

УДК 624.042

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.79.409

ПРАКТИЧНІ ЗАДАЧІ ІМОВІРНІСНОГО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВОГО СИЛОСА

МАХІНЬКО Н. О., *канд. техн. наук*

Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, 02000, Київ, Україна, тел. +38(050)3045072, e-mail: pasargada1985@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

Анотація. Постановка проблеми. Застосування імовірнісних методів в інженерній практиці наразі залишається недостатнім. Цьому перешкоджає необхідність використання специфічної галузі знань (теорія випадкових процесів, математична статистика, теорія надійності будівель і споруд та ін.), що традиційно належать до сфери високоінтелектуальних наукових досліджень. У той же час кількісне знаходження показників надійності - необхідний момент у процесі створення будь-якої будівлі чи споруди та має бути не лише обґрунтоване в нормативних документах, а і безпосередньо застосовуватися в процесі конструкторської діяльності. З огляду на це, дослідження сфокусоване тільки на отриманні кількісної оцінки імовірності безвідмовної роботи для окремих елементів сталевих ємностей зберігання, відповідно до авторської методики та основних положень імовірнісного розрахунку. При цьому модель функції надійності повністю відповідає імовірнісній природі постійних та технологічних навантажень. Для елементів сталевих ємностей зберігання це реалізується шляхом представлення випадкової величини узагальненої міцності нормальним законом розподілу. Для снігових і вітрових навантажень, які описуються технікою випадкових процесів, використано методику, що дозволяє перейти від дослідження всього процесу до розгляду лише його максимумів, описаних подвійним експоненціальним розподілом Гумбеля. **Мета статті** - навести аналітично простий алгоритм для визначення рівня надійності елементів сталевих ємностей зберігання чи розв'язання інших супутніх задач імовірнісного розрахунку такого виду конструкцій. На базі практичних прикладів проілюструвати процедуру розв'язання задач даного типу та ознайомити інженера з елементарними принципами розрахунку елементів сталевих конструкцій ємностей зберігання на надійність. **Висновок.** На базі єдиного підходу та із застосуванням апроксимуючих виразів і лаконічних математичних викладок, наведено узагальнений алгоритм аналітичного імовірнісного розрахунку елементів сталевих ємностей зберігання. Відповідно до формульного вираження здійснено числовий розрахунок імовірності безвідмовної роботи кільцевого ребра жорсткості циліндричної ємності та розв'язано практичну задачу підбору поперечного перерізу радіального ребра жорсткості за заданим рівнем нормативної імовірності роботи.

Ключові слова: *ємність зберігання; імовірнісний розрахунок; функція надійності; коефіцієнт критичного фактора, імовірність безвідмовної роботи*

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНОГО СИЛОСА

МАХИНЬКО Н. А., *канд. техн. наук*

Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, 02000, Киев, Украина, тел. +38(050)3045072, e-mail: pasargada1985@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

Аннотация. Постановка проблемы. Использование вероятностных методов в инженерной практике в данное время является недостаточным. Этому препятствует необходимость использования специфической области знаний (теория случайных процессов, математическая статистика, теория надежности зданий и сооружений и др.), которая традиционно относится к сфере высокоинтеллектуальных научных исследований. В то же время количественное нахождение показателей надежности является необходимым моментом в процессе создания любого строительного объекта и должно быть не только обосновано в нормативных документах, но и непосредственно применяться в процессе конструкторской деятельности. Учитывая это, исследования сфокусированы исключительно на получении количественной оценки вероятности безотказной работы для отдельных элементов стальных емкостей хранения, в соответствии с авторской методикой и основными положениями вероятностного расчета. При этом модель функции надежности полностью соответствует вероятностной природе постоянных и технологических нагрузок. Для элементов стальных емкостей хранения это реализуется путем представления случайной величины обобщенной прочности нормальным законом распределения. Для снеговых и ветровых нагрузок, которые описываются техникой случайных процессов, использована методика, позволяющая перейти от исследования всего процесса к рассмотрению только его максимумов, описанных двойным экспоненциальным распределением Гумбеля. **Цель статьи** - предоставить аналитически простой алгоритм для определения уровня надежности элементов стальных емкостей хранения или решения других сопутствующих задач вероятностного расчета данного вида конструкций. На базе

