

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231622

JUSTIFYING THE PROLONGATION OF THE SERVICE LIFE OF THE BEARING STRUCTURE OF A TANK CAR WHEN USING Y25 BOGIES (p. 6–14)

Oleksij Fomin

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

Alyona Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

Kseniia Ivanchenko

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0960-1200>

Ievgen Medvediev

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,
Sievierodonetsk, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8566-9624>

This paper substantiates the use of Y25 bogies under tank cars in order to prolong their service life. The reported study has been carried out for a tank car with rated parameters, as well as the actual ones, registered during full-scale research. Mathematical modeling was performed to determine the basic indicators of the tank car dynamics. The differential equations of motion were solved by a Runge-Kutta method using the Mathcad software package (USA). It was established that the use of Y25 bogies under a tank car with rated parameters could reduce the acceleration of its bearing structure by almost 39 % compared to the use of standard 18–100 bogies.

Applying the Y25 bogies under a tank car with the actual parameters reduces the acceleration of its load-bearing structure by almost 50 % compared to the use of standard 18–100 bogies.

The derived acceleration values were taken into consideration when calculating the bearing structure of a tank car for strength. The calculation was performed using the SolidWorks Simulation software package (France). The resulting stress values are 18 % lower than the stresses acting on the load-bearing structure of a tank car equipped with 18–100 bogies.

For the load-bearing structure of a tank car with the actual parameters, the maximum equivalent stresses are 16 % lower than the stresses when the 18–100 bogies are used.

The design service life of the load-bearing structure of a tank car was estimated taking into consideration the use of Y25 bogies. The calculations showed that the design service life of the bearing structure of a tank car equipped with Y25 bogies is more than twice as high as that obtained for 18–100 bogies.

The study reported here would contribute to compiling recommendations for prolonging the service life of the load-bearing structures of tank cars.

Keywords: transport mechanics, tank car, load-bearing structure, dynamic load, structural strength, design service life.

References

- Vatulia, G., Falendysh, A., Orel, Y., Pavliuchenkov, M. (2017). Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*, 187, 301–307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.379>
- Barkan, C. P. L., Liu, X., Rapik Saat, M. (2015). Enhanced Tank Car Design Improves the Safety of Transporting Crude Oil and Alcohol by Rail. *TR NEWS*, 298, 41–43. Available at: <https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/Barkan-Liu-&-Saat-2015-TR-News-298---Enhanced-Tank-Car-Design-Improves-the-Safety-of-Transporting-Crude-Oil-and-Alcohol-by-Rail.pdf>
- Ashtiani, I. H., Rakheja, S., Ahmed, W. (2019). Investigation of coupled dynamics of a railway tank car and liquid cargo subject to a switch-passing maneuver. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 233 (10), 1023–1037. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409718823650>
- Shi, H., Wang, L., Nicolsen, B., Shabana, A. A. (2017). Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 231 (4), 608–629. doi: <https://doi.org/10.1177/1464419317696418>
- Wang, L., Shi, H., Shabana, A. A. (2016). Effect of the tank car thickness on the nonlinear dynamics of railroad vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 231 (1), 3–29. doi: <https://doi.org/10.1177/1464419316642930>
- Wan, Y., Mai, L., Nie, Z. G. (2013). Dynamic Modeling and Analysis of Tank Vehicle under Braking Situation. *Advanced Materials Research*, 694-697, 176–180. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.694-697.176>
- Fomin, O., Lovska, A., Radkevych, V., Horban, A., Skliarenko, I., Gurenkova, O. (2019). The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14 (21), 3747–3752. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_1119_7989.pdf
- Ermolenko, I. Yu., Zheleznyak, V. N. (2016). Study on dynamics of rolling stock using an experimental laboratory car when driving on difficult sections of the road. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, 4 (52), 199–203. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-dinamiki-podvizhnogo-sostava-s-ispolzovaniem-eksperimentalnogo-vagona-laboratorii-pri-dvizhenii-po-slozhnym-uchastkam/viewer>
- Domin, I., Cherniak, G., Shevchuk, P. (2017). Computer models of dynamics of flat cars with the bogies with central and axle-box spring suspension. *Visnyk SNU im. V. Dalia*, 5 (235), 41–45. Available at: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:_OaJB6ImokJ:nbu.gov.ua/j-pdf/VISUNU_2017_5_11.pdf+&cd=3&hl=ru&ct=clnk&gl=ua
- Ushkalov, V. E., Bezrukavii, N. V. (2020). Study of the dynamics of freight cars with radial-type trucks. *Technical Mechanics*, 1, 106–113. doi: <https://doi.org/10.15407/itm2020.01.106>
- Shvets, A. O. (2020). Influence of lateral displacement of bogies on the freight car dynamics. *Nauka ta prohres transportu*, 6 (90), 66–81. Available at: <http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/12890/1/Shvets.pdf>
- Domin, Yu. V., Cherniak, H. Yu. (2003). *Osnovy dynamiky vahoniv*. Kyiv: KUETT, 269.
- Fomin, O., Lovska, A. (2020). Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23 (6), 1455–1465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>
- Fomin, O., Lovska, A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car,

- which exhausted its resource. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (7 (108)), 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
15. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
 16. Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. MATEC Web of Conferences, 230, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>
 17. Fomin, O. (2014). Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars. Metallurgical and Mining Industry, 5, 40–44. Available at: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/9-Fomin.pdf>
 18. Lovska, A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge. Metallurgical and Mining Industry, 1, 49–54. Available at: https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/10%20Lovska.pdf
 19. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Ananieva, O., Khoruzhevskiy, H., Kavun, V. (2019). Studying a voltage stabilization algorithm in the cells of a modular sixlevel inverter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (8 (102)), 19–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185404>
 20. Plakhtii, O., Nerubatskyi, V., Karpenko, N., Hordiienko, D., Butova, O., Khoruzhevskiy, H. (2019). Research into energy characteristics of single-phase active four-quadrant rectifiers with the improved hysteresis modulation. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (8 (101)), 36–44. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179205>
 21. Plakhtii, O. A., Nerubatskyi, V. P., Kavun, V. Y., Hordiienko, D. A. (2019). Active single-phase four-quadrant rectifier with improved hysteresis modulation algorithm. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 5, 93–98. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/16>
 22. Bychkov, A. S., Kondratiev, A. V. (2019). Criterion-Based Assessment of Performance Improvement for Aircraft Structural Parts with Thermal Spray Coatings. Journal of Superhard Materials, 41 (1), 53–59. doi: <https://doi.org/10.3103/s1063457619010088>
 23. Kondratiev, A., Gaidachuk, V., Nabokina, T., Tsaritsynskiy, A. (2020). New Possibilities of Creating the Efficient Dimensionally Stable Composite Honeycomb Structures for Space Applications. Advances in Intelligent Systems and Computing, 45–59. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5
 24. Ustich, P. A., Karpych, V. A., Ovechnikov, M. N. (1999). Nadezhnost' rel'sovogo netyagovogo podvizhnogo sostava. Moscow, 415.
 25. DSTU 7598:2014. Freight Wagons. General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled) (2015). Kyiv, 162.
 26. GOST 33211-2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities. Moscow, 54.
 27. EN 12663-2. Railway applications - structural requirements of railway vehicle bodies - Part 2: Freight wagons (2010).
 28. Lovska, A., Fomin, O. (2020). A new fastener to ensure the reliability of a passenger car body on a train ferry. Acta Polytechnica, 60 (6). doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2020.60.0478>
 29. Vatulia, G., Lobiak, A., Chernogil, V., Novikova, M. (2019). Simulation of Performance of CFST Elements Containing Differentiated Profile Tubes Filled with Reinforced Concrete. Materials Science Fo-

rum, 968, 281–287. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.281>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.230820

ANALYTICAL STUDY OF THE NATURAL BENDING OSCILLATIONS OF A CONCAVE BEAM WITH PARABOLIC CHANGE IN THICKNESS (p. 15–23)

Kirill Trapezon

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5873-9519>

Alexandr Trapezon

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-9854>

The synthesis of factorization and symmetry methods produced a general analytical solution to the fourth-order differential equation with variable coefficients. The form and structure of the variable coefficients correspond, in this case, to the problem of the oscillations of a concave beam of variable thickness. The solution to this equation makes it possible to study in detail the oscillations of such and similar, for example convex, beams at the different fixation of their ends' sections. A practical confirmation has been obtained that the beam whose thickness changes in line with the concave parabola law $H=a^2x^2+1$, where a is the concave factor, demonstrates an increase in the natural frequencies of its free oscillations with an increase in its rigidity. As an example, the object's maximum deflection dependence on the beam rigidity factor has been established. The nature of this dependence confirmed the obvious conclusion that the deflections had decreased while the rigidity had increased. The evidence from the calculation results can be a testament to the correctness of the reported procedure of problem-solving.

The considered problem and the analytical solution to it could serve as a practical guide to the optimal design of beam structures. In this case, it is very important to take into consideration the place and nature of the distribution of cyclical extreme operating stresses. The resulting ratios to solve the problem make it possible to simulate the required normal stresses in both the fixation and central zones when the rigidity parameter is changed. Designers could predict such a parabolic profile of the beam, which would ensure the required reduction of maximum stresses in the place of fixing the beam. The considered example of solving the problem of the natural oscillations of the beam with rigid fixation of the ends illustrates the effectiveness of the factoring and symmetry methods used. The developed solution algorithm could be extended to study the natural bending oscillations of the beam at other fixing techniques, not excluding a variant of a completely free beam.

Keywords: free oscillations, variable thickness, symmetry method, factoring method, approximation, differential equation.

References

1. Saurin, V. V. (2019). Analysis of Dynamic Behavior of Beams with Variable Cross-section. Lobachevskii Journal of Mathematics, 40 (3), 364–374. doi: <https://doi.org/10.1134/s1995080219030168>
2. Safronov, V. S., Antipov, A. V. (2020). Evaluation of dynamic qualities of a metal road bridge according to data of natural tests and test calculations. Stroitel'naya mekhanika i konstruksii, 1 (24), 39–53. Available at: <https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/stroitel'naya-mekhanika-i-konstruksii/spisok-vypuskov/24.pdf>
3. Kaynardag, K., Battaglia, G., Ebrahimkhanlou, A., Pirrotta, A., Salamone, S. (2020). Identification of Bending Modes of Vibration in Rails by a Laser Doppler Vibrometer on a Moving Platform. Ex-

- perimental Techniques, 45 (1), 13–24. doi: <https://doi.org/10.1007/s40799-020-00401-9>
4. Mahnenko, O. V., Saprykina, G. Yu., Mirzov, I. V., Pustovoy, A. D. (2014). Prospects for manufacture of welded structures of load-carrying elements of freight wagon carriage. *Avtomaticeskaya svarka*, 3 (730), 36–42. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/103390>
 5. Cao, D., Gao, Y. (2018). Free vibration of non-uniform axially functionally graded beams using the asymptotic development method. *Applied Mathematics and Mechanics*, 40 (1), 85–96. doi: <https://doi.org/10.1007/s10483-019-2402-9>
 6. Cao, D. X., Wang, J. J., Gao, Y. H., Zhang, W. (2019). Free Vibration of Variable Width Beam: Asymptotic Analysis with FEM Simulation and Experiment Confirmation. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 7 (3), 235–240. doi: <https://doi.org/10.1007/s42417-019-00116-1>
 7. Mylenko, A., Rozhkovskaya, E., Garanenko, T. (2014). Increasing endurance limit of gas-turbine engines wide chord fan in ultrasonic field. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 1, 67–70. Available at: <http://vd.zntu.edu.ua/article/view/97952/93278>
 8. Sayyad, A. S., Ghugal, Y. M. (2018). Analytical solutions for bending, buckling, and vibration analyses of exponential functionally graded higher order beams. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19 (5), 607–623. doi: <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0046-z>
 9. Pham, P.-T., Hong, K.-S. (2020). Dynamic models of axially moving systems: A review. *Nonlinear Dynamics*, 100 (1), 315–349. doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05491-z>
 10. Adikov, S. G. (2006) Design features of ultrasonic sawbow. *Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovanie, menedzhment XXI veka: trudy mezhdunarodnogo evraziyskogo simpoziuma. Ekaterinburg*, 125–132. Available at: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/4213/1/Adikov.pdf>
 11. Tomas, K. I., Il'yaschenko, D. P. (2011). *Tekhnologiya svarochnogo proizvodstva*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 247.
 12. Tarasov, S. V., Mischanin, L. V. (2008). Metodika rascheta sobstvennykh chastot uprugoy lopasti vertikal'no-osevoy vetroenergeticheskoy ustanovki. *Vestnik Dnepropetrovskogo universiteta. Seriya: "Fizika. Radioelektronika"*, 16 (15 (2)), 179–183. Available at: http://www.vdnu.narod.ru/v15t2/pdf/s28_15t2.pdf
 13. Korobenko, A., Bazilevs, Y., Takizawa, K., Tezduyar, T. E. (2018). Computer Modeling of Wind Turbines: 1. ALE-VMS and ST-VMS Aerodynamic and FSI Analysis. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26 (4), 1059–1099. doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9292-1>
 14. Sazonov, I. A. (1978). Kонтратory izgibnyh voln. *Akusticheskii zhurnal*, 24 (6), 925–931. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/1978_6_925-931.pdf
 15. Trapezon, A. G. (1983). *Raschet uprugih elementov pri rezonansnykh ustalostnykh ispytaniyakh*. Kyiv: Naukova dumka, 96.
 16. Ghazaryan, D., Burlayenko, V. N., Avetisyan, A., Bhaskar, A. (2017). Free vibration analysis of functionally graded beams with non-uniform cross-section using the differential transform method. *Journal of Engineering Mathematics*, 110 (1), 97–121. doi: <https://doi.org/10.1007/s10665-017-9937-3>
 17. Moreno-García, P., dos Santos, J. V. A., Lopes, H. (2017). A Review and Study on Ritz Method Admissible Functions with Emphasis on Buckling and Free Vibration of Isotropic and Anisotropic Beams and Plates. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 25 (3), 785–815. doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9214-7>
 18. Li, Z., Xu, Y., Huang, D., Zhao, Y. (2019). Two-dimensional elasticity solution for free vibration of simple-supported beams with arbitrarily and continuously varying thickness. *Archive of Applied Mechanics*, 90 (2), 275–289. doi: <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01608-y>
 19. Pavliuchenkov, M. V. (2014). Structure rationalization of tank cars support devices for fluids. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 1 (49), 151–159. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2014/22681>
 20. Gusev, B. V., Saurin, V. V. (2019). On Free Bending Vibrations of Concrete Beams With Variable Cross Section. *Industrial and Civil Engineering*, 8, 93–98. doi: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.08.93-98>
 21. Tymoshenko, S. (1928). *Vibration problems in engineering*. New York: D. Van Nostrand Co Inc, Constable and Co., 351.
 22. Trapezon, K. A. (2006). The symmetry method in calculating and designing of acoustic thickeners. *Akusticheskii vestnik*, 9 (4), 50–55. Available at: [http://hydromech.org.ua/content/pdf/av/av-09-4\(50-55\).pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/av/av-09-4(50-55).pdf)
 23. Chang, P., Zhao, X. (2020). Exact solution of vibrations of beams with arbitrary translational supports using shape function method. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21 (7), 1269–1286. doi: <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00275-7>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232671

DETERMINING THE STRESSED-STRAINED STATE OF CONCRETE IN THE ZONE OF EXPOSURE TO LOCAL LASER RADIATION (p. 24–36)

Ihor Karkhut

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9205-5118>

This paper reports the results of the physical and numerical experiments on determining the stressed-strained state of concrete in protective structures in the region of the effect of local point laser radiation. The software package LIRA10.8 (release 3.4) was used to build a computer model in the statement of a stationary thermal conductivity problem. To this end, the findings from the experimental studies were applied – the resulting temperature distribution and changes in the structure of concrete on the surface and deep into concrete cubes for more than 120 samples of concrete with three levels of moisture content: dried, natural humidity, and water-saturated. This paper gives the parameters of the simulation, the results of a numerical experiment, their analysis, and comparison with the results of a physical experiment.

