ABSTRACT AND REFERENCES

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352199

DESIGN OF A SYSTEM FOR LOAD FORECASTING AND OPTIMAL CONTROL OVER ENTERPRISE ENERGY SOURCES UNDER UNSTABLE POWER SUPPLY (p. 6–14)

Pavlo Shevchyk
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8359-962X

Vitalii Polovyi
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3425-8774

Yana Ni
Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1352-700X

This study investigates the process underlying the autonomy of industrial enterprises that face critical instability of centralized power supply and dynamic market tariffs.

Given the significant losses of generating capacities and frequent interruptions in the supply of electricity, enterprises often use autonomous power sources. Optimal utilization of such sources requires economic substantiation and construction of appropriate models. The task of these models is to improve the economic efficiency and energy independence of an enterprise by automating optimal control over energy sources.

This work proposes a two-level system. The first level is responsible for forecasting energy consumption. The second one is a deterministic optimization algorithm for automatic selection of a power source and economically justified control over the operational schedule of autonomous power sources.

When forecasting energy consumption, two models built on the basis of Random Forest and LightGBM were compared. The models yielded average absolute errors, as a percentage of the average, of 5–7% and 8–10%, which indicates their applicability for further decision-making.

Analysis of the optimization algorithm on real data revealed overall energy cost savings of 9–12% compared to unoptimized use of electricity from the grid. These results were achieved through timely switching between central and alternative power sources. Switching occurs when the use of the source becomes more economically advantageous, subject to technical constraints.

The resulting system could be used by enterprises that require uninterrupted power supply and exploit generators as alternative power sources.

Keywords: enterprise energy consumption optimization, generator control, machine learning, LightGBM regression.

References

1. DiXi Group calculated mass attacks on the energy system of Ukraine (2024). Ukrainian Energy. Available at: https://ua-energy.org/en/posts/03-10-2024-0c9b86dc-4300-49c0-afb3-307d43ca6d1d
2. Bytva za svitlo. Zvit pro diyalnist (2024). DTEK. Available at: https://dtek.com/content/upload/report/DTEK%202024%20Action%20Report%20Ukrainian%20250221.pdf
3. Otsinka priamykh zbytkiv ta nepriamykh vtrat enerhetychnoho sektoru Ukrainy vnaslidok povnomasshtabnoho vtorhnennia rosii (2024). Kyivska shkola ekonomiky. Available at: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/06/KSE_Vpliv-vii--ni-na-energetiku_UA-1.pdf
4. A Rebirth in Flame: Ukraine's Beleaguered Energy System (2025). CEPA. Available at: https://cepa.org/article/a-rebirth-in-flame-ukraines-beleaguered-energy-system
5. Kumar, M., Pal, N. (2023). Machine Learning-based Electric Load Forecasting for Peak Demand Control in Smart Grid. Computers, Materials & Continua, 74 (3), 4785–4799. https://doi.org/10.32604/cmc.2022.032971
6. Halimuzzaman, M. (2025). AI-driven optimization of hybrid renewable energy systems: A review of techniques, challenges, and future direction. Pacific Journal of Advanced Engineering Innovations, 2 (1), 22–32. https://doi.org/10.70818/pjaei.v02i01.093
7. Kong, W., Dong, Z. Y., Jia, Y., Hill, D. J., Xu, Y., Zhang, Y. (2019). Short-Term Residential Load Forecasting Based on LSTM Recurrent Neural Network. IEEE Transactions on Smart Grid, 10 (1), 841–851. https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2753802
8. Fayyazbakhsh, A., Kienberger, T., Vopava-Wrienz, J. (2025). Comparative Analysis of Load Profile Forecasting: LSTM, SVR, and Ensemble Approaches for Singular and Cumulative Load Categories. Smart Cities, 8 (2), 65. https://doi.org/10.3390/smartcities8020065
9. Ibrar, M., Hassan, M. A., Shaukat, K., Alam, T. M., Khurshid, K. S., Hameed, I. A. et al. (2022). A Machine Learning-Based Model for Stability Prediction of Decentralized Power Grid Linked with Renewable Energy Resources. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022 (1). https://doi.org/10.1155/2022/2697303
10. Mudgal, Y., Tiwari, R., Krishnan, N., Téllez, A. A. (2025). Advanced Cluster-Based Load Forecasting and Peak Demand Management for Electric Vehicle Charging Networks. IEEE Access, 13, 105664–105677. https://doi.org/10.1109/access.2025.3578875
11. Bahrami, S., Chen, Y. C., Wong, V. W. S. (2021). Deep Reinforcement Learning for Demand Response in Distribution Networks. IEEE Transactions on Smart Grid, 12 (2), 1496–1506. https://doi.org/10.1109/tsg.2020.3037066
12. Suanpang, P., Jamjuntr, P., Jermsittiparsert, K., Kaewyong, P. (2022). Autonomous Energy Management by Applying Deep Q-Learning to Enhance Sustainability in Smart Tourism Cities. Energies, 15 (5), 1906. https://doi.org/10.3390/en15051906
13. Danylchenko, D. O., Fedorchuk, S. O., Maslak, M. V. et al. (2024). Intelektualni systemy elektropostachannia na osnovi zaluchennia aktyvnykh spozhyvachiv. Kharkiv: NTU "KhPI", 310. Available at: https://repository.kpi.kharkov.ua/entities/publication/1511a424-3c71-467d-a8f6-9ad66d58ae33
14. Sirenko, Yu. V., Volvach, T. S., Savoiskyi, O. Yu., Kozin, V. M. (2025). Analysis of the state of ukraine's energy system and measures to improve the situation. Visnyk of Kherson National Technical University, 1 (2 (93)), 229–237. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.30
15. Bobrov, O., Yaroshenko, Y. (2024). Analysis of electrical load schedules of UPS of Ukraine. Electrical and Information Systems, 106, 27–34. https://doi.org/10.32782/eis/2024-106-5
16. González Grandón, T., Schwenzer, J., Steens, T., Breuing, J. (2024). Electricity demand forecasting with hybrid classical statistical and

machine learning algorithms: Case study of Ukraine. Applied Energy, 355, 122249. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122249
17. Petko, S. (2024). Application of AI in the Energy Sector of Ukraine in the Conditions of War. Challenges to national defence in contemporary geopolitical situation (CNDCGS'2024). Brno, 22–26. Available at: https://ir.kneu.edu.ua/items/9520f314-cf25-4a12-9369-29155c54d6d4
18. Breiman, L. (2001). Random Forests. Machine Learning, 45 (1), 5–32. https://doi.org/10.1023/a:1010933404324
19. Cutler, D. R., Edwards, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. Ecology, 88 (11), 2783–2792. https://doi.org/10.1890/07-0539.1
20. Liaw, A., Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R News, 2, 18–22. Available at: https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-022/RN-2002-022.pdf
21. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. (2009). The Elements of Statistical Learning. In Springer Series in Statistics. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7
22. Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W. et al. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. NIPS'17: Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Available at: http://dl.acm.org/doi/10.5555/3294996.3295074
23. Bertsimas, D., Tsitsiklis, J. N. (1997). Introduction to linear optimization. Athena Scientific, 587.
24. 1320.2-1998 – IEEE Standard for Conceptual Modeling Language – Syntax and Semantics for IDEF1X97 (IDEFobject). Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8883275
25. Yourdon, E. (1989). Modern structured analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 688.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352513

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DIAGNOSING AND FORECASTING POWER SUPPLY SYSTEMS FOR MINING ENTERPRISES (p. 15–26)

Aizada Kuanyshtaeva
Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karagandy, Republic of Kazakhstan
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3718-1899

Yevgeniy Kotov
Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karagandy, Republic of Kazakhstan
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2660-2010

Karshiga Smagulova
Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karagandy, Republic of Kazakhstan
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6834-8490

Fariza Abilzhanova
Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karagandy, Republic of Kazakhstan
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7723-6930

