

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308905

**DETERMINING PATTERNS OF THE VERTICAL LOAD ON A COVERED WAGON ROOF WITH A FRAME IN THE FORM OF A TRIANGULAR ARCH (p. 6–13)****Alyona Lovska**Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>**Iraida Stanovska**Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5884-4228>**Ihor Prokopovych**Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8059-6507>**Ihor Sydorenko**Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1840-4313>**Arsen Muradian**Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6488-6627>

The object of this paper is the processes of perception and redistribution of loads in the roof of a railroad covered wagon with a frame in the form of a triangular arch.

To reduce the tare of the covered wagon, it is proposed to improve the structure of its roof. A feature of this improvement is that the roof frame is made in the form of a triangular arch with a reinforcing belt. This contributes to the reduction of the total mass of the roof compared to a typical structure. The selection of execution profiles of the beams forming the arch is carried out according to the maximum values of the moments that act in their cross-section. Taking into account the chosen profile of the arches, the calculation of the strength of the roof when it receives vertical loads was carried out. It was established that the strength of the roof under the considered load schemes is within the permissible stress values. Since the improvement of the roof structure contributes to the reduction of its weight by 1.8 % compared to the prototype, the movement of the covered wagon was evaluated under conditions of moving while empty. To this end, a mathematical modeling of the load of the covered wagon in the vertical plane during its movement along the joint unevenness was carried out. On the basis of the performed calculation, it was established that the movement of the wagon is assessed as “good”.

Special feature of the results is that the reduction of the tare of the supporting structure of the wagon was achieved by improving its roof, as the least loaded unit.

The field of practical application of the results is railroad transport, including other areas of mechanical engineering. The conditions for the practical use of the results are a symmetrical roof load scheme in operation.

The results of this research could contribute to advancements related to the design of modern structures of freight wagons with improved technical and economic indicators.

**Keywords:** railroad transport, covered wagon, wagon roof, roof load, roof strength.

**References**

1. Lovska, A. (2018). Simulation of Loads on the Carrying Structure of an Articulated Flat Car in Combined Transportation. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 140. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19724>
2. Dižo, J., Blatnický, M., Steišūnas, S., Skočilasová, B. (2018). Assessment of a rail vehicle running with the damaged wheel on a ride comfort for passengers. *MATEC Web of Conferences*, 157, 03004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815703004>
3. Dizo, J., Blatnický, M., Harusinec, J., Falendysh, A. (2018). Modification and analyses of structural properties of a goods wagon bogie frame. *Diagnostyka*, 20 (1), 41–48. <https://doi.org/10.29354/diag/99853>
4. Fomin, O., Lovska, A. (2021). Justification of the use of square pipes in the frame of the removable roof of the open wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (7 (112)), 18–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.237157>
5. Sepe, R., Pozzi, A. (2015). Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 9 (33), 451–462. <https://doi.org/10.3221/igf-esis.33.50>
6. Cuartero, J., Miravete, A., Sanz, R. (2011). Design and calculation of a railway car composite roof under concrete cube crash. *International Journal of Crashworthiness*, 16 (1), 41–47. <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.501163>
7. Fomin, O., Stetsko, A. (2018). Determination of means of contra-indication of operative damage of superior wagon-thermal systems of the model TN 4-201. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series “Transport Systems and Technologies,”* 32 (1), 135–146. Internet Archive. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-1-135-146>
8. Saedi, A., Motavalli, M., Shahverdi, M. (2023). Recent advancements in the applications of fiber reinforced polymer structures in railway industry – A review. *Polymer Composites*, 45 (1), 77–97. <https://doi.org/10.1002/pc.27817>
9. Chandra Prakash Shukla, Bharti, P. K. (2015). Study and Analysis of Doors of BCNHL Wagons. *International Journal of Engineering Research And*, 4 (04). <https://doi.org/10.17577/ijertv4is041031>
10. Levchenko, S. V., Tatianich, E. M., Konopatskyi, Yu. P., Yablonskyi, A. V., Shkabrov, O. A., Kryzhanovskiy, A. Yu. (2016). Pat. No. 109202 UA. Znimnyi dakh vantazhnoho vagona. No. u2016 03361; declared: 31.03.2016; published: 10.08.2016. Available at: <https://uapatents.com/8-109202-znimnij-dakh-vantazhnogo-vagona.html>
11. Kondratiev, A., Pištěk, V., Smovziuk, L., Shevtsova, M., Fomina, A., Kučera, P. (2021). Stress–Strain Behaviour of Repairable Composite Panel with Step-Variable Thickness. *Polymers*, 13 (21), 3830. <https://doi.org/10.3390/polym13213830>
12. Kondratiev, A., Gaidachuk, V., Nabokina, T., Kovalenko, V. (2019). Determination of the influence of deflections in the thickness of a composite material on its physical and mechanical properties with a local damage to its wholeness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (100)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174025>
13. Lee, W. G., Kim, J.-S., Sun, S.-J., Lim, J.-Y. (2016). The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232 (1), 25–42. <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>
14. Olmos Irikovich, Z., Rustam Vyacheslavovich, R., Mahmud Lafta, W., Yadgor Ozodovich, R. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. *International Journal of Engineering & Technology*, 9 (2), 378–381. <https://doi.org/10.14419/ijet.v9i2.30519>
15. Fantuzzi, N., Bacciocchi, M., Benedetti, D., Agnelli, J. (2021). The use of sustainable composites for the manufacturing of electric

- cars. Composites Part C: Open Access, 4, 100096. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100096>
16. Horbenko, A. P., Martynov, I. E. (2007). Konstruiuvannya ta rozrakhunky vahoniv. Kharkiv: UkrDAZT, 150.
  17. Vidy visyachih stropil'nyh sistem primenyaemih v stroitel'stve. Available at: <https://www.pinterest.com/pin/509610514079263558/>
  18. Chausov, M. H., Bondar, M. M., Pylypenko, A. P., Kutsenko, A. H. (2019). Prykladna mekhanika (opir materialiv). Kyiv. Available at: <https://dglip.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/be589d1e-4513-4caf-8792-ebb016171ab2/content>
  19. Shvabiuk, V. I. (2016). Opir materialiv. Kyiv: Znannia, 400. Available at: <https://btpm.nmu.org.ua/ua/download/navch-posib/%D0%A8%D0%B2%D0%B0%D0%B1%D1%8E%D0%BA%D0%9E%D0%9C%D0%9F%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>
  20. DSTU 7598:2014. Freight Wagons. General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled). Kyiv. Available at: [https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=73763](https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73763)
  21. BDS EN 12663-2: 2010. Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies - Part 2: Freight wagons (EN 12663-2: 2010).
  22. Pustiulha, S. I., Samostian, V. R., Klak, Yu. V. (20189). Inzhenerna hrafika v SolidWorks. Lutsk: Vezha, 172. Available at: <https://lib.Intu.edu.ua/sites/default/files/2021-02/%D0%86%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%20%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%20%D0%B2%20SolidWorks.pdf>
  23. Koziar, M. M., Feshchuk, Yu. V., Parfeniuk, O. V. (2018). Kompiuterna hrafika: SolidWorks. Kherson: Oldi-plus, 252. Available at: <https://ep3.nuwm.edu.ua/22175/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%27%D1%8E%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%20%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0.pdf>
  24. Caban, J., Nieoczym, A Gardy ski, L. (2021). Strength analysis of a container semi-truck frame. Engineering Failure Analysis, 127, 105487. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105487>
  25. Lovskaya, A. (2015). Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7 (75)), 9–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43749>
  26. Dižo, J. (2016). Analysis of a Goods Wagon Running on a Railway Test Track. Manufacturing Technology, 16 (4), 667–672. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/mt/16/4/667>
  27. Vatulia, G., Lovska, A., Pavliuchenkov, M., Nerubatskyi, V., Okorokov, A., Hordiienko, D. et al. (2022). Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (7 (120)), 21–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855>
  28. Panchenko, S., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Rybin, A., Kravchenko, O. (2023). Strength Assessment of an Improved Design of a Tank Container under Operating Conditions. Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 25 (3), B186–B193. <https://doi.org/10.26552/com.c.2023.047>
  29. Soukup, J., Skočilas, J., Skočilasová, B., Dižo, J. (2017). Vertical Vibration of Two Axle Railway Vehicle. Procedia Engineering, 177, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.178>
  30. Domin, Yu. V., Cherniak, H. Yu. (2003). Osnovy dynamiky vahoniv. Kyiv: KUETT, 269.
  31. Gerlici, J., Lovska, A., Vatulia, G., Pavliuchenkov, M., Kravchenko, O., Solčanský, S. (2023). Situational Adaptation of the Open Wagon Body to Container Transportation. Applied Sciences, 13 (15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
  32. Lovska, A., Dižo, J., Prokopovych, I., Zharova, O., Voronenko, S. (2023). Detecting the effect of an intermediate adapter on the load of the bearing structure of an open wagon. Eastern-European

Journal of Enterprise Technologies, 6 (7 (126)), 19–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.291247>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309874

## IDENTIFICATION OF CRACK WIDTH BEHAVIOR OF ONE-WAY REINFORCED CONCRETE SLAB STRUCTURE AT DIFFERENT STEEL REINFORCEMENT AREA (p. 14–20)

Wisnumurti

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2939-2170>

Bhondana Bayu Brahmana Kridaningrat

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1324-0021>

Agoes Soehardjono

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6172-4457>

Devi Nuralinah

Brawijaya University, Malang, Indonesia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4236-2492>

An evaluation study of crack limit states based on design codes and prior research is presented in this publication. Its main goal is to connect research findings to common design codes. Researchers continue to face a difficult dilemma when it comes to reinforced concrete structure fractures, particularly in one-way slab constructions where there is still significant damage and corrosion in the reinforcement because of cracks. Practitioners will find it easier to construct these structures and solve the slab durability issue if the proper formula is discovered. One can overcome reinforced concrete. A method for estimating the maximum fracture width formula in one-way reinforced concrete slabs with varying steel areas is suggested based on this research. Slabs use a variety of steel areas, including 1000 mm<sup>2</sup>, 1200 mm<sup>2</sup>, and 1400 mm<sup>2</sup>. The test specimens are the same length of 2 meters and have a slab width of 0.6 meters with steel reinforcement. Findings from a literature review of research codes and prediction formulas from earlier studies, namely  $w_{\max(prop)} = 1.5 \cdot 10^{-2} f_s A_s^{0.4}$ , indicate that the maximum crack width is not significantly influenced by steel area ( $A_s$ ). Overall, the findings from the two methods used in this analysis match the suggested formula and the observed experimental testing. This data indicates that the maximum fracture width has been greatly lowered by increasing the steel Area ( $A_s$ ) of the reinforced concrete slab, leading to the determination of the experimental formula,  $w_{\max(exp)} = 0.11 f_s A_s^{0.630}$ . As a result, a unique approximation formula has been developed to assess the impact of steel area parameters for pure slabs on the maximum crack width formula for one-way reinforced concrete slabs. This crack width formula is only applicable to one-way slabs in practice.