The temperature fields when establishing the dynamic temperature equilibrium, the level of stresses in concrete, derived from the physical experiments, correlate well with the results of the numerical experiment. The maximum temperature determined by the optical method at the surface of concrete was 1,350+50 °C. Deviations at control points do not exceed 12–70 °C in the temperature effect zone and 18–176 °C (1–11 %). At the rated radiation power of 30 W, the second stage of interaction was achieved; at 100 W – the fourth stage for concrete with a moisture content of 0–2.5 %; and, for water-saturated concrete, the fifth stage of interaction with the laser beam. A significant decrease in the thresholds between the stages of interaction between laser radiation and concrete was revealed, especially water-saturated concrete, compared to the thresholds for metals (the thresholds between the third and fifth stages were reduced by 10³–10⁴ times). The destruction of the walls of water-saturated pores in concrete occurred under the pressure of water vapor. The tangent stresses, in this case, were 1.7 MPa, and the values for the coefficient K_p , determined by the method of acoustic emission, were in the range of 4–6. Such results explain the absence of normal microcracks due to the hoop effect.

It was established that in the contact zone between a laser beam and concrete, about 90 % of the radiation energy dissipates, and in the adjacent heating zone – up to 77 %. The optimal speed of beam movement when cleaning the concrete surface from organic, paint, and other types of contamination of 0.5–2 mm/s (surface temperature, 100–300 °C) has been proposed.

Keywords: heavy concrete, moisture content, laser radiation, protective properties.

References

- Baharev, S., Mirkin, L. I., Shesterikov, S. A. et. al. (1988). *Struktura i prochnost' materialov pri lazernyh vozdeystviyah*. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 224.
- Anishchenko, L. M., Lavrenyuk, S. Yu. (1986). *Matematicheskie osnovy proektirovaniya vysokotemperaturnyh tekhnologicheskikh protsessov*. Moscow: Nauka, 77.
- Wignarajan, S. (1999). New horizons for high-power lasers: applications in civil engineering. *Proceeding SPIE*, 3887-01, 34–44.
- Uglov, A. A., Smurov, I. Yu., Lashin, A. M., Gus'kov, A. G. (1991). *Modelirovanie teplofizicheskikh protsessov impul'snogo lazernogo vozdeystviya na metally*. Moscow: Nauka, 288.
- Roźniakowski, K. (2001). *Zastosowanie promieniowania laserowego w badaniach i modyfikacji właściwości materiałów budowlanych. Studia z zakresu inżynierii NR 50*. Warszawa-Lódź, 200.
- Romanowska, A., Jablonski, M. (2001). *Kompozyt gipsowy o podwyższonej akumulacji ciepła. Studia z zakresu inżynierii NR 50*. Warszawa-Lódź, 102.
- Gawin D., Kośny J., Wilkes, K. (2005). *Wpływ zawartości wilgoci na dokładność pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego metodą stacjonarną*. Polska academia nauk. *Studia z zakresu inżynierii NR 50*. Warszawa-Lódź, 88.
- Kamata, H., Mimori, T., Tachiiwa, M., Sugimoto, K. (1996). *New Applications of Lasers to Architecture and Civil Engineering. Study on Methods for Decontaminating Concrete Surface by Laser Treatment*. *The Review of Laser Engineering*, 24 (2), 182–190. doi: <https://doi.org/10.2184/ljsj.24.182>
- Hamasaki, M. (1987). *Experimental cutting of biological shield concrete using laser*. *Proc. International Symposium on Laser Processing*. Tokio.
- Stashuk, P. M. (2001). *Vyvchennia kinetyky protsesiv trishchynoutvorennya metodom akustychnoi emisiyi*. *Visnyk Derzhavnoho universytetu "Lvivska politehnika" Teoriya ta praktyka budivnytstva*, 178–184.
- Filonenko, S. F. (2000). *Analiz kinetiki razvitiya protsessov razrusheniya metodom akusticheskoy emissii*. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Sinergetika 2000. Samoorganizuyushchiesya protsessy v sistemah i tekhnologiyah"*. Komsomol'sk-na-Amure, 94–97.
- Long, N. P., Daido, H., Yamada, T., Nishimura, A., Hasegawa, N., & Kawachi, T. (2017). *Experimental characterization of concrete removal by high-power quasicontinuous wave fiber laser irradiation*. *Journal of Laser Applications*, 29 (4), 041501. doi: <https://doi.org/10.2351/1.5008326>
- Lawrence, J., Li, L. *High power diode laser surface glazing of concrete*. CORE. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/53233.pdf>
- Sakai, Y., Sikombe, I., Watanabe, K., Inoue, H. (2019). *Microscopic Change in Hardened Cement Paste due to High-Speed Impact*. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17 (9), 518–525. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.17.518>
- DSTU B V.2.7-214:2009. *Building material. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens* (2010). Kyiv, 43.
- DSTU B V.2.7-170:2008. *Building materials. Concretes. Methods of determination of middle density, moisture content, water absorptions porosity and watertightness*. Kyiv.
- Karhut, I. I. (2019). *Influence of laser radiation on heavy concrete. Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, 37, 35–47. doi: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.311>
- Karkhut, I. I., Bula, S. S., Soroka, Ya. V. (2007). *Rozpodil temperatury v obiami betonu pry diyi teplovoho udaru, yak vydu mistsevoho nahrivu*. VII Mizhnarodnyi sympozium «Mekhanika ta fizyka ruinuvannia budivnelnykh materialiv i konstruktivnyy». Kyiv, 7, 191–197.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.234131

FORMATION OF A COMPLETE STRESS-STRAIN CURVE OF CONCRETE USING DIGITAL IMAGE CORELLATION (p. 37–44)

Yaroslav Blikharsky

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3374-9195>

Andrii Pavliv

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6149-2972>

This paper reports the development and verification of a new procedure for formation of a complete stress-strain curve of concrete with a downward region of strain by using a digital image correlation method. A new technique to build speckle patterns on the surface of concrete is described. That makes it possible to accurately enough reproduce the speckle patterns on the surface of concrete and perform a high-quality analysis of strains involving digital image correlation. The advantages of this research technique have been established when predicting the formation of internal cracks in concrete followed by their propagation. In addition, using the digital image correlation methodology makes it possible to obtain strains of the entire studied plane of the sample at each stage of loading. This procedure provides an opportunity to investigate a change in strains and the movement of individual points or areas when studying concrete surfaces. That is a relevant issue as it enables more detailed diagnostics of existing reinforced concrete structures. To check the accuracy of this procedure application, a mechanical gauge with an accuracy of 0.001 mm was additionally installed. 2 high-speed monochrome CCD cameras with different lenses were used in determining concrete strains involving the digital image correlation technique. The deformations were controlled with a period of time every 250 ms. The load was controlled by an additional third camera with a speed of 50 frames/second. The result of the experimental study is the formed full concrete destruction diagram with a downward region of strain. The deviation of the results of strains based on the mechanical gauge with an accuracy of 0.001 mm with a base of 200 mm from those acquired by the digital image correlation procedure was mainly up to 10 %, which confirms the reliability of the results. The results of this work allow a more accurate calculation of reinforced concrete structures in the practice of design, inspection, or reinforcement of existing structures.

Keywords: digital image correlation, stress-strain curve, concrete, speckle patterns.

References

- Bambura, A. M., Dorogova, O. V., Sazonova, I. R., Bogdan, V. M. (2018). *Calculations of the eccentriccompressed slender reinforced concrete members applying an "effective" curvature method*. *Nauka ta budivnytstvo*, 3, 10–20.
- Mergos, P. E., Mantoglou, F. (2019). *Optimum design of reinforced concrete retaining walls with the flower pollination algorithm*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 61 (2), 575–585. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02380-x>

3. Martins, A. M. B., Simões, L. M. C., Negrão, J. H. J. O., Lopes, A. V. (2019). Sensitivity analysis and optimum design of reinforced concrete frames according to Eurocode 2. *Engineering Optimization*, 52 (12), 2011–2032. doi: <https://doi.org/10.1080/0305215x.2019.1693554>
4. Tahsin Öztürk, H., Dede, T., Türker, E. (2020). Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm. *Structures*, 25, 285–296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.020>
5. Pavlikov, A., Harkava, O., Kochkarev, D. (2019). Calculation of reinforced concrete members strength by new concept. *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures*, 820–827.
6. Bobalo, T., Blikharskyy, Y., Kopsiika, N., Volynets, M. (2021). Influence of the Percentage of Reinforcement on the Compressive Forces Loss in Pre-stressed RC Beams Strengthened with a Package of Steel Bars. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 53–62. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_7
7. Kovalchuk, B., Blikharskyy, Y., Selejdak, J., Blikharskyy, Z. (2020). Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened Under Loading with Additional Reinforcement with Different Levels of its Pre-tension. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 227–236. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_28
8. Kotes, P., Strieska, M., Brodnan, M. (2018). Sensitive analysis of calculation of corrosion rate according to standard approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 385, 012031. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/385/1/012031>
9. Koteš, P., Strieska, M., Brodňan, M. (2018). Long-time measurements of reinforcement due to air pollution corrosion on reinforced girder bridge. *18th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2018*, 18 (4.2), 515–521. doi: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/4.2/s19.067>
10. Klymenko, Y., Kos, Z., Grynyova, I., Maksyuta, O. (2020). Operation of Damaged H-Shaped Columns. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 192–201. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_24
11. Kos, Ž., Klímenko, Y. (2019). The development of prediction model for failure force of damaged reinforced-concrete slender columns. *Tehnički vjesnik*, 26 (6), 1635–1641. doi: <https://doi.org/10.17559/tv-20181219093612>
12. Blikharskyy, Y., Kopsiika, N., Selejdak, J. (2020). Non-uniform corrosion of steel rebar and its influence on reinforced concrete elements` reliability. *Production Engineering Archives*, 26 (2), 67–72. doi: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.14>
13. Selejdak, J., Urbański, M., Winiarski, M. (2018). Assessment of a steel bridge corrosion degree. *E3S Web of Conferences*, 49, 00098. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184900098>
14. Vatulia, G., Berestianskaya, S., Opanasenko, E., Berestianskaya, A. (2017). Substantiation of concrete core rational parameters for bending composite structures. *MATEC Web of Conferences*, 107, 00044. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700044>
15. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>
16. Khmil, R., Tytarenko, R., Blikharskyy, Y., Vegera, P. (2020). The Probabilistic Calculation Model of RC Beams, Strengthened by RC Jacket. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 182–191. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_23
17. Mansour, W., Tayeh, B. A. (2020). Shear Behaviour of RC Beams Strengthened by Various Ultrahigh Performance Fibre-Reinforced Concrete Systems. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–18. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/2139054>
18. Koteš, P., Vavruš, M., Jošt, J., Prokop, J. (2020). Strengthening of Concrete Column by Using the Wrapper Layer of Fibre Reinforced Concrete. *Materials*, 13 (23), 5432. doi: <https://doi.org/10.3390/ma13235432>
19. Brózda, K., Selejdak, J. (2018). The computational analysis of the crack width of beams reinforced with CFRP and steel bars. *MATEC Web of Conferences*, 183, 02003. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818302003>
20. Ye Khmil, R., Yu Tytarenko, R., Blikharskyy, Y. Z., Vegera, P. I. (2021). Improvement of the method of probability evaluation of the failure-free operation of reinforced concrete beams strengthened under load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012014>
21. DBN V.2.6-98:2009. *Konstruktivnyi budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi. Osnovni polozhennia* (2011). Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 72.
22. Eurocode EN 1990:2002. *Basis of structural design*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).
23. Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and Concrete Research*, 3 (5), 583–599. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3)
24. Barnard, P. R. (1964). Researches into the complete stress-strain curve for concrete. *Magazine of Concrete Research*, 16 (49), 203–210. doi: <https://doi.org/10.1680/mac.1964.16.49.203>
25. Lipiński, T. (2017). Roughness of 1.0721 steel after corrosion tests in 20% NaCl. *Production Engineering Archives*, 15 (15), 27–30. doi: <https://doi.org/10.30657/pea.2017.15.07>
26. Kweon, H. D., Kim, J. W., Song, O., Oh, D. (2021). Determination of true stress-strain curve of type 304 and 316 stainless steels using a typical tensile test and finite element analysis. *Nuclear Engineering and Technology*, 53 (2), 647–656. doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.014>
27. Zhang, Q., Mol'kov, Y. V., Sobko, Y. M., Blikhars'kyi, Y. Z., Khmil', R. E. (2015). Determination of the Mechanical Characteristics and Specific Fracture Energy of Thermally Hardened Reinforcement. *Materials Science*, 50 (6), 824–829. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9789-9>
28. Watanabe, K., Niwa, J., Yokota, H., Iwanami, M. (2004). Experimental Study on Stress-Strain Curve of Concrete Considering Localized Failure in Compression. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2 (3), 395–407. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.2.395>
29. Dohojda, M., Babych, Y., Filipchuk, S. V., Savitskiy, V. V. (2019). Research of deformative properties of concrete class C50/60 taking into account the descending branch of deformation. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures*, 37, 175–183. doi: <https://doi.org/10.31713/budres.v0i37.325>
30. Lavatelli, A., Turrisi, S., Zappa, E. (2018). A motion blur compensation algorithm for 2D DIC measurements of deformable bodies. *Measurement Science and Technology*, 30 (2), 025401. doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf31a>
31. Zappa, E., Hasheminejad, N. (2017). Digital Image Correlation Technique in Dynamic Applications on Deformable Targets. *Experimental Techniques*, 41 (4), 377–387. doi: <https://doi.org/10.1007/s40799-017-0184-3>
32. Mai, B. V., Pham, C. H., Hancock, G. J., Nguyen, G. D. (2019). Block shear strength and behaviour of cold-reduced G450 steel bolted connections using DIC. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 151–160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.025>

