

УДК 624.042

Махінько Антон, д.т.н., с.н.с,
ORCID: 0000-0002-9147-7087, e-mail: pasargada1981@gmail.com,
ТОВ «Етуаль»

Махінько Наталія, д.т.н.,
ORCID: 0000-0001-8120-6374, e-mail: nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua,
Національний авіаційний університет

Воронцов Олег, к.т.н., доц.
ORCID: 0000-0001-7339-9196, e-mail: voronoleg6163@gmail.com,
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

НАДІЙНІСТЬ ТА БЕЗПЕЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА

Анотація. Дослідження присвячене визначенню мінімально необхідних рівнів надійності, яким мають відповідати будівельні конструкції, зокрема ємності для зберігання зерна. Даний показник є необхідною вимогою, яку потрібно виконувати для досягнення безпечної експлуатації споруди. Представлена формула для вираження функції надійності, в якій присутній ряд безрозмірних коефіцієнтів, що залежать від законів розподілу випадкових величин узагальненої міцності та зусилля. Вона може застосовуватися для навантажень, представлених нормальним законом чи подвійним експоненціальним законом Гумбеля. Також отримані вирази для визначення параметру економічного збитку, які можуть застосовуватися для вирішення інженерних задач. Результати даного дослідження надають інженеру зручний та простий алгоритм розрахунку мінімального рівня надійності елементів силосу в умовах одновісного напружено-деформованого стану з економічних міркувань.

Ключові слова: силос, рівень надійності, імовірнісний розрахунок, будівельний ризик, параметр економічного збитку, поперечний переріз.

Makhinko Anton, doctor of technical sciences, senior scientist,
ORCID: 0000-0002-9147-7087, e-mail: pasargada1981@gmail.com,
ETUAL LLC

Makhinko Nataliia, doctor of technical sciences,
ORCID: 0000-0001-8120-6374, e-mail: nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua,
National Aviation University

Vorontsov Oleg, candidate of technical sciences,
ORCID: 0000-0001-7339-9196, e-mail: voronoleg6163@gmail.com,
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

RELIABILITY AND SAFETY MAINTENANCE OF SILOS FOR GRAIN STORAGE

Abstract. The study is devoted to determining minimum required level of reliability, which must be achieved by construction design. This indicator is a necessary requirement that must be fulfilled in order to achieve safe operation of the facility. In order to express the reliability function, a formula was used in which there is a series of dimensionless ratios depending on the laws of the

distribution of random variables generalizing strength and effort. It can be applied to loads represented by the normal law or the double exponential Humbel's law. Also, the expressions obtained can be used to solve engineering problems in determining the parameters of economic loss. The results of this study provide an engineer with a convenient and simple algorithm for calculating the minimum level of reliability of silo elements under uniaxial stress-strain state with regard for economic reasons.

Keywords: silo, level of reliability, stochastic calculation, construction risk, economic loss, cross-section.

Силосні ємності є одними з основних видів споруд елеваторних підприємств та зернових терміналів. Сумні події останніх днів свідчать, що ці об'єкти неодноразово стають цілями ворожих атак країни-агресора. На сьогоднішній день зазнали обстрілів та руйнувань зерновий термінал в м. Миколаїв, зерносховища ряду населених пунктів Дніпропетровської, Донецької, Запорізької та Сумської областей та ін. Блокада морських перевезень і воєнні дії створюють загрозу для нормального функціонування не лише вітчизняного, але і світового зернового ринку, провокуючи загострення глобальної продовольчої кризи [1, 2].

Для України, як аграрної держави, збереження та відновлення силосних парків є одним з найважливіших стратегічних завдань. Певна річ, це актуалізує потребу в розрахунках даних конструкцій. Використання сучасних розрахункових програмних комплексів на базі МСЕ, безумовно збільшує швидкість та точність розрахунків, дозволяє розширити можливості проектувальника та досягнути оптимального економічного рішення, забезпечивши виконання умов міцності та стійкості [3]. Проте успішний розв'язок завжди показує лише виконання граничної нерівності з деяким запасом і аж ніяк не може слугувати характеристикою рівня надійності конструкції. В процесі аналізу рівня надійності актуальним є питання витрат на забезпечення його мінімального значення та збитків від можливої відмови. Цей напрямок є предметом оптимізаційної теорії апріорних ризиків. В рамках даного дослідження головний акцент буде зроблено на ефективному ризику, як найбільш вживаному у технічних дисциплінах [4].