**Keywords:** flexural member, crack width, one-way slab, reinforced concrete, steel area.

## References

1. Kanavaris, F., Coelho, M., Ferreira, N., Azenha, M., Andrade, C. (2023). A review on the effects of cracking and crack width on corrosion of reinforcement in concrete. Structural Concrete, 24 (6), 7272–7294. <https://doi.org/10.1002/suco.202300227>
2. Kridaningrat, B. B. B., Soehardjono, A., Wisnumurti, W., Nuralinah, D. (2024). Identifying the effect of thickness on crack width in one-way reinforced concrete slab structures. Applied Mechanics, 2 (7 (128)), 31–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302795>
3. Pérez Caldentey, A., García, R., Gribniak, V., Rimkus, A. (2020). Tension versus flexure: Reasons to modify the formulation of MC

- 2010 for cracking. *Structural Concrete*, 21(5), 2101–2123. Portico. <https://doi.org/10.1002/suco.202000279>
4. Tue, N. V., Fehling, E., Schlicke, D., Krenn, C. (2021). Crack width verification and minimum reinforcement according to EC 2: Current model with specifications in Germany and Austria vs proposal for revision. *Civil Engineering Design*, 3 (5-6), 210–228. <https://doi.org/10.1002/cend.202100045>
  5. Gribniak, V., Pérez Caldentey, A., Kaklauskas, G., Rimkus, A., Sokolov, A. (2016). Effect of arrangement of tensile reinforcement on flexural stiffness and cracking. *Engineering Structures*, 124, 418–428. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.026>
  6. Naotunna, C. N., Samarakoon, S. M. S. M. K., Fosså, K. T. (2021). Experimental investigation of crack width variation along the concrete cover depth in reinforced concrete specimens with ribbed bars and smooth bars. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00593. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00593>
  7. Soehardjono, A., Wibowo, A., Nuralinah, D., Aditya, C. (2023). Identifying the influence of reinforcement ratio on crack behaviour of rigid pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (125)), 87–94. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290035>
  8. De Maio, U., Greco, F., Leonetti, L., Nevone Blasi, P., Pranno, A. (2022). A cohesive fracture model for predicting crack spacing and crack width in reinforced concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, 139, 106452. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106452>
  9. Lapi, M., Orlando, M., Spinelli, P. (2018). A review of literature and code formulations for cracking in R/C members. *Structural Concrete*, 19 (5), 1481–1503. <https://doi.org/10.1002/suco.201700248>
  10. Kaklauskas, G., Sokolov, A. (2021). Crack Analysis of Tensile and Bending RC Members. Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC2020), 253–263. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76547-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76547-7_21)
  11. Naotunna, C. N., Samarakoon, S. M. K., Fosså, K. T. (2020). Experimental and theoretical behavior of crack spacing of specimens subjected to axial tension and bending. *Structural Concrete*, 22 (2), 775–792. <https://doi.org/10.1002/suco.201900587>
  12. Gribniak, V., Rimkus, A., Pérez Caldentey, A., Sokolov, A. (2020). Cracking of concrete prisms reinforced with multiple bars in tension—the cover effect. *Engineering Structures*, 220, 110979. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110979>
  13. Basteskår, M., Engen, M., Kanstad, T., Fosså, K. T. (2019). A review of literature and code requirements for the crack width limitations for design of concrete structures in serviceability limit states. *Structural Concrete*, 20 (2), 678–688. <https://doi.org/10.1002/suco.201800183>
  14. Goszczyńska, B., Trąmpczyński, W., Tworzewska, J. (2021). Analysis of Crack Width Development in Reinforced Concrete Beams. *Materials*, 14 (11), 3043. <https://doi.org/10.3390/ma14113043>
  15. Soehardjono, A., Aditya, C. (2021). Analysis of the effect of slab thickness on crack width in rigid pavement slabs. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 42–51. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001693>
  16. Suseno, H., Soehardjono, A., Wardana, I. N. G., Rachmansyah, A. (2018). Performance of lightweight concrete one-way slabs using medium-K basaltic andesite pumice and scoria. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19 (4), 473–485. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0047-y>
  17. Ikehata, S., Ishiguro, H., Nakano, T., Nakamura, H. (2020). Experimental evaluation of punching shear capacity of reinforced concrete slabs with horizontal crack due to compression rebar corrosion. *Structural Concrete*, 21 (3), 890–904. <https://doi.org/10.1002/suco.201900438>
  18. Chang, S., Yang, M., Sun, Y., Liu, K. (2019). Calculation Method of Early-Age Crack Width in Reinforced Concrete Bridge through a Nonlinear FEA Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23 (7), 3088–3096. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-2129-0>
  19. Sheikhasiri, A. (2024). Comparative Study of Numerical Methods for Predicting Crack Propagation in Reinforced Concrete Hollow Core Slabs. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 6 (1), 42–47. <https://doi.org/10.61186/jcer.6.1.42>
  20. 318-05/318R-05: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
  21. AS 3600. Concrete structures (2009). Australian Standard.
  22. Standard specifications for concrete structures-2007, design (2007). Tokyo: Japan Society of Civil Engineers. JSCE Guidelines for Concrete No. 15. Available at: [https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15\\_Standard\\_Specifications\\_Design\\_1.0.pdf](https://www.jsce-int.org/system/files/JGC15_Standard_Specifications_Design_1.0.pdf)
  23. Walraven, J. C., van der Horst, A. Q. C. (2013). FIB model code for concrete structures 2010. International Federation for Structural Concrete (fib).
  24. EN 1992-1-1 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309656**

**DETERMINING THE MECHANISM FOR GENERATING CAVITATION PRESSURE FLUCTUATIONS IN THROTTLE DEVICES AT HIGH-HEAD THROTTLING OF LIQUID (p. 21–31)**

**Taras Tarasenko**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8287-4873>

**Valerii Badakh**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-2361-1123>

**Mykola Makarenko**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2089-6620>

**Pavel Lukianov**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5043-6182>

**Igor Dubkovetskiy**

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3403-6103>

The object of this study is the process of generating cavitation pressure fluctuations behind the throttle device at high-head throttling of liquid. This paper addressed the problem of calculating the amplitude of cavitation pressure fluctuations at high-pressure liquid throttling. It was established that cavitation pressure fluctuations are a consequence of collisions of discrete masses of a transiting liquid jet in the region of pressure recovery. The range of cavitation pressure fluctuations reaches the pressure values at the inlet to the throttle device. The frequency band of cavitation pressure fluctuations is in the range from 1.5 to 20 kHz and higher. At high-head throttling of the liquid, caverns attached to the surface of the throttle channel, moving caverns and small bubbles in the transit flow are formed. Moving caverns compress the transit flow and divide it into separate fluid blocks. In the region of pressure restoration, the moving caverns are slammed shut and discrete fluid blocks collide. This causes high-frequency pressure fluctuations. Special feature of the results is the possibility of estimating the range of cavitation pressure fluctuations depending on the pressure drop on the throttle device. When the back pressure on the throttle device increases, the amplitude of cavitation pressure fluctuations decreases, and the frequency band shifts to the high-frequency region. The results make it possible to calculate the range of cavitation oscillations, to predict the development of cavitation erosion of materials depending on the parameters of throttling of

the working fluid. The results of the work are used to design devices for cleaning products from contamination, for determining the volume content of water in aviation fuel, for intensification of technological processes in the chemical and food industries.