33. Tung, S.-H., Shih, M.-H., Kuo, J.-C. (2010). Application of digital image correlation for anisotropic plastic deformation during tension testing. *Optics and Lasers in Engineering*, 48 (5), 636–641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.09.011>
34. Fayyad, T. M., Lees, J. M. (2014). Application of Digital Image Correlation to Reinforced Concrete Fracture. *Procedia Materials Science*, 3, 1585–1590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.256>
35. Skarżyński, Ł., Kozicki, J., Tejchman, J. (2013). Application of DIC Technique to Concrete—Study on Objectivity of Measured Surface Displacements. *Experimental Mechanics*, 53 (9), 1545–1559. doi: <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9781-y>
36. Gualtieri, S. (2012). Novel technique for DIC speckle pattern optimization and generation. *Politecnico Di Milano*, 127.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232446

THE POSSIBILITY TO APPLY THE FRENET TRIHEDRON AND FORMULAS FOR THE COMPLEX MOVEMENT OF A POINT ON A PLANE WITH THE PREDEFINED PLANE DISPLACEMENT (p. 45–50)

Tatiana Volina

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-2208>

Serhii Pylypaka

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1496-4615>

Victor Nesvidomin

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1495-1718>

Aleksandr Pavlov

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7421-8502>

Svitlana Dranovska

Sumy Regional Institute of Postgraduate Pedagogical Education,
Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3779-7602>

Material particles interact with the working moving surfaces of machines in various technological processes. Mechanics considers a technique to describe the movement of a point and decompose the speed and acceleration into single unit vectors of the accompanying trajectory trihedron for simple movement. The shape of the spatial curve uniquely sets the movement of the accompanying Frenet trihedral as a solid body. This paper has considered the relative movement of a material particle in the static plane of the accompanying Frenet trihedron, which moves along a flat curve with variable curvature. Frenet formulas were used to build a system of differential equations of relative particle movement. In contrast to the conventional approach, the chosen independent variable was not the time but the length of the arc of the guide curve along which the trihedron moves. The system of equations has been built in the projections onto the unit vectors of the moving trihedron; it has been solved by numerical methods. The use of the accompanying curve trihedron as a moving coordinate system makes it possible to solve the problems of the complex movement of a point. The shape of the curve guide assigned by parametric equations in its length function determines the portable movement of the trihedron and makes it possible to use Frenet formulas to describe the rela-

tive movement of a point in the trihedron system. This approach enables setting the portable movement of the trihedron osculating plane along a curve with variable curvature, thereby revealing additional possibilities for solving problems on a complex movement of a point at which rotational motion around a fixed axis is a partial case. The proposed approach has been considered using an example of the relative movement of cargo in the body of a truck moving along the road with a curvilinear axis of variable curvature. The charts of the relative trajectory of cargo slip and the relative speed for the predefined speed of the truck have been constructed.

Keywords: accompanying trihedron, guide curve, slip trajectory, movement speed, friction coefficient.

References

1. Kobets, A. S., Ponomarenko, N. O., Kharytonov, M. M. (2017). Construction of centrifugal working device for mineral fertilizers spreading. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 51 (1), 5–14. Available at: <https://dspace.dsau.dp.ua/jspui/bitstream/123456789/64/1/%D0%A1onstruction.pdf>
2. Abbou-ou-cherif, E.-M., Piron, E., Chateaufneuf, A., Miclet, D., Lenain, R., Koko, J. (2017). On-the-field simulation of fertilizer spreading: Part 1 – Modeling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 235–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.006>
3. Bulgakov, V., Nikolaenko, S., Holovach, I., Boris, A., Kiurchev, S., Ilnatiev, Ye., Olt, J. (2020). Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy Research*, 18 (2), 1177–1188. doi: <https://doi.org/10.15159/AR.20.069>
4. Adamchuk, V. V., Prilutsky, A. N. (2018). Theoretical studies of the effect of vibrational motion of gratings on the efficiency of separation of seed mixtures. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo hozyaystva*, 28–34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32699362>
5. Adamchuk, V. V. (2010). *Teoriya tsentrobezhnykh rabochih organov mashin dlya vneseniya mineral'nykh udobreniy*. Kyiv: Agrarna nauka, 177. Available at: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgi-irbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=I&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%92%D0%90738863\\$](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgi-irbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=EC&P21DBN=EC&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=I&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%92%D0%90738863$)
6. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O. (2017). Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 55–61. Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=Nvngu_2017_4_10
7. Kurzthaler, C., Zhu, L., Pahlavan, A. A., Stone, H. A. (2020). Particle motion nearby rough surfaces. *Physical Review Fluids*, 5 (8). doi: <https://doi.org/10.1103/physrevfluids.5.082101>
8. Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Volina, T., Sirykh, L., Ivashyna, L. (2020). Movement of the Particle on the Internal Surface of the Spherical Segment Rotating About a Vertical Axis. *INMATEH Agricultural Engineering*, 62 (3), 79–86. doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-08>
9. Pylypaka, S., Klendiy, M., Zaharova, T. (2018). Movement of the Particle on the External Surface of the Cylinder, Which Makes the Translational Oscillations in Horizontal Planes. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*, 336–345. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_35
10. Milinskiy, V. I. (1934). *Differentsial'naya geometriya*. Leningrad, 332.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233960

THE DYNAMICS OF A RESONANCE SINGLE-MASS VIBRATORY MACHINE WITH A VIBRATION EXCITER OF TARGETED ACTION THAT OPERATES ON THE SOMMERFELD EFFECT (p. 51–68)

Gennadiy Filimonikhin

Central Ukrainian National Technical University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2819-0569>

Vladimir Pirogov

Central Ukrainian National Technical University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5843-4552>

Maksim Hodunko

Central Ukrainian National Technical University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2649-5040>

Ruslan Kisilov

Central Ukrainian National Technical University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1502-0034>

Vitalii Mazhara

Central Ukrainian National Technical University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7451-3798>

This paper reports a study into the dynamics of a vibratory machine composed of a viscoelastically-fixed platform that can move vertically and two identical inertial vibration exciters. The vibration exciters' bodies rotate at the same angular velocities in opposite directions. The bodies host a single load in the form of a ball, roller, or pendulum. The loads' centers of mass can move relative to the bodies in a circle with a center on the axis of rotation. The loads' relative movements are hindered by the forces of viscous resistance.

It was established that a vibratory machine theoretically possesses the following:

- one to three oscillatory modes of movement under which loads get stuck at almost constant angular velocity and generate total unbalanced mass in the vertical direction only;
- a no-oscillation mode under which loads rotate synchronously with the bodies and generate total unbalanced mass in the horizontal direction only.

At the same time, only one oscillatory mode is resonant and exists at the above-the-resonance speeds of body rotation, lower than some characteristic speed.

At the bodies' rotation speeds:

- pre-resonant; there is a globally asymptotically stable (the only existing) mode of load jams;
- above-the-resonance, lower than the characteristic velocity; there are locally asymptotically stable regimes – both the resonance mode of movement of a vibratory machine and a no-oscillations mode;
- exceeding the characteristic velocity; there is a globally asymptotically stable no-oscillations mode.

Computational experiments have confirmed the results of theoretical research. At the same time, it was additionally established that it would suffice, to enter a resonant mode of movement, to slowly accelerate the bodies of vibration exciters to the above-the-resonance speed, less than the characteristic speed.

The results reported here could be interesting both for the theory and practice of designing new vibratory machines.

Keywords: resonant vibratory machine, Sommerfeld effect, inertial vibration exciter of targeted action, single-mass vibratory machine.

References

1. Kryukov, B. I. (1967). *Dinamika vibratsionnyh mashin rezonansnogo tipa*. Kyiv: Nauk. dumka, 210.
2. Sommerfeld, A. (1904). Beitrage zum dynamischen Ausbayer der Festigkeitslehre. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 48 (18), 631–636.
3. Lanets, O. V., Shpak, Ya. V., Lozynskyi, V. I., Leonovych, P. Yu. (2013). Realizatsiya efektu Zommerfelda u vibratsionomu maidanchyku z inertsynym pryvodom. *Avtomatyzatsiya vyrobnychkh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni*, 47, 12–28. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Avtomatyzac_2013_47_4
4. Kuzo, I. V., Lanets, O. V., Gurskyi, V. M. (2013). Synthesis of low-frequency resonance vibratory machines with an aero inertia drive. *Naukovi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 2, 60–67. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2013_2_11
5. Yaroshevich, N., Puts, V., Yaroshevich, T., Herasymchuk, O. (2020). Slow oscillations in systems with inertial vibration exciters. *Vibro-engineering PROCEDIA*, 32, 20–25. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2020.21509>
6. Ryzhik, B., Sperling, L., Duckstein, H. (2004). Non-synchronous Motions Near Critical Speeds in a Single-plane Auto-balancing Device. *Technische Mechanik*, 24 (1), 25–36. Available at: <https://journals.ub.uni-magdeburg.de/index.php/techmech/article/view/911/888>
7. Lu, C.-J., Tien, M.-H. (2012). Pure-rotary periodic motions of a planar two-ball auto-balancer system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 32, 251–268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.06.001>
8. Artyunin, A. I., Eliseyev, S. V. (2013). Effect of “Crawling” and Peculiarities of Motion of a Rotor with Pendular Self-Balancers. *Applied Mechanics and Materials*, 373-375, 38–42. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.373-375.38>
9. Filimonikhin, G., Yatsun, V. (2015). Method of excitation of dual frequency vibrations by passive autobalancers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (76)), 9–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47116>
10. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Dumenco, K., Nevdakha, A. (2017). Search for two-frequency motion modes of single-mass vibratory machine with vibration exciter in the form of passive auto-balancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (90)), 58–66. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.117683>
11. Filimonikhin, G., Yatsun, V., Kyrchenko, A., Hrechka, A., Shcherbyna, K. (2020). Synthesizing a resonance anti-phase two-mass vibratory machine whose operation is based on the Sommerfeld effect. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 42–50. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217628>
12. Yatsun, V., Filimonikhin, G., Pirogov, V., Amosov, V., Luzan, P. (2020). Research of antiresonance threemass vibratory machine with a vibration exciter in the form of a passive autobalancer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (107)), 89–97. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213724>
13. Jung, D. (2018). Supercritical Coexistence Behavior of Coupled Oscillating Planar Eccentric Rotor/Autobalancer System. *Shock and Vibration*, 2018, 1–19. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4083897>
14. Blekhnman, I. I., Rivin, E. I. (1988). *Synchronization in Science and Technology*. ASME, 255.
15. Pan, F., Yongjun, H., Liming, D., Mingjun, D. (2018). Theoretical Study of Synchronous Behavior in a Dual-Pendulum-Rotor System. *Shock and Vibration*, 2018, 1–13. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/9824631>
16. Hou, Y., Fang, P. (2015). Synchronization and Stability of Two Unbalanced Rotors with Fast Antirotaion considering Energy Balance. *Math-*

ematical Problems in Engineering, 2015, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/694145>

17. Yaroshevich, N. P., Zabrodets, I. P., Yaroshevich, T. S. (2016). Dynamics of Starting of Vibrating Machines with Unbalanced Vibroexciters on Solid Body with Flat Vibrations. *Applied Mechanics and Materials*, 849, 36–45. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.849.36>
18. Nayfeh, A. H. (1993). *Introduction to Perturbation Techniques*. John Wiley and Sons Ltd.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232636

DETERMINING THE LOOSE MEDIUM MOVEMENT PARAMETERS IN A CENTRIFUGAL CONTINUOUS MIXER USING A DISCRETE ELEMENT METHOD (p. 59–67)

Volodymyr Statsenko

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3932-792X>

Oleksandr Burmistenkov

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0001-4229>

Tetiana Bila

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8937-5244>

Svitlana Demishonkova

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-8114>

The processes to form the compositions of loose materials in centrifugal mixers of continuous action have been considered. Based on the method of discrete elements, a mathematical model of the movement of particles in the rotor of the centrifugal mixer was built, taking into consideration their geometric and physical-mechanical parameters. To assess the extent of influence of these parameters on the nature of particle movement, a well-known mathematical model in the form of a system of differential equations was used, which was built on the basis of classical laws of mechanics. The process of mixing particles of two loose materials under different initial conditions of movement was modeled. The trajectories of individual particles along the bottom and side wall of the rotor were calculated.

The results of the research reported here have established that the model built on the basis of the discrete element method makes it possible to improve the accuracy of determining the parameters of the movement of loose materials in the mixing zone. Calculations that involved this method show that the length of the particle trajectory is 2.9, and the movement time is 9 times greater than those calculated by the system of differential equations. The built and known mathematical models demonstrated the same nature of the distribution of components in the mixer. The value of the Pearson correlation coefficient between the calculated values of the coefficients of variation is 0.758. The best homogeneity is achieved by separating the flows of the mixture components and reducing the distance between their centers.

The experimental study was carried out using a centrifugal mixer of continuous action with a conical rotor. Particle trajectories were constructed; it was established that the shape of the trajectory built by a discrete element method is closer to the experimental one.

The results reported in this paper make it possible to predict the impact of the structural and technological parameters of the mixers of continuous action on the uniformity of the mixture.

Keywords: discrete element method, centrifugal mixer, loose material, continuous mixing, mixture homogeneity.