The object of the study is the power supply system of the mining enterprise Nova-Zinc LLP, located in Central region of Republic of Kazakhstan, which specializes in the extraction and enrichment of lead-zinc ores. Reliable power supply in mining is challenged by heavy mechanical loads, vibration, and severe weather; this case study is used only as an example of conditions common in many mining regions worldwide. This study proposes a diagnostic-and-forecasting method for distribution power systems based on routinely available operational records and climatic indicators. The method was tested using outage data from 2020–2024. Using least squares, a multivariate regression model was obtained for feeder emergency outage duration as a function of cable damage (F5), transformer failure (F6), and the climatic factor (Climate). The model is significant overall (F-test $p < 0.01$) and explains 68.7% of downtime variation ($R^2 = 0.687$); residual diagnostics indicate normality and no autocorrelation. The average marginal effects are 7.561 h for cable failures, 3.314 h for transformer failures, and 2.418 h for climatic impacts, highlighting cables as the dominant driver of prolonged outages. To assess energy performance, a separate model was built for the loss share in the power system as a function of outage duration, phase clashing (F3), and Climate. This loss model has low explanatory power ($R^2 = 0.2013$) and non-significant factor coefficients ($p > 0.05$). Finally, bivariate regressions show that Climate strongly affects phase clashing (F3) ($R^2 = 0.793$) and moderately affects ground faults (F1) and insulator chipping (F2) ($R^2 = 0.533$ each). The proposed method supports maintenance prioritization, climate-mitigation measures, and continuous updating as new outage records are added, strengthening decision-making and system robustness.

Keywords: power supply, diagnostics, failure prediction, reliability, mining enterprise, regression analysis.

References

1. Government of the Republic of Kazakhstan. Resolution No. 264 of March 28, 2023: On the approval of the Concept for the development of energy saving and energy efficiency in the Republic of Kazakhstan for 2023–2029. Available at: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000264?utm_source=chatgpt.com
2. Khan, M. A. M. (2025). AI and machine learning in transformer fault diagnosis: a systematic review. American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions, 1 (01), 290–318. https://doi.org/10.63125/sxb17553
3. Betti, A., Lo Trovato, M. L., Leonardi, F. S., Leotta, G., Ruffini, F., Lanzetta, C. (2019). Predictive Maintenance in Photovoltaic Plants with a Big Data Approach. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.10855
4. Ding, F., Ma, Y., Li, X., Huang, J. (2025). Research on digital twin diagnosis model for the thermal-electric field of high-voltage switchgears. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6651594/v1
5. Baker, E., Nese, S. V., Dursun, E. (2023). Hybrid Condition Monitoring System for Power Transformer Fault Diagnosis. Energies, 16 (3), 1151. https://doi.org/10.3390/en16031151
6. Rojas, L., Peña, Á., Garcia, J. (2025). AI-Driven Predictive Maintenance in Mining: A Systematic Literature Review on Fault Detection, Digital Twins, and Intelligent Asset Management. Applied Sciences, 15 (6), 3337. https://doi.org/10.3390/app15063337
7. Kim, H., Kim, J.-K., Song, J., Lee, J., Han, K., Shin, J. et al. (2019). Smart and Green Substation: Shaping the Electric Power Grid of Korea. IEEE Power and Energy Magazine, 17 (4), 24–34. https://doi.org/10.1109/mpe.2019.2909792
8. Maican, C. A., Pană, C. F., Pătrașcu-Pană, D. M., Rădulescu, V. M. (2025). Review of Fault Detection and Diagnosis Methods in Power Plants: Algorithms, Architectures, and Trends. Applied Sciences, 15 (11), 6334. https://doi.org/10.3390/app15116334
9. Hasan, A., Salvo Rossi, P. (2025). A unified sensor and actuator fault diagnosis in digital twins for remote operations. Mechanical Systems

and Signal Processing, 222, 111778. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111778
10. Porawagamage, G., Dharmapala, K., Chaves, J. S., Villegas, D., Rajapakse, A. (2024). A review of machine learning applications in power system protection and emergency control: opportunities, challenges, and future directions. Frontiers in Smart Grids, 3. https://doi.org/10.3389/frsgr.2024.1371153
11. Liu, W., Han, B., Zheng, A., Zheng, Z., Chen, S., Jia, S. (2024). Fault diagnosis of reducers based on digital twins and deep learning. Scientific Reports, 14 (1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-75112-x
12. Abilzhanova, F., Bulatbaev, F., Kuanyshtaeva, A. (2025). Development of a method for reliability assessment of distribution power networks up to 110 kV. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (8 (133)), 15–23. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322920
13. Nova Zinc LLP. Available at: http://novazinc.kz/
14. Nova Zinc LLP. Kazakhstan Mining Group. Available at: https://kazmininggroup.kz/company/partners/zn-pb/
15. Telbayeva, S., Nurmaganbetova, G., Avdeyev, L., Kaverin, V., Issenov, S., Janiszewski, D. et al. (2024). Development of mathematical models of power consumption at coal plants. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (8 (131)), 22–32. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313932
16. Breido, I. V., Sichkarenko, A. V., Kotov, E. S. (2013). Emergency control of technological environment and electric machinery activity in coal mines. Journal of Mining Science, 49 (2), 338–342. https://doi.org/10.1134/s1062739149020172

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352343

DETERMINING PHOTOVOLTAIC ARRAY CONFIGURATIONS WITH REDUCED IMPACT OF PARTIAL SHADING ON ENERGY PERFORMANCE (p. 27–36)

Olexandr Shavolkin
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3914-0812

Hennadii Kruhliak
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2634-3856

Iryna Shvedchykova
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3005-7385

Tetiana Bila
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5014-9052

Andrii Pisotskyi
Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3761-2019

This work explores energy processes in the array of photovoltaic panels within an object's power supply system under dynamic modes of the partial-shading strip movement. The study aims to increase the energy productivity of a photovoltaic panel array in the power supply system at a local facility under partial shading conditions.

Based on climatic data, the methodology for modelling the movement of a cloud shading strip, taking wind direction into account, has been substantiated. The array model has been improved by introducing a partial-shading strip that moves in specified directions. That has made it possible to assess the influence of strip direction and speed on dynamic modes for selected panel configurations, based on their location and connection topology.

In accordance with the adopted array power, possible configurations with 16 photovoltaic panels, each of 655 W, have been determined. Modeling confirmed the complication of the trajectory of the global maximum power point under the conditions of shading strip movement. This manifests in the multiplicity of local maxima and in the unpredictable trajectory of the global maximum, which depends on the array configuration and the direction of strip movement.

It was established that the strip speed did not affect the performance. According to the simulation results, recommended configurations with minimal shading impact on energy performance were obtained when the strip moved along the prevailing wind direction. It was shown that the generation power along the prevailing directions of the shading strip relative to the average value in all directions of movement is not less than 96%. The trajectory of the global maximum is monotonic, so no special algorithms are needed to track the maximum power. This makes it possible, at a panel power of 655 W, to form array configurations with a total power in the range of 3.93–15.72 kW.

Keywords: photovoltaic array configuration, shading strip movement, global maximum power trajectory.