**Keywords:** cavitation flow, pressure pulsations, pressure drop, discrete jet, high-head throttling.

### References

- Glazkov, M., Lanetskiy, V., Makarenko, N., Chelyukanov, I. (1987). Kavitatsiya v zhidkostnykh sistemah vozdushnykh sudov. Kyiv: KIIGA, 64.
- Zheng, X., Wang, X., Lu, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Yu, J. (2023). An Experimental Study of Cavitation Bubble Dynamics near a Complex Wall with a Continuous Triangular Arrangement. *Symmetry*, 15 (3), 693. <https://doi.org/10.3390/sym15030693>
- Ohl, C., Linbau, O., Lauterborn, W., Philipp, A. (1998). Details of asymmetric bubble collapse. Third international Symposium on Cavitation. Band 1. Grenoble, 39–44.
- Osterland, S., Müller, L., Weber, J. (2021). Influence of Air Dissolved in Hydraulic Oil on Cavitation Erosion. *International Journal of Fluid Power*, 22 (3), 373–392. <https://doi.org/10.13052/ijfp1439-9776.2234>
- Glazkov, M., Tarasenko, T. (2003). Vliyanie rezhimov drosselirovaniya na lokalizatsiyu i intensivnost' erozii gidroapparatury v potoke zhidkosti. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, 2, 43–46.
- Knepp, R., Deyli, L., Hemmit, F. (1974). Kavitatsiya. Moscow: Mir, 679.
- Tarasenko, T., Badakh, V. (2017). Cavitation Liquid Leakage through Throttle Device. *Mechanics and Advanced Technologies*, 3 (81), 82–91. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.81.117480>
- Hlazkov, M., Lanetskiy, V., Tarasenko, T. (2007). Matematychna model rozmakhu kavitatsiynykh pulsatsiy tysku. *Materialy IX mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsiyi «Avia - 2007»*. Vol. 2. Kyiv: NAU, 60–62.
- Soyama, H., Hoshino, J. (2016). Enhancing the aggressive intensity of hydrodynamic cavitation through a Venturi tube by increasing the pressure in the region where the bubbles collapse. *AIP Advances*, 6 (4). <https://doi.org/10.1063/1.4947572>
- Tarasenko, T., Badach, V., Puzik, O. (2013). Functional units based on cavitation effects for hydraulic systems of vehicles. *Science – Future of Lithuania: 16th Conference for Junior Researchers*. Vilnius, 50–54.
- Xu, X., Fang, L., Li, A., Wang, Z., Li, S. (2021). Numerical Analysis of the energy loss mechanism in cavitation flow of a control valve. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 174, 121331. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121331>
- Li, M., Yang, G., Wu, G., Li, X. (2020). Oxidative Deterioration Effect of Cavitation Heat Generation on Hydraulic Oil. *IEEE Access*, 8, 119720–119727. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3005636>
- Zhang, H., Chen, G., Wu, Q., Huang, B. (2022). Experimental investigation of unsteady attached cavitating flow induced pressure fluctuation. *Journal of Hydrodynamics*, 34 (1), 31–42. <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0003-x>
- Ferrari, A. (2017). Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473 (2199), 20160345. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0345>
- Simpson, A., Ranade, V. V. (2018). Modeling hydrodynamic cavitation in venturi: influence of venturi configuration on inception and extent of cavitation. *AIChE Journal*, 65 (1), 421–433. <https://doi.org/10.1002/aic.16411>
- Echouchene, F., Belmabrouk, H. (2022). Analysis of Geometric Parameters of the Nozzle Orifice on Cavitating Flow and Entropy Production in a Diesel Injector. *Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99404>
- Pilipenko, V. (1989). Kavitatsionnye kolebaniya. Kyiv: Naukova dumka, 316.
- Oba, R., Ito, Y., Miyakura, H., Higuchi, J., Sato, K. (1987). Stochastic behavior (randomness) of acoustic pressure pulses in the near-subcavitating range. *JSME International Journal*, 30 (262), 581–586. <https://doi.org/10.1299/jsme1987.30.581>
- Khozaei, M. H., Favrel, A., Miyagawa, K. (2022). On the generation mechanisms of low-frequency synchronous pressure pulsations in a simplified draft-tube cone. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 93, 108912. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108912>
- Tarasenko, T. V., Badach, V. M. (2019). Investigation of localization and intensity of calculative erosion in high-speed drosselidation of liquid in hydrocontrol devices. *Problems of Friction and Wear*, 2 (83), 93–103. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(83\).13697](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(83).13697)
- Khavari, M., Priyadarshi, A., Morton, J., Porfyarakis, K., Pericleous, K., Eskin, D., Tzanakis, I. (2023). Cavitation-induced shock wave behaviour in different liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 94, 106328. <https://doi.org/10.1016/j.ultrsonch.2023.106328>
- Melissaris, T., Schenke, S., van Terwisga, T. J. C. (2023). Cavitation erosion risk assessment for a marine propeller behind a Ro-Ro container vessel. *Physics of Fluids*, 35 (1). <https://doi.org/10.1063/5.0131914>
- Joshi, S., Franc, J. P., Ghigliotti, G., Fivel, M. (2019). SPH modelling of a cavitation bubble collapse near an elasto-visco-plastic material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 125, 420–439. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.12.016>
- Magnotti, G. M., Battistoni, M., Saha, K., Som, S. (2020). Development and validation of the cavitation-induced erosion risk assessment tool. *Transportation Engineering*, 2, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100034>
- Shi, H., Li, M., Nikrityuk, P., Liu, Q. (2019). Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model. *Chemical Engineering Science*, 207, 672–687. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.004>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308937

**MATHEMATICAL AND COMPUTER IDENTIFICATION OF THE CHARACTERISTICS OF OSCILLATION FREQUENCY AND DEFORMATIONS OF THE EQUIPMENT ELEMENT IN THE FLUSH PURIFICATION UNIT (p. 32–40)**

**Tetiana Surzhko**

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,  
Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8095-3984>

**Petro Molchanov**

Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University,  
Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5335-4281>

**Serhii Hudz**

Pryazovskiyi State Technical University, Dnipro, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4764-8635>

**Maksym Knysch**

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,  
Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3516-4852>

**Yuliya Sribna**

Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University,  
Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3846-3871>

**Larysa Hrytsenko**

Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University,  
Poltava, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4754-4593>



**Valerii Tytarenko**

Poltava V. G. Korolenko National Pedagogical University,  
Poltava, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2362-2876>

**Vasyl Savyk**

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,  
Poltava, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0706-0589>

**Victoriia Rubel**

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»,  
Poltava, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6053-9337>

The object of research is an element of equipment in a vibrating screen, which is an active working body in the form of a plate.

The key element in the system of the flush purification unit is the vibrating screen. The basic design of the sieve does not allow the flush solution to be distributed evenly over the entire working surface. The concentration of drilling fluid in the central part of the equipment leads to premature abrasive wear and failure of the working element. Therefore, the structure of the vibrating screen needs to be improved in order to extend its service life. This task has been solved through the introduction of an active element to the structure for the redistribution of the solution through additional transverse vibrations.

The use of such an active element is an important step for improving the quality and efficiency of the purification system, which could optimize production processes and reduce costs in industry.

Taking into account transverse vibrations and calculating frequency parameters could help improve the design and use the vibrating screen more productively.

An analysis of the frequencies of oscillations of the active element-plate for cleaning the flush liquid with a vibrating screen was performed and a comparison of the analytically obtained results with the simulation data using the finite element method in the COMSOL Multiphysics software was carried out. The results are the basis for designing vibrating screens, conducting experimental and industrial research, and testing the screens. Computer studies have confirmed the possibility of using the improved design of the vibrating screen. By comparing the results of the calculation and computer simulation, the error was determined to be within 5 %.

The identified patterns could make it possible to select the plate oscillation frequencies depending on the known initial parameters, which would be useful for solving similar tasks.

**Keywords:** computer simulation, mathematical examination, purification unit, graphical images, vibrating screen, frequency.

**References**

- Surzhko, N. O., Savyk, V. M., Molchanov, P. O., Kaliuzhnyi, A. P. (2020). The efficiency increase of equipment work for the cleaning block of washing fluid. *Zbirnyk naukovykh prats. Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 2 (55), 121–127. Available at: <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10187>
- Surzhko, T., Knysh, M., Kuzub, Y., Kruchkov, O., Rubel, V. (2023). Study of the operating parameters of vibrations of a vibrosieve of the washing liquid purification unit. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (1 (72)), 34–39. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286362>
- Kim, K., Kim, K., Han, C., Jang, Y., Han, P. (2020). A method for natural frequency calculation of the functionally graded rectangular plate with general elastic restraints. *AIP Advances*, 10 (8). <https://doi.org/10.1063/5.0013625>
- Kashmira Ajay Puranik, Surbhi R Tharewal, Monica S Mhetre. (2017). Eigen Frequency Vibration Analysis for Thin Plate. *International Journal of Engineering Research And*, 6 (03). <https://doi.org/10.17577/ijertv6is030291>

- Nesterenko, M. P., Molchanov, P. O. (2014). Rol vibrosyt v yakosti ochystky burovoho rozchynu. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 1 (40), 82–90.
- Rubel, V., Rubel, V., Surzhko, T., Goshovskiy, S. (2024). Determining the effect of vibrating wave swabbing on the functional processes in carbonate low-permeability reservoirs. *Engineering Technological Systems*, 2 (1 (128)), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.299970>
- Liakh, M. M., Fedoliak, N. V. (2016). Doslidzhennia vplyvu zminnykh parametriv na traiektoriyu rukhu vibratora burovoho vibrosyta. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*, 3, 71–78. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rngr\\_2016\\_3\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rngr_2016_3_10)
- Liakh, M. M., Fedoliak, N. V., Vakaliuk, V. M. (2015). Doslidzhennia vplyvu kolyvalnykh rukhiv sitky na efektyvnist roboty vibrosyta. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*, 4, 36–42. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/rngr\\_2015\\_4\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/rngr_2015_4_6)
- Berezhnyskyi, B. S. (2016). Doslidzhennia kinematychnykh i dynamichnykh parametriv vibrosyt. *Prykarpatskyi visnyk NTSh «Chyslo»*, 1, 328–336.
- Hačegan, L. (Barboni), Hačegan, C., Gillich, G. R., Hamat, C. O., Vasile, O., Stroia, M. D. (2018). Natural frequencies of thin rectangular plates clamped on contour using the Finite Element Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/294/1/012033>
- Alanbay, B., Kapania, R. K., Batra, R. C. (2020). Up to lowest 100 frequencies of rectangular plates using Jacobi polynomials and TSNDF. *Journal of Sound and Vibration*, 480, 115352. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115352>
- Ilanko, S., Monterrubio, L. E., Mochida, Y. (2014). Natural Frequencies and Modes of Plates of Rectangular Planform. *The Rayleigh–Ritz Method for Structural Analysis*, 113–131. <https://doi.org/10.1002/9781118984444.ch10>
- Leissa, A. W. (1973). The free vibration of rectangular plates. *Journal of Sound and Vibration*, 31 (3), 257–293. [https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(73\)80371-2](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(73)80371-2)
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill, 580. Available at: [https://www.cuprecifal.com/ccs\\_files/articles/cuveaqua1\\_deniso/Timoshenko\\_-\\_Theory\\_of\\_plates\\_and\\_shells.pdf](https://www.cuprecifal.com/ccs_files/articles/cuveaqua1_deniso/Timoshenko_-_Theory_of_plates_and_shells.pdf)

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309708**

**DETERMINING THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF A HIGH-SPEED UNMANNED MARINE WIG CRAFT (p. 41–46)**

**Andrii Dreus**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0598-9287>

**Serhii Aleksieienko**

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0320-989X>

**Valerii Nekrasov**

Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9119-0529>

The study object of this paper is the aerodynamic processes during the movement of an unmanned aerial vehicle flying low over the underlying surface. The ground effect is known to enhance the aerodynamic performance of low-flying aircraft, particularly larger ones. However, this effect is most noticeable for large objects. Unmanned vehicles are typically characterized by their relatively compact geometry. This study explores the aerodynamic processes involved in the flight of a small-

sized vehicle using the principle of dynamic support over a surface. The particular prototype of the unmanned aerial vehicle suggested by the authors has been examined herein. The aim of the study is to evaluate the aerodynamic forces affecting a small-sized unmanned high-speed vehicle that employs the dynamic principle of support over the surface (WIG craft) by using CFD modeling. In contrast to most available studies on the ground effect, a 3D problem statement was used in this work. Computational experiments have visualized the physical fields surrounding an aircraft in flight over the ground. This study determines how the distance from the surface affects the aerodynamic properties of a small-sized aircraft, as well as the height of the effective zone where ground effect influences the small-sized WIG craft within  $0.3 \leq \bar{h} \leq 0.7$ . It has been shown that approaching the surface leads to a shift in the center of pressure of the vehicle, which leads to a change in aerodynamic momentum. This phenomenon must be taken into account when designing a control system to provide a stable flight. The study's findings are directly relevant for the development of a type of unmanned vehicles that use the dynamic principle of support over the surface.