References

1. Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P., Bila, T. Ya. (2017). Avtomatyzovani komplekxy bezpererвноho pryhotuvannia kompozytsiyi syppykh materialiv. Kyiv: KNUTD, 219.
2. Burmistenkov, O. P. et. al. (2011). Protsepy ta obladnannia pidhotovchyykh vyrobnystv lehkoi promyslovosti. Kyiv: KNUTD, 135.
3. Burmistenkov, O. P. et. al.; Konoval, V. P. (Ed.) (2007). Vyrobnytstvo lytykh detalei ta vyrobiv z polimernykh materialiv u vztuttyeviy ta shkirhalantereiniy promyslovosti. Kholmnytskyi: [b.v.], 255.
4. Generalov, M. B. (2002). Mekhanika tverdyh dispersnyh sred v protsessah himicheskoy tekhnologii. Kaluga: N. Bochkarevoy, 592.
5. Ahmadiyev, F. G., Aleksandrovskiy, A. A. (1988). Modelirovanie i realizatsiya sposobov prigotovleniya smesey. Zhurn. Vsesoyuz. him. obshch-va im. D.I. Mendeleeva, 33 (4), 448.
6. Bakin, I. A., Sablinskiy, A. I., Belousov, G. N. (2003). Kompleksnoe modelirovanie protsessov nepreryvnogo smeseprigotovleniya. Tekhnologiya i tekhnika pishchevyh proizvodstv. Sbornik nauchnyh rabot. Kemerovo: KemTIPP, 137–141.
7. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V. (2020). Studying the Main Design Parameters of Linkage Mechanisms of Part-Processing Machines with Two Working Barrels. *International Applied Mechanics*, 56 (6), 762–772. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01053-x>
8. Globin, A. N. (2009). Puti sovershenstvovaniya doziruyushchih ustroystv. Sovershenstvovanie tekhnicheskikh protsessov i tekhnicheskikh sredstv v APK. Sb. nauchn. Tr. ACHGAA. Zernograd, 5–6.
9. Synyuk, O., Musial, J., Zlotenko, B., Kulik, T. (2020). Development of Equipment for Injection Molding of Polymer Products Filled with Recycled Polymer Waste. *Polymers*, 12 (11), 2725. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12112725>
10. Third, J. R., Scott, D. M., Lu, G., Müller, C. R. (2015). Modelling axial dispersion of granular material in inclined rotating cylinders with bulk flow. *Granular Matter*, 17 (1), 33–41. doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-014-0542-0>
11. Bila, T. Ya., Statsenko, V. V. (2006). Analitichne doslidzhennia rukhu chastok sumishi u dvorotornomu zmishuvachi bezpererвної diyi. *Visnyk KNUTD*, 5, 30–34.
12. Alchikh-Sulaiman, B. (2011). Assessment of the Mixing of Poly-disperse Solid Particles in the Rotary Drum and Slant Cone Mixers Using Discrete Element Method. Ryerson University. Available at: <https://digital.library.ryerson.ca/islandora/object/RULA%3A3326/datastream/OBJ/view>
13. Pellegrini, M. (2014). DEM simulation of continuous pharmaceutical powders mixing effect of non-constant feeding on mixing quality. Santomaso, Andrea. Available at: <http://tesi.cab.unipd.it/45721/>
14. Borodulin, D. M., Andryushkov, A. A. (2009). The analysis of the operation of combinuous type mixing on the basis of the covariation approach. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv*, 4. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovaniye-sglazhivayushey-sposobnosti-tsentrobezhnogo-smesitelya-na-osnove-korrelyatsionnogo-analiza>
15. Pernenkil, L. (2008). Continuous blending of dry pharmaceutical powders. Massachusetts Institute of Technology. Available at: https://www.researchgate.net/publication/38003180_Continuous_blending_of_dry_pharmaceutical_powders
16. De Monaco, G. (2015). 3D finite volume simulations of dense granular flow inside rotating cylinders. Università degli Studi di Napoli Federico II. 2015. doi: <http://doi.org/10.6092/UNINA/FEDOA/10410>
17. Prashidha, K. (2018). Internal Dynamics and Flow Properties of Dense Granular Materials. A thesis. The University of Sydney. Available at: <https://ses.library.usyd.edu.au/handle/2123/19647>
18. Popov, A. M., Tikhonov, V. V., Tikhonov, N. V., Borodulin, D. M. (2014). Reception of Two and Three-phase Combined Dispersive

- Systems with the Use of Centrifugal Mixer. *Procedia Chemistry*, 10, 400–409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.067>
19. Statsenko, V., Burmistenkov, O., Bila, T., Statsenko, D. (2019). Determining the motion character of loose materials in the system of continuous action «hopper – reciprocating plate feeder». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (98)), 21–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163545>
 20. Statsenko, V. V., Burmistenkov, O. P., Bila, T. Y. (2020). Determination of the bulk materials particles distribution during mixing in the continuous action centrifugal mixers rotor. *Herald of Khmelnytskyi national university*, 1 (281), 238–244. Available at: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/39-3.pdf>
 21. Yan, Z., Wilkinson, S. K., Stitt, E. H., Marigo, M. (2015). Discrete element modelling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Computational Particle Mechanics*, 2 (3), 283–299. doi: <https://doi.org/10.1007/s40571-015-0056-5>
 22. Popov, V. L. (2012). *Mekhanika kontaktnogo vzaimodeystviya i fizika treniya*. Moscow: Fizmatlit, 348.
 23. Mindlin, R. D., Deresiewicz, H. (1953). Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Forces. *J. Appl. Mech.*, 20, 327–344.
 24. Marsov, V. I., Suetina, T. A., Kolbasin, A. M., Shuhin, V. V. (2013). Dispensers continuous compensated disturbance input material. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*, 2, 32–34. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18834562>
 25. Magalhães, F. G. R., Atman, A. P. F., Moreira, J. G., Herrmann, H. J. (2016). Analysis of the velocity field of granular hopper flow. *Granular Matter*, 18 (2). doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0636-y>
 26. Munjiza, A. (2004). *The Combined Finite-Discrete Element Method*. Wiley, 348. Available at: <https://www.wiley.com/en-us/The+Combined+Finite+Discrete+Element+Method-p-9780470020173>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235284

DETERMINING THE INFLUENCE OF STRUCTURAL AND OPERATIONAL PARAMETERS OF A DOUBLE BEARING ON THE THICKNESS OF ITS DISC (p. 68–73)

Vladimir Nazin

National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1078-1969>

This paper describes the main advantages of hydrostatic dynamic bearings of the double type, which have several lubricant films. It is indicated that they have an increased carrying capacity, by 1.8 times, and an extended range of stable operation, by 1.5 times, compared to conventional sleeve bearings with one lubricating film. The importance of determining the thickness of the bearing disk has been demonstrated, as it affects its durability. The goal was to investigate the impact of changes in the operational and structural parameters of a double bearing on the thickness of its disk. A sequence for determining the disk thickness has been proposed, including a joint solution to Reynolds equations, the balance of work fluid flow rate, as well as determining the loads acting on a bearing disk, which makes it possible to rationally assign the thickness of the bearing disk. The most common and effective methods of successive approximations have been used in the numerical implementation of Reynolds equations and flow rate balances. The action of centrifugal forces caused by the rotation of the disk has been taken into consideration in determining the total load acting on the bearing disk. The bending strength of the bearing disk was considered under its exposure to the total load. It was noted that due to the high flow rate of the working liquid pumped through the bearing, and the small change in the temperature of the liquid inside the bearing, the

temperature deformations of the disk were not taken into consideration. The magnitude of change in the thickness of the double bearing disk has been determined, caused by the action of centrifugal forces in the examined range of angular speeds of the disk's rotation with the shaft.

The reported results could be especially useful in the design of rotor supports for nuclear power plants where bearings have large dimensions, as well as for other units in power plants.

Keywords: hydrostatic dynamic bearing, disk thickness, eccentricity, centrifugal forces, bending stiffness.

References

1. Nazin, V. (2015). Pat. No. 112922 UA. Radialnyi hidrostato-dynamichniy kombinovanyi pidshyynyk. No. a201503374; declared: 10.04.2015; published: 10.11.2016, Bul. No. 21.
2. Nazin, V. (2012). Radial hydrostatic bearing of enhanceable bearing strength. *Aerospace technic and technology*, 8 (95), 94–100.
3. Nazin, V. (2015). Sravnenie dinamicheskikh karakteristik sdvoennykh i odinarnykh gidrostato-dinamicheskikh podshipnikov. *Aerospace technic and technology*, 9 (126), 85–88.
4. Avishai, D., Morel, G. (2021). Experimental Investigation of Lubrication Regimes of a Water-Lubricated Bearing in the Propulsion Train of a Marine Vessel. *Journal of Tribology*, 143 (4). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4048382>
5. Koosha, R., San Andrés, L. (2020). A Computational Model for the Analysis of the Static Forced Performance of Self-Equalizing Tilting Pad Thrust Bearings. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 142 (10). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4048458>
6. Amann, T., Chen, W., Baur, M., Kailer, A., Rühle, J. (2020). Entwicklung von galvanisch gekoppelten Gleitlagern zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß. *Forschung Im Ingenieurwesen*, 84 (4), 315–322. doi: <https://doi.org/10.1007/s10010-020-00416-z>
7. Gheisari, R., Lan, P., Polycarpou, A. A. (2020). Efficacy of surface microtexturing in enhancing the tribological performance of polymeric surfaces under starved lubricated conditions. *Wear*, 444–445, 203162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203162>
8. Liu, Y., Zou, J., Deng, Y., Ji, H. (2020). Research on the seawater-lubricated sliding bearing of a novel buoyancy-regulating seawater pump considering the working depth. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 1–20. doi: <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1716510>
9. Zhao, Y., Jianxi, Y. (2019). Influence of interface slip on the surface frictional force of texturing sliding bearing. *Industrial Lubrication and Tribology*, 72 (6), 735–742. doi: <https://doi.org/10.1108/ilt-01-2018-0032>
10. Polyakov, R., Savin, L., Fetisov, A. (2018). Analysis of the conditions for the occurrence of the effect of a minimum of friction in hybrid bearings based on the load separation principle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 233 (2), 271–280. doi: <https://doi.org/10.1177/1350650118777143>
11. Syed, I., Sarangi, M. (2018). Combined effects of fluid–solid interfacial slip and fluid inertia on the hydrodynamic performance of square shape textured parallel sliding contacts. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40 (6). doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1241-2>
12. Zernin, M. V., Mishin, A. V., Rybkin, N. N., Shil'ko, S. V., Ryabchenko, T. V. (2017). Consideration of the multizone hydrodynamic friction, the misalignment of axes, and the contact compliance of a shaft and a bush of sliding bearings. *Journal of Friction and Wear*, 38 (3), 242–251. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366617030163>
13. Zhang, J., Tan, A., Spikes, H. (2016). Effect of Base Oil Structure on Elastohydrodynamic Friction. *Tribology Letters*, 65 (1). doi: <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0791-7>

14. Nazin, V. (2020). Influence mass of the rings, resiliently set on disk, on dynamic descriptions of hydrostatodynamic bearing of the doubled type. *Aerospace technic and technology*, 8 (168), 100–105. doi: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.8.13>
15. Nazin, V. I. (2013). Theory of double radial bearing in gidrostato-dinamicheskogo stationary external load. *Aerospace technic and technology*. Aerospace technic and technology, 8 (105), 160–166.
16. Constantinescu, V. N. (1959). On Turbulent Lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 173 (1), 881–900. doi: https://doi.org/10.1243/pime_proc_1959_173_068_02
17. Konstantinesku, V. N. (1974). Gidrodinamicheskaya smazka: turbulentnost' i rodstvennye yavleniya. *Materialy obschey diskussii na simpoziume ASME. Tr. amerik. obsch. inzh.-mekh. Problemy treniya i smazki. Ser. F*, 96 (1), 198–208.
18. Tipey, N., Konstantinesku, V. N., Nika, A., Bitse, O. (1964). Podshipniki skol'zheniya (raschet, proektirovanie, smazka). *Buharest: Izdatel'stvo Akad. Rum. Nar. Resp.*, 457.
19. Krylov, V. I., Babkov, V. V., Monastyrnyi, P. I. (1977). *Vychislitel'nye metody*. Vol. 2. Moscow: Nauka, 400.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235416

DETERMINING THE EFFICIENCY AND PARAMETERS OF RUBBLE STRIP REINFORCEMENT (p. 74–83)

Serhii Nehrii

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3195-8401>

Andrii Surzhenko

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0362-0614>

Tetiana Nehrii

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178>

Andrii Toporov

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6365-9932>

Eduard Fesenko

LLC Technical University Metinvest Polytechnic, Mariupol, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6307-649X>

Yevhen Pavlov

LLC Technical University Metinvest Polytechnic, Mariupol, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3662-0477>

Mykola Domichev

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3191-6399>

The necessity of development and improvement of methods and means for the protection of preparatory roadways, in particular, protective structures, was proved on the basis of ordinary rock with binding surfaces. Analysis of the results of the study on the use of protective structures of ordinary rock and bounding surfaces was performed. It has shown the feasibility of reinforcing rock structures to ensure operational conditions for the protected roadways. Such structures include rubble strips reinforced with partitions made of metal mesh. To determine their efficiency and reinforcement parameters, studies were performed using provisions of structural mechanics, soil mechanics, and bulk media, as well as physical modeling using natural materials.

According to the results obtained in the performed studies, the efficiency of reinforcement of rubble strips with a metal grid was proved and a procedure for calculation of reinforcement parameters that need to be considered in designing the above structures was developed. Such

parameters include width and height of the strip, class of reinforcement, its diameter and tensile strength, size of the grid cells, angle of internal friction of rocks, and diameter of maximum rock pieces in the strip.

It was established that reinforcement of the rubble strip by partitions made of metal meshes can reduce the width of the strip and volume of the rock fill by 1.33...2.66 times without losing the structure rigidity. To do this, the condition of reinforcement strength in grids must be met. It consists of comparing its tensile strength with maximum stresses in the partition. These stresses are determined by the magnitude of the load on the rubble strip from the roof rocks, the diameter of the reinforcement, and the maximum rock pieces, as well as relative extensional strain in reinforcement.

Keywords: rubble strip, bounding surface, metal mesh, physical modeling, strength condition, reinforcement parameters.

