

*М.С. МАНІЛІЧ, О.І. ТРУБАЄВ***ОГЛЯД ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ ЕЛЕВАТОРНИХ СПОРУД З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ СИЛОС - ЗЕРНО**

У статті розглянуто історичний розвиток конструктивних рішень силосних та бункерних споруд, а також еволюцію наукових підходів до моделювання взаємодії сипучих тіл із конструкціями. Відзначено, що формування сучасних уявлень про розподіл тиску в зернових сховищах бере свій початок від класичної моделі Янсена, яка стала фундаментом для подальших досліджень у галузі інженерної механіки сипучих матеріалів. Подальша еволюція нормативної бази – від національних інструкцій та галузевих документів до вимог Єврокоду – супроводжувалася врахуванням численних експериментальних результатів та введенням емпіричних коефіцієнтів, що дозволяють відображати реальні ефекти, недоступні для аналітичних розв'язків класичного типу.

Особлива увага приділена сучасній узагальнюючій моделі українського науковця Баннікова, яка пропонує універсальний підхід до визначення взаємодії «споруда-сипуче тіло» без необхідності чіткого розмежування на бункери та силоси. Такий метод дає змогу коректніше описувати перехідні режими роботи сховищ та уникати спрощень, властивих традиційним підходам. Наведено результати низки експериментальних досліджень, спрямованих на визначення нормальних і дотичних тисків у різних режимах роботи – як у статичному, так і в динамічному завантаженні, включно з ефектами пульсацій, нерівномірного спрацювання та локальних перевантажень.

Окремо висвітлено сучасні чисельні методи аналізу, серед яких метод дискретних елементів (DEM) та метод скінченних елементів (FEM). Вказано на суттєві відмінності між ними: DEM дозволяє моделювати поведінку окремих часток, тоді як FEM відображає безперервне середовище конструкції, що зумовлює обмеження і сфери застосування кожного методу. Показано, що перспективним є інтеграція цих підходів та їх подальший розвиток у напрямку узагальнення моделей статичного стану для динамічних режимів роботи, що досі залишаються найменш формалізованими та найскладнішими для опису.

На тлі зростаючого дефіциту потужностей для зберігання зерна особливу увагу приділено експлуатаційним проблемам силосних споруд, життєвий цикл яких вичерпано або наближається до завершення. Уточнення сучасних моделей взаємодії сипучого матеріалу зі стінками сховищ змушує переоцінити точність розрахунків для масових силосних корпусів зі збірною залізобетону, зведених за застарілими нормативами. Нові ринкові вимоги вимагають більш інтенсивних режимів експлуатації, що підвищує ризик появи пошкоджень, тріщинотворення та аварійних ситуацій.

З метою підвищення надійності пропонується поєднати оцінку напружено-деформованого стану зі специфічними технологічними вимогами певного підприємства. Такий комплексний підхід, який враховує реальний технічний стан споруди, властивості матеріалу та режими завантаження, дасть змогу оптимізувати розміщення продукції в процесі складського зберігання зерна й забезпечити раціональні умови експлуатації силосних споруд.

Ключові слова: Силос, сипуче тіло, зерно, напружено-деформований стан, модель.

The article reviews the historical development of structural design for silo and bunkers, as well as the evolution of scientific approaches to modeling bulk material structure interaction. It is noted that the formation of modern ideas about the pressure distribution in grain storages originates from the classical Jansen model, which became the foundation for further research in the field of engineering mechanics of bulk materials. The further evolution of the regulatory framework - from national instructions and industry documents to the requirements of the Eurocode - was accompanied by the consideration of numerous experimental results and the introduction of empirical coefficients that allow reflecting real effects that are inaccessible to analytical solutions of the classical type.

Special attention is paid to the modern generalizing model of the Ukrainian scientist Bannikov, which offers a universal approach to determining the interaction of "structure-bulk body" without the need for a clear distinction between bunkers and silos. This method allows for a more correct description of the transient conditions during filling and discharge conditions of operation of storages and to avoid simplifications inherent in traditional approaches. The results of a number of experimental studies aimed at determining normal and tangential pressures in various operating modes - both static and dynamic loading, including the effects of pulsations, uneven operation and local overloads are presented.