**Keywords:** aerodynamic forces, small-scale WIG craft, CFD modeling, unmanned systems, ground effect.

## References

- Ukraine war will shift Black Sea naval balance (2023). Emerald Expert Briefings. <https://doi.org/10.1108/oxan-db282906>
- Yun, L., Bliault, A. (2012). Wings in Ground Effect: Ekranoplans and WIG Craft. *High Performance Marine Vessels*, 89–132. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0869-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0869-7_3)
- Papadopoulos, C., Mitridis, D., Yakinthos, K. (2021). Conceptual design of a novel Unmanned Ground Effect Vehicle. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1024 (1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1024/1/012058>
- Rozhdestvensky, K. V. (2006). Wing-in-ground effect vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 42 (3), 211–283. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2006.10.001>
- Lowther, A., Siddiki, M. K. (2022). Combat Drones in Ukraine. *Air & Space Operations Review*, 1 (4), 3–13.
- Joiner, K. F., Swidan, A. A. (2023). Conceptualising a Hybrid Flying and Diving Craft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11 (8), 1541. <https://doi.org/10.3390/jmse11081541>
- Sokhatskyi, A., Dreus, A., Radovskyi, M., Horbonos, S. (2024). A review of the problem of modeling the aerodynamics of small-sized ekranoplanes. *MATEC Web of Conferences*, 390, 04011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004011>
- Nandkumar, B., Raksheet, C., Subodh, P., Yash, M., Shruti, K. (2021). Design and Analysis of Wing in Ground Effect Vehicle. *Advances in Aerospace Science and Applications*, 11 (1), 11–31. Available at: [https://www.ripublication.com/aasa/aasav11n1\\_02.pdf](https://www.ripublication.com/aasa/aasav11n1_02.pdf)
- Abramowski, T. (2007). Numerical Investigation of Airfoil in Ground Proximity. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 45 (2), 425–436. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228651914\\_Numerical\\_investigation\\_of\\_airfoil\\_in\\_ground\\_proximity](https://www.researchgate.net/publication/228651914_Numerical_investigation_of_airfoil_in_ground_proximity)
- Phillips, W. F., Hunsaker, D. F. (2013). Lifting-Line Predictions for Induced Drag and Lift in Ground Effect. *Journal of Aircraft*, 50 (4), 1226–1233. <https://doi.org/10.2514/1.c032152>
- Prykhodko, A. A., Alekseyenko, S. V., Prykhodko, V. V. (2019). Numerical investigation of the influence of horn ice formation on airfoils aerodynamic performances. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 46 (6), 499–508. <https://doi.org/10.1615/interjfluidmechres.2019026024>
- Tahani, M., Masdari, M., Bargestan, A. (2017). Aerodynamic performance improvement of WIG aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 89 (1), 120–132. <https://doi.org/10.1108/aeat-05-2015-0139>
- Thianwiboon, M. (2023). A Numerical Comparative Study of the Selected Cambered and Reflexed Airfoils in Ground Effect. *Engineering Journal*, 27 (11), 39–51. <https://doi.org/10.4186/ej.2023.27.11.39>
- Tumse, S., Tasci, M. O., Karasu, I., Sahin, B. (2021). Effect of ground on flow characteristics and aerodynamic performance of a non-slender delta wing. *Aerospace Science and Technology*, 110, 106475. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106475>
- Menter, F. (1993). Zonal Two Equation k-w Turbulence Models For Aerodynamic Flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>
- Prikhod'ko, A. A., Alekseenko, S. V. (2014). Numerical Simulation of the Processes of Icing on Airfoils with Formation of a "Barrier" Ice. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87 (3), 598–607. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1050-0>
- Ozdemir, Y. H., Çoşgun, T. (2022). The Influence of Turbulence Models on the Numerical Modelling of a 3D Wing in Ground Effect. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1200056>
- Alekseyenko, S., Dreus, A., Dron, M., Brazaluk, O. (2022). Numerical Study of Aerodynamic Characteristics of a Pointed Plate of Variable Elongation in Subsonic and Supersonic Gas Flow. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 96 (2), 88–97. <https://doi.org/10.37934/arfmts.96.2.8897>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308904

## IDENTIFICATION OF PATTERNS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A STANDARD PLASTIC TANK FOR LIQUID MINERAL FERTILIZERS (p. 47–59)

Vitaliy Tyukanko

M. Kozybayev North Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1736-0323>

Alexandr Demyanenko

M. Kozybayev North Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5698-8140>

Vladislav Semenyuk

M. Kozybayev North Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8580-7326>

Dmitriy Alyoshin

M. Kozybayev North Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5985-0523>

Stanislav Brilkov

«AVAGRO» LLP, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9144-9872>

Sergey Litvinov

«AVAGRO» LLP, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3140-2802>

Tatyana Shirina

M. Kozybayev North Kazakhstan University,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-8975>

Erlan Akhmetzhanov

Academy of the National Guard of the Republic of Kazakhstan,  
Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9473-464X>

In this study, using the method of probabilistic deterministic planning (PDP), the optimum design parameters of a standard

polyethylene tank used worldwide for transporting liquid mineral fertilizers (LMF) were determined.

By the finite element method, the effect of the density of liquid mineral fertilizer, tank wall thickness and four motion modes (braking, acceleration, jump and landing) on the strength of standard polyethylene tanks was studied. According to the results of the study, the five most informative areas in the tank design were identified, for which the values of maximum stresses ( $\sigma_{\max}$ ) were obtained: filler neck, pockets, walls, tap-in points and wall transition to the tank roof. As the LMF density increases,  $\sigma_{\max}$  in the tank increases linearly. Increasing the tank wall thickness by 1.5 times reduces the maximum stresses by 30 to 50 %. It was found that motion mode has a significant effect on the stress-strain state of a standard tank. The “heaviest” mode for a standard tank is “braking”. The “acceleration” motion mode causes  $\sigma_{\max}$  of no more than 60 % of the “braking” mode values. The “lightest” mode is “landing”, in which  $\sigma_{\max}$  is no more than 28 % relative to “braking”. Based on the PDP method, equations were derived for calculating maximum stresses depending on LMF density, wall thickness and motion mode of the tank. Nomograms were built that make it possible to quickly determine the wall thickness of a standard tank without calculations, depending on external factors. The results of the study can be used in practice when designing safe and durable tanks for transporting liquid mineral fertilizers.

**Keywords:** plastic tanks, finite element method, strength calculation, wall thickness, tank motion modes, rotational molding, rotomolding.