References

1. Bondarenko, V., Symanovych, H., Kicki, J., Barabash, M., Salieiev, I. (2019). The influence of rigidity of the collapsed roof rocks in the mined-out space on the state of the preparatory mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 13 (2), 27–33. doi: <https://doi.org/10.33271/mining13.02.027>
2. Shi, X., Jing, H., Ning, J., Zhao, Z., Zhu, J. (2020). Stability Control of Gob-Side Entry Retaining in Fully Mechanized Caving Face Based on a Compatible Deformation Model. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 124 (1), 315–343. doi: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2020.07955>
3. Gong, P., Ma, Z., Zhang, R. R., Ni, X., Liu, F., Huang, Z. (2017). Surrounding Rock Deformation Mechanism and Control Technology for Gob-Side Entry Retaining with Fully Mechanized Gangue Backfilling Mining: A Case Study. *Shock and Vibration*, 2017, 1–15. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/6085941>
4. Zhou, P., Wang, Y., Zhu, G., Gao, Y. (2019). Comparative analysis of the mine pressure at non-pillar longwall mining by roof cutting and traditional longwall mining. *Journal of Geophysics and Engineering*, 16 (2), 423–438. doi: <https://doi.org/10.1093/jge/gxz026>
5. Wang, X., Xie, J., Xu, J., Zhu, W., Wang, L. (2021). Effects of Coal Mining Height and Width on Overburden Subsidence in Longwall Pier-Column Backfilling. *Applied Sciences*, 11 (7), 3105. doi: <https://doi.org/10.3390/app11073105>
6. Nehrii, S., Sakhno, S., Sakhno, I., Nehrii, T. (2018). Analyzing kinetics of deformation of boundary rocks of mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 115–120. doi: <https://doi.org/10.15407/mining12.04.115>
7. Galvin, J. M. (2016) *Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining*. Springer, 684. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25005-2>
8. Qi, F., Ma, Z. (2019). Investigation of the Roof Presplitting and Rock Mass Filling Approach on Controlling Large Deformations and Coal Bumps in Deep High-Stress Roadways. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16 (4). doi: <https://doi.org/10.1590/1679-78255586>
9. Iordanov, I., Novikova, Y., Simonova, Y., Korol, A., Podkopayev, Y., Kayun, O. et al. (2020). Determining stability conditions for haulage drifts protected by coal pillars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (108)), 72–81. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216530>
10. Mishra, B., Tang, X. (2015). Stability analyses of bleeder pillars in longwall mines by displacement-discontinuity method. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25 (6), 933–941. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.09.009>
11. Feng, G., Wang, P., Chugh, Y. P., Zhao, J., Wang, Z., Zhang, Z. (2018). A Coal Burst Mitigation Strategy for Tailgate during Deep Mining of Inclined Longwall Top Coal Caving Panels at Huafeng

- Coal Mine. Shock and Vibration, 2018, 1–18. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/5929785>
12. Ngwenyama, P. L. (2017). Factors and challenges affecting coal recovery by opencast pillar mining in the Witbank coalfield. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117 (3), 215–222. doi: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n3a2>
 13. Skrzypkowski, K. (2020). Decreasing Mining Losses for the Room and Pillar Method by Replacing the Inter-Room Pillars by the Construction of Wooden Cribs Filled with Waste Rocks. *Energies*, 13 (14), 3564. doi: <https://doi.org/10.3390/en13143564>
 14. Gao, Y., Liu, D., Zhang, X., He, M. (2017). Analysis and Optimization of Entry Stability in Underground Longwall Mining. *Sustainability*, 9 (11), 2079. doi: <https://doi.org/10.3390/su9112079>
 15. Yu, Z., Wen, H., Chen, X., Zhang, C. (2018). Integrated Approaches for Extinguishing the Fire of Coal Pillars in Contiguous Coal Seams. *Procedia Engineering*, 211, 963–971. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.098>
 16. Szurgacz, D., Tutak, M., Brodny, J., Sobik, L., Zhironkina, O. (2020). The Method of Combating Coal Spontaneous Combustion Hazard in Goafs – A Case Study. *Energies*, 13 (17), 4538. doi: <https://doi.org/10.3390/en13174538>
 17. Skrzypkowski, K. (2020). Comparative Analysis of the Mining Cribs Models Filled with Gangue. *Energies*, 13 (20), 5290. doi: <https://doi.org/10.3390/en13205290>
 18. Ren, Y., Feng, G., Wang, P., Guo, J., Luo, Y., Qian, R. et al. (2019). Vertical Stress and Deformation Characteristics of Roadside Backfilling Body in Gob-Side Entry for Thick Coal Seams with Different Pre-Split Angles. *Energies*, 12 (7), 1316. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071316>
 19. Zhao, H. (2019). State-of-the-art of standing supports for gob-side entry retaining technology in China. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119 (11). doi: <https://doi.org/10.17159/2411-9717/17/449/2019>
 20. Zhang, Q., Zhang, J., Guo, S., Gao, R., Li, W. (2015). Design and application of solid, dense backfill advanced mining technology with two pre-driving entries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25 (1), 127–132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.12.008>
 21. Demin, V. F., Tulepov, N. N., Demin, V. V. (2006). Obosnovanie effektivnogo sposobu ohrany vyemochnyh vyrabotok pri otrabotke malomoschnykh plastov. *Trudy universiteta*, 4 (25), 45–50.
 22. Litvinov, A. V., Tkachev, V. A., Turkenicheva, O. A. (2000). Pat. No. 2162943 RF. *Iskusstvennaya ohrannaya opora*. No. 2000101751/03; declared: 27.01.2000, published: 10.02.2001.
 23. Ivaschenko, V. D., Artamonov, V. N., Kuzyk, I. N., Serdyuchenko, M. V. (1994). Sposoby povysheniya zhestkosti porodnyh opor. *Gorniy zhurnal*, 3, 50–52.
 24. Bondarenko, Yu. V., Aleksandrov, S. N., Kuzyk, I. N., Bondarenko, A. Yu. (1994). Opredelenie kompressionnyh harakteristik razdelennyh samorazrushayushchimisya prokladkami porodnyh opor so svobodnymi otkosami. *Gorniy zhurnal*, 3, 1–3.
 25. Kuznetsov, G. I., Leman, A. A. (1983). *Tekhnologicheskie skhemy ohrany i podderzhaniya vyemochnyh vyrabotok*. Moscow: TsNIE-Iugol', 27.
 26. Litvinov, A. V. (1995). Pat. No. 2105155 RF. *Ustroystvo dlya ohrany vyemochnyh shtrekov*. No. 95120706/03; declared: 08.12.1995; published: 20.02.1998.
 27. Luan, H., Jiang, Y., Lin, H., Wang, Y. (2017). A New Thin Seam Backfill Mining Technology and Its Application. *Energies*, 10 (12), 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/en10122023>
 28. Kasiyan, M. M., Feldman, E. P., Khazipov, I. V., Nehrii, S. H., Mokrienko, V. M. (2010). Pat. No. 54012 UA. *Method for protection of preparatory workings*. No. u201004634; declared: 19.04.2010, published: 25.10.2010, Bul. No. 20.
 29. Kasyan, N. N., Negrey, S. G., Khazipov, I. V. (2007). Laboratory research of bearing rock construction with dividing him of flexible foundation on layers. *Fiziko-tekhnichekie problemy gornogo proizvodstva*, 10, 106–111.
 30. Kas'yan, N. N., Samoylov, V. L., Hazipov, I. V. (2008). Rezul'taty laboratornyh ispytaniy opornyh porodnyh konstruksiy s ispol'zovaniem ogranichivayuschih poverhnostey. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 3, 240–243.
 31. Nehrii, S., Zhyvohliad, S., Nehrii, T. (2019). Observation of the state of workings at the longwall advancing on the strike. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2 (45), 16–27. doi: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-2-16-27>
 32. SOU 10.1.00185790.011:2007. *Pidhotovchi vyrobky na polohykh plastakh. Vybir kriplennia, sposobiv i zasobiv okhorony* (2007). Kyiv: Minvuhleprom Ukrainy, 113.
 33. *Ukazaniya po ratsional'nomu raspolzheniyu, ohrane podderzhaniyu gornyh vyrabotok na ugol'nyh shahtah SSSR* (1986). Leningrad: VNIMI, 222.
 34. Nehrii, S., Nehrii, T. (2017). Determination of parameters of rock bands with limited suppleness. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 1, 50–57.
 35. Kolay, P. K., Kumar, S., Tiwari, D. (2013). Improvement of Bearing Capacity of Shallow Foundation on Geogrid Reinforced Silty Clay and Sand. *Journal of Construction Engineering*, 2013, 1–10. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/293809>
 36. Kawalec, J., Hornicek, L., Rakowski, Z. (2019). Cost Effective Alternative Solution for the Renovation of Concrete Pavements. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471, 022041. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/471/2/022041>
 37. Itani, H., Saad, G., Chehab, G. (2016). The use of geogrid reinforcement for enhancing the performance of concrete overlays: An experimental and numerical assessment. *Construction and Building Materials*, 124, 826–837. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.013>
 38. Rakowski, Z. (2017). An Attempt of the Synthesis of Recent Knowledge About Mechanisms Involved in Stabilization Function of Geogrids in Infrastructure Constructions. *Procedia Engineering*, 189, 166–173. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.027>
 39. Drukovanyi, M. F., Matvieiev, S. V., Korchevskiy, B. B. et al. (2006). *Armovani osnovy budivel ta sporud*. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia», 235.
 40. Nehrii, S. H., Nehrii, T. O., Kolomiets, V. O., Iordanov, I. V. (2017). Pat. No. 137375 UA. *Sposib okhorony hirnychykh vyrobok*. No. a201700437; declared: 17.01.2017, published: 25.10.2019, Bul. No. 20.
 41. Nehrii, S. H. (2020). Investigation of the features of the load transfer process in ordinary rock structures. *Technical Engineering*, 2 (86), 171–178. doi: [https://doi.org/10.26642/ten-2020-2\(86\)-171-178](https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-171-178)
 42. Negrey, S. G. (2011). O vozmozhnosti uvelicheniya nesuschey sposobnosti butovoyh polos. *Visti Donets'koho hirnychoho instytutu*, 1, 179–184.
 43. Yanko, S. V., Hrebonkin, S. S., Kasian, M. M. et al. (2003). *Suchasni problemy provedennia ta pidtrymannia hirnychykh vyrobok hlybokykh shakht*. Donetsk: DUNVHO, 256.
 44. Kachurin, V. K. (1956). *Gibkie niti s malymi strelkami*. Moscow: Gostekhizdat, 224.
 45. DSTU B V.2.6-156:2010. *Konstruksiyi budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruksiyi z vazhkoho betonu. Pravyly proektuvannia* (2011). Kyiv: Minrehion Ukrainy, 114.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235394

ENSURING ADHESION BETWEEN THE ASPHALT-CONCRETE ROAD SURFACE AND RIGID BASE AT THE ROADBED DESIGN STAGE (p. 84–92)

Yevhen Dorozhko

Kharkiv National Automobile and Highway University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2894-2131>

Angelika Batrakova

Kharkiv National Automobile and Highway University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

Vladislav Tymoshevskiy

Kharkiv National Automobile and Highway University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3606-7229>

Elina Zakharova

Kharkiv National Automobile and Highway University,
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8811-451X>

Arranging asphalt-concrete layers on a rigid base in the form of cement-concrete slabs can significantly improve the transporting and operational performance of the road surface. Such a structural solution is appropriate in almost all countries of the world since cement-concrete slabs retain high strength for a long time. To prevent the rapid destruction of an asphalt-concrete road surface on a rigid base, it is necessary to ensure reliable adhesion between the layers' contacts and, at the design stage, to test the adhesion strength by estimation.

This paper has substantiated a criterion of adhesion strength in the contact between an asphalt-concrete road surface and the rigid base. The calculation involves comparing the active tangent stresses in the contact between layers dependent on the effect of the vertical and horizontal components of the transport load with the magnitude of permissible tangent shear stresses in the contact of layers.

The parameters for an estimation model have been established; the stressed-strained state of the roadbed structure has been simulated using a finite element method. When modeling the stressed-strained state and calculating based on the strength criterion, different vehicle traffic conditions have been considered, as well as the effect of temperature on the strength parameters of the asphalt-concrete layer and the tar layer. The conditions for vehicle movement, taken into consideration when designing, correspond to the conditions of movement along the road, along the curves in the plan and profiles, and notion conditions at car emergency braking. Practical recommendations have been compiled for assigning the minimum permissible thickness of an asphalt-concrete layer on a rigid base, which must be followed at the design stage due to the condition for ensuring reliable adhesion between the layers' contacts. The minimum permissible thickness ranges from 2 cm to 10 cm, depending on the conditions of movement, temperature, and the type of tar.

Keywords: asphalt-concrete layer, elasticity module, stressed-strained state, adhesion, cement-concrete slab.

References

- Radovskiy, B. S. (2009). Tsementobetonnye pokrytiya v SShA. *Dorozhnaya tekhnika*, 1, 50–58.
- Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. J., Roji, E. (2021). Modeling the international roughness index performance on semi-rigid pavements in single carriageway roads. *Construction and Building Materials*, 272, 121665. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121665>
- Radovskiy, B. S. (2010). Opyt ispol'zovaniya starogo tsementobetonna kak osnovaniya pod asfal'tobetonnoe pokrytie v SShA. *Dorozhnaya tekhnika*, 1, 20–32.
- Korochkin, A. V., Ahmetov, S. A. (2009). Zavisimost' sostoyaniya pokrytiya ot tolschiny asfal'tobetonnykh sloev zhestkoy dorozhnoy odezhdy. *Avtomobil'nye dorogi*, 12, 27–29.
- Onischenko, A., Aksenov, S., Nevinhlovskiy, V. (2016). Numerical Simulation of Stress-Strain State of Asphalt Concrete Pavement on the Carriageway of the South Bridge in Kiev. *Procedia Engineering*, 134, 322–329. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.014>
- Dorozhko, E., Ryapuhin, V., Makovyey, R. (2016). Design Procedure by Strength Criteria of Asphalt Layers on a Rigid Base Taking into Account the Simultaneous Action of External Loads and Thermal Stresses. *Procedia Engineering*, 134, 101–108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.045>
- White, G. (2016). State of the art: interface shear resistance of asphalt surface layers. *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (10), 887–901. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1126270>
- Korochkin, A. V. (2017). Teoriya rascheta zhestkoy dorozhnoy odezhdy s asfal'tobetonnykh pokrytiem. Moscow: MADi, 148.
- Dorozhko, Y., Arsenieva, N., Sarkisian, H., Synovets, O. (2019). Determining the most dangerous loading application point for asphalt-concrete layers on a rigid base. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (99)), 36–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166490>
- Lazăr, Ș. M., Răcănel, C. (2017). Flexible Pavement Design Criterion Based on Octahedral Shear Stresses. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 6 (1), 54–65. doi: <https://doi.org/10.1515/rjti-2017-0054>
- Nevinhlovskiy, V. F. (2013). Teoretychni aspekty rozrakhunku zalyshkovoho resursu asfaltobetonnoho pokryttia na zalizobetonnykh avtodorozhnikh mostakh. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, 89, 225–234.
- Gladkiy, A. V., Ryapuhin, V. N. (2006). Osobennosti raschetov na prochnost' mnogoslownykh pokrytyi i usileniya nezhestkikh dorozhnykh odezhd. *Dorohy i mosty*, 4, 232–247.
- Gladkiy, A. V. (2007). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie mnogoslownykh pokrytyi dorozhnykh odezhd. *Bicnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 6 (112), 105–108.
- Pisarenko, G. S. (1976). Deformirovanie i prochnost' materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. Kyiv, 415.
- Li, S., Liu, X., Liu, Z. (2014). Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement. *Construction and Building Materials*, 68, 341–347. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.053>
- Chen, X., Wu, S., Zhou, J. (2013). Analysis of mechanical properties of concrete cores using statistical approach. *Magazine of Concrete Research*, 65 (24), 1463–1471. doi: <https://doi.org/10.1680/mac.13.00113>
- Wang, X., Zhong, Y. (2019). Influence of tack coat on reflective cracking propagation in semi-rigid base asphalt pavement. *Engineering Fracture Mechanics*, 213, 172–181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.04.015>
- Golchin, B., Hamzah, M. O., Hasan, M. R. M. (2017). Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive. *Construction and Building Materials*, 141, 578–588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.123>
- Assogba, O. C., Tan, Y., Sun, Z., Lushing, N., Bin, Z. (2019). Effect of vehicle speed and overload on dynamic response of semi-rigid base asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, 22 (3), 572–602. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1614970>

20. Dong, Z., Ni, F. (2014). Dynamic model and criteria indices of semi-rigid base asphalt pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (9), 854–866. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893322>
21. Merzlikin, A. E., Kapustnikov, N. V. (2010). Pogreshnosti, voznikayushchie pri raschete dorozhnyh odezhd s pomosh'yu metoda konechnykh elementov. *Zhilischnoe stroitel'stvo*, 10, 26–29.
22. M 02070915-750:2016. Metodyka proektuvannya asfaltobetonnoho pokryttia zalizobetonnykh avtodorozhnykh mostiv.
23. Riznichenko, O. S. (2012). Analiz icnuichykh metodiv proektuvannya asfaltobetonnoho pokryttia na mostakh za umovoiu zsvostykykosti. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, 86, 30–36.
24. Onishchenko, A. M., Riznichenko, O. S., Kurtyev, V. S. (2016). The method of determination bond between asphalt pavement and composite steel and concrete bridge. *Visnyk NTU. Seriya: «Tekhnichni nauky»*, 1 (34), 319–327.

