

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357602

**DETERMINING THE INFLUENCE OF BARREL LENGTH ON THE BALLISTIC CHARACTERISTICS OF HUNTING CARTRIDGES (p. 6–12)****Victor Golub**National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1111-8819>**Serhii Bisyk**National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5009-2113>**Gennadii Golub**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
Vytautas Magnus University Agriculture Academy, Akademija, Lithuania  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2388-0405>**Ihor Zozulevych**The Scientific and Research Center of Testing, Expertise and Certification of Personal Armored Protection, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0249-3408>**Oleksandr Kuprinenko**Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6692-0959>**Leonid Davydovs'kyi**National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2529-1989>**Sviatoslav Sedov**The Scientific and Research Center of Testing, Expertise and Certification of Personal Armored Protection, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8718-1112>**Oleh Aristarkhov**National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-4121>

A hunting rifle with a variable barrel length has been examined in this study. The task addressed was to determine the ballistic indicators of hunting cartridges for different barrel lengths.

A standard deviation in shot distribution on the target and the area of damage by hunting cartridges depending on the length of the hunting rifle barrel were established. The influence of barrel length on the ballistic characteristics of hunting cartridges was investigated by conducting a multifactorial experiment according to the D-optimal Box-Behnken plan.

As a result of experimental studies, it was found that the maximum value of standard deviation in shot distribution at the level of 21 cm is achieved with a barrel length of 150 mm and a shot charge mass of 36 g. At the same time, the gunpowder charge did not have a significant effect on the standard deviation in shot distribution on the target. The standard deviation of shot distribution has maximum values when the powder charge is maximum while the shot mass is minimum.

The area of damage was modeled by increasing the penetration point on the target to the size of the total equivalent diameter of the most vulnerable elements of unmanned aerial vehicles (UAVs) with FPV (First-Person View) piloting. On a target with an equivalent diameter of 8 cm, the area of damage has a maximum value of 1.2 m<sup>2</sup> with a barrel length of 150 mm, a powder charge mass of 2.28 g and

a shot charge mass of 54 g. Reducing the mass of the shot charge and the mass of the powder charge leads to a decrease in the area of damage at any barrel length.

The practical significance of the results is that they could be applied to improve cartridges and individual means of defeating UAVs with FPV piloting. In addition, they might be used in automatic protection systems that are promising for installation on combat vehicles.

**Keywords:** hunting rifle, powder charge, standard deviation, area of damage, dispersion model.

**References**

- Mekdad, Y., Aris, A., Babun, L., Fergougui, A. E., Conti, M., Lazzeretti, R., Uluagac, A. S. (2023). A survey on security and privacy issues of UAVs. *Computer Networks*, 224, 109626. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109626>
- Kumar, N., Chaudhary, A. (2024). Surveying cybersecurity vulnerabilities and countermeasures for enhancing UAV security. *Computer Networks*, 252, 110695. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110695>
- Guitton, M. J. (2021). Fighting the Locusts: Implementing Military Countermeasures Against Drones and Drone Swarms. *Scandinavian Journal of Military Studies*, 4 (1), 26–36. <https://doi.org/10.31374/sjms.53>
- Wang, J., Liu, Y., Song, H. (2021). Counter-Unmanned Aircraft System(s) (C-UAS): State of the Art, Challenges, and Future Trends. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36 (3), 4–29. <https://doi.org/10.1109/maes.2020.3015537>
- Xu, L., Luo, Z. (2025). Anti-UAV detection and identification technology: Fundamentals, methods and challenges. *Physical Communication*, 71, 102676. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2025.102676>
- Tyurin, V., Martyniuk, O., Mirnenko, V., Open'ko, P., Korenivska, I. (2019). General Approach to Counter Unmanned Aerial Vehicles. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), 75–78. <https://doi.org/10.1109/apuavd47061.2019.8943859>
- Tytarenko, O., Abramov, S., Kùitorov, M., Synytsina, Y. (2025). Countering FPV Drones: Insights from Ukraine's Combat Experience. *Advances in Military Technology*, 20 (2), 421–434. <https://doi.org/10.3849/aimt.01998>
- Mirnenko, V., Novichenko, S., Doska, O., Open'ko, P., Avramenko, O., Kurban, V. (2022). Methodology for Assessing the Level of Threats when Using Small Arms against Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Military Technology*, 17 (1), 107–120. <https://doi.org/10.3849/aimt.01486>
- Hambling, D. (2024). Drone vs drone is the new warfare. *New Scientist*, 264 (3512), 16. [https://doi.org/10.1016/s0262-4079\(24\)01806-2](https://doi.org/10.1016/s0262-4079(24)01806-2)
- Maitre, M., Chiaravalle, A., Horder, M., Chadwick, S., Beavis, A. (2021). Evaluating the effect of barrel length on pellet distribution patterns of sawn-off shotguns. *Forensic Science International*, 320, 110685. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110685>
- Kerkhoff, W., Maitimu, K., Pater, K. D. H., de Jong, M. A. (2023). The relationship between pellet size and shotgun dispersion patterns. *Journal of Forensic Sciences*, 69 (2), 461–468. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15427>
- Rotter, G., Correzzola, C., Del Ángel, V. F., Daminato, E., Causin, V. (2022). Characterisation of plastic wads: A useful approach for elucidating shooting accidents and homicides involving shotguns. *Forensic Science International*, 332, 111194. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2022.111194>
- Oura, P., Junno, A., Junno, J.-A. (2021). Deep learning in forensic shotgun pattern interpretation – A proof-of-concept study. *Legal Medicine*, 53, 101960. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2021.101960>

14. Meric, Ç., Polat, M. Ö., Altun, G. (2020). Shot range estimation of shotgun grain-loaded cartridges. *Forensic Science International*, 314, 110375. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110375>
15. Golub, V., Bisyk, S., Golub, G., Tsyvenkova, N., Dubok, I., Shkvarskiy, O. et al. (2025). Determining the ballistic characteristics of hunting cartridges. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (136)), 15–24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.336049>
16. Horvath, F., Gardner, K., Siegel, J. (1993). Range of Fire Estimates from Shotgun Pellet Patterns: The Effect of Shell and Barrel Temperature. *Journal of Forensic Sciences*, 38 (3), 585–592. <https://doi.org/10.1520/jfs13442j>
17. Kostorrizos, A., Spiliopoulou, C., Moraitis, K., Papadodima, S. (2023). Determination of Firing Distance based on Pellet Dispersion. *Austin Journal of Forensic Science and Criminology*, 10 (1). <https://doi.org/10.26420/austinjforensicsicriminol.2023.1094>
18. Golub, G. A., Kukharets, S. M., Tsyvenkova, N. M., Golubenko, A. A., Kalenichenko, P. S. (2018). Research on a boiler furnace module effectiveness working on small fracture wastes. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 55 (2), 9–18. Available at: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20183391971>
19. PlotDigitizer. Available at: <https://plotdigitizer.com>
20. Golub, V., Kurban, V., Sedov, S., Golub, G. (2022). Classification of Combat Wheeled Vehicles Using Cluster Analysis Methods. *Advances in Military Technology*, 17 (1), 5–16. <https://doi.org/10.3849/aimt.01499>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354698

**ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF RIGID SECONDARY SUPPORT SYSTEMS FOR GOB-SIDE RETAINED ENTRIES BASED ON STRAIN ENERGY ANALYSIS (p. 13–24)**

**Daria Chepiga**

Ivano-Frankivsk Regional Training and Course Complex of Housing and Communal Services, Ivano-Frankivsk, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3331-9128>

**Leonid Bachurin**

Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2513-7284>

**Serhii Podkopaiev**

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6051-4719>

**Danylo Polii**

Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3374-815X>

**Olena Visyn**

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2361-6708>

**Yevgen Podkopaiev**

Limited Liability Company Manufacturing Company Elteko, Kostyantynivka, Donetsk region, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2217-3017>

**Halyna Herasymchuk**

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1348-4927>

**Yaroslava Bachurina**

Donetsk National Technical University, Drohobych, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-040X>

This study investigates deformation processes occurring in secondary support systems for gob-side retained entries in coal mine extraction panels mining thin seams. The task addressed is to stabilize

gob-side retained entries by improving the bearing capacity of secondary support systems to prevent roof collapses and provide safe working conditions. The comparative assessment was conducted based on an analysis of strain energy-related indicators. Underlying the study are physical models simulating filling walls, concrete blocks, and combined structures consisting of blocks with wooden interlayers.

During uniaxial compression tests, the deformation capacity of each type of support system was determined; critical values of relative deformation at which the structures lose their functional performance were identified. The application of an energy-based approach has made it possible to quantify the stability limit and to predict the onset of structural failure. Experimental results showed that, under uniaxial compression, rigid secondary support systems operate under an increasing resistance mode before the initiation of failure processes. At the same time, the range of linear elastic deformation of the combined support structure is 33% greater than that of the homogeneous structure (damage initiation occurs at  $\lambda_b = 0.103$  and  $\lambda_b = 0.075$ – $0.08$ , respectively), which results in a delayed transition to loss of bearing capacity. The incorporation of limited yielding elements into rigid structures facilitates stress redistribution and enhances their deformation capacity.

An energy-based approach to analyzing the interaction between secondary support systems and the surrounding rock mass has been proposed, based on the use of strain energy density and its components, which characterize the processes of energy accumulation and dissipation. The practical significance of this study is associated with the application of the results to substantiate the design parameters for rigid secondary support systems for gob-side retained entries in coal extraction panels mining thin seams up to 1.2 m thick.

**Keywords:** entry support, bearing capacity, secondary support, deformation energy density, occupational safety.

**References**

1. Sheka, I. V. (2024). Obgruntuvannya ratsionalnykh parametriv kriplennia iz kompozytnykh materialiv dlia hirnychykh vyrobok vuhilnykh shakht, shcho roztashovani na hlybynakh ponad 1000 metriv. *Dnipro: Natsionalnyi tekhnichnyi universytet "Dniprovskva Politekhnikha"*, 158. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18898.77765>
2. Kyrychenko, V. Ya., Usachenko, B. M. (2008). Driftic metal timbers, answering to economic requirements and geomechanical problems of the big depths. *Heotekhnicheskaiia Mekhanyka*, 78, 178–189. Available at: <http://www.geotm.dp.ua/index.php/en/collection/474-geo-technical-mechanics-2008/geo-technical-mechanics-2008-78/7562-2024-06-04-19-42-58>
3. Bondarenko, V. I., Buzlyo, V. I., Tabachenko, M. M., Medianyuk, V. Yu. (2010). *Heomekhanichni osnovy pidvyshchennia stiykosti pidhotovchykh vyrobok*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet, 408. Available at: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/156064>
4. Pro zatverdzhennia Instruktsiyi z zabezpechennia stiykosti dilnychnykh vyrobok dlia povtornoho vykorystannia na vuhilnykh shakhtakh. *Ministerstvo Enerhetyky Ukrainy nakaz 10.11.2022 No. 378*. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1665-22>
5. Yalanskiy, A. O., Slashchov, I. M., Slashchova, O. A., Seleznov, A. M., Arestov, V. V. (2018). Development of new auxiliary measures for protecting preparatory roadways by the cast strips. *Geo-Technical Mechanics*, 141, 3–17. <https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.003>
6. Li, H., Zu, H., Zhang, K., Qian, J. (2022). Study on Filling Support Design and Ground Pressure Monitoring Scheme for Gob-Side Entry Retention by Roof Cutting and Pressure Relief in High-Gas Thin Coal Seam. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (7), 3913. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073913>
7. Kanin, V. O., Antsyferov, A. V. (2004). Okhorona hirnychykh vyrobok hazobetonnykh kriplenniam. *Donetsk: TOV "Alan"*, 396.

8. Qin, T., Wang, Y., Hou, X., Duan, Y. (2023). A characterization method for equivalent elastic modulus of rock based on elastic strain energy. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1120344>
9. Gong, F., Wang, Y. (2022). A New Rock Brittleness Index Based on the Peak Elastic Strain Energy Consumption Ratio. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55 (3), 1571–1582. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02738-y>
10. Rahimzadeh Kivi, I., Ameri, M., Molladavoodi, H. (2018). Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 167, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.061>
11. Liu, Z., Fan, T., Wang, Z., Yang, R., Fan, H., Wang, H., Hu, N. (2025). A rock brittleness evaluation method in interbedded reservoirs based on statistical damage constitutive. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 15 (7). <https://doi.org/10.1007/s13202-025-02008-5>
12. Qiao, L., Hao, J., Liu, Z., Li, Q., Deng, N. (2022). Influence of temperature on the transformation and self-control of energy during sandstone damage: Experimental and theoretical research. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32 (4), 761–777. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.02.008>
13. Krasnikova, O., Kuzmenko, P., Vyzhva, S. (2024). Analysis of the methods of determining the brittleness index and their application for terrigenous reservoir rocks of the Dnipro-Donetsk Basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (104), 22–29. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.03>
14. Li, L., Li, G., Gong, W., Wang, J., Deng, H. (2019). Energy Evolution Pattern and Roof Control Strategy in Non-Pillar Mining Method of Goaf-Side Entry Retaining by Roof Cutting – A Case Study. *Sustainability*, 11 (24), 7029. <https://doi.org/10.3390/su11247029>
15. Hui, Z.-L., Zhao, Z.-Q., Wei, X.-X., Yao-Li. (2025). The energy and stress evolution law of surrounding rock in gob side entry driving of adjacent mining faces. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10977-0>
16. Xin, X., Meng, Q., Pu, H., Wu, J. (2024). Theoretical analysis and numerical simulation analysis of energy distribution characteristics of surrounding rocks of roadways. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 147, 105747. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105747>
17. Wang, C., Liu, L., Elmo, D., Shi, F., Gao, A., Ni, P., Zhang, B. (2018). Improved energy balance theory applied to roadway support design in deep mining. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15 (4), 1588–1601. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aab3a0>
18. Huang, S., Li, Z. (2023). Optimization and Application of Coal Pillar in Fully Mechanized Mining Face based on Energy Analysis. *International Journal of Energy*, 3 (3), 47–51. <https://doi.org/10.54097/ije.v3i3.011>
19. Wang, W., Qiu, W. (2023). Energy-Dissipation Support Technology for Large Deformation Tunnels Based on the Post-Peak Behavior of Steel Plate Buckling: A Case Study. *Applied Sciences*, 13 (21), 11972. <https://doi.org/10.3390/app132111972>
20. Liu, X., Zhang, Y., Fan, D., Zhao, Y., Gao, Y., Pei, H., Shi, Z. (2025). Energy driven mechanism of surrounding rock deformation and failure of mining roadway and classified control technology. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98452-8>
21. Chepiga, D., Bessarab, I., Hnatiuk, V., Tkachuk, O., Kipko, O., Podkopaiev, S. (2023). Deformation as a process to transform shape and volume of protective structures of the development mine workings during coal-rock mass off-loading. *Mining of Mineral Deposits*, 17 (4), 1–11. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.001>
22. Bachurin, L. L., Iordanov, I. V., Bessarab, I. M., Korol, A. V., Kaiun, O. P., Podkopaiev, Y. S. et al. (2021). Comprehensive research of the stability of haulage drifts on steep coal seams in different protection methods. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannya*, 1 (93), 217–236. Available at: <https://ep3.nuwm.edu.ua/22666/>
23. Chepiga, D., Podkopaiev, S., Kayun, O., Bielikov, A., Podkopaiev, Y., Kipko, O., Pidhurna, O. (2024). Assessing the stability of protective structures in preparatory mining workings under conditions of static load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (129)), 57–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304721>
24. Sadd, M. H. (2009). *Elasticity*. Academic Press, 536. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374446-3.x0001-6>
25. Lu, G., Yu, T. (2003). *Energy absorption of structures and materials*. Woodhead Publishing, 403. <https://doi.org/10.1533/9781855738584>
26. Baron, L. I., Kurbatov, V. M. (1959). O diagramme szhatiya krepkih gornyh porod. *Nauchnye Soobsheniya IGD AN SSSR*, 22.
27. Hucka, V., Das, B. (1974). Brittleness determination of rocks by different methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11 (10), 389–392. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91109-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91109-7)