## References

- Crawford, R. J., Throne, J. L. (2002). Rotational Molding Technology. William Andrew.
- Gupta, N., Ramkumar, P., Sangani, V. (2020). An approach toward augmenting materials, additives, processability and parameterization in rotational molding: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 35 (14), 1539–1556. <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1779934>
- Crawford, R. J. (1996). Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 56 (1-4), 263–271. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01840-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01840-9)
- Gnanaprakasam, P. D., Vanisree, A. J. (2022). Recurring detrimental impact of agrochemicals on the ecosystem, and a glimpse of organic farming as a possible rescue. *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (50), 75103–75112. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22750-1>
- Hossain, M. E., Shahrukh, S., Hossain, S. A. (2022). Chemical Fertilizers and Pesticides: Impacts on Soil Degradation, Groundwater, and Human Health in Bangladesh. *Water Science and Technology Library*, 63–92. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95542-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95542-7_4)
- Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., Alamri, S. A. (2018). Fertilizers and Their Contaminants in Soils, Surface and Groundwater. *Encyclopedia of the Anthropocene*, 225–240. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809665-9.09888-8>
- Timoshenko, S. (1956). *Strength of Material. Part II. Advanced Theory and Problems*. Princeton.
- Klabukova, L. S. (1980). The differential operator of problems of the theory of momentless elastic shells and their solution by the variational-difference method. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 20 (1), 225–244. [https://doi.org/10.1016/0041-5553\(80\)90075-0](https://doi.org/10.1016/0041-5553(80)90075-0)
- Paimushin, V. N., Shalashilin, V. I. (2006). Geometrically non-linear equations in the theory of momentless shells with applications to problems on the non-classical forms of loss of stability of a cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 70 (1), 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2006.03.006>
- Zha, S., Lan, H. (2021). Fracture behavior of pre-cracked polyethylene gas pipe under foundation settlement by extended finite element method. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 189, 104270. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104270>
- Khademi-Zahedi, R., Shishesaz, M. (2019). Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes. *Underground Space*, 4 (1), 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.05.001>
- Khademi-Zahedi, R. (2019). Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. *Underground Space*, 4 (1), 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.05.002>
- Kochanov, V., Pištěk, V., Kondratiev, A., Yuresko, T., Kučera, P. (2022). Influence of Geometric Parameters of Conical Acrylic Port-holes on Their Stress–Strain Behaviour. *Polymers*, 14 (5), 1041. <https://doi.org/10.3390/polym14051041>
- Karamnov E. I. Application of the finite element method to solve the problem of stability of the tank wall. *Applied research and development in priority areas of science and technology*. Available at: <http://econf.rae.ru/article/7560>
- Vijay, K., Jayapalan, S. (2022). Creep analysis of Water tank made of Polypropylene (PP) and High-Density Polyethylene (HDPE) polymer material using ANSYS Simulation. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.36909/jer.17611>
- Edlabadkar, O., Potdar, S., Jha, H. K., Jaiswal, N. G. (2022). Structural analysis of a rotomolded water tank. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Available at: [https://issuu.com/irjet/docs/irjet-v9i741#google\\_vignette](https://issuu.com/irjet/docs/irjet-v9i741#google_vignette)
- Šuba, O., Bilek, O., Kubišová, M., Pata, V., Měřinská, D. (2022). Evaluation of the Flexural Rigidity of Underground Tanks Manufactured by Rotomolding. *Applied Sciences*, 12 (18), 9276. <https://doi.org/10.3390/app12189276>
- Pozhil, S. N., Menon, N. M., Waigaonkar, S. D., Chaudhari, V. (2020). An analytical model to predict the creep behaviour of linear low-density polyethylene (LLDPE) and polypropylene (PP) used in rotational moulding. *Materials Today: Proceedings*, 28, 888–892. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.318>
- Tyukanko, V., Demyanenko, A., Semenyuk, V., Dyuryagina, A., Alyoshin, D., Tarunin, R., Voropaeva, V. (2023). Development of an Ultrasonic Method for the Quality Control of Polyethylene Tanks Manufactured Using Rotational Molding Technology. *Polymers*, 15 (10), 2368. <https://doi.org/10.3390/polym15102368>
- Dyuryagina, A., Lutsenko, A., Demyanenko, A., Tyukanko, V., Ostrovnoy, K., Yanevich, A. (2022). Modeling the wetting of titanium dioxide and steel substrate in water-borne paint and varnish materials in the presence of surfactants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (115)), 31–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252757>
- Tyukanko, V., Demyanenko, A., Dyuryagina, A., Ostrovnoy, K., Lezhneva, M. (2021). Optimization of the Composition of Silicone Enamel by the Taguchi Method Using Surfactants Obtained from Oil Refining Waste. *Polymers*, 13 (21), 3619. <https://doi.org/10.3390/polym13213619>
- Tyukanko, V., Demyanenko, A., Dyuryagina, A., Ostrovnoy, K., Aubakirova, G. (2022). Optimizing the Composition of Silicone Enamel to Ensure Maximum Aggregative Stability of Its Suspensions Using Surfactant Obtained from Oil Refining Waste. *Polymers*, 14 (18), 3819. <https://doi.org/10.3390/polym14183819>
- Dyuryagina, A. N., Lutsenko, A. A., Tyukanko, V. Yu. (2019). Study of the disperse effect of polymeric surface-active substances in acrylic dispersions used for painting oil well armature. *Bull. Tomsk. Polytech. Univ. Geo Assets Eng.*, 330 (8), 37–44.
- E-ECE-TRANS-505. Soglasheniya o prinyatii edinoobraznyh tekhnicheskikh predpisanii dlya kolesnyh transportnyh sredstv, predmetov oborudovaniya i chastey, kotorye mogut byt' ustanovleny i/ili ispol'zovany na kolesnyh transportnyh sredstvakh, i ob usloviyakh vzaimnogo priznaniya ofitsial'nyh utverzhdennykh, vydavaemykh na osnovе etih predpisaniiy.

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309867**  
**IMPROVING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF**  
**BALANCING ELECTRIC MACHINE ROTORS ON A**  
**BALANCING MACHINE (p. 60–69)**

**Yaroslav Shostak**

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-2886-3264>

**Oleh Holovashchenko**

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-3499-9413>

**Yuriy Reshetnikov**

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-3893-1736>

**Viktor Tkachenko**

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

The object of research is the process of dynamic balancing of rotors on a balancing machine in the process of restoring electric machines.

The work is aimed at improving the quality of balancing rotors in the process of major repairs of traction electric motors for electric trains. The problem addressed was the quality of balancing the rotors of electric machines on stationary balancing machines. According to the conventional balancing technology, the rotor to be balanced is mounted on the supports of the balancing machine with support surfaces that usually have mechanical defects. These defects cannot be eliminated by machining due to the peculiarities of rotor repair technology. Theoretical and experimental studies of the effect of damage to the rotor support surfaces on the balancing parameters have been carried out. It has been proven that the properties of the bearing surfaces of the rotor during its balancing on a balancing machine significantly affect the results of determining the imbalance. At the same time, the difference in the mass values of balancing loads can reach 25 %. This is because damage to the bearing surfaces of the rotor generates false signals unrelated to the imbalance.

In order to increase the accuracy of determining the mass of balancing loads during rotor balancing, it is proposed to improve the technological process of balancing. The improvement involves the inclusion of a frequency filter in the signal conversion chain of acceleration sensors. The filter is designed to separate signals with a frequency greater than the rotational frequency of the rotor.

A condition for the practical application of the research results is the expediency of introducing a frequency filter of signals of acceleration sensors with a threshold frequency of filtering signals that exceeds the rotational frequency of the rotor into the schematic diagram of the balancing machine.

**Keywords:** railroad transport, vibrations of electric machines, imbalance, mechanical balancing of rotors, balancing machine.

#### References

- Tiwari, R. (2017). Rotor systems: analysis and identification. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315230962>
- Rangel-Magdaleno, J., Peregrina-Barreto, H., Ramirez-Cortes, J., Morales-Caporal, R., Cruz-Vega, I. (2016). Vibration Analysis of Partially Damaged Rotor Bar in Induction Motor under Different Load Condition Using DWT. *Shock and Vibration*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/3530464>
- goston, K. (2015). Fault Detection of the Electrical Motors Based on Vibration Analysis. *Procedia Technology*, 19, 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.078>
- Hraniak, V., Solona, O. (2022). Prospects for detecting defects in rotating electric machines on the basis of the analysis of their vibration signals. *Vibrations in Engineering and Technology*, 1 (104), 20–29. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-1-3>
- Ibraheem, A. A., Ghazaly, N. M., Abd el-Jaber, G. (2019). Review of rotor balancing techniques. *American Journal of Industrial Engineering*, 6 (1), 19–25.
- Gangsar, P., Tiwari, R. (2017). Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 94, 464–481. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.03.016>
- Āgoston, K. (2016). Vibration Detection of the Electrical Motors using Strain Gauges. *Procedia Technology*, 22, 767–772. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.037>
- Zubenko, D. Yu. (2012). Justification of diagnostic characteristics of rotors disbalance of traction engine of rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (51)), 16–18. Available at: <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/1651>
- Znaidiuk, V. H., Ostrovskiy, O. S. (2013). Diahnostyka tekhnichnoho stanu shvydkokhidnykh barabaniv. *Mashynobuduvannya*, 11, 8–13.
- Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou, L. (2021). Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*, 9 (5), 89. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
- MacCamhail, M. (2016). Static and dynamic balancing of rigid rotors. *Bruel & Kjaer application notes*.
- Horvath, R., Flowers, G. T., Fausz, J. (2008). Passive Balancing of Rotor Systems Using Pendulum Balancers. *Journal of Vibration and Acoustics*, 130 (4). <https://doi.org/10.1115/1.2731401>
- Lee, C.-W. (1993). *Vibration Analysis of Rotors*. In *Solid Mechanics and Its Applications*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-8173-8>
- Curtis, G. C., McInturff, J. A., Rubel, H. J., Wall, W. F. (1980). Pat. No. US4238960A. Means for balancing rotors of a machine. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4238960A/en>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310520**  
**IDENTIFYING THE EVOLUTION OF THROUGH**  
**CRACKS IN IRON-REINFORCED HOLLOW SLABS**  
**UNDER THE INFLUENCE OF A STANDARD FIRE**  
**TEMPERATURE MODE (p. 70–77)**

**Stanislav Sidnei**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7664-6620>

**Oleh Myroshnyk**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8951-9498>

**Andrii Kovalov**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6525-7558>

**Roman Veselivskiy**

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3266-578X>

**Kostiantyn Hryhorenko**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0811-1496>

**Taras Shnal**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4226-9513>



Ihor Matsyk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7334-3934>

The object of this study is the fire resistance of reinforced concrete hollow slabs at the onset of the limit state of loss of integrity. The problem of accurate modeling of the formation and development of cracks in concrete was investigated.

The paper reports an analysis of the results of the stress-strain state of a reinforced concrete hollow slab during fire exposure for devising a method for evaluating the fire resistance of such structures upon the onset of the limit state of loss of integrity.

According to EN 1992-1-2, the determination of fire resistance of structures is provided by calculation methods, however, there is no such procedure for reinforced concrete hollow slabs. Many scientific works offer refined methods for evaluating only the loss of load-bearing and heat-insulating capabilities, leaving aside the issue of loss of integrity. Thus, this can lead to a biased evaluation of reinforced concrete hollow floor slabs according to the criterion of the limit state of loss of integrity, which in turn can put under a threat to the fire safety of buildings, which threatens the life and health of people.

According to the results of the calculation, a parameter has been determined, according to which the onset of the limit state of fire resistance, in particular, the loss of integrity, was established. Summarizing the damage distributions, it was assumed that in the case of reaching the critical plastic deformation of  $2.5 \cdot 10^{-3}$  in concrete finite elements, they are excluded from the general set of finite elements. Thus, in the case of the formation of through cracks, the removal of finite elements is taken as a parameter to identify the onset of the limit state of loss of integrity. According to the results of the computational experiment, it was established that through cracks in a fragment of a reinforced concrete hollow slab are formed in 44 min. According to the results of the research, the method of evaluating the fire resistance of such structures based on the onset of the limit state of loss of integrity has been substantiated. Such a method could be applied during design, which provides an opportunity to determine the limit of fire resistance in reinforced concrete hollow slabs.