практических примеров проиллюстрировать процедуру решения задач данного типа и ознакомить инженера с элементарными принципами расчета элементов стальных конструкций емкостей хранения на надежность. **Вывод.** В рамках единого подхода и при применении аппроксимирующих выражений и лаконичных математических выкладок представлен обобщенный алгоритм аналитического вероятностного расчета элементов стальных емкостей хранения. Согласно формульному выражению осуществлен числовой расчет вероятности безотказной работы кольцевого ребра жесткости цилиндрической емкости и решена практическая задача подбора поперечного сечения радиального ребра жесткости по заданному уровню нормативной вероятности работы.

Ключевые слова: емкость хранения; вероятностный расчет; функция надежности; коэффициент критического фактора, вероятность безотказной работы

PRACTICAL TASKS OF PROBABILITY CALCULATION OF THE ELEMENTS OF STEEL SILOS

MAKHINKO N.O., *Cand. Sc. (Tech.)*

National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova Ave., Kyiv, Ukraine, tel. +38 (050) 304-50-72, e-mail: pasargada1985@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8120-6374

Abstract. Problem statement. The use of probability methods in engineering practice is currently insufficient. This is hindered by the need to use a specific area of knowledge, such as the theory of random processes, mathematical statistics, the theory of reliability of buildings and structures, etc. However, the quantitative calculation of reliability indicators is a necessary moment in the process of building any construction. The level of reliability should be substantiated in the regulatory documents and directly applied in the process of design activities. Considering this, the research focuses exclusively on obtaining a quantitative estimate of the probability of failure-free operation for separate elements of steel storage capacities. This was done in accordance with the author's methodology and the main features of probability calculation. At the same time, the model of reliability function completely corresponds to the probability nature of constant and technological loads. For elements of steel storage capacities representing a random value of generalized strength is realized by a normal distribution law. For snow and wind loads, which are described by the method of random processes, it is used a technique that allows to proceed from the study of the whole process to the consideration of only its maximums, which are described by the double exponential distribution of Humbel. The example of solving practical problems will provide visibility to the performed research and will help the ordinary specialist to approach to the mastering of probabilistic calculations. **Purpose.** To provide an analytically simple algorithm for determining the level of reliability of elements of steel storage capacities or for solving other related problems of probability calculation of the given type of structures. On the basis of practical examples to illustrate the procedure of solving problems of this type and acquaint the engineer with the elementary principles of calculating for reliability the elements of steel construction of the storage capacities. **Conclusion.** On the basis of the unified approach and using the approximating expressions and concise mathematical calculations, a generalized algorithm for analytic probability calculation of elements of steel storage capacities is represented. Accordingly to formulas, it was made a numerical calculation of the probability of a failure-free operation, the reliability of the circular stiffener of the cylindrical capacity and it was solved the practical problem of the selection of the cross-section radial stiffener, according to the given level of the normative probability of work.

Keywords: storage capacity, probability calculation, reliability function, coefficient of critical factor, probability of failure-free operation

Постановка проблеми. Практичний розрахунок надійності елементів конструкцій будівель і споруд у більшості випадків належить до сфери наукових досліджень, реалізація яких становить прерогативу науково-дослідних установ чи спеціалістів цієї проблематики. Перед усім це пов'язано з великим обсягом поглиблених знань в галузі теорії імовірності та математичної статистики, а також розумінням особливостей процесу імовірнісного опису навантажень, що діють на конструкцію, та стохастичної природи її

міцнісних характеристик. По-друге, наразі не існує єдиної точки зору на імовірнісні методи та моделі, що застосовуються у розрахунках надійності будівельних конструкцій. Власне й сам показник надійності може включати в себе різні характеристики – безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та ін.

З огляду на це, дослідження сфокусоване тільки на отриманні кількісної оцінки імовірності безвідмовної роботи окремих елементів сталевих ємностей зберігання, відповідно до авторської

методики та основних положень імовірнісного розрахунку. Модель функції надійності має відповідати імовірнісній природі постійних та технологічних навантажень. Для елементів сталевих емностей зберігання це реалізується шляхом представлення випадкової величини узагальненої міцності нормальним законом розподілу. Також для снігових і вітрових навантажень, які описуються технікою випадкових процесів, застосовується методика, що дозволяє перейти від дослідження всього процесу до розгляду лише його максимумів, описаних подвійним експоненціальним розподілом Гумбеля.