References

1. Shao, C., Migan-Dubois, A., Diallo, D. (2023). Performance of PV array configurations under dynamic partial shadings. EPJ Photovoltaics, 14, 21. https://doi.org/10.1051/epjpv/2023012
2. Suriya kala, S., Prince winston, D., Pravin, M., Sakthivel, G. (2023). Maximum power enhancement in solar PV modules through modified TCT interconnection method. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 60, 103462. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103462
3. Baba, A. O., Liu, G., Chen, X. (2020). Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods. Sustainable Futures, 2, 100020. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100020
4. Rezk, H., Fathy, A., Abdelaziz, A. Y. (2017). A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 377–386. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.051
5. Duranay, Z. B., Güldemir, H. (2025). Mitigating Partial Shading Effects in Photovoltaic Systems Using Particle Swarm Optimization-Tuned Sliding Mode Control. Processes, 13 (5), 1463. https://doi.org/10.3390/pr13051463
6. Abdulmawjood, K., Alsadi, S., Refaat, S. S., Morsi, W. G. (2022). Characteristic Study of Solar Photovoltaic Array Under Different Partial Shading Conditions. IEEE Access, 10, 6856–6866. https://doi.org/10.1109/access.2022.3142168
7. Pareek, S., Ansari, M. F., Khurana, N., Nezami, Md. M., Alharbi, S. S., Alharbi, S. S. et al. (2025). Performance comparison of interconnection schemes for mitigating partial shading losses in solar photovoltaic arrays. Scientific Reports, 15 (1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-12984-7
8. Siaw, F. L., Thio, T. H. G., Lau, W. H. (2025). Comparative study of solar photovoltaic array configurations under partial shading conditions on portable solar chargers. International Conference on Research Innovations: Trends in Computational Science, 3335, 040006. https://doi.org/10.1063/5.0290086
9. Saiprakash, C., Mohapatra, A., Nayak, B., Ghatak, S. R. (2021). Analysis of partial shading effect on energy output of different solar PV

array configurations. Materials Today: Proceedings, 39, 1905–1909. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.307

10. Ganesan, S., David, P. W., Thangaraj, H., Balachandran, P. K., Selvarajan, S. (2025). Power enhancement of PV arrays in different configurations under different partial shaded condition. Scientific Reports, 15 (1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-91508-9
11. Devakirubakaran, S., Verma, R., Chokkalingam, B., Mihet-Popa, L. (2023). Performance Evaluation of Static PV Array Configurations for Mitigating Mismatch Losses. IEEE Access, 11, 47725–47749. https://doi.org/10.1109/access.2023.3274684
12. Jalil, M. F., Pushpender, Khatoon, S., Hameed, S., Bansal, R. C. (2026). Shade dispersion in partial shading and mismatch loss reduction in PV array with improved odd-even reconfiguration. International Journal of Modelling and Simulation, 1–17. https://doi.org/10.1080/02286203.2025.2611264
13. Mishra, V. L., Chauhan, Y. K., Verma, K. S. (2024). Attenuation of shading loss using a novel solar array reconfigured topology under partial shading conditions. Solar Energy, 274, 112552. https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112552
14. Cherukuri, S. K., Kumar, B. P., Kaniganti, K. R., Muthubalaji, S., Devadasu, G., Babu, T. S., Alhelou, H. H. (2022). A Novel Array Configuration Technique for Improving the Power Output of the Partial Shaded Photovoltaic System. IEEE Access, 10, 15056–15067. https://doi.org/10.1109/access.2022.3148065
15. Satpathy, P. R., Aljafari, B., Thanikanti, S. B., Sharma, R. (2023). An efficient power extraction technique for improved performance and reliability of solar PV arrays during partial shading. Energy, 282, 128992. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128992
16. Koshkarbay, N., Mohammed, K. K., Mekhilef, S., Kuttybay, N., Saymbetov, A., Nurgaliyev, M., Kalassov, N. (2026). High-efficiency hybrid MPPT technique with integrated partial shading detection for photovoltaic systems under varying shading conditions. Renewable Energy, 261, 125244. https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125244
17. Akter, K., Motakabeer, S. M. A., Zahirul Alam, A. H. M., Yusoff, S. H. B., Pachauri, R. K., Malik, H., Jadoun, V. K. (2025). A novel MPPT approach for photovoltaic system using Pelican optimization and high-gain DC–DC converter. Scientific Reports, 15 (1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-24000-z
18. Somesunthrim, K., Charin, C., Ismail, B., Bani Ahmad, A. (2025). Maximum Power Point Tracking With Opposition-Based Learning-Levy Flight Optimization for a Standalone Photovoltaic System. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2025 (1). https://doi.org/10.1155/jece/5001433
19. Mahmod Mohammad, A. N., Mohd Radzi, M. A., Azis, N., Shafie, S., Atiqi Mohd Zainuri, M. A. (2020). An Enhanced Adaptive Perturb and Observe Technique for Efficient Maximum Power Point Tracking Under Partial Shading Conditions. Applied Sciences, 10 (11), 3912. https://doi.org/10.3390/app10113912
20. Climate and monthly weather forecast Kyiv, Ukraine. Weather Atlas. Available at: https://www.weather-atlas.com/en/ukraine/kiev-climate?utm_source
21. Hi-MO X10_Scientist LR7-72HVH 655-670M. Available at: https://static.longi.com/LR_7_72_HVH_655_670_M_30_30_and_15_Scientist_BGV_02_20241118_EN_Draft_9293e45f42.pdf
22. Deye. Hybrid Inverter. User Manual. Available at: https://www.deye-inverter.com/deyeinverter/2024/02/03/rand/1391/instructions_sun-5-25k-sg01hp3-eu-am2_240203_en.pdf

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352394

IDENTIFICATION OF IMPACT OF MINOR ACTINIDE ADDITION ON BURNUP PROCESS AND HEAVY NUCLIDE EVOLUTION IN UN-PUN FUELED SMALL MODULAR GAS-COOLED FAST REACTORS (p. 37–48)

Mila Hidayatul Aula
Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7356-8671

Ratna Dewi Syarifah
Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9110-2093

Ahmad Haris Rasidi
Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7470-1828

Abdulloh Hasan Shodiq
Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5149-0849

Muhammad Husein Shodiq
Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6948-5630

Bekti Palupi
Universitas Jember, Jawa Timur, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6164-5254

Nuri Trianti
National Research and Innovation Agency, Central Jakarta, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6518-534X

Zaki Su'ud
Bandung Institute of Technology, Jawa Barat, Indonesia
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8907-9824

The object of this study is a small modular gas-cooled fast reactor (GFR) fuelled by UN-PuN with minor actinides (MA) addition. The problem solved in this study is the identification of the impact of MA addition on the criticality, fuel burnup stability, and nuclear waste transmutation of the small modular GFR. The parameters studied include *k-eff*, macroscopic cross-section, conversion ratio (CR), heavy nuclides inventory, and the probability of radiopharmaceutical isotope production. The study was conducted using SRAC-COREBN computational analysis, and the MA used in this study were Pa-231, Am-241, and Np-237. The results obtained that the MA addition, on average, results in a decrease in *k-eff*, the magnitude of which depends on the type and concentration of MA. Macroscopic cross-section analysis reveals shifts in values, such as an increase in the Macroscopic cross-section absorption, particularly in the case of Am-241. Then, an increase in the macroscopic cross-section of fission is passed at high energies. The CR > 1 and inversion ratio of heavy nuclide approximately are observed at 50% in all configurations. Furthermore, the evolution of fission products such as Tc-99, Rh-105, and I-135 suggests the chance production of radiopharmaceutical isotope. Interpretation of the results show that adding MA effect *k-eff* and CR because isotopes such as Am-241, Np-237, and Pa-231 actively participate in fission and conversion of fissile material using fast neutron spectrum. A key feature of obtained results is a stable burnup profile, where the MA effectively functions in target transmutation without disrupting the consumption of the primary fissile fuel. These findings could be a technical basis for

supporting national energy security and sustainable nuclear waste management.