**Keywords:** fire resistance, integrity, hollow slab, combustion products, through cracks, finite element model.

## References

- Eisa, A. S., Aboul-Nour, L. A., El-Ghamry, A., Zelenáková, M., Katunský, D. (2024). Flexural behavior of two-layer reinforced concrete slab with hollow cores. *Advances in Mechanical Engineering*, 16 (2). <https://doi.org/10.1177/16878132231224940>
- Káta-Urbán, L., Cimer, Z., Lublőy, É. E. (2023). Examination of the Fire Resistance of Construction Materials from Beams in Chemical Warehouses Dealing with Flammable Dangerous Substances. *Fire*, 6 (8), 293. <https://doi.org/10.3390/fire6080293>
- Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Sidnei, S., Kostenko, T., Borysova, A., Samchenko, T. (2023). Increasing the Efficiency and Environmental Friendliness of Fire Resistance Assessment Tools for Load-Bearing Reinforced Concrete Building Structures. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24 (4), 138–146. <https://doi.org/10.12912/27197050/161923>
- Wang, Y., Bisby, L. A., Wang, T., Yuan, G., Baharudin, E. (2018). Fire behaviour of reinforced concrete slabs under combined biaxial in-plane and out-of-plane loads. *Fire Safety Journal*, 96, 27–45. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.12.004>
- Nuianzin, O., Pozdieiev, S., Hora, V., Shvydenko, A., Samchenko, T. (2018). Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (93)), 21–27. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>
- Kildashti, K., Katwal, U., Tao, Z., Tam, V. (2024). Numerical simulation of steel-concrete composite beams and slabs at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 315, 118297. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118297>
- Drury, M. M., Quiel, S. E. (2023). Standard versus natural fire resistance for partially restrained composite floor beams: 2-Analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 202, 107767. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107767>
- Kassem, A. T. (2018). Deformations of R.C.Circular Slabs in Fire Condition. *Civil Engineering Journal*, 4 (4), 712. <https://doi.org/10.28991/cej-0309126>
- Wang, Y., Yuan, G., Huang, Z., Lyu, J., Li, Q., Long, B. (2018). Modelling of reinforced concrete slabs in fire. *Fire Safety Journal*, 100, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.005>
- Pozdieiev, S., Sidnei, S., Nekora, O., Subota, A., Kulitsa, O. (2023). Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. *Smart Technologies in Urban Engineering*, 447–457. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_40)
- World Fire Statistics. Available at: <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>
- Sidnei, S., Nuianzin, V., Kostenko, T., Berezovskyi, A., Wąsik, W. (2023). A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences*, 10 (2), D1–D7. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).d1](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).d1)
- Walls, R. S., Viljoen, C., de Clercq, H. (2018). Analysis of Structures in Fire as Simplified Skeletal Frames Using a Customised Beam Finite Element. *Fire Technology*, 54 (6), 1655–1682. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0762-7>
- Meschke, G., Macht, J., Lackner, R. (1998). A damage-plasticity model for concrete accounting for fracture-induced anisotropy. Computational modelling of concrete structures: Proceedings of the EURO-C 1998 Conference on Computational Modelling of Concrete Structures. Badgastein.
- Klemczak, B. (2007). Adapting of the willam-warnke failure criteria for young concrete. *Archives of Civil Engineering*, 53, 323–339.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310241

**DETERMINING THE EFFECT OF LONGITUDINAL STIFFENERS ON THE DEFORMATION OF MULTILAYER ELLIPSOIDAL SHELLS UNDER NON-STATIONARY LOADS (p. 78–88)**

Yuliia Meish

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-700X>

Maryna Belova

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0546-8094>

Nataliia Maiborodina

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1754-6790>

Viacheslav Gerasymenko

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4017-1141>

The object of this study is the deformation of multilayer ellipsoidal shells under non-stationary distributed load. It is proposed to reinforce the shell with longitudinal stiffeners to enhance the strength of it. The application of Timoshenko's theory of shells and cores enabled the investigation of the influence of longitudinal stiffeners on the deformation of multilayer ellipsoidal shells under non-stationary loads with the discrete positioning of the stiffeners. A mathematical model of shell oscillations under various types of short-term non-stationary

loads was based on the Hamilton-Ostrogradsky variational principle. The numerical algorithm based on the application of the integral-interpolation approach to the construction of finite difference schemes in spatial coordinates, combined with an explicit finite-difference scheme for the time coordinate, was used to solve the task set.

It has been determined that reinforcing stiffeners significantly affect the deformed state of the multilayer ellipsoidal shell. The “shell-stiffeners” relation was taken into account as a base for research. The maximum deformation  $\varepsilon_{11}$  of the smooth three-layer ellipsoidal shell was on average 1.4 times greater than the deformation  $\varepsilon_{11}$  of the reinforced three-layer ellipsoidal shell throughout the entire studied time interval. It was determined that over time the presence of reinforcing stiffeners has a more significant impact on the deformed state of the reinforced ellipsoidal shell.

A distinctive feature of this research is the consideration of the discrete placement of reinforcing stiffeners which made it possible to investigate the impact of longitudinal stiffeners on the deformation of multilayer ellipsoidal shells under non-stationary loads.

The results could be used for the investigation of applied problems in research organizations and design bureaus when designing shell structures.

**Keywords:** three-layer shells, forced oscillations, non-stationary load, reinforcing stiffeners, numerical algorithm.

#### References

- Avramov, K. V., Uspenskiy, B. V., Urniaieva, I. A., Breslavskiy, I. D. (2023). Bifurcations and Stability of Nonlinear Vibrations of a Three-Layer Composite Shell with Moderate Amplitudes. *Journal of Mechanical Engineering*, 26 (2), 6–15. <https://doi.org/10.15407/pmach2023.02.006>
- Song, J.-P., She, G.-L., He, Y.-J. (2024). Nonlinear forced vibration of axially moving functionally graded cylindrical shells under hygro-thermal loads. *Geomechanics and Engineering*, 36 (2), 99–109. <https://doi.org/10.12989/gae.2024.36.2.099>
- Salenko, O., Drahobetskiy, V., Symonova, A., Onishchenko, E., Kostenko, A., Tsurkan, D., Vasiukov, D. (2024). Damage Behavior of Multilayer Axisymmetric Shells Obtained by the FDM Method. *Journal of Engineering Sciences*, 11 (1), D27–D35. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).d4](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).d4)
- Gulizzi, V., Benedetti, I., Milazzo, A. (2024). High-order accurate transient and free-vibration analysis of plates and shells. *Journal of Sound and Vibration*, 587, 118479. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118479>
- Sun, J., Ni, Y., Gao, H., Zhu, S., Tong, Z., Zhou, Z. (2019). Torsional Buckling of Functionally Graded Multilayer Graphene Nanoplatelet-Reinforced Cylindrical Shells. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20 (01), 2050005. <https://doi.org/10.1142/s0219455420500054>
- Sun, J., Zhu, S., Tong, Z., Zhou, Z., Xu, X. (2020). Post-buckling analysis of functionally graded multilayer graphene platelet reinforced composite cylindrical shells under axial compression. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 476 (2243). <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0506>
- Tao, C., Dai, T. (2021). Postbuckling of multilayer cylindrical and spherical shell panels reinforced with graphene platelet by isogeometric analysis. *Engineering with Computers*, 38 (S3), 1885–1900. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01360-4>
- Liu, Z., Wu, X., Yu, M., Habibi, M. (2020). Large-amplitude dynamical behavior of multilayer graphene platelets reinforced nanocomposite annular plate under thermo-mechanical loadings. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 50 (11), 3722–3746. <https://doi.org/10.1080/15397734.2020.1815544>
- Shiyekar, S. M. (2024). Analytical and Numerical Investigations of Multilayered Sandwich Structures under Static and Dynamic Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1326 (1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012032>
- Guarino, G., Gulizzi, V., Milazzo, A. (2022). Accurate Multilayered Shell Buckling Analysis via the Implicit-Mesh Discontinuous Galerkin Method. *AIAA Journal*, 60 (12), 6854–6868. <https://doi.org/10.2514/1.j061933>
- Rahnama, M., Hamzeloo, S. R., Morad Sheikhi, M. (2024). Vibration analysis of anisogrid composite lattice sandwich truncated conical shells: Theoretical and experimental approaches. *Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/00219983241264364>
- Monge, J. C., Mantari, J. L., Arciniega, R. A. (2022). 3D semi-analytical solution of hygro-thermo-mechanical multilayered doubly-curved shells. *Engineering Structures*, 256, 113916. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113916>
- Brischetto, S., Torre, R. (2018). Thermo-elastic analysis of multilayered plates and shells based on 1D and 3D heat conduction problems. *Composite Structures*, 206, 326–353. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.042>
- Taati, E., Rastian, V., Fallah, F. (2024). Nonlinear geometric fluid-structure interaction model of multilayered sandwich plates in contact with unbounded or bounded fluid flow. *Ocean Engineering*, 292, 116559. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116559>
- Meish, V. F., Meish, Yu. A., Maiborodina, N. V., Storozhuk, E. A. (2023). Deformation of Three-Layer Ellipsoidal Shells Reinforced with Longitudinal Ribs Under Non-Stationary Loading. *International Applied Mechanics*, 59 (3), 292–303. <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01221-1>
- Meish, V. F., Maiborodina, N. V. (2008). Nonaxisymmetric vibrations of ellipsoidal shells under nonstationary distributed loads. *International Applied Mechanics*, 44 (9), 1015–1024. <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0117-7>
- Meish, V. F., Maiborodina, N. V. (2008). Analysis of the nonaxisymmetric vibrations of flexible ellipsoidal shells discretely reinforced with transverse ribs under nonstationary loads. *International Applied Mechanics*, 44 (10), 1128–1136. <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0125-7>
- Maiborodina, N. V., Meish, V. F. (2013). Forced Vibrations of Ellipsoidal Shells Reinforced with Transverse Ribs Under a Nonstationary Distributed Load. *International Applied Mechanics*, 49 (6), 693–701. <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0603-9>
- Meish, V. F., Maiborodina, N. V. (2018). Stress State of Discretely Stiffened Ellipsoidal Shells Under a Nonstationary Normal Load. *International Applied Mechanics*, 54 (6), 675–686. <https://doi.org/10.1007/s10778-018-0922-y>
- Meish, V. F., Meish, Yu. A., Maiborodina, N. V., Herasymenko, V. P. (2022). Dynamic Behavior of Ellipsoidal Sandwich Shells Under Nonstationary Loads. *International Applied Mechanics*, 58 (2), 170–179. <https://doi.org/10.1007/s10778-022-01144-3>

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308905

### ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ДАХУ КРИТОГО ВАГОНА З КАРКАСОМ У ВИГЛЯДІ ТРИКУТНОЇ АРКИ (с. 6–13)

А. О. Ловська, І. І. Становська, І. В. Прокопович, І. І. Сидоренко, А. О. Мурад'ян

Об'єктом дослідження є процеси сприйняття та перерозподілу навантажень в даху критого вагона з каркасом у вигляді трикутної арки.