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357605

### SUBSTANTIATING THE DESIGN OF EQUIPMENT FOR PREPARING OIL AND GAS FIELD PRODUCTS FOR TRANSPORTATION (p. 25–34)

Tetiana Nesterenko

National University

"Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2387-8575>

Ivan Nazarenko

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>

Mykola Nesterenko

National University

"Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4073-1233>

Oleksandr Shevchenko

National University

"Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0478-7060>

Andrii Khyzhniak

National University

"Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5518-0723>

Iryna Bernyk

National University of Life

and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>

Artur Onyshchenko

National Transport University, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

Roman Moshkivskyi

National Transport University, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8172-1329>

This study investigates processes that separate gas-liquid flows and purify formation water in the equipment for oil and gas field production preparation units.

At the late stage of field development, the efficiency of separation depends on the ability of the equipment to operate under conditions of waterlogging, an increase in the content of mechanical impurities, and a decrease in formation pressure. Under such conditions, conventional separation equipment does not provide the required quality of hydrocarbon separation and purification of formation water.

The task addressed in this work has been solved by improving the internal structural elements in the three-phase separator and a cyclone in the hydrocarbon preparation unit. Hydraulic losses were within permissible values; no secondary removal of drops into the gas stream occurred. That was confirmed by the results of thermodynamic and CFD modeling. This is a feature of the approach in comparison with those reported in which studies of new design solutions were not comprehensively conducted.

The issues of hydraulic losses and secondary removal of drops into the gas stream remained open. The design solutions proposed in this work affected the separation efficiency – the volume of the selected condensate increased while the total hydraulic losses did not exceed 0.037 MPa. It has been proven that new structural solutions for separation elements provide a more uniform distribution of speeds and form local zones with reduced speeds.

The results are explained by a change in the flow structure, an increase in inertial deposition of drops, and a decrease in low-mobility zones in the flow part of the separation elements. The findings could be implemented in the reconstruction of oil and gas treatment plants, in the design of internal separation elements, and when choosing structural solutions for cyclones in order to purify formation water.

**Keywords:** oil and gas fields, hydrocarbon transportation, hydrocarbon preparation, formation water, thermodynamic modeling.

#### References

- Yang, L., Chen, X., Huang, C., Liu, S., Ning, B., Wang, K. (2024). A review of gas-liquid separation technologies: Separation mechanism, application scope, research status, and development prospects. *Chemical Engineering Research and Design*, 201, 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.11.057>
- Yuan, Y. (2024). The Analysis of Gas-liquid Separation Technology Research Progress. *E3S Web of Conferences*, 528, 01020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452801020>
- Chen, X., Liu, G., Jin, W. (2021). Natural gas purification by asymmetric membranes: An overview. *Green Energy & Environment*, 6 (2), 176–192. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.08.010>
- Liu, G., Chernikova, V., Liu, Y., Zhang, K., Belmabkhout, Y., Shekhah, O. et al. (2018). Mixed matrix formulations with MOF molecular sieving for key energy-intensive separations. *Nature Materials*, 17 (3), 283–289. <https://doi.org/10.1038/s41563-017-0013-1>
- Liu, G., Cadiau, A., Liu, Y., Adil, K., Chernikova, V., Carja, I. et al. (2018). Enabling Fluorinated MOF-Based Membranes for Simultaneous Removal of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> from Natural Gas. *Angewandte Chemie International Edition*, 57 (45), 14811–14816. <https://doi.org/10.1002/anie.201808991>
- Lai, X., Jiang, W., Chen, J., Ru, Y., Hu, W., Wang, S. (2021). Process Simulation Investigation of Purification and Deacidification in Supersonic Separation Process for Natural Gas Treatment. *Proceedings of the International Petroleum and Petrochemical Technology Conference 2020*, 266–284. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1123-0\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1123-0_27)
- Nesterenko, T., Nesterenko, M., Shevchenko, O., Omelchenko, O. (2023). Justification for the Choice of a Modeling Scheme for the Hydrocarbon Preparation Process for Transportation Using Supersonic Separation. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 2 (61), 86–93. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3864>
- James, P. W., Azzopardi, B. J., Wang, Y., Hughes, J. P. (2005). A Model for Liquid Film Flow and Separation in a Wave-Plate Mist Eliminator. *Chemical Engineering Research and Design*, 83 (5), 469–477. <https://doi.org/10.1205/cherd.03363>
- Makowski, Ł., Łaskowski, J., Tyrański, M. (2021). Influence of Modification of the Geometry of the Wave-Plate Mist Eliminators on the Droplet Removal Efficiency – CFD Modelling. *Processes*, 9 (9), 1499. <https://doi.org/10.3390/pr9091499>
- Moiseev, V., Manoilo, E., Liaposhchenko, A., Seif, H. (2020). Oilfield wastewater treatment. *Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: New Solutions in Modern Technologies*, 4 (6), 122–130. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.04.18>
- Li, Z. (2025). Optimization and experimental validation of a high-efficiency oil–water cyclone separator for well testing conditions. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72 (1). <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00585-0>
- Nunes, S. A., Magalhães, H. L. F., Gomez, R. S., Vilela, A. F., Figueiredo, M. J., Santos, R. S. et al. (2021). Oily Water Separation Process Using Hydrocyclone of Porous Membrane Wall: A Numerical Investigation. *Membranes*, 11 (2), 79. <https://doi.org/10.3390/membranes11020079>
- Simões, A., Macêdo-Júnior, R., Santos, B., Silva, L., Silva, D., Ruzene, D. (2020). Produced Water: An overview of treatment technologies. *International Journal for Innovation Education and Research*, 8 (4), 207–224. <https://doi.org/10.31686/ijier.vol8.iss4.2283>
- Khan, H., Lemma, T. A., Soon, W. P. K., Vijayakumaran, H., Marode, R. V. (2025). A Critical Review on the Comprehensive Assessment of Supersonic Separator Technologies for Enhanced Gas Processing and CO<sub>2</sub> Removal Efficiency. *Results in Engineering*, 28, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106923>
- Rahimpour, M. R., Makarem, M. A., Meshksar, M. (Eds.) (2024). *Advances Natural Gas: Formation, Processing, and Applications. Volume 8: Natural Gas Process Modelling and Simulation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2022-0-00187-2>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354601

#### DEVISING A TECHNIQUE FOR CONSTRUCTING TUBULAR SURFACES REFERRED TO A COORDINATE GRID OF LINES OF CURVATURE (p. 35–41)

**Andrii Nesvidomin**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9227-4652>

**Serhii Pylypaka**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1496-4615>

**Tetiana Volina**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-2208>

**Victor Nesvidomin**

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1495-1718>

**Oleksandr Solarov**

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1485-0685>

**Taras Voloshko**

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2605-8836>

**Taras Pylypaka**

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5582-1859>

**Lidiia Savchenko**

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9444-2031>

**Oleksandr Savchenko**

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0498-218X>

**Irina Zakharova**

Sumy State Pedagogical University  
 named after A. S. Makarenko, Sumy, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9693-5550>

This study considers the construction of tubular surfaces with a spatial axis of slope, referred to a coordinate grid of curvature lines. Such surfaces have a number of mathematical advantages compared to surfaces described by arbitrary coordinate grids. In differential geometry, this has a theoretical justification and applied value. This follows from the special role of curvature lines as geometrically privileged directions on a surface with minimal and maximal curvatures.

To parameterize a tubular surface in this way, it is necessary that the length of its axis be described by analytical dependences in a finite form. Typically, the length of spatial curves is determined by numerical integration. There is a known group of plane curves that are described by parametric equations as a function of the arc length and for which such a problem does not exist. This work proposes taking such curves as a horizontal projection of a spatial curve. The spatial curve should be constructed as a slope curve with a constant elevation angle relative to the horizontal plane. Then the spatial curve, the equations of which include the elevation angle, will be described as a function of the arc length. Its use as the axis of the tubular surface makes it possible to attribute the latter to the families of coordinate lines of curvature.

In this paper, the horizontal projection of the axis of the tubular surface is a logarithmic spiral. Parametric equations of the tubular surface in analytical form have been derived. A surface with the elevation angle of the axis  $\beta = 10^\circ$  and the radius of the generating circle  $\rho = 15$  linear units was constructed. The orthogonality of the resulting coordinate grid has been proven through the analysis of the coefficients of the first quadratic form ( $F=0$ ), which confirms the assignment of the surface to the lines of curvature. This makes it possible to improve the accuracy of calculating the stress-strain state of shells in mechanical engineering and aerospace engineering at simultaneous minimization of computational costs.

**Keywords:** curvature lines, slope curve, arc length, Frenet trihedron, orthogonal grid.

**References**

- Lytvynenko, A., Yukhymenko, M., Pavlenko, I., Pitel, J., Mizakova, J., Lytvynenko, O. et al. (2019). Ensuring the Reliability of Pneumatic Classification Process for Granular Material in a Rhomb-Shaped Apparatus. *Applied Sciences*, 9 (8), 1604. <https://doi.org/10.3390/app9081604>
- Novitskiy, A., Banniy, O., Novitskiy, Y. (2023). Logical-probabilistic model of the reliability of means for preparing and distributing fodder. *Naukovij Zhurnal "Tehnika Ta Energetika"*, 14 (1). <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.57>
- Pylypaka, S. F., Klendii, M. B., Trokhaniak, V. I., Kresan, T. A., Hryshchenko, I. Y., Pastushenko, A. S. (2021). External rolling of a polygon on closed curvilinear profile. *Acta Polytechnica*, 61 (1), 270–278. <https://doi.org/10.14311/ap.2021.61.0270>
- Pylypaka, S. F., Klendii, M. B., Nesvidomin, V. M., Trokhaniak, V. I. (2019). Particle motion over the edge of an inclined plane that performs axial movement in a vertical limiting cylinder. *Acta Polytechnica*, 59 (1), 67–76. <https://doi.org/10.14311/ap.2019.59.0067>
- Li, C.-Y., Wang, R.-H., Zhu, C.-G. (2013). An approach for designing a developable surface through a given line of curvature. *Computer-Aided Design*, 45 (3), 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.11.001>
- Althibany, N. (2021). Construction of Developable Surface with Geodesic or Line of Curvature Coordinates. *Journal of New Theory*, 36, 75–87. <https://doi.org/10.53570/jnt.987265>
- Karacan, M. K., Yayli, Y. (2008). On the geodesics of tubular surfaces in Minkowski 3-space. *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society. Second Series*, 31 (1). Available at: <https://eudml.org/doc/54573>
- Dogan, F., Yayli, Y. (2011). On the curvatures of tubular surface with bishop frame. *Communications Faculty Of Science University of Ankara Series A1Mathematics and Statistics*, 60 (1), 59–69. [https://doi.org/10.1501/commua1\\_0000000669](https://doi.org/10.1501/commua1_0000000669)
- Khalifa Saad, M., Yüksel, N., Oğraş, N., Alghamdi, F., Abdel-Salam, A. A. (2024). Geometry of tubular surfaces and their focal surfaces in Euclidean 3-space. *AIMS Mathematics*, 9 (5), 12479–12493. <https://doi.org/10.3934/math.2024610>
- Eren, K. (2021). On the harmonic evolute surfaces of tubular surfaces in euclidean 3-space. *Journal of Science and Arts*, 21 (2), 449–460. <https://doi.org/10.46939/j.sci.arts-21.2-a12>
- Hevko, I. B., Lyashuk, O. L., Leshchuk, R. Y., Rogatinska, L. R., Melnychuk, A. L. (2016). Investigation of the radius of bending for flexible screw sectional conveyers. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 48 (1), 35–42. Available at: [https://inma-ita.ro/inmateh/INMATEH\\_1\\_2016/48\\_5\\_Hevko%20Iv.B.pdf](https://inma-ita.ro/inmateh/INMATEH_1_2016/48_5_Hevko%20Iv.B.pdf)
- Lyashuk, O., Rohatynskiy, R., Hevko, I., Dmytriv, O., Tson, O., Tkachenko, I. et al. (2023). Investigation of Bulk Material Transportation by Screw Conveyer with Hinge-Pan Operating Device. *Key Engineering Materials*, 948, 169–182. <https://doi.org/10.4028/p-6qjn71>
- Pylypaka, S., Kresan, T., Trokhaniak, O., Taras, I., Demchuk, I. (2021). Parametric equations of a spatial curve as a function of length of the arc with given dependences of curvature and angle of ascent. *Journal for Geometry and Graphics*, 25 (2), 163–170. Available at: <https://www.heldermann-verlag.de/jgg/jgg25/j25h2pyly.pdf>
- Ju, Y., Konoplianchenko, I., Pu, J., Zhang, Z., Dong, Q., Dumanchuk, M. (2024). Optimization of structure and properties of WC-reinforced FeCoNiCr high-entropy alloy composite coating by laser melting. *Results in Engineering*, 21, 101985. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101985>
- Myslyvchenko, O. M., Gaponova, O. P., Tarelnyk, V. B., Krapivka, M. O. (2020). The Structure Formation and Hardness of High-Entropy Alloy Coatings Obtained by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59 (3-4), 201–208. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00152-7>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352159**

