дослідження є комплексний підхід до раціоналізації складу екструдату, який поєднує технологічну ефективність із економічною доцільністю. Екструдат розробленого складу може бути використаний у виробництві кормів для аквакультури. Подальші дослідження мають бути спрямовані на дослідження довгострокової стабільності властивостей продукту та адаптацію технології до промислових умов.

Ключові слова: екструдат, харчові волокна, курячий жир, білково-крохмальна матриця, структурно-механічні властивості, індекс набухання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.331223

ОЦІНКА ВПЛИВУ РАПТОВОГО ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ НА ВИДІЛЕННЯ ЛЕТКИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ СЛАБОМЕТАМОРФІЗОВАНОГО ВУГІЛЛЯ (с. 22–34)**Alexandra Atyaksheva, Anastassiya Dashevskaya, Almagul Mergalimova, Sultan Ybray, Maralgu Aitmagambetova, Ruslan Umirzakov, Zhenis Sultanbek**

Об'єктом дослідження є низькотемпературна технологія газифікації слабометаморфізованого вугілля. Одним з невирішених питань низькотемпературної технології газифікації слабометаморфізованого вугілля залишається тривалий період обробки через те, що слабка енергія активації вугілля безпосередньо залежить від виділення летких газів, які залежать від ізотропного стану вугілля.

Вирішена проблема полягає у збільшенні енергії активації вугілля за рахунок раптового нагрівання під час термічної обробки. Отримані результати показують зміщення початку виділення летких газів з температури 410°C на таку ж величину, як і при поступовому нагріванні до температури 500°C. Крім того, раптове нагрівання сприяє зменшенню викидів CO₂ на 12%, що свідчить про покращення екологічних показників. Ці результати пояснюються тим, що різка різниця температур 20°C та 400°C створює умови для появи енергетичних спотворень в ізотропних зонах нагрівання вугільного тіла. Ця енергія послаблює та руйнує внутрішні зв'язки між частинками вугілля та створює умови для виділення нових летких елементів при нижчих температурах. Основними особливостями отриманих результатів, які дозволили вирішити досліджувану проблему, є результати щодо перетворення термічних напружень в енергію деформації при раптовому нагріванні у взаємозв'язку між механікою та фізикою анізотропного вугілля. Обсяг та умови практичного використання отриманих результатів дозволять коригувати методи газифікації вугілля з низьким ступенем метаморфізму та встановлювати режими газифікації з урахуванням конструкції та потужності газогенераторів.

Ключові слова: слабометаморфізоване вугілля, раптове нагрівання, енергія деформації, термогравіметричний аналіз, термічна напруга.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.330654

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПОРОХОВИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ТЕРМОДЕСТРУКЦІЇ ПОРОХУ В ПРОСТОРІ ОБМЕЖЕНОГО ОБ'ЄМУ (с. 35–45)

О. І. Брунеткін, О. В. Сідельников, М. В. Максимов, Є. В. Добринін

Об'єктом дослідження є модель процесу утворення продуктів термодеструкції нітроцелюлозного порошу за різних значень тиску суміші порохових газів.

Робота спрямована на усунення невизначеності в переліку продуктів горіння порошу. У багатьох випадках не враховується утворення конденсованого вуглецю в процесі пострілу, що не відповідає реальному процесу.

Процес утворення продуктів горіння порошу досліджено як в умовах експерименту при тиску в кілька МПа, так і в умовах пострілу при тиску ~300 МПа і вище. Запропонована модель дозволяє пояснити причини та умови утворення конденсованого вуглецю. Показано можливість утворення до 10 % конденсованого вуглецю від початкової маси порошу в процесі пострілу.

Удосконалена модель побудована з використанням мольного складу продуктів згоряння. Розрахунок питомих об'ємів газоподібних продуктів реакції при зміні тиску газової суміші проводиться з урахуванням зміни їхнього коефіцієнта стисливості на основі рівняння Пенга–Робінсона. У межах зміни тиску в процесі пострілу показано можливість зміни величин констант рівноваги в діапазоні від ~40 % до дворазового. Утворення конденсованого вуглецю пояснюється реакцією диспропорціонування монооксиду вуглецю. Виділено область значень термодинамічних параметрів порохових газів, що забезпечують можливість перебігу цієї реакції.

Запропонована модель може бути використана при експериментальному визначенні складу та енергетичних характеристик зразка порошу в польових умовах на основі бібліотечного методу. На основі виявленого складу порошу може бути розв'язане завдання внутрішньої балістики для оперативного визначення параметрів пострілу.

Ключові слова: термодеструкція порошу, порохові гази, коефіцієнт стисливості, рівноважна модель, конденсований вуглець.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.324608

ОЧИЩЕННЯ ФЕРОНІКЕЛЮ МЕТОДАМИ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ТА ОСАДЖЕННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОЧИСТОГО НІКЕЛЮ (с. 46–53)

Vita Astini, Anne Zulfia Syahrial, Johny Wahyuadi M. S

Це дослідження висвітлює очищення феронікелю за допомогою електролізу та процесів осадження для отримання високочистого нікелю. Феронікель ще не знайшов широкого застосування в галузях промисловості, що потребують високочистого нікелю. Тому вкрай важливо розробити технології, які можуть покращувати якість феронікелю за допомогою електролітичних процесів. Феронікель, що складається приблизно з 18% Ni та 80% Fe, являє собою рясний, але недостатньо використаний ресурс для отримання високоякісного нікелю. Електроліз проводили з використанням феронікелевих анодів та графітових катодів у 2 М HCl з подальшим окисленням H₂O₂ та осадженням NaOH за різних умов pH (4,4 та 4,7) та температури (40–70°C). Результати показали, що концентрація Ni лінійно зростала від 5,36 г/л до 32,57 г/л протягом 8 годин електролізу, тоді як концентрація Fe швидко зростала та стабілізувалася приблизно на рівні 84,8 г/л через 3 години. Рентгенівський дифрактограмний аналіз виявив покращену кристалічність при вищих температурах, переважно утворюючи фази FeO₂ та NiO при 70°C. Рентгенофлуоресцентний аналіз підтвердив ефективне видалення заліза, досягнувши 78,91% осадження Fe при pH 4,4 та 70°C, тоді як відновлення нікелю було максимальним при 14,60% при pH 4,7 та 70°C, але цей pH не є сприятливим через втрату Ni. СЕМ-сканування показало дрібнішу, більш однорідну морфологію осаду при підвищених температурах. СЕМ-візуалізація показала, що при pH 4,4 осад, що утворився при 40°C, мав грубу, пухко упаковану структуру з великими, нерівномірними частинками (середній розмір ~6,50 мкм). Натомість, при 70°C осад був набагато дрібнішим та одноріднішим, з частинками ~916,8 нм. Результати дослідження підкреслюють, що електроліз з подальшим оптимізованим осадженням дозволяє ефективно відокремити нікель від заліза, пропонуючи перспективний альтернативний шлях для модернізації феронікелю без використання процесів HPAL або матових процесів. Цей підхід сприяє диверсифікації ланцюгів постачання нікелю та просуванню сталого використання сировини з використанням місцевого вмісту.

Ключові слова: феронікель, вторинний, ресурси, місцевий, вміст, електроліз, осадження, pH, температура, час.