При вирішенні задачі застосовувалися загальні методи теорії надійності будівель і споруд та теорії ризиків. При цьому були задіяні різні імовірнісні моделі навантажень. Випадкова величина узагальненої міцності описувалася нормальним законом розподілу, а дія узагальненого зусилля розглядається в двох варіантах: нормальний розподіл, що використовується для опису тиску сипкого матеріалу на стінки корпусу силосу та подвійний експоненціальний розподіл Гумбеля, що використовується для опису максимумів снігового та вітрового навантаження. Дані характеристики враховуються системою коефіцієнтів, які присутні в результуючій формулі для функції безвідмовної роботи.

Сталеві ємності для зберігання відносяться до об'єктів, біля яких фактично відсутня присутність людини, тобто можуть розглядатися як споруди з виключно економічною відповідальністю. Це дозволяє представити будівельний ризик R_Q , як величину, що дорівнює добутку імовірності руйнування (відмови) Q ємності на кількість необхідних фінансових витрат C для ліквідації наслідків аварії (вартість самої ємності C_C та вартість продукту, що зберігається в ній C_G).

$$R_{\Sigma}(Q) = R_C(Q) + R_Q(Q) = \alpha_C \cdot C_C + (\alpha_C \cdot C_C + C_G) \cdot Q, \quad (1)$$

де α_C – коефіцієнт, який враховує збитки, що не залежать від розмірів перерізів елементів.

Вартість ємності оцінюється її металоємністю, яка залежить від прийнятих розмірів поперечного перерізу елементів. Чим більші розміри перерізів, тим вища надійність ємності. Фактична імовірність безвідмовної роботи конструкції u_F , отримана шляхом прямого моделювання, може бути оцінена за формулою [5, 6]

$$y_F = \left[\sqrt{B_K^2 - 4A_K(C_K - 1/m_K)} - B_K \right] / (2A_K) \quad (2)$$

де A_K, B_K і C_K – безрозмірні коефіцієнти, що залежать від законів розподілу випадкових величин узагальненої міцності та зусилля.

При вираженні площі, як функції імовірності відмови та враховуючи, що вартість елемента пропорційна площі його поперечного перерізу з коефіцієнтом пропорційності k_C , формула для будівельного ризику набуде вигляду

$$R_S(Q) = k_C \frac{m_N}{m_R} (1 + Q\Omega_Q) \cdot \{A_K y_Q^2 - B_K y_Q + C_K\} \quad (3)$$

Умова мінімуму функції ризику $R_S(Q)$

$$\frac{1 + Q \cdot \Omega_Q}{\ln(1 - Q) \cdot (Q - 1) \cdot \Omega_Q} = \frac{A_K y_Q^2 - B_K y_Q + C_K}{B_K - 2A_K y_Q} \quad (4)$$

Звідси можна отримати параметри економічного збитку представлення навантаження нормальним законом та подвійним експоненціальним законом Гумбеля відповідно

$$\frac{1}{\Omega_Q} = \ln(1 - Q)(1 - Q) \left[\frac{-\alpha_A y_Q^2 + \alpha_B y_Q + \alpha_C - V_S^{-1}}{\alpha_B - 2\alpha_A y_Q} \right] - Q. \quad (5)$$

$$\frac{1}{\Omega_Q} = \ln(1 - Q) \cdot (1 - Q) \cdot \left[\frac{\alpha_C - V_S^{-1}}{\alpha_B} + \ln(-\ln(1 - Q)) \right] - Q. \quad (6)$$

Отримані формули пов'язують три безрозмірні величини: параметр економічного збитку Ω_Q , оптимальну імовірність відмови Q та коефіцієнт варіації навантаження V_S та можуть засовуватися для вирішення інженерних задач.

Література

1. *The coming food catastrophe* [Електронний ресурс] // *The economist*: – Режим доступа : <https://www.economist.com/leaders/2022/05/19/the-coming-food-catastrophe> (09.06.2022).
2. *Lack of grain exports driving global hunger to famine levels, as War in Ukraine Continues* [Електронний ресурс] : <https://www.un.org/press/en/2022/sc14894.doc.htm> (09.06.2022).
3. Iwicki P./ *Application of linear buckling sensitivity analysis to economic design of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns*// P. Iwicki, M. Sondej, J. Tejchman. – *Engineering Failure Analysis*, 2016. – Vol. 70. – P. 105–121.
4. *Naiwei Lu Risk and Reliability in Structural Engineering: Theoretical Basis* // *Naiwei Lu, Mohammad Noori*. – *Momentum Press*, 2019. – 150 p.
5. *A. Makhinko To the calculation of the optimal level of reliability by using economic indicators* / A. Makhinko, N. Makhinko // *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2019. – Vol. 47. – Н. 251-259.
6. *Махінько А. Сталеві ємності для зберігання зерна. Частина 1/ А. Махінько, Н. Махінько*. – К.: Вид-во «Сталь», 2021. – 350 с.