DOI: [10.15587/1729-4061.2021.235468](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235468)

DEVELOPMENT OF A RHEOLOGICAL MODEL OF STRESS RELAXATION IN THE STRUCTURE OF AN OIL FILM ON THE FRICTION SURFACE WITH FULLERENE ADDITIVES (p. 93–99)

Andrii Kravtsov

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3103-6594>

Anastasiia Suska

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7465-1776>

Abliatif Biekirov

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6376-1072>

Dmytro Levkin

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1980-4426>

A rheological model of stress relaxation in a thin lubricant film, which is formed on the friction surface under the influence of the force field of the friction surface in the presence of fullerene compositions in lubricants, was developed. Analysis of the model made it possible to establish that the existence of elastic or viscous properties in surface structures depends on the ratio of two parameters. This is the time of stress relaxation in the structure on spots of actual contact and the duration of stress action on these spots, which is termed the lifetime of an actual contact spot.

It was shown that an increase in the sliding rate reduces the time of relaxation of stresses in the surface structure. This is due to the destruction of aggregates in the structure of gel and the appearance of rotational movements of separate units – flocs. An increase in the load on the tribosystem significantly increases the value of relaxation time. This is due to squeezing the viscous component out of the structure of a surface film. It was established that if the relaxation time exceeds the duration of actions of stresses on actual contact spots, the structure of a surface film behaves like an elastic solid. Conversely, if relaxation time becomes shorter than the duration of stress action, the film behaves like a viscous medium.

Theoretically, it was shown that in the range of sliding and loading rates, when a film behaves like an elastic solid, a decrease in stresses

on actual contact spots does not exceed the values of 1.1–22.8 %. This property provides the bearing capacity of a film. The development of the model will make it possible to simulate elastic and viscous properties of “stitched” structures and substantiate the rational concentrations of additives to lubricants, as well as the ranges of their use.

Keywords: tribosystem, fullerene compositions, dynamic viscosity, structural viscosity, clusters, micelles, rheological model, stress relaxation, lubricant film, lubricants.

References

1. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Lyashuk, O., Zamota, T., Holub, D. (2019). Studying the tribological properties of mated materials C61900 - A48-25BC1.25BNo. 25 in composite oils containing geomodifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (12 (101)), 38–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179900>
2. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y. et. al. (2019). Wear Resistance Increase of Samples Tribomating in Oil Composite with Geo Modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*, 41 (2), 156–165. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.02>
3. Singh, A., Chauhan, P., Mamatha, T. G. (2020). A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Materials Today: Proceedings*, 25, 586–591. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.245>
4. Munge, H. P., Khatri, O. P. (2014). Chemically Functionalized Reduced Graphene Oxide as a Novel Material for Reduction of Friction and Wear. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118 (26), 14394–14402. doi: <https://doi.org/10.1021/jp5033614>
5. Shahnazari, S., Bagheri, S., Abd Hamid, S. B. (2016). Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (4), 3153–3170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.040>
6. Ali, I., Basheer, A. A., Kucherova, A., Memetov, N., Pasko, T., Ovchinnikov, K. et. al. (2019). Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 251–266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.113>
7. Yao, Y., Wang, X., Guo, J., Yang, X., Xu, B. (2008). Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive. *Materials Letters*, 62 (16), 2524–2527. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.12.056>
8. Rapoport, L., Feldman, Y., Homyonfer, M., Cohen, H., Sloan, J., Hutchison, J. L., Tenne, R. (1999). Inorganic fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship. *Wear*, 225–229, 975–982. doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(99\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(99)00040-x)
9. Yunusov, F. A., Breki, A. D., Vasilyeva, E. S., Tolochko, O. V. (2020). The influence of nano additives on tribological properties of lubricant oil. *Materials Today: Proceedings*, 30, 632–634. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.447>
10. Li, X., Xu, X., Zhou, Y., Lee, K.-R., Wang, A. (2019). Insights into friction dependence of carbon nanoparticles as oil-based lubricant additive at amorphous carbon interface. *Carbon*, 150, 465–474. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.050>
11. Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S., Kwon, L., Kim, S., Lee, J. (2009). Performance evaluation of nano-lubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil. *Current Applied Physics*, 9 (2), e128–e131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2008.12.054>
12. Xing, M., Wang, R., Yu, J. (2014). Application of fullerene C60 nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors. *International Journal of Refrigeration*, 40, 398–403. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004>
13. Lee, J., Cho, S., Hwang, Y., Cho, H.-J., Lee, C., Choi, Y. et. al. (2009). Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement

- in friction surfaces. *Tribology International*, 42 (3), 440–447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.08.003>
14. Shahmohamadi, H., Rahmani, R., Rahnejat, H., Garner, C. P., Balodimos, N. (2017). Thermohydrodynamics of lubricant flow with carbon nanoparticles in tribological contacts. *Tribology International*, 113, 50–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.12.048>
 15. Vojtov, V. A., Kravtsov, A. G., Tsymbal, B. M. (2020). Evaluation of Tribotechnical Characteristics for Tribosystems in the Presence of Fullerenes in the Lubricant. *Journal of Friction and Wear*, 41 (6), 521–525. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366620060197>
 16. Kravtsov, A., Gradiskiy, Y., Tsymbal, B., Borak, K. (2021). Simulation of the oil film thickness on a friction surface in the presence of fullerene compositions in the lubricant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021, 012040. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012040>
 17. Kravtsov, A. G. (2018). Development of macroreological model of strain relaxation in lubricating film on friction surface in the presence of fullerenes. *Problemy trybolohiyi*, 4, 36–40.
 18. Dykha, A., Makovkin, O. (2019). Physical basis of contact mechanics of surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 1172, 012003. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1172/1/012003>
 19. Dykha, A., Marchenko, D., Artyukh, V., Zubiekhina-Khaiat, O., Kurepin, V. (2018). Study and development of the technology for hardening rope blocks by reeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 22–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126196>
 20. Vojtov, V. A., Zaharchenko, M. B. (2015). Modeling of processes of friction and wear in tribosystems in the conditions boundary lubrication. Part 1. Calculating the speed of dissipation in tribosystem. *Problems of Tribology*, 1, 49–57.
 21. Kravtsov, A. (2021). Investigation of the structural viscosity of oil films on the friction surface with fullerene compositions. *Problems of Tribology*, 99 (1), 13–19. doi: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-96-1-13-19>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235451

BUILDING AN ANALYTICAL MODEL OF THE GRAVITATIONAL GRAIN MOVEMENT IN AN OPEN SCREW CHANNEL WITH VARIABLE INCLINATION ANGLES (p. 100–112)

Volodymyr Arendarenko

Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0701-7983>

Anatolii Antonets

Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2332-6711>

Oleg Ivanov

Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-9913>

Ihor Dudnikov

Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0448-2241>

Tetiana Samoylenko

Company «Tayfun», Poltava
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4756-6223>

Existing technical means for loading silos with grain material do not fully meet the needs of production. The issue related to grain injury remains urgent, which predetermines the need to design a gravitational loader of another principle of operation with the appropriate

theoretical justification for the movement of grain material in it. This paper has presented and substantiated the model of the gravitational movement of grain in the peripheral open screw channel with two variable angles of inclination. The model is based on the system of forces in the cylindrical coordinate system, acting on the volume of grain flow in the peripheral screw channel. The grain speed at the end of the braking section of the channel should be as low as possible but not less than the initial flow rate at the beginning of the acceleration section. The model takes into consideration this condition and ensures the optimal passage of grain along any part of the channel.

The reported model makes it possible to obtain the speed of grain movement at any time, takes into consideration the height of the bunker hole and the dependence between the angles of inclination of the spirals of acceleration and brake sections. A mathematical dependence is given for these angles that ensures the passage of grain without its discharge and, at the same time, prevents injury to the grain mass due to a controlled decrease in the resulting speed. A separate dependence is provided to find the time at which the grain increases its speed on the acceleration section, reaching the maximum value.

Based on the model, a peripheral open screw channel with two angles of inclination of spirals α and β has been proposed. For this channel, the relationships between its key parameters have been established, in particular, values have been substantiated for the recommended angles of $41^\circ \dots 45^\circ$ for the acceleration section and $39^\circ \dots 35^\circ$ for the brake section, respectively, as well as the h_0/r ratio not less than 0.6...0.7.

Keywords: grain movement speed, screw channel, variable angles of inclination, injury.

References

1. Kong, E., Liu, D., Guo, X., Yang, W., Sun, J., Li, X. et. al. (2013). Anatomical and chemical characteristics associated with lodging resistance in wheat. *The Crop Journal*, 1 (1), 43–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2013.07.012>
2. Komchenko, E. V., Basyuk, S. P. (2003). Vliyanie materiala stenok bunkera na istechenie razlichnyh sypuchih materialov. *Energosberezhenie i energosbergayushchie tekhnologii v APK*, 1, 145–149.
3. Goryushinskiy, I. V., Mosina, N. N. (2001). K voprosu otsenki protsessa zagruzki emkostey sypuchimi materialami. *Sbornik nauchnyh trudov studentov, aspirantov i molodyh uchenyh SamIIT*, 3, 83–84.
4. Arendarenko, V. M., Antonets, A. V., Savchenko, N. K., Samoilenko, T. V., Ivanov, O. M. (2020). Calculation model of grain gravitational movement in sloping passage with discrete variable inclination angle. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 4, 273–282. doi: <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.35>
5. Samoilenko, T. V., Arendarenko, V. M., Antonets, A. V. (2020). Kinematics of grain movement on a spiral device with variable angle of descent. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 267–274. doi: <https://doi.org/10.31210/visnyk2020.01.31>
6. Goryushinskiy, I. V., Mosina, N. N. (2003). Povyshenie kachestva funkcionirovaniya bunkernykh hranilisch uluchsheniem ih zagruzki. *Puti povysheniya effektivnosti APK v usloviyah vstupleniya Rossii v VTO. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (k XIII mezhdunarodnoy spetsializirovannoy vystavke «AGRO-2003»)*, 343–345.
7. Tarasenko, A. P., Orobinskiy, V. I., Gievskiy, A. M., Baskakov, I. V., Chernyshov, A. V., Haritonov, M. K. (2019). Snizhenie travmirovaniya zerna pri posleuborochnoy obrabotke. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 1, 63–68. Available at: <https://readera.org/140243652>
8. Tarasenko, A. P., Orobinskiy, V. I., Gievskiy, A. M., Merchalova, M. E. (2012). Sovershenstvovanie sredstv mekhanizatsii dlya polucheniya kachestvennogo zerna. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universitet*, 3, 109–115.