Keywords: conversion ratio, GFR, COREBN, *k-eff*, minor actinide, radiopharmaceutical, SMR, transmutation

References

1. Zhan, L., Bo, Y., Lin, T., Fan, Z. (2021). Development and outlook of advanced nuclear energy technology. Energy Strategy Reviews, 34, 100630. https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100630
2. 2022 GIF Annual Report. Available at: https://www.gen-4.org/resources/annual-reports/2022-gif-annual-report
3. 2023 GIF Annual Report. Available at: https://www.gen-4.org/resources/annual-reports/2023-gif-annual-report
4. Zajac, R., Hatala, B., Dařílek, P. (2014). Introduction Gas Cooled Fast Reactor (GFR) general concept, history and design. Stockholm.
5. Gas-Cooled Fast Reactor Research and Development Roadmap (2017). Idaho. Available at: https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_1841.pdf
6. Hore-Lacy, I. (2007). Nuclear Power. Nuclear Energy in the 21st Century, 37–53. https://doi.org/10.1016/b978-012373622-2/50006-4
7. Lennox, T. A., Millington, D. N., Sunderland, R. E. (2007). Plutonium management and Generation IV systems. Progress in Nuclear Energy, 49 (8), 589–596. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.02.004
8. Delage, F., Ramond, L., Gallais-During, A., Pillon, S. (2020). Actinide-Bearing Fuels and Transmutation Targets. Comprehensive Nuclear Materials, 645–683. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.12049-1
9. Liou, J. (2025). What are Small Modular Reactors (SMRs)? IAEA. Available at: https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs
10. Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024. IAEA. https://doi.org/10.61092/iaea.3o4h-svum
11. Syarifah, R. D., Yulianto, Y., Su'ud, Z., Basar, K., Irwanto, D. (2016). Design Study of 200MWth Gas Cooled Fast Reactor with Nitride (UN-PuN) Fuel Long Life without Refueling. MATEC Web of Conferences, 82, 03008. https://doi.org/10.1051/matecconf/20168203008
12. Syarifah, R. D., Arkundato, A., Irwanto, D., Su'ud, Z. (2020). Neutronic analysis of comparation UN-PuN fuel and ThN fuel for 300MWth Gas Cooled Fast Reactor long life without refueling. Journal of Physics: Conference Series, 1436 (1), 012132. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012132
13. Raflis, H., Ilham, M., Su'ud, Z., Waris, A., Irwanto, D. (2020). Neutronic Analysis of Modular Gas-cooled Fast Reactor for 5–25% of Plutonium Fuel using Parallelization MCNP6 Code. Journal of Physics: Conference Series, 1493 (1), 012008. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012008
14. Syarifah, R. D., Aula, M. H., Arkundato, A., Nugroho, A. T., Jatisukamto, G., Handayani, S. (2023). Design study of 300MWth GFR with UN-PuN fuel using SRAC-COREBN code. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 18 (04), 264–270. https://doi.org/10.59018/022346
15. Angelina, T. E., Syarifah, R. D., Widiawati, N., Arkundato, A., Rohman, L., Maulina, W., Purwandari, E. (2024). Neutronic Analysis for The Radial Direction Heterogeneous Core Configuration of GFR with Thorium Fuel. Journal of Physics: Conference Series, 2734 (1), 012066. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2734/1/012066
16. Maulana, M. R., Dewi Syarifah, R., Prasetya, F., Mabruri, A. M., Arkundato, A., Rohman, L. (2024). Comparative Analysis of Hexagonal and Square Fuel Pin Geometry Designs of GFR using Uranium Carbide Fuel. Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology, 5 (3), 109–116. https://doi.org/10.23960/jemit.v5i3.252
17. Prasetya, F., Syarifah, R. D., Karomah, I., Aji, I. K., Trianti, N. (2024). A comparative analysis of gas-cooled fast reactor using heterogeneous core configurations with three and five fuel variations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (8 (127)), 6–17. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298202
18. Dewi Syarifah, R., Mabruri, A. M., Hanifah, Z., Prasetya, F., Arkundato, A., Rohman, L., Maulina, W. (2025). Neutronic Investigation of the Fuji-12 MSR Reactor with A Rectangular Core Configuration and Plutonium-Based Fuel. Sains Malaysiana, 54 (6), 1605–1616. https://doi.org/10.17576/jsm-2025-5406-15
19. Shelley, A., Ovi, M. H. (2021). Use of americium as a burnable absorber for VVER-1200 reactor. Nuclear Engineering and Technology, 53 (8), 2454–2463. https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.024
20. Syarifah, R. D., Su'ud, Z., Basar, K., Irwanto, D. (2020). Actinide Minor Addition on Uranium Plutonium Nitride Fuel for Modular Gas Cooled Fast Reactor. Journal of Physics: Conference Series, 1493 (1), 012020. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012020
21. Syarifah, R. D., Prasetya, F., Mabruri, A. M., Arkundato, A., Trianti, N. (2024). The Effect of Adding Minor Actinide Fuel Rods on GFR Reactor in Radiopharmaceutical Waste Production Using OpenMC Program. Science and Technology Indonesia, 9 (4), 857–865. https://doi.org/10.26554/sti.2024.9.4.857-865
22. Syarifah, R. D., Sari, A. K., Arkundato, A., Irwanto, D., Su'ud, Z. (2022). Neutronics analysis of UN-PuN fuel for 300MW pressurized water reactor using SRAC-COREBN code. EUREKA: Physics and Engineering, 6, 12–23. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.002247
23. Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihashi, K. (2007). SRAC2006: A comprehensive neutronics calculation code system. Japan Atomic Energy Agency. Available at: https://inis.iaea.org/records/9zdp8-g1z91
24. Okumura, K. (2007). COREBN; A Core burn-up calculation module for SRAC2006. https://doi.org/10.11484/jaea-data-code-2007-003

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.350505

DEVISING A METHOD FOR ASSESSING EFFICIENCY OF THE COOLING SYSTEM AND DETERMINING THE THERMAL STATE OF VERTICAL SYNCHRONOUS HYDROGENERATORS USING THREE-DIMENSIONAL CFD SIMULATION (p. 49–58)

Andrii Yehorov
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6643-4256

Stanislav Kravchenko
National Aerospace University
"Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-6409-4767

Oleksii Duniev
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8196-7077

Oleksandr Vasyliev
National Aerospace University
"Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9251-8768

Denys Hromenko
National Aerospace University
"Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3073-3713

Serhii Lukashevych
National Aerospace University
"Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8386-6237

Oleh Buhaiov
Limited Liability Company
"Kharkov Electric Machine-Building Plant", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1233-3569

Kostiantyn Liakhov
Limited Liability Company
"Kharkov Electric Machine-Building Plant", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0417-4028

Anton Kovryga
JSC "Ukrainian Energy Machines", Kharkiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5843-8349

Dmytro Obidin
Flight Training School "Condor", Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9923-9024

This study explores heat and mass transfer processes in the structural elements of an umbrella-type hydrogenerator, as well as the ventilation and cooling system in the active components of the hydrogenerator. A vertical synchronous air-cooled hydrogenerator with a rated capacity of 60 MW has been investigated.

The task addressed relates to the cooling efficiency of generator components. Conventional analytical calculation methods do not make it possible to identify local overheating zones and pressure distribution in complex ventilation channels. Therefore, it becomes necessary to use numerical methods and algorithms to calculate and analyze the cooling efficiency of the generator's active parts.

The main result of this study is the designed structure of the guide channels (blades) of the rotor, which provides the required air flow rate of 45 m^3/s. At the same time, the maximum values of the winding temperature do not exceed the permissible values for class F insulation.

The CFD calculation detailed the action of the superchargers and showed the real pressure in the channels and the volume of air passing through each section of the generator. The error between the results from CFD modeling and analytical calculations is less than 3%.

The results are attributed to the detailed reproduction of the geometry of the ventilation channels in the 3D model, which made it possible to determine the real aerodynamic resistance and cooling medium consumption.

The proposed method uses the boundary conditions of the third kind for a comprehensive calculation of the conjugate heat and mass transfer.

The proposed structure could be implemented in the design and modernization of air-cooled hydrogenerators.

Keywords: hydrogenerator ventilation system, CFD simulation, rotor channels, fan operating characteristic.