Аналіз публікацій. Фундаментальні засади теорії надійності ґрунтуються на працях видатних учених [1-3]. В подальшому імовірнісна концепція розрахунку будівельних конструкцій знайшла розвиток у чималій кількості наукових літературних джерел теоретичного [1; 2; 6; 7] та практичного спрямування [1; 2; 6; 7]. Також варто відмітити праці безпосередньо використані в процесі дослідження [1; 2; 6].

Мета і завдання. Зважаючи на складність оцінювання надійності в руслі інженерного розрахунку, актуальним завданням постає не лише наведення спрощеного алгоритму обчислень на базі апроксимуючих виразів та узагальнених підходів, а і практичний приклад отримання кількісного показника. Такий зразок надасть наочності виконаному дослідженню та сприятиме наближенню рядового спеціаліста до освоєння імовірнісних засад розрахунку.

Виклад матеріалу. Процедура оцінювання надійності виконаємо з умови використання граничної нерівності вираженої через критичний фактор

$$K_R = S/R \leq 1,0 \quad (1)$$

де R – узагальнена величина міцності; S – узагальнена величина зусилля.

В загальному випадку визначення випадкової величини критичного фактора може бути здійснене відповідно до формули

$$K_{R,i} = m_K \cdot \gamma_{K,i} \quad (2)$$

де $m_K = m_S/m_R$ – математичне очікування критичного фактора, рівне відношенню відповідних статистичних характеристик узагальнених величин зусилля та міцності; $\gamma_{K,i}$ – ранжована змінна, що визначається як

$$\gamma_{K,i} = [1 + \gamma_{S,i} V_S] / [1 + \gamma_{R,i} V_R] \quad (3)$$

де $\gamma_{S,i}$ і $\gamma_{R,i}$ – нормовані випадкові величини з визначеним законом розподілу.

Або ж можна запропонувати більш простий варіант формули (2):

$$K_R = m_K \cdot (A_K y^2 + B_K y + C_K) \quad (4)$$

де $y = -\ln[-\ln(F_\gamma)]$ – аргумент подвійного експоненціального розподілу Гумбеля; коефіцієнта A_K , B_K і C_K – залежать від обраних законів розподілу $\gamma_{S,i}$ і $\gamma_{R,i}$ та знаходяться методом найменших квадратів.

Фактична імовірність безвідмовної роботи елемента визначиться як

$$y_F = \left(\sqrt{B_K^2 - 4A_K(C_K - 1/m_K)} - B_K \right) / 2A_K \quad (5)$$

Величини коефіцієнтів A_K , B_K і C_K залежать від коефіцієнту варіації V_S навантаження (внутрішнього зусилля чи напруження) та описуються такими формулами:

$$A_K = \alpha_A V_S, \quad B_K = \alpha_B V_S, \quad C_K = 1 - \alpha_C V_S \quad (6)$$

де α_A , α_B і α_C – коефіцієнти, числові значення яких при розподілі навантаження за подвійним експоненціальним законом Гумбеля $\alpha_A \approx 0$, $\alpha_B \approx 0,84$, $\alpha_C \approx 0,57$.

Функція надійності елемента з урахуванням (6) має вигляд:

$$y_F = -\ln[-\ln(F_\gamma)] = \quad (7)$$

$$= \left[\sqrt{\alpha_B^2 - 4\alpha_A^2(1 - \alpha_C V_S - 1/m_K)} - \alpha_B \right] / 2\alpha_A.$$

Імовірність безвідмовної роботи в явному вигляді:

$$F_y = \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha_B - \sqrt{\alpha_B^2 - 4\alpha_A^2(1 - \alpha_C V_S - \frac{1}{m_K})}}{2\alpha_A} \right) \right] \quad (8)$$

Розглянемо процедуру оцінювання надійності кільцевого ребра жорсткості циліндричної ємності діаметром $D_w = 22000$ мм, що працює на центральний стиск. Переріз елемента прийемо у вигляді швелера з відгинами полицок (рис. 1) та розмірами: висота $h = 200$ мм, ширина полицок $b_f = 75$ мм, зазор між відгинами $c_f = 150$ мм, товщина $t_w = 2,5$ мм.