9. Zharkikh, V. U., Tarasenko, A. P. (2015). Overview of technical solutions for even loading of grain cleaners. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii*, 1 (3 (23)), 76–81. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-tehnicheskikh-resheniy-dlya-ravnomernoy-zagruzki-zernoochistitelnyh-mashin/viewer>
10. Strona, I. G. (1974). *Travmirovaniya semyan zernovykh kul'tur i urozhayev. Biologiya i tekhnologiya semyan*, 2, 122–129.
11. Chazov, S. A., Shelyapen', P. A., Votskiy, Z. Z. (1981). *Travmirovaniya semyan i puti snizheniya pri mekhanizirovannoy obrabotke, obmolote, sortirovani. Ukrainskie nivny*, 8, 41–43.
12. Derevi'anko, D., Sukmaniuk, O., Sarana, V., Derevi'anko, O. (2020). Justification of influence of the working bodies of combine harvesters on damage and quality of seed. *Bulletin of Agricultural Science*, 92 (2), 64–71. doi: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202002-10>
13. Cherniy, A. S. (1973). Puti snizheniya povrezhdaemosti semyan pri rabote zernovoy norii NZ-20. *Trudy ChIMESKh*, 62, 270–275.
14. Kupreenko, A. I., Isaev, Kh. M., Bychkov, I. E. (2019). Improving the efficiency of loading of tanks for agricultural purposes. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skohozyaystvennogo naznacheniya*, 1 (18), 462–469.
15. Fraczek, J., Ślipek, Z. (1999). Fatigue strength of wheat grains. Part 1. The analysis of grain deformation at multiple loads. *International Agrophysics*, 13 (1), 93–97. Available at: <http://www.international-agrophysics.org/Fatigue-strength-of-wheat-grains-Part-1-The-analysis-of-grain-deformation-at-multiple,106935,0,2.html>
16. Omarov, A., Müller, P., Tomas, J. (2013). Influence of loading rate on the deformation and fracture behavior of wheat grains. *Chemie Ingenieur Technik*, 85 (6), 907–913. doi: <https://doi.org/10.1002/cite.201200054>
17. Borshchev, V. Ya., Dolgunin, V. N. (2006). Characteristics of Raped Shear Flow and Recommendations for Production Process. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 12 (2A), 401–407. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-sdvigovogo-potoka-zernistoy-sredy-i-rekomendatsii-po-organizatsii-tehnologicheskikh-protsessov/viewer>
18. Dolgunin, V. N., Borshev, V. Ya. (2006). *Bystrye gravitatsionnye techeniya zernistyh materialov: tekhnika izmereniya, zakonomenosti, tekhnologicheskoe primeneniye*. Moscow: Mashinostroeniye.
19. Sevidzh, S. (1985). *Gravitatsionnoe techeniye nesvyazannykh granulirovannykh materialov v lotkakh i kanalah. Mekhanika granulirovannykh sred: Teoriya bystrykh dvizheniy*. Moscow: Mir, 86–146.
20. Leuthe, F., Eisenhauer, N., Hofmann, B., Maier, M., Roth, K. (2017). The movement of a dune of non-uniform grain size in a circular pipe flow. *18th International Conferences on Transport and Sedimentation of Solid Particles*, 185–192.
21. Melnik, V. I., Samojlenko, T. V. (2018). Analysis of directions for improving the design of devices for loading silos. *Engineering of nature management*, 1 (9), 83–90. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2018_1_13
22. Dancey, C. L., Diplas, P., Papanicolaou, A., Bala, M. (2002). Probability of Individual Grain Movement and Threshold Condition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128 (12), 1069–1075. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:12\(1069\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:12(1069))
23. Pylypaka, S., Nesvidomin, V., Zaharova, T., Pavlenko, O., Klendiy, M. (2019). The Investigation of Particle Movement on a Helical Surface. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*, 671–681. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_67
24. Ren, J.-L., Zhou, J.-N., Han, L., Hu, Y.-J. (2018). Analysis of the Law Governing the Movement of Bulk Materials in a Vertical Helical Conveyor. *Reneng Dongli Gongcheng/Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 33 (6), 77–82. doi: <https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.06.013>
25. Borshchev, V. Ya., Dolgunin, V. N., Dronova, M. Yu. (2005). Cascade Gravity Separation of Particulate Solids: Technological Peculiarities and Mathematical Modeling. *Vestnik TGTU*, 4, 903–909. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kaskadnaya-gravitatsionnaya-separatsiya-zernistyh-materialov-osobennosti-tehnologii-i-modelirovaniye/viewer>
26. Antipov, S. T., Zhuravlev, A. V., Nesterov, D. A. (2015). Mathematical motion simulation of millet grains in the drying device with weighed-twisted layer. *Tekhnologii pischevoy i pererabatyvayushey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*, 4, 46–53. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovaniye-dvizheniya-zerna-prosa-v-sushilnom-apparate-sovzveshenno-zakruchennym-sloem/viewer>
27. Negi, S. C., Lu, Z., Jofriet, J. C. (1997). A Numerical Model for Flow of Granular Materials in Silos. Part 2: Model Validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68 (3), 231–236. doi: <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0197>
28. Ukolov, A., Dolgunin, V., Romaanof, A., Klimov, A. (2001). Gravity separation technology of particulate materials of high uniformity. *International Conference on Practical Aspects Technology*, 215–218.
29. Shatskiy, V. P., Orobinskiy, V. I., Popov, A. E. (2015). Modelirovaniye dvizheniya zernovogo potoka v gravitatsionnom separatore. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 4 (47), 72–79. Available at: <http://vestnik.vsau.ru/wp-content/uploads/2015/11/72-79.pdf>
30. Morozov, I. V., Dudin, O. V. (2003). Model traiektoriyi rukhu zerna po poverkhniam silskohospodarskykh mashyn. *Visnyk Kharkivskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu silskoho hospodarstva «Mekhanizatsiya silskohospodarskoho vyrobnytstva»*, 21, 124–131.
31. Hevko, B. M. (2012). *Matematychna model rukhu zerna po rukhomym poverkhniam vysivnykh aparativ. Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 1 (11), 113–118.
32. Lezhenkin, O., Holovlov, V., Mikhailenko, O., Rubtsov, M. (2019). Mathematical model of the movement of the combed grain heap after stripper harvesting module in the air flow. *Proceedings of the Tavria State agrotechnological university*, 19 (3), 14–21. Available at: <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/236>
33. Naumenko, M. M., Sokol, S. P., Filipenko, D. V., Guridova, V. A. (2017). Mathematical model of the grain mix in a cylindrical grid rotating around the axis. *Heotekhnichna mekhanika*, 133, 250–256.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231622

ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ЦИСТЕРНИ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВІЗКІВ ТИПУ Y25 (с. 6–14)

О. В. Фомін, А. О. Ловська, К. В. Іванченко, Є. П. Медведєв

Проведено обґрунтування використання візків Y25 під вагонами-цистернами для збільшення ресурсу їх експлуатації. Дослідження проведені стосовно вагона-цистерни з номінальними параметрами, а також фактичними, зафіксованими під час натурних досліджень. Для визначення основних показників динаміки вагона-цистерни проведено математичне моделювання. Розв'язок диференціальних рівнянь руху здійснених за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad (США). Встановлено, що використання візків Y25 під вагоном-цистерною з номінальними параметрами дозволяє зменшити прискорення його несучої конструкції, у порівнянні з використанням типових візків 18–100, майже на 39 %.

Використання візків Y25 під вагоном-цистерною з фактичними параметрами дозволяє зменшити прискорення його несучої конструкції, у порівнянні з використанням типових візків 18–100, майже на 50 %.

Отримані прискорення враховані при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-цистерни. Розрахунок здійснений в програмному комплексі SolidWorks Simulation (Франція). Отримані величини напружень на 18 % нижчі за напруження, які діють на несучу конструкцію вагона-цистерни на візках 18–100.

Для несучої конструкції вагона-цистерни з фактичними параметрами максимальні еквівалентні напруження на 16 % нижчі за напруження на візках 18–100.

Проведено розрахунок проектного строку служби несучої конструкції вагона-цистерни з урахуванням використання візків Y25. Проведені розрахунки показали, що проектний строк служби несучої конструкції вагона-цистерни на візках Y25 більше ніж у два рази вищий за той, що отриманий для візків 18–100.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо підвищення ресурсу експлуатації несучих конструкцій вагонів-цистерн.

Ключові слова: транспортна механіка, вагон-цистерна, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність конструкції, проектний строк служби.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.230820

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ ЗГИННИХ КОЛИВАНЬ ВВІГНУТОЇ БАЛКИ З ПАРАБОЛІЧНОЮ ЗМІНОЮ ТОВЩИНИ (с. 15–23)

К. О. Трапезон, О. Г. Трапезон

На основі синтезу методів факторизації і симетрії отримано загальний аналітичний розв'язок диференціального рівняння четвертого порядку зі змінними коефіцієнтами. Вигляд та структура змінних коефіцієнтів відповідають задачі про коливання ввігнутої балки змінної товщини. Розв'язок цього рівняння дозволяє детально вивчити коливання такої, та подібної, наприклад випуклої балки при різних способах закріплення її кінцевих перерізів. Отримано практичне підтвердження для балки, товщина якої змінюється за увігнутою параболою $H=a^2x^2+1$, де a – коефіцієнт увігнутості, що з підвищенням жорсткості балки власні частоти її вільних коливань також підвищуються. Як приклад, отримано предметну залежність максимальних прогинів від параметра жорсткості балки. Характер цієї залежності підтвердив очевидне твердження про зниження прогинів при підвищенні жорсткості. Дані підтвердження за результатами проведених розрахунків можуть бути свідченням правильності наведеної методики рішення задачі у статті.

Розглянута задача і її аналітичний розв'язок можуть слугувати практичним орієнтиром при оптимальному проектуванні балкових конструкцій. Попри це вельми важливим є облік місця дії та характер розподілу циклічних екстремальних експлуатаційних напружень. Отримані співвідношення для вирішення задачі дозволяють при зміні параметра жорсткості змоделювати необхідні нормальні напруження як в закладенні, так і в центральній зоні. У розробників з'являється можливість спрогнозувати такий параболічний профіль балки, при якому буде забезпечено необхідне зниження максимальних напружень у місці закріплення балки. Розглянутий приклад рішення задачі про власні коливання балки з жорстким закріпленням кінців ілюструє ефективність використаних методів факторизації і симетрії. Розроблений алгоритм розв'язку може бути поширений і на вивчення власних згинальних коливань балки при інших способах закріплення, не виключаючи при цьому і варіанти абсолютно вільної балки.

Ключові слова: вільні коливання, змінна товщина, метод симетрій, метод факторизації, апроксимація, диференціальне рівняння.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232671

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БЕТОНУ В ЗОНІ ВПЛИВУ МІСЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЕННЯ (с. 24–36)

І. І. Кархут

Подано результати фізичного та чисельного експериментів з визначення напружено-деформованого стану бетону захисних конструкцій на ділянці впливу місцевого точкового лазерного випромінювання. З допомогою програмного забезпечення комплексу ЛПРА10.8 (реліз 3.4) створена комп'ютерна модель в постановці стаціонарної задачі теплопровідності. Для цього були використані

результати експериментальних досліджень – отриманий розподіл температури та зміни структури бетону по поверхні та вглиб бетонних кубиків для більше ніж 120 вірців бетону трьох рівнів вологості: висушеного, природної вологості та водонасиченого. В статті наведені параметри моделювання, результати чисельного експерименту, їх аналіз та порівняння з результатами фізичного експерименту.

Температурні поля при встановленні динамічної температурної рівноваги, рівень напружень в бетоні, отримані при фізичних експериментах, добре корелюють з результатами чисельного експерименту. Максимальна температура, визначена оптичним методом, на поверхні бетону становила $1350+50$ °С. Відхилення в контрольних точках не перевищує $12-70$ °С в зоні температурного впливу та $18-176$ °С ($1-11$ %). При номінальній потужності випромінювання 30 Вт досягнуто другу стадію взаємодії, при 100 Вт – четверту стадію для бетону вологістю $0-2,5$ %, а для водонасиченого бетону – п'яту стадію взаємодії з лазерним променем. Виявлено значне зниження порогів між стадіями взаємодії лазерного випромінювання з бетоном, особливо водонасиченим, порівняно з порогоми для металів (пороги між третьою- п'ятою стадіями знижені в 10^3-10^4 разів). Руйнування стінок водонасичених пор в бетоні відбувалось під тиском водяної пари. Дотичні напруження при цьому становили 1,7 МПа, а значення коефіцієнта K_p , визначеного методом акустичної емісії, були в межах 4–6. Такі результати пояснюють відсутність нормальних мікротріщин за рахунок ефекту обойми.

Встановлено, що в зоні контакту лазерного променя з бетоном розсіюється близько 90 % енергії випромінювання, а в прилеглий зоні нагрівання до 77 %. Запропонована оптимальна швидкість переміщення променя при чищенні поверхні бетону від органічних, лакофарбових та інших видів забруднення $0,5-2$ мм/с (температура поверхні $100-300$ °С).

Ключові слова: важкий бетон, вологість, лазерне випромінювання, захисні властивості.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.234131

ПОБУДОВА ПОВНОЇ ДІАГРАМИ НАПРУЖЕННЯ-ДЕФОРМАЦІЇ БЕТОНУ, ВИКОРИСТОВУЮЧИ КОРЕЛЯЦІЮ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ (с. 37–44)

Я. З. Бліхарський, А. П. Павлів

У даній роботі розроблено та апробовано нову методику побудови повної діаграми “напруження-деформації” бетону з низхідною ділянкою деформування, використовуючи метод цифрової кореляції зображення. Представлено пропозиції нової методики створення спетклів на поверхні бетону. Це дає можливість досить точно відтворювати спектли на поверхні бетону та виконувати якісний аналіз деформацій при цифровій кореляції зображення. Встановлено переваги даного способу дослідження для можливості прогнозування утворення внутрішніх тріщин в бетоні з їх поширенням. Також, використання методики цифрової кореляції зображення дозволяє отримання відносних деформацій всієї дослідженої площини зразка на кожному етапі навантаження. Дана методика створює можливість дослідити зміну відносних деформацій та переміщення окремих точок або ділянок при дослідженні бетонних поверхонь. Це є актуальним питанням, оскільки дає можливість більш детальної діагностики існуючих залізобетонних конструкцій. Для перевірки точності використання методики додатково було встановлено мікроіндикатор з точністю 0.001 мм. При визначенні деформацій бетону за методикою цифрової кореляції зображення було використано 2 високошвидкісні монохромні CCD камери з різними об'єктивами. Деформації контролювались з періодом часу кожні 250 мс. Навантаження контролювалось за допомогою додаткової третьої камери зі швидкістю 50 кадрів/секунду. В результаті експериментальних досліджень було побудовано повну діаграму руйнування бетону з низхідною ділянкою деформації. Відхилення результатів деформацій за мікроіндикатором з точністю 0.001 мм на базі 200 мм та за методикою цифрової кореляції зображення складала в основному до 10 %, що підтверджує достовірність результатів. Результати даної роботи дають можливість для більш точного розрахунку залізобетонних конструкцій в практиці проектування, обстаження чи підсилення існуючих конструкцій.

Ключові слова: цифрова кореляція зображення (digital image correlation), діаграма напруження-деформації (stress-strain curve), бетон, спектли (spectle patterns).

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232446

МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТРИГРАННИКА І ФОРМУЛ ФРЕНЕ В СКЛАДНОМУ РУСІ ТОЧКИ ПО ПЛОЩИНІ ІЗ ЗАДАНИМ ПЕРЕМІЩЕННЯМ ПЛОЩИНИ (с. 45–50)

Т. М. Воліна, С. Ф. Пилипака, В. М. Несвідомін, О. Г. Павлов, С. В. Драновська

Частинки матеріалу взаємодіють з робочими рухомими поверхнями машин при різних технологічних процесах. В механіці розглядається спосіб описання руху точки і розкладання швидкості і прискорення на одиничні орти супровідного тригранника траєкторії для простого руху. Формою просторової кривої однозначно задається рух супровідного тригранника Френе, як твердого тіла. У статті розглянуто відносний рух матеріальної частинки у стичній площині супровідного тригранника Френе, який рухається по плоскій кривій зі змінною кривиною. Для складання системи диференціальних рівнянь відносного руху частинки було використано формули Френе. На відміну від традиційного підходу, за незалежну змінну було взято не час, а довжину дуги напрямної кривої, вздовж якої рухається тригранник. Систему рівнянь складено в проекціях на орти рухомого тригранника та розв'язано чисельними методами. Застосування супровідного тригранника кривої у ролі рухомої системи координат дає можливість розв'язувати задачі складного руху точки. Форма напрямної кривої, заданої параметричними рівняннями у функції її довжини, визначає переносний рух тригранника і дає можливість застосувати формули Френе для опису відносного руху точки в системі тригранника. Такий підхід дає можливість задавати переносний рух стичної площини тригранника по кривій зі змінною кривиною, розкриваючи додаткові можливості у розв'язанні задач на складний рух точки, при якому обертальний рух навколо нерухомої осі є частковим випадком. Запропонований підхід розглянуто на прикладі відносного руху вантажу в кузові автомобіля, який рухається по дорозі з криволінійною віссю змінної кривини. Побудовано графіки відносної траєкторії ковзання вантажу та відносної швидкості для заданої швидкості руху автомобіля.