**ERGONOMIC OPTIMIZATION OF A MANUAL WHEELED FURROWING IMPLEMENT (IMRS) USING USER-CENTERED DESIGN METHODOLOGIES: A CASE STUDY IN PERUVIAN SMALLHOLDER AGRICULTURE (p. 42–56)**

**Cesar Augusto Castillo Roque**

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-5110-4080>

**Wendy Carolina Yupanqui Leon**

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-6524-194X>

**Trunks Giorgio Vasquez Llave**

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7741-9043>

**Jose Carlos Canazas Rodriguez**

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2236-7869>

**Yuri Lester Silva Vidal**

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0461-470X>

**Jose Fernando Garate Delgado**

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Peru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2218-0554>

The object of the study is the manual wheeled furrowing implement (IMRS), a human-powered tool used by smallholder farmers in the Tiabaya district (Arequipa, Peru) to form furrows and hill crops of onion and garlic requiring 45 cm spacing, operated for up to 227 furrows per plot in 10–12 hour shifts. The unvarying height of the handle compels taller individuals to maintain prolonged trunk bending and wrist extension, while shorter users manage the excess force with their arms, structurally excluding women who lack a fitting handle height. Four approaches were employed: design thinking and quality function deployment (QFD) to translate farmer needs into key engineering goals; VDI 2221/2225 to evaluate design alternatives; the McKyes & Ali equation for modeling soil resistance in sandy loam found in Tiabaya; and Digital Human Models within CATIA V5 for biomechanical validation at female P5 and male P95 percentiles before physical prototyping. The refined design incorporates a Ø2" SCH10 tube frame with a quick-release height adjustment limited to between 900 and 1,200 mm based on QFD priorities, a Ø600 mm spoked wheel, an AISI 1045 heat-treated furrower, and handles made from AISI 304 steel, minimizing push force by 8%. This reduction occurs because the larger wheel distributes soil reaction over a broader area, lowering rolling resistance per the McKyes & Ali model. The adjustable height eliminates the postures causing a score of 5 on the rapid upper limb assessment (RULA), reducing it to 4 for users at both measurement extremes. While unit cost is higher ( $\approx S/680$  vs.  $S/300-400$ ), a lifespan exceeding 12 years yields break-even within 3–4 years, aligning with sustainable development goals (SDGs) 2, 5, and 8.

**Keywords:** furrowing implement, rapid upper limb assessment, quality function deployment, digital human modeling, smallholder agriculture, artisanal manufacturing.

## References

- The Future of Food and Agriculture: Alternative Pathways to 2050 (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: <https://www.fao.org/3/i8429en/i8429en.pdf>
- Ricciardi, V., Ramankutty, N., Mehrabi, Z., Jarvis, L., Chookolingo, B. (2018). How much of the world's food do smallholders produce? *Global Food Security*, 17, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.05.002>
- Lowder, S. K., Skoet, J., Raney, T. (2016). The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Development*, 87, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>
- de Janvry, A., Sadoulet, E. (2009). Agricultural Growth and Poverty Reduction: Additional Evidence. *The World Bank Research Observer*, 25 (1), 1–20. <https://doi.org/10.1093/wbro/lkp015>
- Fathallah, F. A. (2010). Musculoskeletal disorders in labor-intensive agriculture. *Applied Ergonomics*, 41 (6), 738–743. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.03.003>
- Zhang, M., Kim, R. (2025). Occupational health in agriculture: a re-emerging frontier in worker protection. *Global Health Journal*, 9 (2), 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2025.06.001>
- Goals 8: Promote sustained, inclusive and sustainable economic growth, full and productive employment and decent work for all. United Nations. Available at: <https://sdgs.un.org/goals/goal8>
- Harianto, S., Listyani, R. H. (2025). Empowering marginalised women in rural Indonesia: a multifaceted approach. *International Journal of Sociology and Social Policy*, 45 (9-10), 959–980. <https://doi.org/10.1108/ijssp-02-2025-0111>
- Majumder, J., Shah, P. (2017). Mapping the Role of Women in Indian Agriculture. *Annals of Anthropological Practice*, 41 (2), 46–54. <https://doi.org/10.1111/napa.12112>
- Yoder, A. M., Adams, A. M., Brensinger, E. A., Freivalds, A. (2010). Designing Tools and Agricultural Equipment for Women. 2010 Pittsburgh, Pennsylvania, June 20 – June 23, 2010. <https://doi.org/10.13031/2013.29983>
- Caputo, F., Greco, A., Fera, M., Caiazza, G., Spada, S. (2018). Simulation Techniques for Ergonomic Performance Evaluation of Manual Workplaces During Preliminary Design Phase. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), 170–180. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_18)
- Devaux, A., Horton, D., Velasco, C., Thiele, G., López, G., Bernet, T. et al. (2009). Collective action for market chain innovation in the Andes. *Food Policy*, 34 (1), 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2008.10.007>
- Escobal, J., Torero, M. (2003). Adverse Geography and Differences in Welfare in Peru. United Nations University. Available at: <https://www.wider.unu.edu/sites/default/files/dp2003-073.pdf>
- Escobal, J., Ponce, C. (2008). Enhancing Income Opportunities for the Rural Poor: The Benefits of Rural Roads. *Economic Reform in Developing Countries*. <https://doi.org/10.4337/9781781007655.00019>
- Food security and nutrition and sustainable agriculture. United Nations. Available at: <https://sdgs.un.org/topics/food-security-and-nutrition-and-sustainable-agriculture>
- Colombini, D. (2018). Application Study: Biomechanical Overload in Agriculture. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), 72–83. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96083-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96083-8_10)
- Yu, H., Nam, K., Shin, S., Choi, M., Son, Y., Chang, J. (2021). Repetitive patterns in the locations of touch errors for two-thumb text entry on a smartphone. *Applied Ergonomics*, 97, 103541. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103541>
- Markova, V., Petrova, Z., Valcheva-Georgieva, I. (2025). Assessing Musculoskeletal Health Risks in Standing Occupations. *EEPES 2025*, 74. <https://doi.org/10.3390/engproc2025104074>
- Meinel, C., Leifer, L., Plattner, H. (Eds.) (2011). *Design Thinking*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13757-0>
- Akao, Y. (1990). *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*. Productivity Press.
- Apfata Limachi, B. A., Cari Mora, F. A., Sivincha Quispe, Y. S., Valdeiglesias Flores, E., Silva Vidal, Y. L., Sulla Espinoza, E., Pari, L. (2024). Application of QFD and FMEA methodologies for the development and improvement of an explosive ordnance disposal robot design. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (131)), 30–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306986>
- Rega, S. J., Rohman, T., Ishlah, N. W., Subekti, S. (2024). Application of the VDI 2221 method in the design of an air-to-water converter device. *JTTM: Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 5 (2), 277–288. <https://doi.org/10.37373/jttm.v5i2.1126>
- Leutenecker-Twelsiek, B., Klahn, C., Meboldt, M. (2016). Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 50, 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.016>
- Schröppel, T., Miehling, J., Wartzack, S. (2020). How to identify relevant product properties in the context of user-product interaction? *Procedia CIRP*, 91, 615–620. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.219>
- Llave, T. G. V., Huaman, L. A. L., Torres, B. P. R., Rodríguez, J. C., Vidal, Y. L. S. (2024). Conceptual Design of a Trash Collecting Machine for Highways in Arequipa, Peru. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 13 (4), 477–488. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.13.4.477-488>
- Gembariski, P. C., Bibani, M., Lachmayer, R. (2016). Design catalogues: Knowledge repositories for knowledge-based-engineering applications. *International Design Conference – DESIGN 2016*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/309610854\\_Design\\_Catalogues\\_Knowledge\\_Repositories\\_for\\_Knowledge-Based-Engineering\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/309610854_Design_Catalogues_Knowledge_Repositories_for_Knowledge-Based-Engineering_Applications)

27. Jiang, S., Sarica, S., Song, B., Hu, J., Luo, J. (2022). Patent Data for Engineering Design: A Critical Review and Future Directions. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 22 (6). <https://doi.org/10.1115/1.4054802>
28. López-Perez, V. P., Ramirez-Montesdeoca, W. A., Alarcón-Moyano, G. A. (2020). Estudio de materiales utilizados en la construcción de aperos para la mecanización agrícola en la zona Andina del Ecuador. *Domínio de las Ciencias*, 6 (3), 1194–1204. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7539763>
29. Bringas-Fernandez, B., Carrion-Reyes, M., Altamirano-Flores, E., Viacava-Campos, G. (2022). Model to Increase the Production Efficiency of Low-Pressure Regulators through the Combined Use of Lean Tools at a Metalworking SME. 2022 8th International Conference on Information Management (ICIM), 141–145. <https://doi.org/10.1109/icim56520.2022.00032>
30. Leceta, F., Binder, C., Mader, C., Mächtle, B., Marsh, E., Dietrich, L. et al. (2024). The impact of agriculture on tropical mountain soils in the western Peruvian Andes: a pedo-geoarchaeological study of terrace agricultural systems in the Laramate region (14.5°S). *SOIL*, 10 (2), 727–761. <https://doi.org/10.5194/soil-10-727-2024>
31. Hruban, V., Panfilova, A., Galeeva, A., Khranov, M. (2024). Optimisation of structural parameters of rotary tillage units to increase the stability of operation under the influence of variable loads. *Naukovij Žurnal "Tehnika Ta Energetika"*, 16 (1), 65–80. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.65>
32. Stafford, J. V. (1979). The performance of a rigid tine in relation to soil properties and speed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24 (1), 41–56. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(79\)90059-3](https://doi.org/10.1016/0021-8634(79)90059-3)
33. Fielke, J. M., Riley, T. W. (1991). The universal earthmoving equation applied to chisel plough wings. *Journal of Terramechanics*, 28 (1), 11–19. [https://doi.org/10.1016/0022-4898\(91\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0022-4898(91)90003-0)
34. Hasankhani-Ghavam, F., Abbaspour-Gilandeh, Y., Shahgoli, G., Rahmanszadeh-Bahram, H. (2015). Design, manufacture and evaluation of the new instrument to measure the friction coefficient of soil. *CIGR Journal*, 17 (1), 101–109. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2710>
35. Ucgul, M., Saunders, C., Fielke, J. M. (2017). Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 155, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.002>
36. Antunez, A. et al. (2017). Propiedades físico-hídricas del suelo en el cultivo del maíz grano. *INIA*, 31–50. Available at: <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/19314dbc-3274-4165-b176-b4370c91fe20/content>
37. Mouazen, A. M., Neményi, M. (1999). Tillage Tool Design by the Finite Element Method: Part 1. Finite Element Modelling of Soil Plastic Behaviour. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72 (1), 37–51. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0343>
38. GEO5 Software. Online Help. Available at: <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/material-10/>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354678

**IDENTIFICATION OF THE PERFORMANCE MECHANICAL SECONDARY SAFETY BRAKE UNDER HYDRAULIC FAILURE CONDITIONS: EXPERIMENTAL ASSESSMENT UNDER FLUID LEAKAGE (p. 57–65)**

**Rolan Siregar**

Darma Persada University, Jakarta, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0300-7094>

**Asyari**

Darma Persada University, Jakarta, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4504-8083>

**Suzuki Syofian**

Darma Persada University, Jakarta, Indonesia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3105-8259>

The object of the study is the hydraulic braking system of heavy vehicles under conditions of progressive brake fluid leakage, with particular emphasis on its effect on braking performance and failure behavior. The problem addressed is the loss of braking performance due to hydraulic brake failure caused by fluid leakage, which reduces hydraulic pressure and may lead to total brake failure.

This study presents the design and experimental analysis of an independent mechanical wheel-clamp-based secondary safety brake for heavy vehicle braking systems. Experimental evaluation was conducted using a rotational test rig under varying load conditions. The results show that brake failure is strongly dependent on load. Under low load (5 Hz), total failure occurs at approximately 70 mL leakage and 5 bars, whereas under high load (50 Hz), failure occurs at only 25 mL and 9.3 bar, indicating increased sensitivity to leakage. This behavior is explained by the loss of hydraulic fluid and the compressibility of trapped air in the braking circuit, which prevents pressure from reaching its maximum level and reduces effective force transmission. Under total hydraulic failure, the secondary safety brake is capable of stopping wheel rotation across all tested conditions; however, the stopping time is longer, reaching up to 6.5 s compared to 1.4–2.9 s for the primary brake. These results demonstrate that the proposed system provides a fully independent fail-safe braking mechanism capable of maintaining braking functionality when the primary system fails, thereby addressing the problem of brake performance loss under hydraulic failure conditions. The system can be applied in heavy vehicle braking systems as a risk mitigation solution under failure scenarios, particularly in high-load operating conditions, with potential for further development, experimental refinement, and real vehicle implementation, including integration with activation strategies.