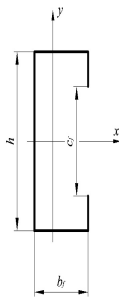


Рис. 1. Поперечний переріз кільцевого ребра жорсткості / Fig. 1. Cross section of ring ring of rigidity

Довжина ребра $l_p = 250$ см. Матеріал – сталь із статистичними характеристиками: математичне очікування границі текучості $m_R = 450$ МПа; коефіцієнт варіації границі текучості $V_R = 0,08$. Розрахунок виконувати для третього снігового району України.

Виконуємо попередній статичний розрахунок елемента кільцевого ребра з урахуванням імовірнісних параметрів снігового навантаження. Поздовжнє зусилля стиску в кільцевому ребрі, з умови рівноваги вузла примикання кільцевих ребер до головного радіального обчислюється за формулою:

$$N_p = [n_M / 2\pi] (N_b - N_t) \quad (9)$$

де n_M – кількість головних радіальних балок; N_b і N_t – поздовжні зусилля в головному радіальному ребрі нижче і вище кільцевого ребра жорсткості. Ця розрахункова процедура була детально описана в [6]. В результаті були отримані статистичні характеристики (математичне очікування та коефіцієнт варіації) випадкової величинимаксимумів поздовжньої сили $m_S = 65$ кН, $V_S = 0,3$.

Визначимо статистичні характеристики обраного перерізу – площу A_0 ; координати центра ваги x_0 , y_0 ; моменти інерції відносно центральних вісей J_x , J_y ; моменти опору W_x , $W_{y,max}$, $W_{y,min}$ та радіуси інерції i_x , i_y . Для цього використаємо наближені формули:

$$A_0 = h t_w \psi_A \quad (10)$$

$$x_0 = h \psi_x; \quad y_0 = h \psi_y \quad (11)$$

$$J_x = h^3 t_w \psi_{J,x}; \quad J_y = h^3 t_w \psi_{J,y} \quad (12)$$

$$W_x = 2 h^2 t_w \psi_{J,x} \quad (13)$$

$$W_{y,max} = h^2 t_w \frac{\psi_{J,y}}{\psi_x}; \quad W_{y,min} = \frac{h^2 t_w \psi_{J,y}}{\alpha_1 - \psi_x} \quad (14)$$

$$i_x = h \sqrt{\psi_{J,x} / \psi_A}; \quad i_y = h \sqrt{\psi_{J,y} / \psi_A} \quad (15)$$

де ψ_A , ψ_x , ψ_y , $\psi_{J,x}$, $\psi_{J,y}$ – безрозмірні коефіцієнти, які характеризують форму заданого перерізу та знаходяться за наступними формулами:

$$\alpha_1 = b_f / h = 0,375 \quad \alpha_2 = c_f / h = 0,75 \quad (16)$$

$$\psi_A = 2 + 2\alpha_1 - \alpha_2 = 2 \quad (17)$$

$$\psi_x = [\alpha_1^2 + \alpha_1(1 - \alpha_2)] / \psi_A = 0,117 \quad (18)$$

$$\psi_{J,x} = [2 + 6\alpha_1 - \alpha_2^3] / 12 = 0,32 \quad (19)$$

$$\psi_{J,y} = \psi_x^2 + \alpha_1^3/6 + 2\alpha_1(0,5\alpha_1 - \psi_x)^2 + (1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \psi_x)^2 = 0,04 \quad (20)$$