Для зменшення тари критого вагона пропонується удосконалення конструкції його даху. Особливістю даного удосконалення є те, що каркас даху виконаний у вигляді трикутної арки з підсилюючим поясом. Це сприяє зменшенню загальної маси даху у порівнянні з типовою конструкцією. Вибір профілів виконання балок, що утворюють арку, проведено за максимальними значеннями моментів, які діють в їх перерізі. З урахуванням обраного профілю виконання арок здійснено розрахунок даху на міцність при сприйнятті ним вертикальних навантажень. Встановлено, що міцність даху при розглянутих схемах навантажень дотримується в межах допустимих значень напружень. Оскільки удосконалення конструкції даху сприяє зменшенню його маси у порівнянні з прототипом на 1,8 %, то проведено оцінку ходу критого вагона за умови руху у порожньому стані. Для цього здійснено математичне моделювання навантаженості критого вагона у вертикальній площині при його русі стиковою нерівністю. На підставі проведеного розрахунку встановлено, що рух вагона оцінюється як «добрий».

Особливість отриманих результатів полягає у тому, що зменшення тари несучої конструкції вагона досягається шляхом удосконалення його даху, як найменш навантаженого вузла.

Сфера практичного застосування отриманих результатів – залізничний транспорт, в тому числі, і інші галузі машинобудування. Умовами практичного використання результатів є симетрична схема навантаження даху в експлуатації.

Результати даного дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування сучасних конструкцій вантажних вагонів з покращеними техніко-економічними показниками.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, критий вагон, дах вагона, навантаженість даху, міцність даху.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309874

### ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПОВЕДІНКИ ШИРИНИ ТРІЩИН КОНСТРУКЦІЇ ОДНОБЕТОННОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ ЗА РІЗНОЇ ПЛОЩІ СТАЛЕВОГО АРМУВАННЯ (с. 14–20)

Wisnumurti, Bhondana Bayu Brahmata Kridaningrat, Agoes Soehardjono, Devi Nuralinah

У цій публікації представлено оціночне дослідження граничних станів тріщин на основі проектних кодів і попередніх досліджень. Його головна мета – зв'язати результати досліджень із загальними кодами проектування. Дослідники продовжують стикатися зі складною дилемою, коли йдеться про руйнування залізобетонних конструкцій, особливо в односторонніх конструкціях плит, де все ще є значні пошкодження та корозія в арматурі через тріщини. Практикам буде легше побудувати ці конструкції та вирішити проблему довговічності плити, якщо буде знайдено відповідну формулу. На основі цього дослідження запропоновано метод оцінки формули максимальної ширини руйнування в односторонніх залізобетонних плитах із змінною сталеву площею. Плити використовують різні сталеві площі, включаючи 1000 мм<sup>2</sup>, 1200 мм<sup>2</sup> та 1400 мм<sup>2</sup>. Випробувальні зразки мають однакову довжину 2 метри та ширину плити 0,6 метра зі сталевим армуванням. Відповідно до існуючих даних, формула для прогнозування має вигляд  $w_{\max(\text{prop})} = 1.5 \cdot 10^{-2} f_s A_s^{-0.4}$ , але виявляється, що на максимальну ширину тріщини суттєво не впливає площа сталі ( $A_s$ ). Загалом результати двох методів, використаних у цьому дослідженні, збігаються із запропонованою формулою та спостережуваним експериментальним тестуванням. Ці дані вказують на те, що максимальна ширина руйнування була значно зменшена завдяки збільшенню сталеві площі ( $A_s$ ) залізобетонної плити, що призвело до визначення експериментальної формули  $w_{\max(\text{exp})} = 0.11 f_s A_s^{0.630}$ . У результаті була розроблена унікальна формула наближення для оцінки впливу параметрів площі сталі для чистих плит за формулою максимальної ширини тріщини для односторонніх залізобетонних плит. Ця формула ширини тріщини на практиці застосовна лише до односторонніх плит.

**Ключові слова:** згинальний елемент, ширина тріщини, одностороння плита, залізобетон, площа сталі.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309656

### ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЗМУ ГЕНЕРУВАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ ТИСКУ В ДРОСЕЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ ПРИ ВИСОКОНАПІРНОМУ ДРОСЕЛЮВАННІ РІДИНИ (с. 21–31)

Т. В. Тарасенко, В. М. Бадах, М. Г. Макаренко, П. В. Лук'янов, І. В. Дубковецький

Об'єктом дослідження є процес генерування кавітаційних коливань тиску за дросельним пристроєм при високонапірному дроселюванні рідини. В роботі вирішувалась проблема розрахунку розмаху кавітаційних коливань тиску при високонапірному дроселюванні рідини. Встановлено, що кавітаційні коливання тиску є наслідком співударянь дискретних мас транзитного струменю рідини у області відновлення тиску. Розмах кавітаційних коливань тиску досягає значень тиску на вході в дросельний пристрій. Смуга частот кавітаційних коливань тиску знаходиться в межах від 1,5–20 кГц і вище. При високонапірному дроселю-

ванні рідини утворюються приєднані каверни до поверхні дросельного каналу, каверни, що переміщуються і дрібні бульбашки у транзитному потоці. Каверни, що переміщуються, стискають транзитний потік і ділять його на окремі блоки рідини. У області відновлення тиску відбувається захоплення каверн, що переміщуються і співударяння дискретних блоків рідини. Це спричиняє високочастотні коливання тиску. Особливостями отриманих результатів є можливість оцінки розмаху кавітаційних коливань тиску в залежності від перепаду тиску на дросельному пристрої. При збільшенні протитиску на дросельному пристрої амплітуда кавітаційних коливань тиску зменшується і смуга частот зміщується у високочастотну область. Отримані результати дозволяють розрахувати розмах кавітаційних коливань, спрогнозувати розвиток кавітаційної ерозії матеріалів в залежності від параметрів дроселювання робочої рідини. Результати роботи використовуються при розробці апаратів для очищення виробів від забруднень, для визначення об'ємного вмісту води у авіаційному паливі, для інтенсифікації технологічних процесів у хімічній і харчовій промисловостях.

**Ключові слова:** кавітаційна течія, пульсації тиску, перепад тиску, дискретний струмінь, високонапірне дроселювання.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308937**

### **МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ ЕЛЕМЕНТА ОБЛАДНАННЯ БЛОКУ ОЧИСТКИ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ (с. 32–40)**

**Т. О. Суржко, П. О. Молчанов, С. А. Гудзь, М. І. Книш, Ю. А. Срібна, Л. О. Гриценко, В. М. Титаренко, В. М. Савик, В. П. Рубель**

Об'єктом дослідження є елемент обладнання вібраційного сита, що являє собою активний робочий орган у вигляді пластини.

Ключовим елементом у системі блоку очищення промивальної рідини є вібраційне сито. Базова конструкція сита не дозволяє розподілити промивальний розчин рівномірно по всій робочій поверхні. Зосередженість бурового розчину в центральній частині обладнання призводить до передчасного абразивного зносу та виходу з ладу робочого елемента. Тому будова вібраційного сита потребує вдосконалення для подовження його терміну служби. Дана задача була розв'язана за рахунок введення в конструкцію активного елемента для перерозподілу розчину за рахунок додаткових поперечних коливань.

Використання такого активного елемента є важливим етапом для покращення якості та ефективності системи очищення, що може оптимізувати виробничі процеси та зниження витрат у промисловості.

Враховання поперечних коливань і розрахунок частотних параметрів допоможуть удосконалити конструкцію та продуктивність використовувати вібраційне сито.

Було виконано аналіз частот коливань активного елемента-пластини для очищення промивальної рідини вібраційним ситом і проведено порівняння отриманих аналітично результатів з даними моделювання методом скінченних елементів у програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics. Отримані результати є основою для розроблення вібраційних сит, та проведення експериментальних і промислових їх досліджень та випробувань. Проведені комп'ютерні дослідження підтвердили можливість використання вдосконаленої конструкції вібраційного сита. Провівши порівняння результатів розрахунку та комп'ютерного моделювання була визначена похибка яка знаходилася в межах 5 %.

Отримані закономірності дадуть можливість підбирати частоти коливань пластин залежно від відомих вихідних параметрів, що стане у нагоді для вирішення подібних задач.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, математичне дослідження, блок очистки, графічні зображення, вібросито, частота.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309708**

### **ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОШВИДКІСНОГО БЕЗПЛОТНОГО МОРСЬКОГО WIG-КОРАБЛЯ (с. 41–46)**

**А. Ю. Дреус, С. В. Алексєєнко, В. Є. Некрасов**

Об'єктом дослідження даної роботи є аеродинамічні процеси під час руху безпілотного літального апарату, що рухається низько над підстилаючою поверхнею. Відомо, що ефект присутності поверхні, або екранний ефект, дозволяє підвищити аеродинамічну якість літального апарату, що низько летить. Проте даний ефект найвідчутніше проявляється для суден великих розмірів. Безпілотні апарати зазвичай характеризуються відносно невеликою геометрією. В представленій роботі досліджено аеродинамічні процеси під час польоту малорозмірного апарату з динамічним принципом підтримки над поверхнею. Розглянуто конкретний прототип такого безпілотного апарату, що був запропонований авторами. Метою роботи є оцінка аеродинамічних сил, що впливають на малорозмірний безпілотний високошвидкісний апарат, що використовує динамічний принцип підтримки над поверхнею (WIG-корабель), за допомогою CFD моделювання. На відмінну від більшості відомих досліджень екранного ефекту, в даній роботі використовувалась 3D постановка задачі. На основі обчислювальних експериментів виконано візуалізацію фізичних полів навколо літального апарату під час руху над екраном. Визначено вплив відстані від поверхні на аеродинамічні характеристики силу малорозмірного літального апарату та висоту ефективної зони впливу екранного ефекту на малорозмірний WIG-корабель, що розглядається, в межах  $0.3 \leq \bar{h} \leq 0.7$ . Показано, що наближення до поверхні призводить до зміщення центру тяжіння апарату, що призводить до зміни аеродинамічного моменту. Дане явище має бути враховано під час розробки системи керування, для забезпечення стійкого польоту. Результати дослідження мають безпосередній інтерес з точки зору створення безпілотних апаратів нового типу, що використовують динамічний принцип підтримки над поверхнею.