References

1. Hydropower Special Market Report (2021). International Energy Agency. Available at: https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report
2. Siciliano, G., Urban, F. (Eds.) (2017). Chinese Hydropower Development in Africa and Asia. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315440040
3. Rutschmann, P., Kampa, E., Wolter, C., Albayrak, I., David, L., Stoltz, U., Schletterer, M. (Eds.) (2022). Novel Developments for Sustainable Hydropower. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99138-8
4. Renewable Power Generation Costs in 2022 (2023). IRENA. Available at: https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022
5. 2023 World Hydropower Outlook (2023). International Hydropower Association. Available at: https://www.hydropower.org/publications/2023-world-hydropower-outlook
6. Quaranta, E., Aggidis, G., Boes, R. M., Comoglio, C., De Michele, C., Ritesh Patro, E. et al. (2021). Assessing the energy potential of modernizing the European hydropower fleet. Energy Conversion and Management, 246, 114655. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114655
7. Traxler-Samek, G., Binder, A., Bartosch, M. (2020). Combination of Numerical and Analytical Methods for Hydrogenerator Calculation. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2589–2595. https://doi.org/10.1109/icem49940.2020.9270973
8. Traxler-Samek, G., Zickermann, R., Schwery, A. (2010). Cooling Airflow, Losses, and Temperatures in Large Air-Cooled Synchronous Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (1), 172–180. https://doi.org/10.1109/tie.2009.2031191
9. Yu, W., Fangmian, D., Jiankangy, W., Ziran, C., Lin, R. (2022). Effect of evaporative cooling of stator core on electromagnetic field of large horizontal generator. 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 1–4. https://doi.org/10.1109/icems56177.2022.9982834
10. Tome-Robles, D. J., Nøland, J. K., Maurer, F., Øyvang, T. (2023). Thermal Mapping of the Hydrogenerator's Reactive Power Boosting Ability at Various Time Windows. 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 1–5. https://doi.org/10.1109/pesgm52003.2023.10252548
11. Shan, R., Duan, J., Zeng, Y., Qian, J., Dong, G., Zhu, M., Zhao, J. (2024). Study on the Thermal Field of a Hydro-Generator under the Effect of a Plateau Climate. Energies, 17 (4), 932. https://doi.org/10.3390/en17040932
12. Fan, Y., Wen, X., Xu S., Deng, W. (2006). 3D Analysis and Calculation of Stator Temperature Field of Hydro-generator in the Case of Sudden Short Circuit. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 155–158. https://doi.org/10.1109/elinsl.2006.1665280
13. Fan, Y., Wen, X., Jafri, S. A. K. S. (2012). 3D transient temperature field analysis of the stator of a hydro-generator under the sudden short-circuit condition. IET Electric Power Applications, 6 (3), 143–148. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2011.0039
14. Yehorov, A., Duniev, O., Masliennikov, A., Gouws, R., Dobzhanskyi, O., Stamann, M. (2025). Study on the Thermal State of a Transverse-Flux Motor. IEEE Access, 13, 20893–20902. https://doi.org/10.1109/access.2025.3534284
15. Shevchenko, V. V., Shylkova, L. V., Strokous, A. V. (2022). Determination of the Permissible Range of Turbogenerators Non-Nominal Operating Modes at Thermal Power Plants. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), 01–05. https://doi.org/10.1109/mees58014.2022.10005663

16. SanAndres, U., Almandoz, G., Poza, J., Ugalde, G. (2014). Design of Cooling Systems Using Computational Fluid Dynamics and Analytical Thermal Models. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (8), 4383–4391. https://doi.org/10.1109/tie.2013.2286081
17. Dang, D.-D., Pham, X.-T., Labbe, P., Torriano, F., Morissette, J.-F., Hudon, C. (2018). CFD analysis of turbulent convective heat transfer in a hydro-generator rotor-stator system. Applied Thermal Engineering, 130, 17–28. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.034
18. Vasylenko, S. M., Kulinchenko, V. R., Shevchenko, O. Yu., Piddubnyi, V. A. (2024). Hidrohazodynamika. Kyiv: Vydavnychyi dim "Kondor", 676. Available at: https://condor-books.com.ua/monografiyi/gidrogazodinamika-monografiya
19. Howard, G. J. (2017). Finite Element Modelling of Creep for an Industrial Application. University of Pretoria. Available at: http://hdl.handle.net/2263/60133

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352876

DEVELOPMENT OF A CONCEPT OF GRAVITY ENERGY STORAGE SYSTEMS BASED ON DISCONTINUED WELLS (p. 59–66)

Oleg Vytyaz
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8666-550X

Ruslan Rachkevych
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4113-1907

Ivan Petryk
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0863-5476

Eduard Velikanov
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3158-5998

The object of the study is the well gravity energy storage system (WellGES) implemented in a vertical oil and gas well. The system consists of a heavy load suspended on steel cables that moves along the shaft of a discontinued well to convert potential energy into electrical energy via generators. The inherent instability of renewable energy sources requires the implementation of grid balancing technologies and peak load coverage.

A concept is proposed that involves using the great depth of decommissioned oil and gas wells for gravity energy storage, as well as the feasibility of using such technology for large-scale energy storage.

The well gravity energy storage system converts excess electrical energy into potential mechanical energy. This conversion is carried out by lifting a load-storage unit that moves freely along the wellbore using a cable and a drum with an electric machine operating in engine mode. When the load is lowered, the electric machine switches to regenerative braking mode, returning the stored energy to the power grid.

The advantages of the well gravity energy storage system over existing similar systems have been identified. In particular, the use of a significant height difference (deep wells), lower capital investments due to the use of ready-made objects, environmental safety, and independence from atmospheric conditions. Kinematic and power calculations of the system are carried out, including determining energy consumption, calculation of the hoist, selection of an electric machine and gear ratio of a multi-stage mechanism. Using the example of well No. 64 – Dolyna (depth 2000 m, load 4000 kg), it was calculated that the battery capacity is 22 kWh, which confirms the possibility of implementing the system.

Keywords: gravity energy storage, wells, renewable energy sources, load-storage unit.

References

1. Cai, K., Han, Y., Xia, R., Wu, J., Wang, J., Lund, P. D. (2024). Gravity Energy Storage: A Review on System Types, Techno-Economic Assessment and Integration With Renewable Energy. WIREs Energy and Environment, 13 (6). https://doi.org/10.1002/wene.543
2. Tong, W., Lu, Z., Chen, W., Han, M., Zhao, G., Wang, X., Deng, Z. (2022). Solid gravity energy storage: A review. Journal of Energy Storage, 53, 105226. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226
3. Wang, R., Zhang, L., Shi, C., Zhao, C. (2025). A Review of Gravity Energy Storage. Energies, 18 (7), 1812. https://doi.org/10.3390/en18071812
4. Hunt, J. D., Zakeri, B., Falchetta, G., Nascimento, A., Wada, Y., Riahi, K. (2020). Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies. Energy, 190, 116419. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116419
5. Berrada, A., Emrani, A., Ameur, A. (2021). Life-cycle assessment of gravity energy storage systems for large-scale application. Journal of Energy Storage, 40, 102825. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102825
6. Berrada, A. (2022). Financial and economic modeling of large-scale gravity energy storage system. Renewable Energy, 192, 405–419. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.086
7. Berrada, A., Loudiyi, K., Zorkani, I. (2017). System design and economic performance of gravity energy storage. Journal of Cleaner Production, 156, 317–326. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.043
8. Botha, C. D., Kamper, M. J. (2019). Capability study of dry gravity energy storage. Journal of Energy Storage, 23, 159–174. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015
9. Bowoto, O. K., Emenuvwe, O. P., Azadani, M. N. (2021). Gravitricity based on solar and gravity energy storage for residential applications. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 12 (3), 503–516. https://doi.org/10.1007/s40095-021-00393-1
10. Emrani, A., Berrada, A., Arechkik, A., Bakhouya, M. (2022). Improved techno-economic optimization of an off-grid hybrid solar/wind/gravity energy storage system based on performance indicators. Journal of Energy Storage, 49, 104163. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104163
11. Tong, W., Lu, Z., Zhao, H., Han, M., Zhao, G., Hunt, J. D. (2023). The structure and control strategies of hybrid solid gravity energy storage system. Journal of Energy Storage, 67, 107570. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107570
12. Hunt, J. D., Nascimento, A., Zakeri, B., Jurasz, J., Dąbek, P. B., Barbosa, P. S. F. et al. (2022). Lift Energy Storage Technology: A solution for decentralized urban energy storage. Energy, 254, 124102. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124102
13. Zakeri, B., Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 569–596. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011
14. Break Through with G-VAULT™ - Gravity Energy Storage. Energy Vault. Available at: https://www.energyvault.com/products/g-vault-gravity-energy-storage