Modern numerical methods of analysis are separately highlighted, including the discrete element method (DEM) and the finite element method (FEM). Significant differences between them are indicated: DEM allows modeling the behavior of individual particles, while FEM reflects the continuous environment of the structure, which determines the limitations and scope of each method. It is shown that the integration of these approaches and their further development in the direction of generalizing static state models for dynamic operating modes, which still remain the least formalized and most difficult to describe, is promising.

Against the background of the growing shortage of grain storage capacities, special attention is paid to the operational problems of silo structures, the life cycle of which has been exhausted or is approaching completion. Refinement of modern models of interaction of bulk material with storage walls forces to reassess the accuracy of calculations for mass silo buildings made of precast reinforced concrete, erected according to outdated standards. New market requirements require more intensive operating modes, which increases the risk of damage, cracking and emergency situations. In order to increase reliability, it is proposed to combine the assessment of the stress-strain state with the specific technological requirements of a particular enterprise. Such a comprehensive approach, which takes into account the real technical condition of the structure, material properties and loading modes, will allow to optimize the placement of products in the process of grain storage and ensure rational operating conditions of silo structures.

Keywords: Silo, bulk material, grain, stress-strain state, modelling.

Список літератури

1. Гавриленко Н., Широкий Г. Світовий ринок зерна: стан та тенденції : аналіт. доп. / Національний інститут стратегічних досліджень. – 2022. – URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-02/rynok-zerna_gavrylenko_0422022.pdf [дата звернення: 03.12.2025].
2. АПК-Інформ. В Україні набувається дефіцит сучасних елеваторних потужностей // *Інформаційно-аналітичне агентство «АПК-Інформ»*. – 2018. – 14 серпня. – URL: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1100055> [дата звернення: 03.12.2025].
3. LCDM Corporation. The History and Evolution of Grain Storage. – 2024. – 15 березня. – URL: <https://lcdmcorp.com/grain-flow-101/the-history-and-evolution-of-grain-storage/> [дата звернення: 03.12.2025].
4. Match F., Steen H. The Story of Americas First Silo // *The Prairie Farmer*. – 1922. – 28 Jan. – P. 3. – URL: <https://idnc.library.illinois.edu/?a=d&d=PFR19220128.2.4> [дата звернення: 03.12.2025].
5. Janssen H. A. Versuche uber getreidedruck in silozellen // *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*. – 1895. – Vol. 39, No. 35. – P. 1045–1049.
6. Бібік М. В., Бібік В. М., Бібік І. О. Класифікація силосних зернохранилищ // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – 2014. – Вип. 1 (40). – С. 157–165.
7. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах : учеб. пособие / И. В. Горюшинский, В. М. Сидоров, А. П. Литвинов ; под общ. ред. И. В. Горюшинского. – Самара : СамГАПС, 2003. – 232 с.
8. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 Єврокод 1: Впливи на конструкції. Частина 4. Силоси та резервуари (EN 1991-4:2006, IDT). – [Чинний від 2013-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. – IV, 98 с. – (Національний стандарт України).
9. СНиП 2.10.05-85. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна : введ. 01.01.1986. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 49 с.
10. Банніков Д. О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції : моногр. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2009. – 171 с.
11. СНиП II-21-75. Бетонные и железобетонные конструкции : введ. 01.01.1977. – М. : Стройиздат, 1976. – 87 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками : [Чинний від 2011-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – IV, 23 с. – (Національний стандарт України).
13. ДСТУ Б В.2.7-223:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за зразками, відібраними з конструкцій : [Чинний від 2011-01-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. – IV, 15 с. – (Національний стандарт України).
14. ДБН В.1.2-14:2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : [Чинний від 2011-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 31 с.