**Keywords:** secondary safety brake, leakage, stopping time, pressure threshold, failure zone.

**References**

1. Wang, Z., Yu, Q., Han, F., Shi, P. (2016). Research on a Brake Temperature Model of Heavy-Duty Trucks Braking on Long Downhill. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 10 (3), 90–96. <https://doi.org/10.1061/jhtrcq.0000524>
2. Gang, W., Tian, C., ZhiPeng, L. (2023). Study on the influence of running parameters on the temperature field of disc brake on long downhill road. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 238 (10-11), 3386–3398. <https://doi.org/10.1177/09544070231177176>
3. Budhi, W. S., Utanaka, A., Wiryasuta, I. K. H., Widyastuti, H. (2024). Identifying Traffic Accident Trends and Black Spot Locations on National Road (A Case Study: Rogojampi-Kabat, Banyuwangi). *Advances in Civil Engineering Materials*, 683–695. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-0751-5\\_60](https://doi.org/10.1007/978-981-97-0751-5_60)
4. Lu, Y., Wang, F., Zhang, G. (2020). Research on Brake Failure Control of Heavy Commercial Vehicles Based on Turning Conditions. 2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI), 395–400. <https://doi.org/10.1109/cvci51460.2020.9338601>
5. Haq, M. T., Ampadu, V.-M. K., Ksaibati, K. (2023). An investigation of brake failure related crashes and injury severity on mountainous roadways in Wyoming. *Journal of Safety Research*, 84, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.10.003>
6. Wang, F., Lu, Y., Li, H. (2022). Heavy-Duty Vehicle Braking Stability Control and HIL Verification for Improving Traffic Safety. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1–27. <https://doi.org/10.1155/2022/5680599>

7. Umaras, E., Barari, A., Tsuzuki, M. S. G. (2021). Heavy Vehicles Brake Drums – An Accurate Evaluation on Thermal Loads in Severe Service Conditions. *International Journal of Automotive Technology*, 22 (2), 371–382. <https://doi.org/10.1007/s12239-021-0035-1>
8. Kosbe, P., Patil, P., Kulkarni, R. (2020). Fade and recovery characteristics of commercial disc brake friction materials: a case study. *International Journal of Ambient Energy*, 43 (1), 2446–2452. <https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1730959>
9. Hilden, M., Dietl, H. (2024). Improvements in brake fluid standardization to avoid noise & wear. 14th International Munich Chassis Symposium 2023, 425–437. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-70348-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-662-70348-9_26)
10. Kawakami, A., Shikada, A., Miyao, K. (2000). Control method for brake vapor lock in automobiles. *JSAE Review*, 21 (1), 73–78. [https://doi.org/10.1016/s0389-4304\(99\)00066-1](https://doi.org/10.1016/s0389-4304(99)00066-1)
11. Hui, Y., Liu, G., Zhang, Q., Zhang, Y., Zang, Y., Wang, S., Shi, R. (2023). Fading behavior and wear mechanisms of C/C–SiC brake disc during cyclic braking. *Wear*, 526–527, 204930. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204930>
12. Zhang, P., Zhang, L., Fu, K., Wu, P., Cao, J., Shijia, C., Qu, X. (2019). Fade behaviour of copper-based brake pad during cyclic emergency braking at high speed and overload condition. *Wear*, 428–429, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.126>
13. Zhang, Q., Liu, H., He, Z., Mo, J., Jin, W., Shen, M., Zhao, C. (2025). Impact of initial braking temperature on thermal-induced brake fade during long-downhill operations. *Engineering Failure Analysis*, 167, 109077. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109077>
14. Vdovin, A., Gustafsson, M., Sebben, S. (2018). A coupled approach for vehicle brake cooling performance simulations. *International Journal of Thermal Sciences*, 132, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.016>
15. Peng, D., Tan, G., Tang, J., Guo, X. (2021). Design and Optimization of Forced-Air Cooling System for Commercial Vehicle Brake System. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 15 (1), 15–25. <https://doi.org/10.4271/02-14-04-0031>
16. Adamowicz, A., Grzes, P. (2011). Influence of convective cooling on a disc brake temperature distribution during repetitive braking. *Applied Thermal Engineering*, 31 (14–15), 2177–2185. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.05.016>
17. de Freitas, L. H., Roux, G. A. C. L. (2009). Exploiting R&D Databases for Efficient Product Design: Application to Brake Fluid Formulations. 10th International Symposium on Process Systems Engineering: Part A, 1161–1166. [https://doi.org/10.1016/s1570-7946\(09\)70414-6](https://doi.org/10.1016/s1570-7946(09)70414-6)
18. Khamidullin, R. F., Bashkirtseva, N. Yu., Abdullin, A. I., Akhmetov, I. I. (2006). Polyethylene glycol monomethyl ethers as the main component of brake fluid. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 79 (11), 1853–1856. <https://doi.org/10.1134/s107042720611022x>
19. Zulhilm, I. M., Peeie, M. H., Asyraf, S. M., Sollehudin, I. M., Ishak, I. M. (2020). Experimental Study on the Effect of Emergency Braking without Anti-Lock Braking System to Vehicle Dynamics Behaviour. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17 (2), 7832–7841. <https://doi.org/10.15282/ijame.17.2.2020.02.0583>
20. Lai, F., Liu, J., Hu, Y. (2024). An Automatic Emergency Braking Control Method for Improving Ride Comfort. *World Electric Vehicle Journal*, 15 (6), 259. <https://doi.org/10.3390/wevj15060259>
21. Kurhade, A. S., Tiwari, A. P., Wadkar, R. M., Kumar, S. (2017). Development of Secondary Braking System in Order Reduce Accidents Happening Due to Brake Failure. *IJSRD - International Journal for Scientific Research & Development*, 5 (10), 584–586. Available at: <https://www.ijrsrd.com/articles/IJSRDV5I100332.pdf>
22. Rancourt, D., Khazoom, C., Blanchette, C., Giraud, L., Lemire, J., St-Amant, Y. (2018). Wheel Chock Key Design Elements and Geometrical Profile for Truck Vehicle Restraint. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 06 (1), 69–84. <https://doi.org/10.4271/09-06-01-0006>
23. Adhitya, M., Siregar, R., Sumarsono, D. A., Nazaruddin, N., Heryana, G., Prasetyo, S., Zainuri, F. (2020). Experimental analysis in the test rig to detect temperature at the surface disc brake rotor using rubbing thermocouple. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (5 (104)), 6–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.191949>
24. Limpert, R. (2011). *Brake Design and Safety, Third Edition R-398*. SAE International. <https://doi.org/10.4271/r-398>
25. Siregar, R., Adhitya, M., Sumarsono, D. A., Nazaruddin, N., Heryana, G., Prasetya, S., Zainuri, F. (2021). Optimization of temperature measurement on the bus drum brake as a basis for developing brake fault signals. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (1 (109)), 13–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224907>
26. Bogomolov, V., Klimenko, V., Leontiev, D., Kuripka, O., Frolov, A., Don, Y. (2021). Features of adaptive brake control of the secondary brake system of a multi-axle vehicle. *Automobile Transport*, 48, 27–37. <https://doi.org/10.30977/at.2219-8342.2021.48.0.27>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356685

**IMPROVING EFFICIENCY INDICATORS AND REDUCING CO<sub>2</sub> EMISSIONS BY USING HYDROGEN AND METHANE ADDITIVES TO GASOLINE IN A SPARK-IGNITION ENGINE (p. 66–77)**

**Andrii Marchenko**

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9746-4634>

**Mykyta Mishchenko**

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1265-8155>

This study investigates the working process in a 4Ch7.6/6.6 gasoline engine when using hydrogen and methane additives to fuel. The task addressed relates to the lack of a single methodological approach to the comparative quantitative assessment of the impact of various gas additives on combustion parameters, efficiency indicators, and CO<sub>2</sub> emissions. As a result, there is a complication of the justified choice of the optimal component to increase energy efficiency and reduce the carbon footprint of the existing fleet of gasoline engines.

This work advanced semi-empirical relationships for determining the parameters of the Wiebe model when methane is added to gasoline, which are based on scaling through the ratio of laminar flame velocities. Based on the results from mathematical modeling, it was established that when adding 10% hydrogen, the combustion dynamics indicator  $m$  decreases by 32.4–38.7% while the combustion duration  $\varphi_z$  is reduced by 26.1–28.2%. It was determined that the specific effective fuel consumption decreases by 13.9–14.3%, the effective efficiency increases by 0.5–1.8%, and the volume fraction of CO<sub>2</sub> decreases by 14.1%. When methane is added to 10%, the dynamics parameter  $m$  increases by 3.2–3.9%, and, accordingly, the combustion duration  $\varphi_z$  increases by 2.4–2.6%, while the specific consumption decreases by 2.3–4.8%, the effective efficiency increases by 1.4–3.7%, and a decrease in CO<sub>2</sub> is also observed, which is 11.7%.

A defining feature is the quantitative results of the effect at the same proportion of the additive (10%), according to which hydrogen provides a 1.2-fold greater reduction in CO<sub>2</sub> compared to methane, but at the same time an improvement in fuel efficiency is observed. The results allow for a reasonable choice of the type of additive for a comprehensive increase in efficiency and environmental friendliness or moderate decarbonization at minimal engine modernization.

**Keywords:** hydrogen addition, methane addition, Wiebe model, combustion parameters, decarbonization of transport.

### References

- Tracking Clean Energy Progress 2023 (2023). IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- Marchenko, A., Koruba, Z. (Eds.) (2025). Decarbonization of Transport Energy Installations in the Context of Sustainable Development Strategies. Studies in Systems, Decision and Control. <https://doi.org/10.1007/978-3-032-05884-3>
- Singh, G., Khan, S., Stork, K., Weismiller, M. (2022). Advanced Engine and Fuel Technologies 2021 Annual Progress Report. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/2483827>
- Stone, R. (1999). Introduction to Internal Combustion Engines. Macmillan Education UK. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-14916-2>
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 31 (2), 189–199. <https://doi.org/10.1002/joc.2106>
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A. H. (2012). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17 (1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Dorado, M. P., Ballesteros, E., Arnal, J. M., Gómez, J., López, F. J. (2003). Exhaust emissions from a Diesel engine fueled with transesterified waste olive oil. *Fuel*, 82, 1311–1315. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00034-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00034-6)
- Demirbas, A. (2009). Biofuels securing the planet's future energy needs. *Energy Conversion and Management*, 50 (9), 2239–2249. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.010>
- Zacharof, N.-G., Broekaert, S., Fontaras, G. (2021). Future CO<sub>2</sub> reducing technologies in VECTO: VECTO technology coverage and market uptake. Publications Office. Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/985739>
- Depczyński, W. P., Marchenko, A., Mishchenko, S., Mishchenko, M. (2025). The effect of hydrogen addition to traditional petrol engine fuel in a hybrid power plant on its environmental performance and fuel efficiency. *Combustion Engines*, 200 (1), 87–94. <https://doi.org/10.19206/ce-199735>
- Wang, X., Sun, B., Luo, Q. (2019). Energy and exergy analysis of a turbocharged hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (11), 5551–5563. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.047>
- Di Battista, D., Cipollone, R. (2023). Waste Energy Recovery and Valorization in Internal Combustion Engines for Transportation. *Energies*, 16 (8), 3503. <https://doi.org/10.3390/en16083503>
- Bhan, S., Yadav, P. S., Mahajan, S., Bibhu, V., Awasthi, S., Sharma, A. et al. (2025). Optimization of SI engine responses fueled with hydrogen-enriched G30 fuel: Experimental and statistical approach. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 45 (2). <https://doi.org/10.1002/ep.70257>
- Erdiwansyah, Mamat, R., Ghazali, M. F., Basrawi, F., Rosdi, S. M., Bahagia. (2025). A recent review of alternative fuels in SI engines: Performance, emissions, and combustion aspects. *Next Research*, 2 (4), 100810. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100810>
- Nuthan Prasad, B. S., Pandey, J. K., Kumar, G. N. (2021). Effect of hydrogen enrichment on performance, combustion, and emission of a methanol fueled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (49), 25294–25307. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.039>
- Baswana, C. S., Narang, S. A. (2025). HCNG for Sustainable Emission Reduction in SI Engines. *Journal of Engineering Sciences*, 12 (2), G1–G11. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).g1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).g1)
- Karagöz, Y., Balci, Ö., Gezer, O., Köten, H., Işın, Ö. (2021). Performance and emissions of spark-ignition engines fuelled with petrol and methane. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, 174 (4), 156–169. <https://doi.org/10.1680/jener.19.00055>
- Kubica, G. (2023). Combustion of LPG / DME gas mixtures in an SI engine with correction of the ignition advance angle. *Combustion Engines*. <https://doi.org/10.19206/ce-168401>
- Fosudo, T., Kar, T., Windom, B., Olsen, D. (2024). Low-carbon fuels for spark-ignited engines: A comparative study of compressed natural gas and liquefied petroleum gas on a CFR engine with exhaust gas recirculation. *Fuel*, 360, 130456. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130456>
- Marchenko, A. P., Mishchenko, M. T. (2024). Research of the combustion parameters of gasoline with additional hydrogen in a spark-ignition engine in external speed characteristic modes. *Internal Combustion Engines*, 1, 52–60. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.07>
- Giglio, V., di Gaeta, A. (2020). Novel regression models for wiebe parameters aimed at 0D combustion simulation in spark ignition engines. *Energy*, 210, 118442. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118442>
- Lindström, F., Ångström, H.-E., Kalghatgi, G., Möller, C. E. (2005). An Empirical SI Combustion Model Using Laminar Burning Velocity Correlations. *SAE Technical Paper Series*, 1. <https://doi.org/10.4271/2005-01-2106>
- Gatowski, J. A., Balles, E. N., Chun, K. M., Nelson, F. E., Ekchian, J. A., Heywood, J. B. (1984). Heat Release Analysis of Engine Pressure Data. *SAE Technical Paper Series*, 1. <https://doi.org/10.4271/841359>
- Verhelst, S., Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35 (6), 490–527. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>
- Shivaprasad, K. V., Chitragar, P. R., Kumar, G. N. (2018). Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a high speed spark ignited engine at idle condition. *Thermal Science*, 22 (3), 1405–1413. <https://doi.org/10.2298/tsci180407157s>
- Verhelst, S. (2014). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (2), 1071–1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.102>
- Metghalchi, M., Keck, J. C. (1982). Burning velocities of mixtures of air with methanol, isooctane, and indolene at high pressure and temperature. *Combustion and Flame*, 48, 191–210. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90127-4](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90127-4)
- Hasche, A., Bräuer, P., Bauer, F., Will, S., Krause, H., Eckart, S. (2026). Experimental determination of the laminar burning velocity of hydrogen-methane-oxygen flames through a micro-cone burner. <https://doi.org/10.2139/ssrn.6291867>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engines Fundamentals*. McGraw-Hill, 930.
- Ricci, F., Zembi, J., Avana, M., Grimaldi, C. N., Battistoni, M., Papi, S. (2024). Analysis of Hydrogen Combustion in a Spark Ignition Research Engine with a Barrier Discharge Igniter. *Energies*, 17 (7), 1739. <https://doi.org/10.3390/en17071739>
- Panthi, N., Sharma, P., AlRamadan, A. S., Cenker, E., Magnotti, G. (2026). Direct injection of methane or hydrogen on port-fueled methane combustion in a heavy-duty optical spark ignition engine. *Fuel*, 405, 136587. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136587>
- Osetrov, O., Haas, R. (2025). Modeling Homogeneous, Stratified, and Diffusion Combustion in Hydrogen SI Engines Using the Wiebe Approach. *Energies*, 18 (12), 3004. <https://doi.org/10.3390/en18123004>
- Farhan, M., Salam, H. A., Shahid, M. I., Chen, T., Xiao, Q., Jiang, L. et al. (2026). Experimental and predictive advancements in hydrogen enriched compressed natural gas spark ignition engines: a critical review. *Fuel*, 407, 137248. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.137248>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356502