**Ключові слова:** аеродинаміка транспортних засобів, малорозмірний WIG – апарат, CFD моделювання, безпілотні системи, екранний ефект.



DOI: 10.15587/1729-4061.2024.308904

**ВИЯВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАНДАРТНОЇ ПЛАСТИКОВОЇ ЄМНОСТІ ДЛЯ РІДКИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ (с. 47–59)**

Vitaliy Tyukanko, Alexandr Demyanenko, Vladislav Semenyuk, Dmitry Alyoshin, Stanislav Brilkov, Sergey Litvinov, Tatyana Shirina, Erlan Akhmetzhanov

У даному дослідженні за допомогою методу імовірно-детермінованого планування (ІДП) визначено оптимальні конструктивні параметри стандартної поліетиленової ємності, що використовується в усьому світі для перевезення рідких мінеральних добрив (РМД).

За допомогою методу скінчених елементів вивчено вплив щільності рідкого мінерального добрива, товщини стінки резервуара та чотирьох режимів руху ємностей (гальмування, прискорення, стрибок і приземлення) на міцність стандартних поліетиленових ємностей. За результатами дослідження виявлено п'ять найбільш інформативних місць у конструкції ємності, для яких отримано значення максимальних напружень ( $\sigma_{\max}$ ): горловина, кишені, стінки, місця врізки кранів і перехід стінки в дах ємності. При збільшенні щільності РМД  $\sigma_{\max}$  у ємності лінійно зростають. Збільшення товщини стінки ємності в 1,5 рази знижує максимальні напруження від 30 до 50 %. Встановлено, що режим руху має значний вплив на напружено-деформований стан стандартної ємності. Найбільш «важким» режимом для стандартної ємності є «гальмування». Режим руху «прискорення» викликає  $\sigma_{\max}$  не більше 60 % від значень, характерних для режиму «гальмування». Найбільш «легким» режимом є «приземлення», при якому  $\sigma_{\max}$  становить не більше 28 % відносно «гальмування». На основі методу ІДП виведено рівняння для розрахунку максимальних напружень у залежності від щільності РМД, товщини стінки та режиму руху ємності. Побудовано номограми, що дозволяють швидко без розрахунків визначити товщину стінки стандартної ємності, залежно від зовнішніх факторів. Результати дослідження можуть бути використані на практиці при проектуванні безпечних і довговічних резервуарів для перевезення рідких мінеральних добрив.

**Ключові слова:** пластикова ємність, метод скінчених елементів, розрахунок міцності, товщина стінки, режими руху ємності, ротаційне формування, ротомолдинг

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.309867

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БАЛАНСУВАННЯ РОТОРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА БАЛАНСУВАЛЬНОМУ СТАНКУ (с. 60–69)**

Я. В. Шостак, О. А. Головащенко, Ю. О. Решетніков, В. П. Ткаченко

Об'єктом дослідження є процес динамічного балансування роторів на балансувальному станку в процесі відновлення електричних машин.

Робота спрямована на підвищення якості балансування роторів в процесі капітального ремонту тягових електродвигунів електропоїздів. Вирішується проблема якості балансування роторів електричних машин на стаціонарних балансувальних станках. Відповідно до традиційної технології балансування ротор, що балансується, встановлюється на опори балансувального станка опорними поверхнями, які, як правило, мають механічні дефекти. Ці дефекти через особливості технології ремонту роторів не можуть бути усунуті шляхом механічної обробки. Проведено теоретичні і експериментальні дослідження впливу пошкоджень опорних поверхонь ротора на параметри балансування. Доведено, що властивості опорних поверхонь ротора при його балансуванні на балансувальному станку суттєво впливають на результати визначення дисбалансу. При цьому різниця значень мас балансувальних вантажів може досягати 25 %. Це пояснюється тим, що пошкодження опорних поверхонь ротора створюють хибні сигнали, що не мають відношення до дисбалансу.

Для підвищення точності визначення мас балансувальних вантажів при балансуванні ротора пропонується удосконалення технологічного процесу балансування. Удосконалення полягає у включенні частотного фільтру у ланцюг перетворення сигналів датчиків прискорень. Фільтр призначений для відокремлення сигналів з частотою більшою, ніж обертова частота ротора.

Умовою практичного застосування результатів дослідження є доцільність введення у принципову схему балансувального станка частотного фільтру сигналів датчиків прискорень з пороговою частотою фільтрації сигналів, що перевищує обертову частоту ротора.

**Ключові слова:** залізничний транспорт, вібрації електричних машин, дисбаланс, механічне балансування роторів, балансувальний станок.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310520

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ УТВОРЕННЯ НАСКРІЗНИХ ТРІЩИН У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОРОЖНИСТИХ ПЛИТАХ ПРИ ВПЛИВІ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ (с. 70–77)**

С. О. Сідней, О. М. Мирошник, А. І. Ковальов, Р. Б. Веселівський, К. В. Григоренко, Т. М. Шналь, І. Р. Мацик

Об'єктом дослідження є вогнестійкість залізобетонних порожнистих плит при настанні граничного стану втрати цілісності. Досліджувалась проблема точного моделювання утворення та розвитку тріщин у бетоні.

У роботі представлено аналіз результатів напружено-деформованого стану залізобетонної порожнистої плити під час впливу пожежі для розробки методу оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану втрати цілісності.

Згідно з EN 1992-1-2, визначення вогнестійкості конструкцій передбачено розрахунковими методами, однак для залізобетонних порожнистих плит перекриття така методика відсутня. Багато наукових робіт пропонують уточнені методи оцінювання лише

втрати несучої та теплоізолювальної здатностей, залишаючи без уваги питання втрати цілісності. Таким чином, це може призвести до необ'єктивної оцінки залізобетонних порожнистих плит перекриття за критерієм граничного стану втрати цілісності, що в свою чергу може поставити під загрозу пожежну безпеку будівель, що загрожує життю та здоров'ю людей.

За результатами проведеного розрахунку визначений параметр, за яким встановлюється настання граничного стану з вогнестійкості, зокрема втрата цілісності. Узагальнюючи розподіли ушкоджень, було прийнято, що у разі досягнення критичної пластичної деформації  $2,5e-3$  у скінченних елементів бетону, вони виключаються із загального комплексу скінченних елементів. Таким чином, у разі утворення наскрізних тріщин видалення скінченних елементів приймається як параметр для ідентифікації настання граничного стану втрати цілісності. За результатами обчислювального експерименту встановлено, що наскрізні тріщини у фрагменті залізобетонної порожнистої плити утворюються на 44 хв. За результатами проведених досліджень обґрунтовано метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану втрати цілісності. Такий метод може бути застосований під час проектування, що надає можливість визначити межу вогнестійкості у залізобетонних порожнистих плит.

**Ключові слова:** вогнестійкість, цілісність, порожниста плита, продукти згорання, наскрізні тріщини, скінченно-елементна модель.

DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310241

## ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПОЗДОВЖНІХ РЕБЕР НА ДЕФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ЕЛІПСОЇДАЛЬНИХ ОБОЛОНОК ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ (с. 78–88)

Ю. А. Мейш, М. О. Белова, Н. В. Майбородіна, В. П. Герасименко

Об'єктом дослідження є деформації багатошарових оболонок при дії нестационарного розподіленого навантаження. Для підвищення міцності оболонки запропоновано підкріпити їх поздовжніми ребрами. Використання теорії оболонок і стержнів типу Тимошенка дозволило дослідити вплив поздовжніх ребер на деформації багатошарових еліпсоїдальних оболонок при нестационарних навантаженнях, з врахуванням дискретності розміщення ребер. На основі варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського побудовано математичну модель коливань оболонки при дії на неї різного виду короточасних нестационарних навантажень. Чисельний алгоритм, що ґрунтується на застосуванні інтегро-інтерполяційного методу побудови скінченно-різницевої схеми по просторовим координатам та явної скінченно-різницевої схеми по часовій координаті, дозволив одержати розв'язок поставленої задачі.

На основі побудованих залежностей «оболонка-ребра» встановлено, що підкріплюючі ребра значно впливають на деформований стан багатошарової еліпсоїдальної оболонки. На всьому досліджуваному часовому інтервалі, максимальна деформація  $\varepsilon_{11}$  гладкої тришарової еліпсоїдальної оболонки була більша в середньому 1,4 рази від деформації  $\varepsilon_{11}$  підкріпленої тришарової еліпсоїдальної оболонки. Визначено, що з плином часу наявність підкріплюючих ребер має більший вплив на деформований стан підкріпленої еліпсоїдальної оболонки.

Особливістю даного дослідження є врахування дискретності розміщення підкріплюючих ребер, що дозволило дослідити вплив поздовжніх ребер на деформування багатошарових еліпсоїдальних оболонок при нестационарних навантаженнях.

Отримані результати може бути використані для дослідження прикладних задач в науково-дослідних організаціях та конструкторських бюро при проектуванні оболонкових конструкцій.

**Ключові слова:** тришарові оболонки, вимушені коливання, нестационарне навантаження, підкріплені ребрами, чисельний алгоритм.