15. Пособие П 1-98 к СНиП 2.03.01-84*. Усиление железобетонных конструкций. – Минск : НИИС, 1998. – 245 с.
16. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : [Чинний від 2011-07-01]. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 73 с.
17. Maraveas C. Concrete Silos: Failures, Design Issues and Repair / Strengthening Methods // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 11. – P. 3938. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113938>.
18. Maraveas C., Bartzanas T. Sensors for Structural Health Monitoring of Agricultural Structures // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, No. 1. – P. 314. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s21010314>.
19. Warade A. R., Shende T. G. Analysis and Design of Long Concrete Silo Having Different Height and Diameter under Earthquake Effect // **National Conference on 'Advances in Engineering, Technology and Applied Sciences' – NCAETAS-2019** : зб. матер. конф. – 2019. – P. 1–10. – URL: <https://ijsrset.com/paper/5600.pdf> [дата звернення: 26.11.2023].
20. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов : учеб. пособие. – Барнаул : Алт. политехн. ин-т, 1986. – 84 с.
21. Gandia R. M., de Paula W. C., de Oliveira Junior E. A., Rodrigo G. H., Padin A. R., Vegas A. T., Gomes F. C., Rodriguez P. J. A. Effect of the Hopper Angle of a Silo on the Vertical Stress at the Cylinder-to-Hopper Transition // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, No. 4. – P. 830. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12040830>.
22. Silo filling simulation : відео / RockyDEM Simulator // *YouTube*. – 2020. – 26 лютого. – URL: <https://youtu.be/o8eo-9CVpQ8> [дата звернення: 03.12.2025].
23. Hilal A., Sanad A. M., Abdelbarr M. H., Ramadan O. M. O., Abdalla H. A. Three-Dimensional Finite Element Analysis for Pressure on Flexible Wall Silos // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 18. – P. 9251. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app12189251>.
24. Атрошенко О. О., Скріпченко Н. Б., Таран Ю. В., Фалько А. Л., Матвієнко Ю. І. Аналіз конструкційної міцності складених тонкостінних конструкцій з болтовим з'єднанням елементів // *Вісник НТУ "ХПІ"*. – 2016. – № 39 (1211). – С. 112–120.
25. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону : моногр. – Рівне : НУВГП, 2016. – 424 с.
26. Ларін О. І., Трубаєв О. І., Юдаєв В. В. Комп'ютерний аналіз міцності колон елеватора при різних варіантах навантаження (частина №1) // *Наукові нотатки : міжвуз. зб. наук. пр.* – 2018. – Вип. 63. – С. 98–106.
27. Ларін О. І., Трубаєв О. І., Юдаєв В. В. Комп'ютерний аналіз міцності колон елеватора при різних варіантах навантаження (частина №2) // *Наукові нотатки : міжвуз. зб. наук. пр.* – 2018. – Вип. 63. – С. 107–113.
28. Водка А. А., Ларін А. А., Трубаєв А. І., Бондаренко Ю. В., Мольський М. М., Бабенко А. С., Юдаєв В. В. Оцінка напруженого стану днищ силосов елеваторів, що перебувають в тривалій експлуатації, з урахуванням просадки колонн і фактичних фізико-механічних властивостей бетону // *Науковий вісник будівництва*. – 2016. – Т. 83, № 1. – С. 81–91.
29. Типовая документация на строительные системы изделий зданий и сооружений. Серия 3.702-1/79. Унифицированные сборные железобетонные конструкции силосных сооружений предприятий по хранению и переработке зерна. Выпуск 2. Сборные железобетонные колонны. Рабочие чертежи. / Держ. проект. ін-т ЦНДПромзернопроект; затверджено постановою Держбуду СРСР від 18.03.1981 №37. – М. : ЦТДП Держбуду СРСР, 1981. – 67 арк. крес.
30. Указания по повышению эксплуатационной надежности элеваторных сооружений / Держ. проект. ін-т ЦНДПромзернопроект ; арх. №7961/645. – М., 1978. – 45 с.
31. Троян В. В. Прогнозування параметрів тріщиноутворення бетонів для монолітних конструкцій // *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка: наук.-техн. зб.* – 2012. – Вип. 46. – С. 35–41.
32. Пішнінко О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій : навч. посіб. – Дніпро : ДНУЗТ, 2018. – 220 с.
33. Khalil M., Ruggieri S., Uva G. Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-of-the-Art and Recent Research Trends // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 6. – P. 3006. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063006>.
34. Світій І. М. Моделювання динаміки запасів зерна на хлібоприймальному підприємстві: концептуальна, математична та імітаційна моделі // *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. – 2018. – Т. 10, Вип. 1. – С. 58–63.