## DEVELOPMENT OF A VALIDATED COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL FOR FILM COOLING EFFICIENCY CALCULATION (p. 78–90)

Oleg Shevchuk

JSC Ivchenko-Progress, Zaporizhzhia, Ukraine  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1837-6287>

Oleksandr Tarasov

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5952-3258>

This study investigates the film cooling process on a flat plate. The task addressed relates to the identification of the most universal CFD model for different film cooling hole shapes.

The task has been solved by selecting an optimal computational mesh and determining the most suitable turbulence models for predicting film cooling effectiveness over a wide range of parameters. To investigate mesh-independence effects, four levels of polyhedral computational grids were generated. It was shown that the mesh with 5.8 million elements, selected based on the mesh-convergence analysis, performs nearly as well as a block-structured mesh with identical settings.

A validated CFD model based on a polyhedral mesh was built. A distinctive feature of the results is that the CFD model covers 4 hole geometries spaced 5D apart and inclined at 30° to the mainstream flow (classical cylindrical, fan-shaped, oval, and a diffused slot).

The results include a comparison of seven RANS turbulence models with experimental data. It was found that for the considered flow and geometric conditions, the most robust and generally applicable model is the  $k-\varepsilon$  Realizable turbulence model. Its advantages may be explained by its improved stability and better sensitivity to regions of complex flow kinematics, which enables more accurate prediction of expanding (fan-shaped and diffuser-type) holes.

Additionally, the model feasibility was verified for the 7-7 hole configuration. For this type of hole, a preliminary analysis of the influence of thermal barrier coating configurations on film cooling effectiveness is presented. The proposed computational model could be used for optimizing hole geometry and blowing conditions in gas turbine blade cooling applications.

**Keywords:** film cooling, cooling efficiency, flat plate, numerical modeling, turbulence model.

## References

- Jauregui, R., Silv, F. (2011). Numerical Validation Methods. Numerical Analysis – Theory and Application. <https://doi.org/10.5772/23304>
- Shevchuk, O., Tarasov, O. (2025). Review of the Current State of Problem of Film Cooling for Gas Turbine Blades. NTU "KhPI" Bulletin: Power and Heat Engineering Processes and Equipment, 1, 29–44. <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2025.01.03>
- Bunker, R. S. (2010). Film Cooling: Breaking the Limits of Diffusion Shaped Holes. Heat Transfer Research, 41 (6), 627–650. <https://doi.org/0.1615/heattransres.v41.i6.40>
- Shevchuk, O. V. (2025). Analysis of Modern Numerical Approaches to Film Cooling Simulation on a Flat Surface: Trends, Errors and Correlation Dependencies. Journal of Mechanical Engineering, 28 (4), 11–25. <https://doi.org/10.15407/pmach2025.04.011>
- Chen, X., Li, J., Long, Y., Wang, Y., Weng, S., Yavuzkurt, S. (2020). A Conjugate Heat Transfer and Thermal Stress Analysis of Film-Cooled Superalloy With Thermal Barrier Coating. Volume 7B: Heat Transfer. <https://doi.org/10.1115/gt2020-16241>
- Zamiri, A., You, S. J., Chung, J. T. (2020). Numerical Evaluation of Surface Roughness Effects on Film-Cooling Performance in a Laid-back Fan-Shaped Hole. Volume 7B: Heat Transfer. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14525>
- Barigozzi, G., Zamiri, A., Brumana, G., Franchina, N., Chung, J. T. (2025). On the impact of Reynolds number on the performance of a trenced shaped hole. 16th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. <https://doi.org/10.29008/etc2025-107>
- Petelchic, V. Yu., Halatov, A. A., Pismenniy, D. N., Dashevskiy, Yu. Ya. (2013). Adaptation of SST turbulence model for a flat plate film cooling simulation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (12 (63)), 25–29. Available at: <https://journals.uran.ua/ejeet/article/view/14874/>
- Fischer, L., James, D., Jeyaseelan, S., Pfitzner, M. (2023). Optimizing the trench shaped film cooling design. International Journal of Heat and Mass Transfer, 214, 124399. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124399>
- Liu, C.-L., Zhu, H.-R., Bai, J.-T. (2008). Effect of turbulent Prandtl number on the computation of film-cooling effectiveness. International Journal of Heat and Mass Transfer, 51 (25-26), 6208–6218. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.04.039>
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J. (1995). A new  $k-\varepsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. Computers & Fluids, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-t](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-t)
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, 32 (8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Diskin, B., Thomas, J. (2012). Effects of mesh regularity on accuracy of finite-volume schemes. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. <https://doi.org/10.2514/6.2012-609>
- Furgeson, M. T., Flachs, E. M., Bogard, D. G. (2025). Adjoint Optimization of Gas Turbine Film Cooling Geometry With Elevated Mainstream Mach Number. Volume 5: Energy Storage; Fans and Blowers; Heat Transfer: Combustors; Heat Transfer: Film Cooling. <https://doi.org/10.1115/gt2025-154287>
- Avacun, S., Erdem, E., Sal, S., Yasa, T. (2025). The Effect of Cross-flow Velocity on the Film Cooling Effectiveness of Fan Shaped Holes. Volume 5: Energy Storage; Fans and Blowers; Heat Transfer: Combustors; Heat Transfer: Film Cooling. <https://doi.org/10.1115/gt2025-154073>
- Watanabe, K., Matsuura, M., Suenaga, K., Takeishi, K. I. (1999). An experimental study on the film cooling effectiveness with expanded hole geometry. Proceedings of the international gas turbine congress. Kobe, 615–622.
- Celik, I., Ghia, U., Roache, P., Freitas, C., Coleman, H., Raad, P. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, 130 (7), 078001. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>
- Pedersen, D. R., Eckert, E. R. G., Goldstein, R. J. (1977). Film Cooling With Large Density Differences Between the Mainstream and the Secondary Fluid Measured by the Heat-Mass Transfer Analogy. Journal of Heat Transfer, 99 (4), 620–627. <https://doi.org/10.1115/1.3450752>
- Na, S., Shih, T. I.-P. (2006). Increasing Adiabatic Film-Cooling Effectiveness by Using an Upstream Ramp. Journal of Heat Transfer, 129 (4), 464–471. <https://doi.org/10.1115/1.2709965>
- Hussain, S., Yan, X. (2020). Implementation of Hole-Pair in Ramp to Improve Film Cooling Effectiveness on a Plain Surface. Volume 7B: Heat Transfer. <https://doi.org/10.1115/gt2020-14838>
- Rutledge, J. L., Polanka, M. D. (2014). Computational Fluid Dynamics Evaluations of Unconventional Film Cooling Scaling Parameters on

a Simulated Turbine Blade Leading Edge. *Journal of Turbomachinery*, 136 (10). <https://doi.org/10.1115/1.4028001>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359455

**DESIGN OF A CONSOLIDATED SWIRLER MONOPART STRUCTURE BY OPTIMIZING THE PROCESSES OF MICROMETALLURGICAL LAYER-TO-LAYER FUSION OF HEAT-RESISTANT ALLOYS (p. 91–104)**

**Volodymyr Yefanov**

Ukrainian State University  
of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6363-4081>

**Oleh Kalinichenko**

Ukrainian State University  
of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5597-6084>

**Dmytro Kuts**

Ukrainian State University  
of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3110-4978>

**Oleh Ovchynnykov**

Ukrainian State University  
of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3172-0582>

**Hanna Laptieva**

National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhia, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4475-2354>

This study investigates air flow characteristics and the temperature field in the combustion chamber, which are determined by the geometry of the swirler. The task addressed is predetermined by the fact that swirlers manufactured by conventional casting methods with subsequent assembly are characterized by significant geometric deviations of the flow-through elements. This leads to a dispersion of air flow along the contours, a violation of the uniformity of the fuel-air mixture and, as a result, to increased circular unevenness of the temperature field at the outlet of the combustion chamber, which reduces the resource and reliability of engine operation.

In this work, three-dimensional simulation of the swirler was performed using the Unigraphics NX CAD system; a numerical CFD analysis of processes in the combustion chamber was carried out. Experimental studies on geometric deviations and air flow rates for swirlers manufactured by the conventional casting method and the additive method L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) were conducted. The geometric accuracy was assessed using a 3-D scanning method with comparison with a digital model; the flow characteristics were determined by bench tests during the purging of the air and fuel circuits, as well as during the combined operation of the circuits.

It was found that the swirlers manufactured using the L-PBF method provide air flow stability within  $\pm 1.5\%$ , which is a better indicator compared to cast analogs. That has made it possible to reduce the circular unevenness of the combustion chamber temperature field to 12.5–18.9% with an allowable value of no more than 21%.

The results confirm the feasibility of using additive technologies for the manufacture of swirlers for combustion chambers in gas turbine engines.

**Keywords:** additive technologies, L-PBF, swirler, combustion chamber, gas turbine engine, CFD simulation.

**References**

- Lefebvre, A. H., Ballal, D. R. (2010). *Gas Turbine Combustion*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420086058>

- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw-Hill, 736. Available at: [https://www.academia.edu/40886924/An\\_Introduction\\_To\\_Combustion\\_Concepts\\_And\\_Applications\\_](https://www.academia.edu/40886924/An_Introduction_To_Combustion_Concepts_And_Applications_)
- Poinsot, T., Veynante, D. (2005). *Theoretical and Numerical Combustion*. R.T. Edwards, 540. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/248068931\\_Theoretical\\_and\\_Numerical\\_Combustion](https://www.researchgate.net/publication/248068931_Theoretical_and_Numerical_Combustion)
- Pitsch, H. (2006). Large-eddy simulation of turbulent combustion. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38 (1), 453–482. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092133>
- Lieuwen, T. C., Yang, V. (2006). *Combustion Instabilities In Gas Turbine Engines*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/4.866807>
- Mattingly, J. D. (2002). *Elements of Gas Turbine Propulsion*. AIAA Education Series, 945. Available at: <https://soaneemrana.org/one-webmedia/ELEMENTS%20OF%20GAS%20TURBINE%20PROPULSION2.pdf>
- Frazier, W. E. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (6), 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Spierings, A. B., Herres, N., Levy, G. (2011). Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping Journal*, 17 (3), 195–202. <https://doi.org/10.1108/13552541111124770>
- Vodennikova, O. S., Koval, M. O., Vodennikov, S. A. (2021). Investigation of Mechanical Properties and Structure of Inconel 718 Alloy Obtained by Selective Laser Sintering from Powder Produced by 'LPW'. *Metallofizika I Noveishie Tekhnologii*, 43 (7), 925–937. <https://doi.org/10.15407/mfint.43.07.0925>
- Launder, B. E., Spalding, D. B. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press, 169.
- Burke, S. P., Schumann, T. E. W. (1928). Diffusion Flames. *Industrial & Engineering Chemistry*, 20 (10), 998–1004. <https://doi.org/10.1021/ie50226a005>
- Pope, S. B. (1976). The probability approach to the modelling of turbulent reacting flows. *Combustion and Flame*, 27, 299–312. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(76\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(76)90035-3)
- Crowe, C. T. (1982). Review – Numerical Models for Dilute Gas-Particle Flows. *Journal of Fluids Engineering*, 104 (3), 297–303. <https://doi.org/10.1115/1.3241835>
- van Leer, B. (1997). Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme. *Journal of Computational Physics*, 135 (2), 229–248. <https://doi.org/10.1006/jcph.1997.5704>
- Turbomeca uses metal additive manufacturing for helicopter engine components. Available at: <https://www.metal-am.com/turbomeca-uses-metal-additive-manufacturing-for-helicopter-engine-components/>
- Pedash, A. A., Klochykhin, V. V., Lysenko, N. A., Shilo, V. G., Kasay, P. A. (2019). Influence of the powder manufacturing technique on the structure and properties of the SLM-parts. *Bulletin of Engine Building*, 2, 31–39. Available at: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjln6bLjo6UAXW9ywIHHX86JYgQFnoECBYQAQ&url=https%3A%2F%2Fvd.zp.edu.ua%2Fparticle%2Fview%2F180255%2F180181&usg=AOvVaw1kuOs-1mY5xtbSOyCCdmrKp&opi=89978449>
- Klochikhin, V. V., Kasai, P. A., Naumyk, V. V. (2022). Structure and Properties of Material of Samples, Cultivated by Selective Laser Melting of In718 Alloy Powder after Hot Isostatic Pressing and Subsequent Heat Treatment. *Casting Processes*, 147 (1), 19–29. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.019>
- Klochikhin, V. V., Kasay, P. A., Balushok, K. B., Shilo, V. G., Naumyk, V. V. (2021). Study of the Material Quality of Samples