Статистичні характеристики :

$$A_0 = 10 \text{ см}^2, \quad x_0 = 2,34 \text{ см},$$

$$J_x = 640 \text{ см}^4, \quad J_y = 80 \text{ см}^4, \quad W_x = 64 \text{ см}^3,$$

$$W_{y,max} = 34,2 \text{ см}^3, \quad W_{y,min} = 15,5 \text{ см}^3,$$

$$i_x = 8,0 \text{ см}, \quad i_y = 2,83 \text{ см},$$

Обчислимо мінімальну гнучкість ребра:

$$\lambda_{min} = I_p / i_{min} \approx 88 \quad (21)$$

Враховуючи, що розглядуваний елемент ребра є стиснутим, на резерв його несної здатності буде впливати коефіцієнт поздовжнього згину φ [8]. Для вираження «незручної» залежності φ від гнучкості елемента, границі текучості сталі R_y та типу кривої стійкості $\varphi(R_y, \lambda)$ [5, 8] можна скористатися апроксимуючим виразом:

$$\varphi = \exp(-\delta \lambda^\varepsilon R_y / (\pi^2 E)) \quad (22)$$

де ε і δ – параметри кривої стійкості.

Відповідно до математичного очікування критичного фактора отримає вигляд:

$$m_K = m_S / m_R \cdot \exp(\delta \lambda^2 m_R / [\pi^2 E]) \quad (23)$$

Враховуючи, що для кривої типу «с» $\varepsilon = 0,6$ і $\delta = 2$, отримаємо $m_K \approx 0,4$.

Відповідно (6) та (8) виконуємо оцінювання імовірності безвідмовної роботи ребра:

$$N_q(y) = -\sin \beta \left[\frac{H_A}{\text{tg } \beta} + q_A I_M y \left(\Delta q + \frac{y}{2} (1 - \Delta q) \right) \right], \quad (24)$$

$$Q_q(y) = q_A I_M \cos \beta \left[y \Delta q - \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} + \Delta q \right) + \frac{y^2}{2} (1 - \Delta q) \right], \quad (25)$$

$$F_\gamma = \exp[-\exp(-6,627)] = 0,99868$$

Як другий приклад виконаємо підбір поперечного перерізу радіального ребра жорсткості конічної покрівлі круглого силоса діаметром $D_w = 5500$ мм на дію снігового навантаження. Ребра приймаємо з кутовим кроком 30° , а переріз у вигляді гнучкого швелера без відгинів полицок. Матеріал обираємо, як у попередньому прикладі. Розрахунок виконуємо для третього снігового району України. Навантаження від термопідвіски не враховується, а діаметр центрального опорного кільця приймаємо $d_0 = 400$ мм.

Радіальне ребро покрівлі (рис. 2) працює на стиск зі згином.

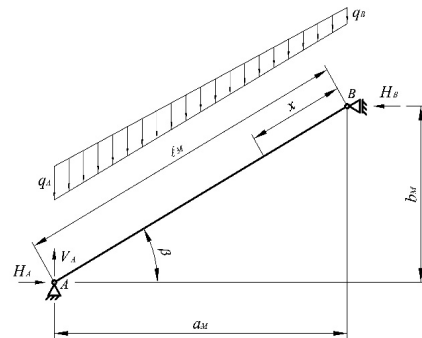


Рис. 2. Розрахункова схема головного радіального ребра жорсткості / Fig. 2. Schematic diagram of the main radial rib of rigidity

Розподіл внутрішніх зусиль поздовжнього зусилля $N_{q,F}$, поперечної сили $Q_{q,F}$ та згинального моменту $M_{q,F}$ описується функціями [6]:

$$M_q(y) = \frac{q_A I_M^2}{6} y \cos \beta (1-y) [1 + y(1 - \Delta q) + 2\Delta q] \quad (26)$$

Умовні позначення величин у формулах (24)-(26): $\Delta q = \Delta_D = d_0 / D_w$ – відношення діаметрів; β – кут нахилу покрівлі; I_M – довжина головної радіальної балки; $y = x / I_M$ – безрозмірний параметр.