15. Gravitricity. Available at: https://www.huismanequipment.com/en/products/renewables/gravitricity#specs
16. ARES North America. Available at: https://aresnorthamerica.com/
17. Borysevych, B. D., Smaha, B. I., Senchishak, V. M., Popovych, V. Ya. (2004). Osnovy teoriyi ta rozrakhunku zasobiv mekhanizatsiyi peremishchennia vantazhu. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 269.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352509

REVEALING THE INFLUENCE OF AGE AND FRACTIONAL COMPOSITION OF WOODY BIOMASS ON THE KINETIC CHARACTERISTICS OF THERMAL DECOMPOSITION (p. 67–78)

Andrii Kapustianskyi
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2771-2505

Kateryna Romanova
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9738-3383

Igor Galyanchuk
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6242-1749

Oksana Yurasova
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9930-9152

This study investigates processes related to thermal decomposition and direct combustion of woody biomass derived from the fast-growing energy willow Salix fragilis. The task addressed is predetermined by the lack of a sufficient database on kinetic parameters required for the efficient utilization of woody biofuel in modern boiler systems, particularly under conditions of transitioning from fossil to renewable energy sources.

The thermal degradation pattern of woody biomass of different ages and particle-size distributions was explored in detail using differential thermogravimetry (DTG) and differential thermal analysis (DTA). The results demonstrate empirical dependences of relative mass loss of samples at heating, which made it possible to identify the characteristic stages of thermal decomposition and the intensity of mass transfer.

The clearly observed influence of biomass age and particle-size distribution enabled identification of the key kinetic features that directly affect the combustion rate and completeness of fuel conversion. These differences provide a more accurate prediction of fuel behavior in actual power units and lay the basis for forming the primary database of combustion kinetic constants. The results are attributed to differences in the structural organization of the wood, the biomass age, as well as the content of volatile components in samples of different age groups.

The practical application of the established dependences is relevant for the design and optimization of boilers operating on comminuted woody biomass. The defined parameters make it possible to optimize fuel particle-size composition, ensure a rational residence time of biomass particles in the combustion zone, and improve the energy efficiency of boiler units when replacing traditional fuels with renewable raw materials.

Keywords: energy willow (Salix fragilis), thermal analysis, thermal decomposition, thermogram, derivatograph.

References

1. DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. Available at: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX-:32018L2001&from=EN
2. Varchenko, O. M., Oleksandrivna, D. O., Halchynska, Y. M., Tkachenko, K. V., Byba, V. A., Svynous, N. I. (2020). Strategic Priorities for the Use of Biomass in the Energy Supply System of Ukraine. Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development, 9 (1), 23–27. https://doi.org/10.2478/vjbsd-2020-0005
3. Geletukha, G. G., Zheliezna, T. A., Drahniev, S. V. (2023). Analysis of prospects and sustainability issues of liquid motor biofuels production in the eu and in Ukraine. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 45 (1), 46–54. https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2023.6
4. Klymchuk, O., Korniychuk, O., Yaremenko, O., Lapshin, S., Samborska, O., Kovalov, B. (2024). Global processes of solid biofuel production: Trends and prospects of its development in Ukraine. Energy Reports, 12, 5346–5355. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.007
5. Kravets, T., Galyanchuk, I., Yurasova, O., Kapustianskyi, A., Romanova, K. (2025). Technological and Engineering Aspects of the Development of Biogas and Biomethane Plants in Ukraine: Prospects for Integration into the Country's Energy System. Grassroots Journal of Natural Resources, 8 (1), 801–827. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080134
6. Clean Energy for All Europeans Package. European Commission. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en
7. Wieruszewski, M., Mydlarz, K. (2022). The Potential of the Bioenergy Market in the European Union – An Overview of Energy Biomass Resources. Energies, 15 (24), 9601. https://doi.org/10.3390/en15249601
8. Alcocer-García, H., Sánchez-Ramírez, E., García-García, E., Ramírez-Márquez, C., Ponce-Ortega, J. M. (2025). Unlocking the Potential of Biomass Resources: A Review on Sustainable Process Design and Intensification. Resources, 14 (9), 143. https://doi.org/10.3390/resources14090143
9. Ali, F., Dawood, A., Hussain, A., Alnasir, M. H., Khan, M. A., Butt, T. M. et al. (2024). Fueling the future: biomass applications for green and sustainable energy. Discover Sustainability, 5 (1). https://doi.org/10.1007/s43621-024-00309-z
10. Matusiak, M., Ślęzak, R., Ledakowicz, S. (2020). Thermogravimetric Kinetics of Selected Energy Crops Pyrolysis. Energies, 13 (15), 3977. https://doi.org/10.3390/en13153977
11. Wang, L., Lei, H., Liu, J., Bu, Q. (2018). Thermal decomposition behavior and kinetics for pyrolysis and catalytic pyrolysis of Douglas fir. RSC Advances, 8 (4), 2196–2202. https://doi.org/10.1039/c7ra12187c
12. Salleh, S. F., Mohd Roslan, M. E., Abd Rahman, A., Shamsuddin, A. H., Tuan Abdullah, T. A. R., Sovacool, B. K. (2020). Transitioning to a sustainable development framework for bioenergy in Malaysia: policy suggestions to catalyse the utilisation of palm oil mill residues. Energy, Sustainability and Society, 10 (1). https://doi.org/10.1186/s13705-020-00269-y
13. Zsinka, V., Tarcsay, B. L., Miskolczi, N. (2024). Determination of Kinetic and Thermodynamic Parameters of Biomass Gasification with TG-FTIR and Regression Model Fitting. Energies, 17 (8), 1875. https://doi.org/10.3390/en17081875

14. Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. Renewable Energy, 107, 235–244. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008
15. Yusuf, N., Almomani, F. (2023). Recent advances in biogas purifying technologies: Process design and economic considerations. Energy, 265, 126163. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126163
16. Lysenko, A. A., Vorobiov, M. V. (2021). Analysis of direct biomass combustion process in industrial rotary furnaces. Collection of Scientific Publications NUS, 1, 48–53. https://doi.org/10.15589/znp2021.1(484).6
17. Fischer, O., Lemaire, R., Bensakhria, A. (2024). Thermogravimetric analysis and kinetic modeling of the pyrolysis of different biomass types by means of model-fitting, model-free and network modeling approaches. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149 (19), 10941–10963. https://doi.org/10.1007/s10973-023-12868-w
18. Melikoglu, M., Ozdemir, M., Ates, M. (2023). Pyrolysis kinetics, physicochemical characteristics and thermal decomposition behavior of agricultural wastes using thermogravimetric analysis. Energy Nexus, 11, 100231. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100231
19. Porotnikova, N., Zakharov, D., Khodimchuk, A., Kurumchin, E., Osinkin, D. (2023). Determination of Kinetic Parameters and Identification of the Rate-Determining Steps in the Oxygen Exchange Process for LaNi0.6Fe0.4O3−δ. International Journal of Molecular Sciences, 24 (16), 13013. https://doi.org/10.3390/ijms241613013
20. BS ISO 334:2020. Coal and coke. Determination of total sulfur. Eschka method. https://doi.org/10.3403/30404810
21. ISO 17247:2020. Coal and coke – Ultimate analysis. Geneva: International Organization for Standardization. Available at: https://www.iso.org/standard/79740.html
22. ISO 625:2002. Solid mineral fuels – Determination of carbon and hydrogen – Liebig method. Geneva: International Organization for Standardization.
23. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86 (12-13), 1781–1788. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013
24. Diblasi, C. (2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Progress in Energy and Combustion Science, 34 (1), 47–90. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001
25. Grønli, M. G., Várhegyi, G., Di Blasi, C. (2002). Thermogravimetric Analysis and Devolatilization Kinetics of Wood. Industrial & Engineering Chemistry Research, 41 (17), 4201–4208. https://doi.org/10.1021/ie0201157
26. Vamvuka, D., Sfakiotakis, S. (2011). Effects of heating rate and water leaching of perennial energy crops on pyrolysis characteristics and kinetics. Renewable Energy, 36 (9), 2433–2439. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.013
27. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

АНОТАЦІЇ

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352199

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ (с. 6–14)

П. А. Шевчик, В. Є. Польовий, Я. С. Ні

Об'єктом дослідження є процес забезпечення автономності промислових підприємств в умовах критичної нестабільності централізованого електропостачання та динамічних ринкових тарифів.