- Obtained by Selective Laser Melting (SLM) Method from IN718 Alloy Powder. Casting Processes, 144 (2), 12–22. <https://doi.org/10.15407/plit2021.02.012>
20. WZ16/Ardiden 3C. ENGINES. Safran-Group JSC. Available at: <https://www.safran-group.com/products-services/ardiden-3c-first-jointly-developed-aero-engine-be-entirely-certified-china>
  21. Nozzles Ariane 6. Ariane-Group JSC. Available at: <https://www.ariane.group/en/space-transportation/ariane-6/>
  22. Hahn, J. (2020). Hyperganic uses AI to design 3D-printed rocket engine. Available at: <https://www.dezeen.com/2020/03/30/hyperganic-ai-rocket-engine-3d-printed/>
  23. 3D printing a rocket engine. Available at: <https://www.etmm-online.com/3d-printing-rocket-engine-a-886960/>
  24. Giant Satellite Fuel Tank Sets New Record for 3-D Printed Space Parts. Available at: [https://news.lockheedmartin.com/2018-07-11-Giant-Satellite-Fuel-Tank-Sets-New-Record-for-3-D-Printed-Space-Parts#assets\\_115](https://news.lockheedmartin.com/2018-07-11-Giant-Satellite-Fuel-Tank-Sets-New-Record-for-3-D-Printed-Space-Parts#assets_115)
  25. Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., du Plessis, A., MacDonald, E. (2021). Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals. Elsevier, 654. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/350007655\\_Fundamentals\\_of\\_Laser\\_Powder\\_Bed\\_Fusion\\_of\\_Metals](https://www.researchgate.net/publication/350007655_Fundamentals_of_Laser_Powder_Bed_Fusion_of_Metals)
  26. Kuts, D., Yefanov, V., Halienkova, O., Ovchynnykov, O., Tepla, T., Lemishka, I., Mierzwiński, D. (2025). Additive technologies for manufacturing swirlers of the combustion chamber of aircraft engines from nickel superalloy powders. Archives of Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.0368>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356920**  
**STUDY OF THE REGULARITIES OF CENTERLINE POROSITY FORMATION IN CONTINUOUSLY CAST BILLETS DEPENDING ON CASTING PARAMETERS (p. 105–114)**

**Yevhen Synehin**

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9983-3971>

**Volodymyr Ruban**

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6617-296X>

**Kostiantyn Niziaiev**

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9260-0964>

**Oleksandr Stoinov**

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7136-7403>

**Svitlana Zhuravlova**

Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8519-5155>

This study investigates the process that forms centerline porosity in the axial zone of a continuously cast steel billet during its hardening. The task addressed relates to the need to establish rational parameters for the temperature-speed mode of casting to minimize axial porosity, which is critical for increasing the density of the metal and the quality of rolled products.

A comprehensive methodology for physical modeling of the hardening process using stearin as a model substance has been devised. Based on the analysis of similarity numbers (Biot, Fourier, Kosovych), the exact scales of modeling were established: by time – 1.854, by linear dimensions – 0.1778, by heat transfer coefficient – 0.04639. It was determined that for an adequate simulation of the formation of the bloom blank, the closing angle of the liquid core varies within 2.3–6°. Quantitative parameters of the experiment on the

model were established: overheating of the melt in the range of 1.8–4.2°C, which corresponds to 15–35°C for steel.

The resulting data are explained by the laws of convection heat transfer and phase transition. The angle of inclination of the crystallization front and the intensity of heat removal determine the moment of formation of "bridges" and interceptions in the thermal center, which directly defines the morphology and volume of shrinkage pores.

Unlike conventional mathematical modeling, the proposed approach provides high visual reliability of defect formation due to the use of the  $\pi$ -theorem for the selection of physical parameters. This makes it possible to investigate critical system states without the risk of emergencies in industrial settings.

The research results could be used for implementation at metallurgical enterprises in the design and optimization of billet cooling modes on a continuous billet casting machine (CCM), which will ensure an increase in the yield of suitable metal.

**Keywords:** continuous billet, centerline porosity, physical modeling, similarity numbers, temperature-speed regime, stearin.

**References**

1. Sigarev, E. N., Chernyatevich, A. G., Chubin, K. I., Zarandiya, S. A. (2011). Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating tuyere. Steel in Translation, 41 (6), 487–491. <https://doi.org/10.3103/s0967091211060155>
2. Wang, X., Guo, Y., Xiao, P., Liu, Z., Zhu, L. (2023). Numerical simulation of shrinkage porosity defect in billet continuous casting. High Temperature Materials and Processes, 42 (1). <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0246>
3. Yao, C., Wang, M., Cheng, M., Xing, L., Wang, Y., Gao, Y., Bao, Y. (2022). Effect of Dynamic Soft Reduction Range and Amount on Central Segregation in Bloom and the Resulting Microstructure in the Rod of GCr15-Bearing Steel. Steel Research International, 93 (11). <https://doi.org/10.1002/srin.202200495>
4. Gao, Y., Bao, Y., Wang, Y., Wang, M., Zhang, M. (2023). Development of a Novel Strand Reduction Technology for the Continuous Casting of Homogeneous High-Carbon Steel Billet. Steel Research International, 94 (5). <https://doi.org/10.1002/srin.202200740>
5. Han, Y., Yan, W., Zhang, J., Chen, W., Chen, J., Liu, Q. (2020). Optimization of Thermal Soft Reduction on Continuous-Casting Billet. ISIJ International, 60 (1), 106–113. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2019-409>
6. Liu, Y., Liu, J., He, Y. (2022). Evolution Behavior and Closure Mechanism of Porosity in Large Billet during the Reduction Pretreatment. Metals, 12 (4), 599. <https://doi.org/10.3390/met12040599>
7. Gao, Y., Bao, Y., Wang, M., Zhang, H., Wang, Y. (2024). Investigation on the effect of reduction process on internal quality of high carbon steel billet and its evolution in as-rolled wire rod. Metallurgical Research & Technology, 121 (5), 506. <https://doi.org/10.1051/met-al/2024058>
8. Shen, C., Liping, W., Qiang, L., Biao, S., Zheng, Y., Chunlin, H. (2019). Research on improving central defects of billet by external vibration strike. Ironmaking & Steelmaking, 47 (9), 986–990. <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1652446>
9. Shakhov, S. I., Sivak, B. A., Vdovin, K. N., Shakhov, D. S., Kerimov, R. I., Bairamov, A. T. (2020). Perfection of the equipment of electromagnetic stirring in moulds of billet and bloom CCM. Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information, 76 (10), 1014–1020. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-10-1014-1020>
10. Yamanaka, A., Ota, K., Terunuma, M., Tsujita, S., Abe, T. (1998). Reduction of Center Porosity of Round Billet by Electromagnetic Stirring in Horizontal Continuous Casting. Tetsu-to-Hagane, 84 (9), 609–616. [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.84.9\\_609](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.84.9_609)

11. Kanaev, A. T., Bykov, P. O., Bogomolov, A. V., Reshotkina, E. N. (2012). Reducing the central porosity of continuous-cast billet by modification of the solidification process. *Steel in Translation*, 42 (8), 643–645. <https://doi.org/10.3103/s0967091212080037>
12. Salina, V. A. (2022). Modeling of a continuously cast billet central porosity reducing processes. *Science and Technology of Kazakhstan*, 4, 59–67. <https://doi.org/10.48081/qfdl7381>
13. Ruban, V., Stoinanov, O., Niziaiev, K., Synehin, Y. (2021). Determining changes in the temperature field of a graphitized hollow electrode during metal processing periods in ladle-furnace. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (110)), 109–115. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230002>
14. Myrav'yova, I. G., Ivancha, N. G., Shcherbachov, V. R., Vishnyakov, V. I., Ermolina, E. P. (2023). Improvement of the Burden Column Structure by Controlling the Multicomponent Burden Loading Mode into the Blast Furnace. *Problems of the Regional Energetics*, 2 (58), 138–149. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-12>
15. DSTU 7620:2014. Palm Kernel Stearin. Technical specifications supplement. Kyiv. Available at: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=92687](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=92687)
16. Mamuzić, I., Longauerova, M., Strkalj, A. (2005). The analysis of defects on continuous cast billets. *Metalurgija*, 44 (3), 201–207. Available at: <https://bucketvirtualpro-private.s3.amazonaws.com/files-bv/20050728/49395.pdf>
17. Yu, H., Zhu, M. (2009). Effect of electromagnetic stirring in mold on the macroscopic quality of high carbon steel billet. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 22 (6), 461–467. [https://doi.org/10.1016/s1006-7191\(08\)60124-6](https://doi.org/10.1016/s1006-7191(08)60124-6)
18. Hress, O. V., Ohurtsov, A. P., Nedopokin, F. V. (2010). Doslidzhennia, modeliuvannia ta optymizatsiya lyvarnykh system. *Dni-prodzerzhynsk: DDTU*, 282. Available at: [https://nmetau.edu.ua/file/gress\\_o\\_v\\_ohurtsov\\_a\\_p\\_nedopokin\\_f\\_v\\_doslidzhennia\\_modeliyuvannya.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/gress_o_v_ohurtsov_a_p_nedopokin_f_v_doslidzhennia_modeliyuvannya.pdf)
19. Lantukh, O. S., Molchanov, L. S., Synehin, Ye. V. (2018). Metodyka fizychnoho modeliuvannia splyvannia ansambliu nemetalevykh vkluchchen u stalerozlyvnomu kovshi. *Matematychno modeliuvannia*, 1 (38), 95–99. Available at: [https://nmetau.edu.ua/file/kmet-steel\\_16495.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/kmet-steel_16495.pdf)
20. Smirnov, O. M., Kuberskyi, S. V., Shtepan, Ye. V. (2011). Bezperervne rozlyvannia stali. *Alchevsk: DonDTU*, 518. Available at: [https://drive.google.com/file/d/1fqRdAAfnynPV47ZFsc9m9y9\\_9JU8S9eS/view](https://drive.google.com/file/d/1fqRdAAfnynPV47ZFsc9m9y9_9JU8S9eS/view)

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359494

**DETECTION OF THE INFLUENCE OF FLEXOGRAPHIC PRINTING SPEED ON THE OCCURENCE OF THE BOUNCING EFFECT ON IMPRINTS (p. 115–124)**

**Svitlana Havenko**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4973-5174>

**Tetiana Telegina**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1521-5033>

**Marta Labetska**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2818-051X>

The paper studies the influence of flexographic printing speed on the manifestation of the bouncing effect and imprint quality indicators. Printing was carried out on an Optima 2 flexographic machine (Soma Engineering, Czech Republic) on a white polypropylene film with a thickness of 20 μm. The study was carried

out using a test printing form containing solid fills, raster areas (25%, 50%, 75%), linear elements and gradients. The geometric parameters of the lines were analyzed using an electron microscope. Spectrodensitometric studies of optical density and dot gain (TVI) in three zones across the width of the web were also conducted. The appearance of vibration defects in the form of banding and doubling of elements was observed at printing speeds of more than 400 m/min. It was found that with an increase in printing speed from 100 to 600 m/min, the TVI value decreases on average by 15–25% depending on the tone.

Based on the results obtained, second-order regression models were constructed that describe the dependence of TVI on printing speed and position on the web. Based on these models, the corresponding response surfaces were synthesized and analyzed. For a tone of 75%, a pronounced nonlinear nature of the process is observed ( $R^2 = 0.93$ ), for 50% – moderate nonlinearity ( $R^2 = 0.88$ ), for 25% – almost linear dependence ( $R^2 = 0.81$ ). The adequacy of the models was confirmed by the Fisher criterion, and the homogeneity of the experimental data – by the Cochran criterion.

It was found that the position on the web is a significant factor determining the distribution of TVI, which indicates the spatial heterogeneity of the printing process. The results obtained can be used to optimize high-speed flexographic printing modes and reduce vibration defects during the manufacture of packaging products.