В розрахунковому перерізі ребра, на відстані $y_{M,\max}$ від правої опори зусилля в перерізі визначаються як

$$N_M = [q_A I_M (1 + 2\Delta q)] / (6 \sin \beta) \quad (27)$$

$$M_{q,\max} = \frac{q_A I_M^2 \cos \beta}{18} \left(\frac{2f_M^3 - 3f_M^2 + 1}{f_M^2 - \Delta q} \right) \quad (28)$$

де f_M – параметр навантаження. З урахуванням вихідних даних

$$\Delta q = \Delta_D = d_0 / D_w \approx 0,073 \quad (29)$$

$$f_M = \sqrt{[1 + \Delta q + \Delta q^2]} / 3 = 0,6$$

$$(30) \quad y_{M,\max} = (f_M - \Delta q) / [1 - \Delta q] = 0,57 \quad (31)$$

Довжина головного ребра

$$I_M = 0,5 D_w (1 - \Delta_D) / \cos \beta \approx 2944 \text{ мм.} \quad (32)$$

Відповідно до формул (27), (28)

випадкові величини внутрішніх зусиль

$$N_M^{\%} \approx 1,62 \cdot S_m^{\%}, \quad M_{q,\max}^{\%} = 0,737 \cdot S_m^{\%}$$

де $S_m^{\%}$ – випадкова величина максимумів випадкового процесу снігового навантаження.

Втрата стійкості ребра неможлива, завдяки закріпленню верхнього поясу профільованим листом покриття. Тому підбір геометричних характеристик виконується за критерієм міцності.

Для математичного очікування критичного фактору використаємо формулу

$$m_K = [m_N / A_0 + m_M / W_x] / m_R = \frac{1,62}{h t_w \psi_A} \cdot \frac{m_{q,\max}}{m_R} \cdot \left[1 + 22,7 \frac{\psi_A}{h \psi_{J,x}} \right] \quad (33)$$

Відповідно до (4) m_K також можна виразити як

$$m_K = 1 / [1 + 0,84 V_{q,\max} (y - 0,68)] \quad (34)$$

Обчислюємо статистичні характеристики випадкової величини максимумів випадкового процесу снігового навантаження. Для цього задаємося періодом експлуатації $T_{ef} = 20$ років та обчислимо проміжні величини.

Характеристичний максимум отримаємо з рівняння

$$C_0 + C_1 \gamma_0 + C_2 \gamma_0^2 + C_3 \gamma_0^3 = \ln \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{\omega_{e,s} T_{ef} K_s} \right) \quad (35)$$

$$\gamma_0 = 1,251$$

де $\omega_{e,q} = 0,14$ день⁻¹ – ефективна частота, $K_s = 0,1$ – безрозмірний коефіцієнт корегування; $C_0 = -4,116$; $C_1 = -6,748$; $C_2 = 8,355$; $C_3 = -2,160$ – коефіцієнти полінома (всі числові величини наведені для третього снігового району).

Характеристична інтенсивність

$$\lambda_0 = -(C_1 + 2C_2 \gamma_0 + 3C_3^2) = 4,445 \quad (36)$$

Параметр масштабу

$$\alpha_n = \lambda_0 / (m_q \cdot V_q) = 0,012 \text{ Па}^{-1}, \quad (37)$$

де $m_q = 200$ Па – математичне очікування та $V_q = 1,8$ – коефіцієнт варіації для третього снігового району.

Параметр положення

$$u_n = m_q(1 + V_q \gamma_0) = 650 \text{ Па.} \quad (38)$$

Остаточо отримаємо

$$\sigma_{q,\max} = 1,282/\alpha_n \approx 104 \text{ Па,} \quad (39)$$

$$m_{q,\max} = u_n + 0,577/\alpha_n = 697 \text{ Па,} \quad (40)$$

$$V_{q,\max} = 1,282/(\alpha_n u_n + 0,577) = 0,15 \quad (41)$$

Задамо значення нормативної імовірності роботи $F_\gamma = 0,999$, яка відповідає безрозмірному показнику надійності $\gamma_F = -\ln[-\ln(F_\gamma)] \approx 6,91$ та з (24) отримаємо числову оцінку необхідного математичного очікування $m_k \approx 0,56$.