В умовах значних втрат генеруючих потужностей та частих перебоїв у постачанні електроенергії підприємства часто використовують автономні джерела живлення. Оптимальне використання таких джерел потребує економічного обґрунтування та розроблення відповідних моделей. Завданням цих моделей є підвищення економічної ефективності та енергетичної незалежності підприємства шляхом автоматизації оптимального управління джерелами енергії.

У роботі запропоновано дворівневу систему. Перший рівень відповідає за прогнозування енергоспоживання. Другий – детермінований алгоритм оптимізації для автоматичного вибору джерела живлення та економічно обґрунтованого управління графіком роботи автономних джерел живлення.

При прогнозуванні енергоспоживання було проведено порівняння двох моделей побудованих на основі Random Forest та LightGBM. Моделі продемонстрували середні абсолютні похибки, у відсотках від середнього, 5–7% та 8–10%, що свідчить про їхню придатність для подальшого прийняття рішень.

Аналіз роботи алгоритму оптимізації на реальних даних продемонстрував загальну економію витрат на енергоспоживання в межах 9–12% порівняно з неоптимізованим використанням електроенергії з мережі. Цих результатів досягнуто завдяки вчасному перемиканні між центральним та альтернативними джерелами електропостачання. Перемикання відбувається тоді, коли використання джерела стає економічно вигіднішим за умови дотримання технічних обмежень.

Отримана система може бути застосована на підприємствах, які вимагають безперебійного постачання електроенергії та використовують генератори як альтернативні джерела живлення.

Ключові слова: оптимізація енергоспоживання підприємства, управління генераторами, машинне навчання, регресія LightGBM.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352513

РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧОДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ (с. 15–26)

Aizada Kuanyshtaeva, Yevgeniy Kotov, Karshiga Smagulova, Fariza Abilzhanova

Об'єктом дослідження є система електропостачання гірничодобувного підприємства ТОВ «Нова-Цинк», розташованого в Центральному регіоні Республіки Казахстан, яке спеціалізується на видобутку та збагаченні свинцево-цинкових руд. Надійне електропостачання в гірничодобувних підприємствах стикається з труднощами через великі механічні навантаження, вібрацію та суворі погодні умови; це тематичне дослідження використовується лише як приклад умов, поширених у багатьох гірничодобувних регіонах світу. У цьому дослідженні пропонується метод діагностики та прогнозування для розподільчих енергосистем на основі стандартно доступних експлуатаційних записів та кліматичних показників. Метод був протестований з використанням даних про відключення за 2020–2024 роки. Використовуючи метод найменших квадратів, було отримано багатовимірну регресійну модель для тривалості аварійного відключення фідера як функції пошкодження кабелю (F5), відмови трансформатора (F6) та кліматичного фактора (Клімат). Модель є значущою загалом (F-тест $p < 0{,}01$) та пояснює 68,7% варіації простою ($R^2 = 0{,}687$); залишкова діагностика вказує на нормальність та відсутність автокореляції. Середні граничні ефекти становлять 7,561 год для відмов кабелів, 3,314 год для відмов трансформаторів та 2,418 год для кліматичних впливів, що виділяє кабелі як домінуючу рушійну силу тривалих відключень. Для оцінки енергетичної ефективності було побудовано окрему модель для частки втрат в енергосистемі як функції тривалості відключення, колізій фаз (F3) та клімату. Ця модель втрат має низьку пояснювальну силу ($R^2 = 0{,}2013$) та незначні коефіцієнти факторів ($p > 0{,}05$). Нарешті, двовимірні регресії показують, що клімат сильно впливає на колізії фаз (F3) ($R^2 = 0{,}793$) та помірно впливає на замикання на землю (F1) та відколювання ізолятора (F2) ($R^2 = 0{,}533$ кожен). Запропонований метод підтримує пріоритезацію технічного обслуговування, заходи щодо пом'якшення кліматичних змін та постійне оновлення в міру додавання нових записів про відключення, посилюючи прийняття рішень та стійкість системи.

Ключові слова: електропостачання, діагностика, прогнозування відмов, надійність, гірничодобувне підприємство, регресійний аналіз.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352343

ВИЗНАЧЕННЯ КОНФІГУРАЦІЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МАСИВУ ІЗ ЗМЕНШЕНИМ ВПЛИВОМ ЧАСТКОВОГО ЗАТІНЕННЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ ПРОДУКТИВНІСТЬ (с. 27–36)

О. О. Шавьолкін, Г. В. Кругляк, І. О. Шведчикова, Т. Я. Біла, А. В. Пісоцький

Об'єктом дослідження є енергетичні процеси в масиві фотоелектричних панелей системи електроживлення об'єкту в динамічних режимах руху смуги часткового затінення. Робота спрямована на підвищення енергетичної продуктивності масиву фотоелектричних панелей в системі електроживлення локального об'єкта в умовах часткового затінення. Згідно кліматичних даних обґрунтовано методику моделювання руху смуги затінення хмарами з урахуванням напряму вітру. Удосконалено модель масиву з введенням смуги часткового затінення, що рухається в заданих напрямах. Це дозволило здійснити в динамічних режимах

оцінку впливу напряму та швидкості руху смуги для обраних конфігурацій панелей згідно їх розташуванню та топології з'єднання. Відповідно до прийнятої потужності масиву визначено можливі конфігурації з використанням 16 фотоелектричних панелей потужністю 655 Вт кожна. Моделюванням підтверджено ускладнення траєкторії точки глобального максимуму потужності в умовах руху смуги затінення. Це проявляється у множинності локальних максимумів, непередбачуваній траєкторії руху глобального максимуму в залежності від конфігурації масиву та напряму руху смуги. Встановлено відсутність впливу швидкості смуги на показники. За результатами моделювання визначено рекомендовані конфігурації з мінімальним впливом затінення на енергетичні показники за руху смуги згідно переважних напрямків вітру. Показано, що потужність генерації за переважних напрямів смуги затінення відносно середнього значення за всіма напрямками руху становить не менше 96%. Траєкторія руху глобального максимуму є монотонною, що не передбачає використання спеціальних алгоритмів відстеження максимальної потужності. Це дозволяє за потужності панелей 655 Вт сформувати конфігурації масиву із сумарною потужністю в діапазоні 3.93–15.72 кВт.

Ключові слова: конфігурація фотоелектричного масиву, рух смуги затінення, траєкторія глобального максимуму потужності.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352394

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАВАННЯ МІНОРНИХ АКТИНОЇДІВ НА ПРОЦЕС ВИГОРАННЯ ТА ВИДІЛЕННЯ ВАЖКИХ НУКЛІДІВ У МАЛИХ МОДУЛЬНИХ ШВИДКИХ РЕАКТОРАХ З ГАЗОВИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА UN-PUN (с. 37–48)

Mila Hidayatul Aula, Ratna Dewi Syarifah, Ahmad Haris Rasidi, Abdulloh Hasan Shodiq, Muhammad Husein Shodiq, Bekti Palupi, Nuri Trianti, Zaki Su'ud