References (transliterated)

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Havrylenko, N. and Shyrokyi, H. (2022) <i>Svitovyi rynok zerna: stan ta tendentsii</i>. Kyiv: Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen. | <div style="text-align: right;"> Available at:
 https://niss.gov.ua/sites/default/files/2022-02/rynok- </div> |
|---|--|

- zerna_gavrylenko_0422022.pdf (Accessed: 3 December 2025).
2. APK-Inform (2018) *V Ukraini sposterihaetsia defitsyt suchasnykh elevatornykh potuzhnosti*, 14 August. Available at: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1100055> (Accessed: 3 December 2025).
 3. LCDM Corporation (2024) *The History and Evolution of Grain Storage*, 15 March. Available at: <https://lcdmcorp.com/grain-flow-101/the-history-and-evolution-of-grain-storage/> (Accessed: 3 December 2025).
 4. Match, F. and Steen, H. (1922) 'The Story of Americas First Silo', *The Prairie Farmer*, 28 January, p. 3. Available at: <https://idnc.library.illinois.edu/?a=d&d=PFR19220128.2.4> (Accessed: 3 December 2025).
 5. Janssen, H. A. (1895) 'Versuche uber getreidedruck in silozellen', *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 39(35), pp. 1045–1049.
 6. Bibik, M. V., Bibik, V. M. and Bibik, I. O. (2014) 'Klasyfikatsiia sylosnykh zernoskhovysch', *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*, 1(40), pp. 157–165.
 7. Horiushynskiy, I. V. (ed.) (2003) *Emkosti dlia sypuchykh hruzov v transportno-hruzovykh systemakh*. Samara: SamHAPS.
 8. DSTU-N B EN 1991-4:2012 (2012) *Yevrokod 1: Vplyvy na konstruktii. Chastyna 4. Sylosy ta rezervuary (Eurocode 1: Actions on structures. Part 4: Silos and tanks)*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
 9. SNiP 2.10.05-85 (1986) *Predpriatiia, zdaniia i sooruzheniia po khranenniui i pererabotke zerna*. Moscow: TsITP Gosstroia SSSR.
 10. Bannikov, D. O. (2009) *Sypuchy material v yemnisnii konstruktii*. Dnipropetrovsk: Nova ideolohiia.
 11. SNiP II-21-75 (1977) *Betonnnye i zhelezobetonnye konstruktii*. Moscow: Stroiizdat.
 12. DSTU B V.2.7-214:2009 (2010) *Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnyy zrazkamy*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
 13. DSTU B V.2.7-223:2009 (2010) *Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za zrazkamy, vidibranymi z konstruktii*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
 14. DBN V.1.2-14:2009 (2011) *Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktii ta osnov*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
 15. Posobie P 1-98 k SNiP 2.03.01-84* (1998) *Usylenie zhelezobetonnykh konstruktii*. Minsk: NIIS.
 16. DBN V.2.6-98:2009 (2011) *Betonn i zalizobetonni konstruktiiyi. Osnovni polozhennia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.
 17. Maraveas, C. (2020) 'Concrete Silos: Failures, Design Issues and Repair/Strengthening Methods', *Applied Sciences*, 10(11), p. 3938. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10113938>.
 18. Maraveas, C. and Bartzanas, T. (2021) 'Sensors for Structural Health Monitoring of Agricultural Structures', *Sensors*, 21(1), p. 314. Available at: <https://doi.org/10.3390/s21010314>.
 19. Warade, A. R. and Shende, T. G. (2019) 'Analysis and Design of Long Concrete Silo Having Different Height and Diameter under Earthquake Effect', in **Proceedings of the National Conference on Advances in Engineering, Technology and Applied Sciences (NCAETAS-2019)**. Available at: <https://ijsrset.com/paper/5600.pdf> (Accessed: 26 November 2023).
 20. Hiachev, L. V. (1986) *Osnovy teorii bunkerov i sylosov*. Barnaul: Altai Polytechnic Institute.