**Keywords:** high-speed flexographic machines, vibration effects, imprints, tone value increment (TVI).

**References**

1. CI flexo printing machine market report. *Cognitive Market Research*. Available at: <https://www.cognitivemarketresearch.com/ci-flexo-printing-machine-market-report>
2. Havenko, S., Telegina, T., Wiczorek, M. (2025). The studies on the impact of the printing speed on the quality of flexographic prints performed on PET film. *Packaging Review*. Available at: [https://packagingreview.eu/wp-content/uploads/2025/12/PACKAGING-REVIEW\\_4\\_2025.pdf](https://packagingreview.eu/wp-content/uploads/2025/12/PACKAGING-REVIEW_4_2025.pdf)
3. Hamblyn, A. (2015). Effect of plate characteristics on ink transfer in flexographic printing. *Swansea University*. Available at: <https://www.proquest.com/openview/200b0f092b10dc8a3d669c794a6579d6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366>
4. Keawkul, P., Pachonklaew, P., Waleetorncheepsawat, B. (2022). Optimization of printing conditions to achieve effective ink transfer in flexographic printing. *Journal of Printing Science and Technology*, 59 (6), 298–302. <https://doi.org/10.11413/nig.59.298>
5. Folea, G. V., Bălan, E., Mohora, C. (2020). Considerations on quality assurance for flexographic print products. *Annals of the Academy of Romanian Scientists, Series on Engineering Sciences*, 12 (1), 33–47. <https://doi.org/10.56082/annalsarscieng.2020.1.33>
6. Petrović, S., Kašiković, N., Novaković, D., Ozcan, A. (2021). Influence of the compressible flexographic sleeve exploitation on print quality. *Tehnički vjesnik*, 28 (2), 391–400. <https://doi.org/10.17559/tv-20191114164921>
7. Vasile, P. D. (2016). Methods for improving process control and correction in flexographic printing. *Sesiunea Științifică Studentească*. Available at: [https://www.fiir.upb.ro/Upload/Studenti/SSS\\_2016/lucrarile\\_sesiunii\\_stud\\_2016/L01\\_Balan\\_Emilia.pdf](https://www.fiir.upb.ro/Upload/Studenti/SSS_2016/lucrarile_sesiunii_stud_2016/L01_Balan_Emilia.pdf)
8. Dendge, R. R. (2023). Analysis of dot gain produced by interactions of flexographic plate and anilox roll screen frequencies. *Acta Graphica*, 31 (1), 35–44. Available at: <https://hrcak.srce.hr/file/434151>
9. Žolek-Tryznowska, Z., Rombel, M., Petriaszwili, G., Dedijer, S., Kašiković, N. (2020). Influence of Some Flexographic Printing Process Conditions on the Optical Density and Tonal Value Increase of Overprinted Plastic Films. *Coatings*, 10 (9), 816. <https://doi.org/10.3390/coatings10090816>

10. Bould, D. C., Hamblyn, S. M., Gethin, D. T., Claypole, T. C. (2011). Effect of impression pressure and anilox specification on solid and halftone density. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225 (5), 699–709. <https://doi.org/10.1177/2041297510394072>
11. Phill, J., Houssin, A., Moncek, J., Chan, C. Y. (2013). *Flexographic Printing Redesign*. University of Manitoba. <http://hdl.handle.net/1993/35586>
12. Johnson, J., Rättö, P., Lestelius, M., Blohm, E. (2004). Measuring the dynamic pressure in a flexographic central impression printing press. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 19 (1), 84–88. <https://doi.org/10.3183/npprj-2004-19-01-p084-088>
13. FIRST 7.0 Design Guide. Flexographic Technical Association. Available at: <https://www.flexography.org/training-resources/resource-library/flexographic-image-reproduction-specifications-and-tolerances-first/design-guide/>
14. Havenko, S., Labetska, M., Telehina, T. (2024). Study of flexographic imprints using the methods of optical and electron microscopy. *Sixteenth International Conference on Correlation Optics*, 35. <https://doi.org/10.1117/12.3012269>

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357602

**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ СТВОЛА НА БАЛІСТИЧНІ ПОКАЗНИКИ МИСЛИВСЬКИХ НАБОЇВ (с. 6–12)****В. А. Голуб, С. П. Бісик, Г. А. Голуб, І. М. Зозулевич, О. М. Купріненко, Л. С. Давидовський, С. Г. Седов, О. М. Арістархов**

Об'єктом дослідження є мисливська рушниця з варіативною довжиною ствола. Досліджувалась проблема, пов'язана з визначенням балістичних показників мисливських набоїв за різної довжини ствола.

Визначено стандартне відхилення розподілу дробу на мішені та площа ураження мисливськими набоями в залежності від довжини ствола мисливської рушниці. Вплив довжини ствола на балістичні характеристики мисливських набоїв досліджувався шляхом проведення багатофакторного експерименту, побудованого за D-оптимальним планом Бокса–Бенкена.

У результаті проведення експериментальних досліджень було встановлено, що максимальне значення стандартного відхилення розподілу дробу на рівні 21 см має місце при довжині ствола 150 мм та масі дробового заряду 36 г. При цьому заряд пороху не мав суттєвого впливу на стандартне відхилення розподілу дробу на мішені. Стандартне відхилення розподілу дробу має максимальні значення у випадку коли пороховий заряд максимальний, а маса дробу мінімальна. Площа ураження моделювалася шляхом збільшення точки пробиття на мішені до розмірів сумарного еквівалентного діаметру найбільш вразливих елементів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із FPV (First-Person View) пілотуванням. На мішені із еквівалентним діаметром 8 см площа ураження має максимальне значення на рівні 1,2 м<sup>2</sup> при довжині ствола 150 мм, масі порохового заряду 2,28 г та масі дробового заряду 54 г. Зменшення маси дробового заряду та маси порохового заряду призводить до зменшення площі ураження при будь-якій довжині ствола.

Практичне значення результатів досліджень полягає в тому, що вони можуть бути використані для удосконалення набоїв та індивідуальних засобів ураження БПЛА із FPV пілотуванням. Крім того, їх можливо застосувати в автоматичних системах захисту, перспективних для встановлення на бойових машинах.

**Ключові слова:** мисливська рушниця, пороховий заряд, стандартне відхилення, площа ураження, модель розсіювання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354698

**ОЦІНКА ТРИМКОСТІ ЖОРСТКИХ ОХОРОННИХ СПОРУД ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕФОРМУВАННЯ (с. 13–24)****Д. А. Чепіга, Л. Л. Бачурін, С. В. Подкопаєв, Д. В. Полій, О. О. Вісин, Є. С. Подкопаєв, Г. А. Герасимчук, Я. П. Бачуріна**

Об'єктом дослідження були деформаційні процеси в охоронних спорудах для підготовчих виробок, підтримуваних позаду очисного вибою на виїмкових ділянках вугільних шахт, що відпрацьовують тонкі пласти. Вирішувалась проблема забезпечення стійкості підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт шляхом підвищення тримкості охоронних споруд для запобігання обвалень покривлі та створення безпечних умов праці. Порівняльна оцінка здійснювалася на основі аналізу енергетичних показників деформування. Дослідження базувалися на використанні моделей, що відтворювали роботу литих смуг, бетонних блоків та комбінованих конструкцій із блоків з дерев'яними прокладками. При випробуваннях на одновісне стиснення визначено деформаційний ресурс кожного виду споруд, встановлено критичні значення відносної деформації, за якими відбувається втрата функціональної придатності конструкцій. Використання енергетичного підходу дозволило кількісно оцінити межу стійкості та прогнозувати момент руйнування споруди. Експериментальним шляхом визначено, що в умовах одновісного стиснення жорсткі охоронні споруди до початку процесів руйнування працюють в режимі зростаючого опору. При цьому ділянка лінійно-пружної деформації комбінованої споруди на 33% більше, ніж у однорідної конструкції (ініціація руйнування відбувається при значенні  $\lambda_b = 0.103$  та  $\lambda_b = 0.075$ – $0.08$  відповідно), що зумовлює пізніший перехід до втрати тримкості. Наявність обмежено піддатливих елементів у жорстких конструкціях сприяє перерозподілу напружень та підвищує їх деформаційний ресурс.

Запропоновано енергетичний підхід до аналізу взаємодії охоронних конструкцій з породним масивом, що базується на використанні питомої потенціальної енергії та її складових, які характеризують процеси акумулювання й дисипації енергії. Практичне значення роботи полягає в можливості застосування отриманих результатів для обґрунтування параметрів охоронних споруд при підтриманні підготовчих виробок на виїмкових ділянках вугільних шахт, що відпрацьовують тонкі пласти товщиною до 1.2 м.

**Ключові слова:** підтримання виробок, тримкість, охоронні споруди, густина енергії деформації, безпека праці.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.357605

**ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ДО ТРАСПОРТУВАННЯ ПРОДУКЦІЇ РОДОВИЩ НАФТИ І ГАЗУ (с. 25–34)****Т. М. Нестеренко, І. І. Назаренко, М. М. Нестеренко, О. О. Шевченко, А. А. Хижняк, І. М. Берник, А. М. Онищенко, Р. В. Мошківський**

Об'єктом дослідження є процеси сепарації газорідних потоків і очищення пластової води в обладнанні установок підготовки продукції родовищ нафти і газу.

На пізній стадії розробки родовищ ефективність сепарації залежить від здатності обладнання працювати в умовах обводненості, збільшення вмісту механічних домішок і зниження пластового тиску. За таких умов класичне сепараційне обладнання не забезпечує необхідної якості розділення вуглеводнів й очищення пластової води. Вирішувалася проблема шляхом удосконалення внутрішніх конструктивних елементів трифазного сепаратора та циклонів установки підготовки вуглеводнів. Гідравлічні втрати були в межах допустимих значень і вторинне винесення крапель у газовий потік не відбувалося. Це підтверджувалося результатами термодинамічного і CFD-моделювання. У цьому є особливість підходу у порівнянні з існуючими дослідженнями, в яких дослідження нових

конструктивних рішень комплексно не проводилися. Питання гідравлічних втрат і вторинного винесення крапель у газовий потік залишалися відкритими. Запропоновані в роботі конструктивні рішення вплинули на ефективність сепарації – збільшився обсяг відібраного конденсату, а сумарні гідравлічні втрати не перевищили 0,037 МПа. Доведено, що нові конструкційні рішення сепараційних елементів забезпечують більш рівномірний розподіл швидкостей та формують локальні зони зі зниженими швидкостями. Отримані результати пояснюються зміною структури потоку, зростанням інерційного осадження крапель і зменшенням малорухомих зон у проточній частині сепараційних елементів. Практичне використання результатів можливе при реконструкції установок підготовки нафти і газу, проектуванні внутрішніх сепараційних елементів й виборі конструктивних рішень циклонів для очищення пластової води.

**Ключові слова:** нафтогазові родовища, транспортування вуглеводнів, підготовка вуглеводнів, пластова вода, термодинамічне моделювання.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354601

#### РОЗРОБКА СПОСОБУ КОНСТРУЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ПОВЕРХОНЬ, ВІДНЕСЕНИХ ДО КООРДИНАТНОЇ СІТКИ ІЗ ЛІНІЙ КРИВИНИ (с. 35–41)

A. В. Несвідомін, С. Ф. Пилипака, Т. М. Воліна, В. М. Несвідомін, О. О. Соларьов, Т. П. Волошко, Т. С. Пилипака, Л. Г. Савченко, О. С. Савченко, І. О. Захарова

Об'єктом дослідження є конструювання трубчастих поверхонь із просторовою віссю укусу, віднесених до координатної сітки із ліній кривини. Такі поверхні мають низку математичних переваг порівняно з поверхнями, описаними довільними координатними сітками. У диференціальній геометрії це має теоретичне обґрунтування і прикладну цінність. Це впливає з особливої ролі ліній кривини як геометрично привілейованих напрямів на поверхні із мінімальними і максимальними кривинами.

Щоб параметризувати трубчасту поверхню таким чином, потрібно, щоб довжина її осі описувалася аналітичними залежностями в кінцевому вигляді. Зазвичай довжина просторових кривих визначається чисельним інтегруванням. Відома група плоских кривих, які описуються параметричними рівняннями у функції довжини дуги і для яких такої проблеми не існує. В роботі запропоновано такі криві приймати за горизонтальну проекцію просторової кривої. А просторову криву конструювати як криву укусу зі сталим кутом підйому по відношенню до горизонтальної площини. Тоді просторова крива, до рівнянь якої входить кут підйому, буде описана у функції довжини дуги. Її використання в ролі осі трубчастої поверхні дозволяє віднести останню до сімей координатних ліній кривини.

В роботі горизонтальною проекцією осі трубчастої поверхні є логарифмічна спіраль. Отримано параметричні рівняння трубчастої поверхні в аналітичному вигляді. Побудовано поверхню з кутом підйому осі  $\beta = 10^\circ$  і радіусом твірного кола  $\rho = 15$  лінійних одиниць. Доведено ортогональність отриманої координатної сітки через аналіз коефіцієнтів першої квадратичної форми ( $F = 0$ ), що підтверджує віднесення поверхні до ліній кривини. Це дозволяє підвищити точність розрахунків напружено-деформованого стану оболонок у машинобудуванні та авіакосмічній техніці з одночасною мінімізацією обчислювальних витрат.

**Ключові слова:** лінії кривини, крива укусу, довжина дуги, тригранник Френе, ортогональна сітка.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.352159

#### ЕРГОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РУЧНОГО КОЛІСНОГО ЗНАРЯДДЯ ДЛЯ БОРОЗНУВАННЯ (IMRS) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДОЛОГІЙ ПРОЄКТУВАННЯ, ОРІЄНТОВАНИХ НА КОРИСТУВАЧА: ДОСЛІДЖЕННЯ НА ПРИКЛАДІ СІМЕЙНОГО ФЕРМЕРСТВА В ПЕРУ (с. 42–56)

Cesar Augusto Castillo Roque, Wendy Carolina Yupanqui Leon, Trunks Giorgio Vasquez Llave, Jose Canazas Rodriguez, Yuri Lester Silva Vidal, Jose Fernando Garate Delgado

Об'єктом дослідження є ручний колісний борозник (IMRS) – інструмент, що приводиться в дію мускульною силою, який використовують дрібні фермери в районі Тіабая (Арекіпа, Перу) для формування борозен та підгортання цибулі та часнику з інтервалом 45 см; за 10–12-годинну зміну обробляється до 227 борозен на ділянці. Незмінна висота ручки змушує високих людей тривалий час згинати тулуб і розгинати зап'ястя, тоді як нижчі користувачі компенсують надмірне навантаження на руки, що структурно виключає жінок, для яких висота ручки є невідповідною. Було застосовано чотири підходи: «Дизайн-мислення» та «Розгортання функцій якості» (QFD) для перетворення потреб фермерів у ключові інженерні цілі; VDI 2221/2225 для оцінки альтернатив; рівняння Маккіса та Алі для моделювання опору ґрунту в супісках, що зустрічаються в Тіабай; та цифрові моделі людини в САТІА V5 для біомеханічної валідації на 5-му перцентилі для жінок та 95-му для чоловіків перед створенням фізичного прототипу. Удосконалена конструкція включає раму з труб  $\varnothing 2''$  SCH10 із швидким регулюванням висоти від 900 до 1200 мм за пріоритетами QFD, колесо зі спицями  $\varnothing 600$  мм, борознювач із термообробленої сталі AISI 1045 та ручки зі сталі AISI 304, знижуючи зусилля на 8%. Більше колесо розподіляє силу від ґрунту на більшій площі контакту, що зменшує опір при русі, як зазначають McKees та Ali. Налаштування висоти усуває позиції тіла, які отримують оцінку 5 за Rapid Upper Limb Assessment (RULA), знижуючи її до 4 для користувачів з крайніми параметрами. Незважаючи на те що вартість технічного засобу вища (приблизно 680 солей у порівнянні з 300–400), строк служби більше 12 років забезпечує повернення інвестицій за 3–4 роки, відповідно до Цілей сталого розвитку (ЦСР) 2, 5 та 8.