Ключові слова: супровідний тригранник, напрямна крива, траєкторія ковзання, швидкість руху, коефіцієнт тертя.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233960**ДИНАМІКА РЕЗОНАНСНОЇ ОДНОМАСОВОЇ ВІБРОМАШИНИ З ВІБРОЗБУДНИКОМ СПРЯМОВАНОЇ ДІЇ, ПРАЦЮЮЧОМУ НА ЕФЕКТІ ЗОМЕРФЕЛЬДА (с. 51–58)****Г. Б. Філімоніхін, В. В. Пирогов, М. О. Годунко, Р. В. Кісільов, В. А. Мажара**

Досліджена динаміка вібромашини, що складається із пружно-в'язко закріпленої платформи, що може рухатися вертикально і двох однакових інерційних віброзбудників. Корпуси віброзбудників обертаються з однаковими кутовими швидкостями у протилежних напрямках. Всередині корпусів знаходяться по одному вантажу у вигляді кулі, ролика або маятника. Центри мас вантажів можуть рухатися відносно корпусів по колу з центром на осі обертання. Відносним рухам вантажів перешкоджають сили в'язкого опору.

Встановлено, що у вібромашини теоретично існують:

- від одного до трьох коливальних режимів руху, на яких вантажі застряють на майже сталій кутовій швидкості і створюють сумарний дебаланс тільки у вертикальному напрямку;
- режим відсутності коливань, на якому вантажі обертаються синхронно з корпусами і створюють сумарний дебаланс тільки у горизонтальному напрямку.

При цьому тільки один коливальний режим є резонансним і існує на зарезонансних швидкостях обертання корпусів, менших деякої характерної швидкості.

На швидкостях обертання корпусів:

- дорезонансних, глобально асимптотично стійкий (єдиний існуючий) режим застрягання вантажів;
- зарезонансних, менших характерної швидкості, локально асимптотично стійкі як резонансний режим руху вібромашини, так і режим відсутності коливань;
- більших характерної швидкості, глобально асимптотично стійкий режим відсутності коливань.

Обчислювальними експериментами підтвержені результати теоретичних досліджень. При цьому додатково встановлено, що для настання резонансного режиму руху достатньо повільно розігнати корпуси віброзбудників до зарезонансній швидкості, меншій характерної.

Отримані результати цікаві як для теорії, так і для практики при проектуванні нових вібромашин.

Ключові слова: резонансна вібромашина, ефект Зомерфельда, інерційний віброзбудник спрямованої дії, одномасова вібромашина

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.232636**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА В ВІДЦЕНТРОВОМУ ЗМІШУВАЧІ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ (с. 59–67)****В. В. Стаценко, О. П. Бурмістенков, Т. Я. Біла, С. А. Демішонкова**

Розглянуто процеси створення композицій сипких матеріалів у відцентрових змішувачах безперервної дії. На основі методу дискретних елементів розроблено математичну модель руху частинок у роторі відцентрового змішувача з врахуванням їх геометричних і фізико-механічних параметрів. Для оцінки ступеню впливу цих параметрів на характер руху частинок використана відома математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь, що створена на основі класичних законів механіки. Проведено моделювання процесу змішування частинок двох сипких матеріалів за різних початкових умов руху. Розраховано траєкторії окремих частинок вздовж дна та бічної стінки ротора.

В результаті проведених досліджень встановлено, що модель, розроблена на основі методу дискретних елементів, дозволяє підвищити точність визначення параметрів руху сипких матеріалів у зоні змішування. Розрахунки за цим методом свідчать, що довжина траєкторії частинок у 2,9, а час руху – у 9 разів більші ніж розраховані за системою диференціальних рівнянь. Розроблена та відомі математичні моделі показали однаковий характер розподілу компонентів у змішувачі. Значення коефіцієнту кореляції Пірсона між розрахованими значеннями коефіцієнтів варіації дорівнює 0,758. Найкраща однорідність досягається за умови розділення потоків компонентів суміші та зменшення відстані між їх центрами.

Експериментальні дослідження проведено з використанням відцентрового змішувача безперервної дії з конічним ротором. Побудовано траєкторії частинок та встановлено, що форма траєкторії, яка отримана методом дискретних елементів ближча до експериментальної.

Отримані результати дозволяють прогнозувати вплив конструктивних та технологічних параметрів змішувачів безперервної дії на однорідність суміші.

Ключові слова: метод дискретних елементів, відцентровий змішувач, сипкий матеріал, безперервне змішування, однорідність суміші.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235284**ВИЯВЛЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗДВОЄНИХ ПІДШИПНИКІВ НА ТОВЩИНУ ЙОГО ДИСКУ (с. 68–73)****В. І. Назін**

Наведено основні переваги гідростатодинамічних підшипників здвоєного типу, що мають кілька мастильних плівок. Вказано, що вони володіють підвищеною несучою здатністю в 1,8 рази і розширеним діапазоном стійкої роботи в 1,5 рази в порівнянні зі звичайними втулковими підшипниками з однією мастильною плівкою. Показана важливість визначення товщини диска підшипника, так як вона впливає на його міцність. Поставлено мету дослідити вплив зміни експлуатаційних і конструктивних параметрів підшипника здвоєного типу на товщину його диска. Запропоновано послідовність визначення товщини диска, що включає спільне рішення рівнянь Рейнольдса, балансу витрат рідини і визначення навантажень, що діють на диск підшипника, яка дозволяє раціонально призначати товщину диска підшипника. Застосовані найбільш поширені і ефективні методи послідовних наближень при чисельній

реалізації рівнянь Рейнольдса і балансу витрат. Враховано дію відцентрових сил, обумовлених обертанням диска, при визначенні сумарного навантаження, що діє на диск підшипника. Розглянуто згинна міцність диска підшипника при дії сумарного навантаження. Відзначено, що в силу великої витрати робочої рідини, що прокачується через підшипник, і малого зміни температури рідини всередині підшипника, температурні деформації диска не враховувалися. Виявлено величину зміни товщини диска підшипника зведеного типу, яка викликана дією відцентрових сил, в досліджуваному діапазоні кутових швидкостей обертання диска з валом.

Результати роботи можуть бути особливо корисними при проектуванні опор роторів для атомних електростанцій, де підшипники мають великі габарити, а також для інших агрегатів енергоустановок.

Ключові слова: гідростатодинамічний підшипник, товщина диска, ексцентриситет, відцентрові сили, згинальна жорсткість.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235416

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПАРАМЕТРІВ АРМУВАННЯ БУТОВИХ СМУГ (с. 74–83)

С. Г. Негрій, А. М. Сурженко, Т. О. Негрій, А. А. Топоров, Е. В. Фесенко, Є. Є. Павлов, М. В. Домнічев

Доведена необхідність розробки та вдосконалення способів та засобів охорони підготовчих виробок, зокрема охоронних споруд на основі рядової породи з обмежувачими поверхнями. Здійснено аналіз результатів досліджень щодо застосування охоронних споруд з рядової породи та обмежувачих поверхонь, який показав доцільність армування породних конструкцій для забезпечення експлуатаційного стану підготовчих виробок, що охороняються. До таких конструкцій відносяться бутіві смуги, які армуються перегородками з металевих сіток. Для визначення їх ефективності та параметрів армування виконані дослідження з використанням положень будівельної механіки, механіки ґрунтів та сипкого середовища, а також фізичного моделювання з використанням натурних матеріалів.

За результатами виконаних досліджень доведена ефективність армування бутівих смуг металевою сіткою, розроблено методику розрахунку параметрів армування, які потрібно враховувати при проектуванні даних споруд. До таких параметрів відносяться: ширина та висота смуги, клас арматури, її діаметр та міцність на розтягнення, розмір чарунк у сітці, кут внутрішнього тертя порід та діаметр максимальних шматків у смугі.

Встановлено, що армуванням бутіві смуги перегородками з металевих сіток можна досягти зменшення ширини смуги та об'єму породи у 1,33...2,66 рази без втрати жорсткості споруди. Для цього має виконуватись умова міцності арматури у сітках, яка полягає у порівнянні її міцності на розтягнення з максимальними напруженнями у перегородці. Ці напруження визначаються величиною навантаження на бутіву смугу з боку порід покрівлі, діаметрами арматури та максимальних шматків породи, а також відносною деформацією видовження арматури.

Ключові слова: бутіві смуга, обмежувача поверхня, металева сітка, фізичне моделювання, умова міцності, параметри армування.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235394

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗЧЕПЛЕННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ І ЖОРСТКОЇ ОСНОВИ НА ЕТАПІ ПРОЄКТУВАННЯ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ (с. 84–92)

Є. В. Дорожко, А. Г. Батракова, В. В. Тимошевський, Е. В. Захарова

Влаштування асфальтобетонних шарів на жорсткій основі у вигляді цементобетонних плит дозволяє значно підвищувати транспортно-експлуатаційні показники покриття. Таке конструктивне рішення є особливо актуальним у майже всіх країнах світу, оскільки цементобетонні плити достатньо довго зберігають високу міцність. Для попередження швидкого руйнування асфальтобетонного покриття на жорсткій основі необхідно забезпечити надійне зчеплення контакту шарів та на етапі проектування виконати перевірку міцності зчеплення розрахунком.

Обґрунтовано критерій міцності зчеплення на контактні асфальтобетонного покриття та жорсткої основи. Розрахунок полягає у порівнянні активних дотичних напружень на контактні шарів від дії вертикальної і горизонтальної складової транспортного навантаження з величиною допустимих дотичних напружень на зсув на контактні шарів.

Встановлено параметри розрахункової моделі та проведено моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу із залученням методу скінчених елементів. При моделюванні напружено-деформованого стану і розрахунках за критерієм міцності враховано різні умови руху транспортних засобів та вплив температури на міцнісні параметри асфальтобетонного шару і шару підґрунтовки. Враховані при проектуванні умови руху транспортних засобів відповідають умовам руху на перегоні, на кривих у плані і профілі та умовам руху при екстремому гальмуванні автомобілів. Розроблено практичні рекомендації з призначення мінімально допустимої товщини асфальтобетонного шару на жорсткій основі, що необхідно передбачити на етапі проектування з умови забезпечення надійного зчеплення контакту шарів. Мінімально допустима товщина коливається в межах від 2 см до 10 см в залежності від умов руху, температури і типу підґрунтовки.

Ключові слова: асфальтобетонний шар, модуль пружності, напружено-деформований стан, забезпечення зчеплення, цементобетонна плита.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235468

РОЗРОБКА РЕОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ РЕЛАКСАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ В СТРУКТУРІ МАСТИЛЬНОЇ ПЛІВКИ НА ПОВЕРХНЯХ ТЕРТЯ З ФУЛЕРЕНОВИМИ ДОБАВКАМИ (с. 93–99)

А. Г. Кравцов, А. А. Суска, А. Ш. Бекиров, Д. А. Левкін

Розроблено реологічну модель релаксації напружень в тонкій мастильній плівці, яка сформована на поверхні тертя під дією силового поля поверхні тертя при наявності фулеренових композицій в змащувальному матеріалі. Аналіз моделі дозволив встановити,

що наявність пружних або в'язких властивостей у поверхневих структур залежить від співвідношення двох параметрів. Це час релаксації напружень в структурі на плямах фактичного контакту і час дії напружень на даних плямах, яке названо часом життя фактичної плями контакту.

Показано, що збільшення швидкості ковзання зменшує час релаксації напружень в поверхневій структурі. Це пов'язано з руйнуванням агрегатів в структурі гелю і появою обертальних рухів окремих блоків – флоків. Збільшення навантаження на трибосистему значно збільшує значення часу релаксації. Це пов'язано з видавлюванням в'язкої складової зі структури поверхневої плівки. Встановлено, якщо час релаксації перевищує час дії напружень на плямах фактичного контакту, то структура поверхневої плівки поводить себе як пружне тверде тіло. І навпаки, якщо час релаксації стає меншим, ніж час дії напружень, плівка поводить себе як в'язке середовище.

Теоретичним шляхом показано, що в діапазоні швидкостей ковзання і навантажень, коли плівка поводить себе як пружне тверде тіло, зниження напружень на плямах фактичного контакту не перевищує значень 1,1–22,8 %. Таке явище забезпечує несучу здатність плівки. Розробка моделі дозволить моделювати пружні і в'язкі властивості «зшитих» структур і обґрунтувати раціональні концентрації добавок до мастильних матеріалів, а також діапазони їх застосування.

Ключові слова: трибосистема, фулеренові композиції, динамічна в'язкість, структурна в'язкість, кластери, міцели, реологічна модель, релаксація напружень, змашувальна плівка, мастильні матеріали.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.235451

РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГРАВІТАЦІЙНОГО РУХУ ЗЕРНА У ВІДКРИТОМУ ГВИНТОВОМУ КАНАЛІ ЗІ ЗМІННИМИ КУТАМИ НАХИЛУ (с. 100–112)

В. М. Арендаренко, А. В. Антоненко, О. М. Іванов, І. А. Дудніков, Т. В. Самойленко

Існуючі технічні засоби завантаження силосів зерновим матеріалом не в повній мірі задовольняють потреби виробництва. Наявною залишається проблема травмування зерна, що зумовлює необхідність розробки гравітаційного завантажувача з іншим принципом роботи із відповідним теоретичним обґрунтуванням руху зернового матеріалу в ньому. В роботі представлено і обґрунтовано модель гравітаційного руху зерна у периферійному відкритому гвинтовому каналі із двома змінними кутами нахилу. Модель ґрунтується на системі сил в циліндричній системі координат, що діють на об'єм зернового потоку у периферійному гвинтовому каналі. Швидкість зерна у кінці гальмівної ділянки каналу повинна бути якомога меншою, але не менша ніж початкова швидкість потоку на початку розгінної ділянки. Модель враховує цю умову і забезпечує оптимальне проходження зерна на будь-якій ділянці каналу.

Наведена модель дає змогу знаходити швидкість руху зерна у будь-який момент часу, враховує висоту отвору бункера та залежність між кутами нахилу спіралей розгінної та гальмівної ділянок. Для даних кутів наведено математичну залежність, що забезпечує проходження зерна без його згруження і водночас запобігає травмуванню зернової маси за рахунок контрольованого зменшення кінцевої швидкості. Окремо надано залежність для знаходження часу, за якого зерно збільшує швидкість на розгінній ділянці, досягаючи максимального значення.

На основі моделі запропоновано периферійний відкритий гвинтовий канал із двома кутами нахилу спіралей α і β . Для даного каналу встановлено взаємозв'язки між його ключовими параметрами, зокрема обґрунтовано значення рекомендованих кутів $41^\circ \dots 45^\circ$ для розгінної та $39^\circ \dots 35^\circ$ для гальмівної ділянок відповідно, а також відношення h_0/g не менше 0.6...0.7.

Ключові слова: швидкість руху зерна, гвинтовий канал, змінні кути нахилу, травмування.