 21. Gandia, R. M., de Paula, W. C., de Oliveira Junior, E. A., Rodrigo, G. H., Padin, A. R., Vegas, A. T., Gomes, F. C. and Rodríguez, P. J. A. (2022) 'Effect of the Hopper Angle of a Silo on the Vertical Stress at the Cylinder-to-Hopper Transition', *Agronomy*, 12(4), p. 830. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy12040830>.
 22. RockyDEM Simulator (2020) *Silo filling simulation*, 26 February. Available at: <https://youtu.be/o8eo-9CVpQ8> (Accessed: 3 December 2025).
 23. Hilal, A., Sanad, A. M., Abdelbarr, M. H., Ramadan, O. M. O. and Abdalla, H. A. (2022) 'Three-Dimensional Finite Element Analysis for Pressure on Flexible Wall Silos', *Applied Sciences*, 12(18), p. 9251. Available at: <https://doi.org/10.3390/app12189251>.
 24. Atroshenko, O. O., Skripchenko, N. B., Taran, Yu. V., Falko, A. L. and Matviienko, Yu. I. (2016) 'Analiz konstruktivnoi mitsnosti skladanykh tonkostinnykh konstruktii z boltovym ziednanniam elementiv', *Visnyk NTU "KhPI"*, 39(1211), pp. 112–120.
 25. Romashko, V. M. (2016) *Deformatsiino-sylova model oporu betonu ta zalizobetonu*. Rivne: NUVHP.
 26. Larin, O. I., Trubaiev, O. I. and Yudaiev, V. V. (2018) 'Komp'iuternyi analiz mitsnosti kolon elevatora pry ryznykh variantakh navantazhennia (chastyna №1)', *Naukovi notatky*, 63, pp. 98–106.
 27. Larin, O. I., Trubaiev, O. I. and Yudaiev, V. V. (2018) 'Komp'iuternyi analiz mitsnosti kolon elevatora pry ryznykh variantakh navantazhennia (chastyna №2)', *Naukovi notatky*, 63, pp. 107–113.
 28. Vodka, A. A., Larin, A. A., Trubaiev, A. I., Bondarenko, Yu. V., Molskii, M. M., Babenko, A. S. and Yudaiev, V. V. (2016) 'Otsenka napryazhennoho sostoyannia dnyshch sylosov elevatorov, nakhodyashchysya v dlytel'noy ekspluatatsii, s uchedom prosadky kolonn y faktycheskykh fizyko-mekhanicheskikh svoystv betona', *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 83(1), pp. 81–91.
 29. Derzhavnyi proektnyi instytut TsNDIPromzernoproekt (1981) **Typovaya dokumentatsiia na stroitel'nye systemy yzdel'nykh zdanyy y sooruzheniy. Seryia 3.702-1/79. Unyfityrovannye sbornye zhelezobetonnye konstruktii sylosnykh sooruzheniy predpriyaty po khranenyui y pererabotke zerna. Vypusk 2. Sbornye zhelezobetonnye kolonny. Rabochye chertezhy*. Moscow: TsITP Derzhbuda SRSR.
 30. Derzhavnyi proektnyi instytut TsNDIPromzernoproekt (1978) *Ukazannya po povysheniyu ekspluatatsionnoy nadezhnosti elevatornykh sooruzheniy*. Moscow.
 31. Troian, V. V. (2012) 'Prohnozuvannia parametriv trishchynoutvorennia betoniv dlia monolitnykh konstruktii', *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika*, 46, pp. 35–41.
 32. Pshinko, O. M., Savyskiy, M. V. and Zinkevych, A. M. (2018) *Vidnovlennia ekspluatatsiinoi prydatnosti betonnykh, zalizobetonnykh ta kamianykh konstruktii*. Dnipro: DNUZT.
 33. Khalil, M., Ruggieri, S. and Uva, G. (2022) 'Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-of-the-Art and Recent Research Trends', *Applied Sciences*, 12(6), p. 3006. Available at: <https://doi.org/10.3390/app12063006>.
 34. Svityi, I. M. (2018) 'Modeliuvannia dynamiky zapasiv zerna na khlipoprimalnomu pidpriemstvi: kontseptualna, matematychna ta imitatsiina modeli', *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv*, 10(1), pp. 58–63.

Надійшла (received) 05.12.2018

Відомості про авторів / About the Authors

МАНІЛІЧ Микола Сергійович (MANILICH Mykola Serhiyovych) – аспірант кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії (ММІ), НТУ «ХПІ», Харків, Україна; тел.: +38 (099) 42 43 066; e-mail: mykola.manilich@infz.khpi.edu.ua, ORCID ID: 0009-0000-1307-1789.

ТРУБАЄВ Олександр Іванович (TRUBAEV Oleksandr Ivanovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії (ММІ), НТУ «ХПІ»,

Харків, Україна тел.: +38 (057) 707 68 79; тел.: (050) 999-79-65; e-mail: Oleksandr.Trubaiev@khti.edu.ua , **ORCID
ID: 0000-0002-7318-6526**