**Ключові слова:** борознювальний інструмент, швидка оцінка верхніх кінцівок, розгортання функцій якості, цифрове моделювання людини, дрібне сільське господарство, кустарне виробництво.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.354678

#### ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ МЕХАНІЧНОГО ДОПОВНЮЮЧОГО ЗАПОБІЖНОГО ГАЛЬМА В УМОВАХ ГІДРАВЛІЧНОЇ ВІДМОВИ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПРИ ВИТОКУ РІДИНИ (с. 57–65)

Rolan Siregar, Asyari, Suzuki Syofian

Об'єктом дослідження є гідравлічна гальмівна система важких транспортних засобів в умовах прогресуючого витоку гальмівної рідини, з особливим акцентом на її вплив на гальмівну ефективність та поведінку при відмовах. Розглянута проблема полягає

в втраті гальмівної ефективності через відмову гідравлічних гальм, спричинену витоком рідини, що знижує гідравлічний тиск і може призвести до повної відмови гальм.

У цьому дослідженні представлено конструкцію та експериментальний аналіз незалежного механічного вторинного запобіжного гальма на основі колісного затискача для гальмівних систем важких транспортних засобів. Експериментальна оцінка була проведена з використанням обертового випробувального стенду за різних умов навантаження. Результати показують, що відмова гальм сильно залежить від навантаження. При низькому навантаженні (5 Гц) повна відмова відбувається при витoku приблизно 70 мл та тиску 5 бар, тоді як при високому навантаженні (50 Гц) відмова відбувається лише при 25 мл та тиску 9,3 бар, що вказує на підвищену чутливість до витоків. Така поведінка пояснюється втратою гідравлічної рідини та стисливістю повітря, що потрапило в гальмівний контур, що запобігає досягненню тиску максимального рівня та зменшує ефективну передачу зусилля. При повній гідравлічній відмові вторинне запобіжне гальмо здатне зупинити обертання колеса за всіх випробуваних умов; однак, час зупинки довший, сягаючи 6,5 с порівняно з 1,4–2,9 с для основного гальма. Ці результати демонструють, що запропонована система забезпечує повністю незалежний безвідмовний гальмівний механізм, здатний підтримувати функціональність гальмування у разі відмови основної системи, тим самим вирішуючи проблему втрати ефективності гальмування в умовах гідравлічної відмови. Система може бути застосована в гальмівних системах важких транспортних засобів як рішення для зменшення ризиків у сценаріях відмови, особливо в умовах експлуатації з високим навантаженням, з потенціалом для подальшого розвитку, експериментального вдосконалення та впровадження в реальних транспортних засобах, включаючи інтеграцію зі стратегіями активації.

**Ключові слова:** вторинне запобіжне гальмо, витік, час зупинки, поріг тиску, зона відмови.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356685

#### ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ CO<sub>2</sub> ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ДОБАВОК ВОДНЮ ТА МЕТАНУ ДО БЕНЗИНА В ДВИГУНІ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ (с. 66–77)

А. П. Марченко, М. Т. Міщенко

Об'єктом дослідження є робочий процес бензинового двигуна 4Ч7,6/6,6 при використанні добавок водню та метану до палива. Проблема, що вирішувалася, полягає у відсутності єдиного методологічного підходу до порівняльної кількісної оцінки впливу різних газових добавок на параметри згоряння, показники ефективності та викиди CO<sub>2</sub>. Як наслідок, виникає ускладнення обґрунтованого вибору оптимального компонента для підвищення енергоефективності та зниження вуглецевого сліду існуючого парку бензинових двигунів.

У роботі дістали подальшого розвитку напівемпіричні залежності для визначення параметрів моделі Вібе при додаванні метану до бензину, які базуються на масштабуванні через співвідношення ламінарних швидкостей полум'я. За результатами математичного моделювання встановлено, що при додаванні 10% водню показник динаміки згоряння  $m$  зменшується на 32,4–38,7%, тривалість згоряння  $\varphi_z$  скорочується на 26,1–28,2%. Визначено, що питома ефективна витрата палива знижується на 13,9–14,3%, ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) зростає на 0,5–1,8%, а об'ємна частка CO<sub>2</sub> зменшується на 14,1%. При додаванні метану до 10% параметр динаміки  $m$  зростає на 3,2–3,9%, та, відповідно, тривалість згоряння  $\varphi_z$  збільшується на 2,4–2,6%, при цьому питома витрата знижується на 2,3–4,8%, ефективний ККД зростає на 1,4–3,7%, також спостерігається зниження CO<sub>2</sub>, яке становить 11,7%.

Визначальною особливістю є кількісні результати впливу при однаковій частці добавки (10%), відповідно до яких, водень забезпечує в 1,2 рази більше зниження CO<sub>2</sub> порівняно з метаном, але одночасно спостерігається покращення паливної ефективності. Отримані результати дозволяють обґрунтовано обирати тип добавки для комплексного підвищення ефективності та екологічності або помірної декарбонізації з мінімальною модернізацією двигуна.

**Ключові слова:** добавка водню, добавка метану, модель Вібе, параметри згоряння, декарбонізація транспорту.

DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356502

#### РОЗРОБКА ВАЛІДОВАНОЇ МОДЕЛІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГІДРОДИНАМІКИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ (с. 78–90)

О. В. Шевчук, О. І. Тарасов

Об'єктом дослідження є процес плівкового охолодження на плоскій пластині. Основною проблемою, яка розглядалась, був пошук найбільш універсальної CFD моделі для різних форм отворів плівкового охолодження. Проблема вирішувалась шляхом вибору оптимальної розрахункової сітки та визначення найбільш підходящих турбулентних моделей для прогнозування ефективності плівкового охолодження в широкому діапазоні параметрів. Для дослідження впливу сіткової збіжності було побудовано 4 рівня поліедральної (багатогранної) розрахункової сітки. Показано, що обрана сітка розміром 5.8 млн елементів практично не поступається блочній структурованій сітці з ідентичними налаштуваннями. Отримано валідовану CFD модель, що базується на поліедральній сітці. Особливістю результатів є те, що CFD модель охоплює чотири форми отворів, які розташовані з кроком 5D під кутом 30° до основного потоку (класичний циліндричний, віяловий, овальний та дифузний щілина). Представлені результати порівняння семи RANS-моделей турбулентності з експериментальними даними. Виявлено, що при розглянутих режимних і геометричних параметрах найбільш універсальною за багатьма критеріями є модель турбулентності  $k-\varepsilon$  Realizable. Її перевага може пояснюватися підвищеною стійкістю та кращою чутливістю до зон складної кінематики потоку, що забезпечує більш точне відтворення розширюваних (віялових та дифузних) отворів. Додатково працездатність моделі була перевірена при розрахунку отвору 7-7-7. Для цього типу отвору представлений попередній аналіз впливу конфігурацій теплозахисного покриття на ефективність плівки. Запропонована розрахункова модель може бути використана для оптимізації геометрії отворів і режимів вдуву в задачах охолодження лопаток газотурбінних двигунів.

**Ключові слова:** плівкове охолодження, ефективність охолодження, плоска пластина, чисельне моделювання, модель турбулентності.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359455****РОЗРОБКА КОНСОЛІДОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАВИХРЮВАЧА З МЕТОЮ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ МІКРОМЕТАЛУРГІЙНОГО ПОШАРОВОГО СПЛАВЛЕННЯ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ ЯК МОНОДЕТАЛІ (с. 91–104)****В. С. Єфанов, О. О. Калініченко, Д. О. Куц, О. О. Овчинников, Г. М. Лаптева**

Об'єктом дослідження є витратні характеристики повітря та температурне поле камери згоряння, що визначаються геометрією завихрювача. Проблема, яка вирішується у роботі, полягає в тому, що завихрювачі, виготовлені традиційними методами лиття з подальшим складанням, характеризуються значними геометричними відхиленнями елементів проточної частини. Це призводить до розкиду витрат повітря по контурах, порушення рівномірності паливно-повітряної суміші та, як наслідок, до підвищеної колової нерівномірності температурного поля на виході з камери згоряння, що знижує ресурс і надійність роботи двигуна. У роботі виконано тривимірне моделювання завихрювача із використанням CAD-системи Unigraphics NX та проведено чисельний CFD-аналіз процесів у камері згоряння. Проведено експериментальні дослідження геометричних відхилень і витрат повітря для завихрювачів, виготовлених традиційним методом лиття та адитивним методом L-PBF (Laser Powder Bed Fusion). Оцінку геометричної точності виконано методом 3-D сканування з порівнянням із цифровою моделлю, а витратні характеристики визначено шляхом стендових випробувань при продування повітряного та паливного контурів, а також при сумісній роботі контурів. Встановлено, що завихрювачі, виготовлені методом L-PBF, забезпечують стабільність витрат повітря в межах  $\pm 1,5\%$ , що є кращим показником порівняно з литими аналогами. Це дозволило знизити колову нерівномірність температурного поля камери згоряння до 12,5–18,9% при допустимому значенні не більше 21%. Отримані результати підтверджують доцільність застосування адитивних технологій для виготовлення завихрювачів камер згоряння газотурбінних двигунів.

**Ключові слова:** адитивні технології, L-PBF, завихрювач, камера згоряння, газотурбінний двигун, CFD-моделювання.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.356920****ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ РОЗЛИВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ПОРИСТОСТІ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ (с. 105–114)****Є. В. Синегін, В. О. Рубан, К. Г. Нізяєв, О. М. Стоянов, С. В. Журавльова**

Об'єкт дослідження – процес формування центральної пористості в осьовій зоні безперервнолитої сталеві заготовки під час її тверднення. Проблема полягає у необхідності встановлення раціональних параметрів температурно-швидкісного режиму розливання для мінімізації осьової пористості, що є критичним для підвищення щільності металу та якості прокату.

Розроблено комплексну методику фізичного моделювання процесу затвердіння з використанням стеарину як модельної речовини. На основі аналізу чисел подібності (Біо, Фур'є, Косовича) встановлено точні масштаби моделювання: за часом – 1,854, за лінійними розмірами – 0,1778, за коефіцієнтом тепловіддачі – 0,04639. Визначено, що для адекватної імітації формування кут змикання рідкої лунки коливається в межах 2,3–6°. Встановлено кількісні параметри експерименту на моделі: перегрів розплаву в межах 1,8–4,2°C, що відповідає 15–35°C для сталі.

Отримані дані пояснюються законами конвекційного теплообміну та фазового переходу. Кут нахилу фронту кристалізації та інтенсивність відведення тепла визначають момент утворення «мостів» і перехватів у тепловому центрі, що безпосередньо зумовлює морфологію та об'єм усадкових пор.

На відміну від традиційного математичного моделювання, запропонований підхід забезпечує високу візуальну достовірність дефектоутворення завдяки використанню  $\pi$ -теорему для підбору фізичних параметрів. Це дозволяє досліджувати критичні стани системи без ризику аварійних ситуацій у промислових умовах.

Результати дослідження можуть бути використані для впровадження на металургійних підприємствах при проектуванні та оптимізації режимів охолодження заготовок на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), що забезпечить підвищення виходу придатного металу.

**Ключові слова:** безперервнолита заготовка, центральна пористість, фізичне моделювання, числа подоби, температурно-швидкісний режим, стеарин.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2026.359494****ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ФЛЕКСОГРАФІЧНОГО ДРУКУ НА ПОЯВУ ПІДСТРИБУЮЧОГО ЕФЕКТУ (BOUNCING EFFECT) НА ВІДБИТКАХ (с. 115–124)****С. Ф. Гавенко, Т. Є. Телегіна, М. Т. Лабецька**

В роботі проведено дослідження впливу швидкості флексографічного друку на прояв підстрибуючого ефекту та показники якості відбитків. Друкування здійснювалось на флексографічній машині Optima 2 (Soma Engineering, Чехія) на білій поліпропіленовій плівці товщиною 20 мкм. Дослідження проводилося з використанням тестової друкарської форми, яка містила суцільні заливки, растрові ділянки (25%, 50%, 75%), лінійні елементи та градієнти. Здійснено аналіз геометричних параметрів ліній з використанням електронного мікроскопа. Також проведено спектроденситометричні дослідження оптичної щільності і розтискування растрової крапки (TVI) у трьох зонах по ширині полотна. Поява вібраційних дефектів у вигляді смугастості та подвоєння елементів спостерігалася при швидкостях друку понад 400 м/хв. Встановлено, що зі збільшенням швидкості друку від 100 до 600 м/хв значення TVI в середньому зменшується на 15–25% залежно від тону.

На основі отриманих результатів побудовано регресійні моделі другого порядку, які описують залежність TVI від швидкості друку та позиції на полотні. На основі цих моделей синтезовано та проаналізовано відповідні поверхні відгуків. Для тону 75% спостерігається виражений нелінійний характер процесу ( $R^2 = 0.93$ ), для 50% – помірний нелінійний ( $R^2 = 0.88$ ), для 25% – майже лінійна залежність ( $R^2 = 0.81$ ). Адекватність моделей підтверджено за критерієм Фішера, а однорідність експериментальних даних – за критерієм Кохрена.

Встановлено, що позиція на полотні є вагомим фактором, який визначає розподіл TVI, що вказує на просторову неоднорідність друкарського процесу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації швидкісних режимів флексографічного друку та зменшення вібраційних дефектів під час виготовлення пакувальної продукції.

**Ключові слова:** високошвидкісні флексографічні машини, вібраційні ефекти, друкарські відбитки, приріст тонового значення (TVI).

---