Припустмо, що співвідношення (15) ширини полицки до висоти швелера $\alpha_1 = 0,25$. Відповідно до (17) і (19)

отримаємо $\psi_A = 2,5$, $\psi_{J,x} = 0,292$
Використавши формулу (33), отримаємо:

$$1 + 428/h = 5,6ht_w$$

$$h \approx 0,1 \cdot [1 + \sqrt{1 + 9587t_w}] / t_w$$

Висновки

1. Наведено узагальнений алгоритм аналітичного імовірнісного розрахунку елементів сталевих ємностей зберігання.
2. Відповідно до формульного виразу здійснено числовий розрахунок імовірності безвідмовної роботи надійності кільцевого ребра жорсткості циліндричної ємності.
3. Розв'язано практичну задачу підбору поперечного перерізу радіального ребра жорсткості за заданим рівнем нормативної імовірності роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вероятностные методы в строительном проектировании : монография / [Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати]. – Москва : Стройиздат, 1988. – 584 с.
2. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений : монография / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1982. – 351 с.
3. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения : монография / Е. С. Вентцель. – Москва : Высшая школа, 2000. – 383 с.
4. Кінаш Р. І. Снігове навантаження в Україні : монографія. / Р. І. Кінаш. – Львів : Вид-во науково-технічної літери, 1997. – 848 с.
5. Махінко Н. О. До розрахунку надійності елементів сталевих ємностей зберігання / Н. О. Махінко // Вісник ПДАБА. – 2018. – № 6. – С. 71–77.
6. Махінко Н. О. Розрахунок напружено-деформованого стану конусних покрівель при симетричному навантаженні / Н. О. Махінко // Вісник ПДАБА. – Дніпро, 2018. – Вип. 1. – С. 74 – 83.
7. Рекомендації із розрахунку надійності сталевих елементів конструкцій на дію снігового та вітрового навантажень (до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи») / [С. Ф. Пічугін, А. В. Махінко, Н. О. Махінко]. – Полтава : АСМІ, 2007. – 115 с.
8. Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014. [Чинний від 2015-01-01]. – Київ : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
9. Casciati F. Mathematical Models for Structural Reliability Analysis / [F. Casciati, B. Roberts] – USA : CRC Press, 1996. – 384 p.
10. Lemaire M. Structural Reliability / M. Lemaire. – London, UK : ISTE Ltd, 2009. – 504 p.

REFERENCES

1. Augusti G., Baratta A. and Kashiati F. *Veroyatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii* [Probabilistic methods in building design]. Moscow : Stroizdat, 1988, 584 p. (in Russian).
2. Bolotin V.V. *Metody teorii veroiatnostei i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenii* [Methods of the theory of probability and the theory of reliability in the calculations of structures]. Moscow : Stroizdat, 1982, 351 p. (in Russian).
3. Venttsel E.S. *Teoriia sluchainykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniia* [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow : High School, 2000, 383 p. (in Russian).
4. Kinash R.I. *Snigove navantazhennya v Ukraini* [Snow load in Ukraine]. Lviv : Scientific-Technical Year, 1997, 848 p. (in Ukrainian).

5. Makhinko N.O. *Do rozrahunku nadijnosti elementiv stalevih emnostej zberigannya* [To calculate the reliability of elements of steel storage tanks]. *Visnik PDABA* [Bulletin of the PSACEA]. 2018, no. 6, pp. 71–77. (in Ukrainian).
6. Makhinko N.O. *Rozrakhunok napruzhenno-deformovanoho stanu konusnykh pokrivel pry symetrychnomu navantazhenni* [Calculation of the deflected mode of conical roofs under the symmetric load]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSACEA]. 2018, no. 1, pp. 74–83. (in Ukrainian).
7. Pichugin C.F., Makhinko A.V. and Mahinko N.A. *Rekomendacii iz rozrahunku nadijnosti stalevih elementiv konstrukcij na diyu snigovogo ta vitrovogo navantazhen' (do DBN V.1.2-2:2006 «Navantazhennya i vplivi»)* [Recommendations on the calculation of the reliability of steel elements of structures on the effect of snow and wind loads (to SBS B.1.2-2: 2006 "Load and Impact")]. Poltava : ASMI, 2007, 115 p. (in Ukrainian).
8. *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia : DBN V.2.6-198:2014* [Steel structures. Design standards : SBS V.2.6-198:2014]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014, 199 p. (in Ukrainian).
9. Casciati F. and Roberts B. *Mathematical Models for Structural Reliability Analysis*. USA, CRC Press, 1996, 384 p.
10. Lemaire M. *Structural Reliability*. London, UK, ISTE Ltd, 2009, 504 p.

Надійшла до редакції: 15.02.2019 р.