Об'єктом цього дослідження є малий модульний газоохолоджувальний швидкий реактор (ГШР), що працює на UN-PuN з додаванням мінорних актиноїдів (МА). Проблема, що вирішується в цьому дослідженні, полягає в визначенні впливу додавання МА на критичність, стабільність вигорання палива та трансмутацію ядерних відходів малого модульного ГШР. Досліджувані параметри включають *k-eff*, макроскопічний поперечний переріз, коефіцієнт конверсії (КК), кількість важких нуклідів та ймовірність утворення радіофармацевтичних ізотопів. Дослідження проводилося за допомогою обчислювального аналізу SRAC-COREBN, а в якості МА, що використовувалися в цьому дослідженні, були використані Pa-231, Am-241 та Np-237. Отримані результати показують, що додавання МА в середньому призводить до зменшення *k-eff*, величина якого залежить від типу та концентрації МА. Макроскопічний поперечний переріз виявляє зміни значень, такі як збільшення макроскопічного поперечного перерізу поглинання, особливо у випадку Am-241. Потім, збільшення макроскопічного поперечного перерізу поділу проходить при високих енергіях. КК > 1 та коефіцієнт інверсії важкого нукліда спостерігається приблизно 50% у всіх конфігураціях. Крім того, еволюція продуктів поділу, таких як Tc-99, Rh-105 та I-135, свідчить про випадкове утворення радіофармацевтичного ізотопу. Інтерпретація результатів показує, що додавання МА впливає на *k-eff* та КК, оскільки ізотопи, такі як Am-241, Np-237 та Pa-231, активно беруть участь у поділі та перетворенні матеріалу з використанням спектру швидких нейтронів. Ключовою особливістю отриманих результатів є стабільний профіль вигорання, де МА ефективно функціонує в цільовій трансмутації, не порушуючи споживання основного ділиться палива, що ділиться. Ці результати можуть бути технічною основою для підтримки національної енергетичної безпеки та сталого управління ядерними відходами.

Ключові слова: коефіцієнт конверсії, GFR, COREBN, *k-eff*, мінорний актиноїд, радіофармацевтичний препарат, малий модульний реактор, трансмутація.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.350505

СТВОРЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ СИНХРОННИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРИВИМІРНОГО CFD-МОДЕЛЮВАННЯ (с. 49–58)

А. В. Єгоров, С. С. Кравченко, О. О. Дунєв, О. О. Васильєв, Д. В. Громенко, С. Ю. Лукашевич, О. В. Бугайов, К. О. Ляхов, А. Є. Коврига, Д. М. Обідін

Об'єктом дослідження є процеси тепломасообміну в конструктивних елементах гідрогенератора та система вентиляції і охолодження в активних компонентах гідрогенератора. Досліджується вертикальний синхронний гідрогенератор зонтичного типу з повітряним охолодженням потужністю 60 МВт.

В дослідженні вирішувалась проблема ефективності охолодження вузлів генератора при модернізації системи вентиляції. Традиційні аналітичні методи розрахунку не дозволяють з достатньою точністю виявити локальні зони перегріву та розподіл тиску в складних вентиляційних каналах. Тому виникла необхідність застосування чисельних методів та алгоритмів для розрахунку і аналізу ефективності охолодження активних частин генератора.

Основним результатом дослідження є створена конструкція напрямних каналів (лопаток) ротора, яка забезпечує необхідну витрату повітря 45 $м^3$/с. При цьому максимальні значення температури обмоток не перевищують допустимих значень для ізоляції класу F.

CFD-розрахунок деталізував дію нагнітачів і показав реальний тиск у каналах та об'єм повітря, що проходить через кожну ділянку генератора. Похибка між результатами моделювання CFD-методом та аналітичними розрахунками становить менше 3%.

Результати пояснюються детальним відтворенням геометрії вентиляційних каналів у 3D-моделі, що дозволило визначити реальні аеродинамічні опори та витрату охолоджуючого середовища.

Запропонований метод використовує граничні умови третього роду, отримані за допомогою чисельного моделювання фізичних процесів, для комплексного розрахунку спряженого тепломасообміну всіх вузлів гідрогенератора.

Запропонована конструкція може бути впроваджена при проєктуванні та модернізації гідрогенераторів з повітряним охолодженням.

Ключові слова: система вентиляції гідрогенератора, CFD-моделювання, канали ротора, робоча характеристика вентилятора.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352876

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ ГРАВІТАЦІЙНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ВИВЕДЕНИХ ІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СВЕРДЛОВИН (с. 59–66)

О. Ю. Витязь, Р. В. Рачкевич, І. Я. Петрик, Е. В. Веліканов

Об'єкт дослідження – свердловинний гравітаційний накопичувач енергії (WellGES), реалізований у вертикальному стовбурі нафтогазової свердловини. Система складається з важкого вантажу, підвішеного на сталевих тросах, який переміщується вздовж стовбура ліквідованої свердловини для перетворення потенційної енергії в електричну за допомогою генераторів. Притаманна відновлювальним джерелам енергії нестабільність генерації вимагає впровадження технологій балансування мережі та покриття пікових навантажень.

Запропоновано концепцію, яка передбачає використання великої глибини виведених з експлуатації нафтових і газових свердловин для гравітаційного зберігання енергії, а також доцільність використання такої технології для великомасштабного зберігання енергії.

Свердловинний гравітаційний накопичувач енергії перетворює надлишкову електричну енергію на потенційну механічну енергію. Дане перетворення здійснюється шляхом підйому вантажу-накопичувача, що вільно переміщується вздовж стовбура свердловини за допомогою троса та барабана з електричною машиною, яка працює в режимі двигуна. При опусканні вантажу електрична машина переходить у режим рекуперативного гальмування, повертаючи накопичену енергію в електромережу.

Визначено переваги свердловинного гравітаційного накопичувача енергії над існуючими аналогічними системами. Зокрема, використання значного перепаду висот (глибокі свердловини) сприяє меншим капіталовкладенням завдяки використанню готових об'єктів, екологічну безпеку та незалежність від атмосферних умов. Проведено кінематичний і силовий розрахунки системи, включаючи визначення енергоємності, розрахунок поліспасту, підбір електричної машини та передавального числа багатоступеневого механізму. На прикладі свердловини №64 – Долина (глибина 2000 м, вантаж 4000 кг) розраховано, що ємність накопичувача становить 22 кВт · год, що підтверджує можливість реалізації системи.

Ключові слова: гравітаційне накопичення енергії, свердловина, відновлювані джерела енергії, вантаж-накопичувач.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352509

ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ ВІКУ ТА ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ НА КІНЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ (с. 67–78)

А. О. Капустянський, К. О. Романова, І. Р. Галянчук, О. Г. Юрасова

Об'єктом даного дослідження є процеси термічного розкладу та прямого спалювання деревної біомаси швидкоростучої енергетичної верби Salix fragilis. Проблема полягає у відсутності достатньої бази кінетичних параметрів, необхідних для ефективного використання деревного біопалива в сучасних котельних установках, особливо в умовах переходу від викопних енергоресурсів до відновлювальних. У роботі детально проаналізовано особливості термодеструкції деревної біомаси різного віку та фракційного складу із застосуванням методів диференційної термогравіметрії (DTG) та диференційного термічного аналізу (DTA). Отримані результати демонструють емпіричні залежності відносної втрати маси зразків у процесі нагрівання, що дозволило визначити характерні стадії термічного розкладу та інтенсивність масообміну.

Завдяки чітко простежуваному впливу вікових характеристик та фракційного складу біомаси стало можливим виокремити ключові кінетичні особливості, які безпосередньо впливають на швидкість і повноту згоряння матеріалу. Ці відмінності забезпечують точніше прогнозування поведінки палива в реальних енергетичних агрегатах і створюють основу для формування первинної бази кінетичних констант спалювання. Пояснюються отримані результати різною структурною організацією деревини, віком деревної біомаси та вмістом летких компонентів у зразках різного віку.

Практичне застосування встановлених залежностей можливе під час проєктування та оптимізації роботи котлів, що працюють на подрібненій деревній біомасі. Визначені параметри дозволяють оптимізувати фракційний склад палива, забезпечити раціональну тривалість перебування частинок у зоні горіння та підвищити енергоефективність установок за умови заміщення традиційних видів палива відновлювальною сировиною.

Ключові слова: енергетична верба (Salix fragilis), термічний аналіз, термічна деструкція, термограма, дериватограф.