

УДК 624.953

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.73.913

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ НАФТОВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗА ЕКОНОМІЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ З УРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ

НАСОНОВА С. С., канд. техн. наук, доц.

Кафедра інформаційних технологій, Дніпропетровський державний університет внутрішніх справ, пр. Гагаріна, 26, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (063) 848-06-80, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7228-7499

Анотація. Постановка проблеми. Згідно з державними нормами, основним методом забезпечення надійності сталевих вертикальних резервуарів наземного типу для довгострокового зберігання нафти і нафтопродуктів (РВС) є метод граничних станів. Із застосуванням цього методу забезпечується надійність резервуарів в умовах і режимах роботи, які передбачені відповідними нормами. Однак питання, пов'язані із забезпеченням надійності резервуарів, термін служби яких перевищує нормативний, а також питання економічної ефективності проектних рішень вимагають подальшого наукового опрацювання. У статті відповідно до нормативних документів, які регламентують проектування нафтових резервуарів, розглядається загальна методика оптимального проектування РВС за критерієм мінімуму повних очікуваних витрат при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого терміну експлуатації. У рамках даної методики сформульовано модель оптимального проектування РВС та запропоновано алгоритм її чисельної реалізації. Наведено отримані результати чисельних експериментів за цією моделлю. Досліджено залежність раціональних значень товщини конструктивних елементів резервуара об'ємом 5 000 м³ від необхідного рівня надійності. **Мета дослідження** – з урахуванням діючих норм проектування розробити метод прийняття економічно обґрунтованих проектних рішень, які забезпечують необхідний рівень надійності нафтових резервуарів протягом заданого терміну експлуатації. **Висновки.** У статті запропоновано модель оптимального проектування нафтових резервуарів, яка сформульована в термінах нелінійної задачі математичного програмування з цілочисловими змінними. За цією моделлю можна приймати раціональні проектні рішення за критерієм мінімуму повних очікуваних витрат при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого терміну експлуатації. Складовими даної моделі є розрахункові моделі оцінки надійності РВС, параметри яких визначаються за наявними результатами статистичної обробки даних натурних обстежень аналогічних об'єктів. Для чисельної реалізації запропонованої моделі оптимального проектування розроблено спеціальний «жадібний» алгоритм. Отримані результати показують, зокрема, що забезпечення надійності РВС пов'язане, головним чином, із забезпеченням міцності двох нижніх поясів стінки і герметичності днища. При цьому ключову роль відіграє міцність 1-го поясу. Все це добре узгоджується з наявними даними натурних обстежень і статистикою капітальних ремонтів РВС, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

Ключові слова: оптимальне проектування; економічна ефективність; математична модель; надійність; нафтовий резервуар

OPTIMAL DESIGN OF OIL TANKS ACCORDING TO ECONOMIC CRITERIA WITH CONSIDERATION OF RELIABILITY

NASONOVA S.S., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

Department of Information Technologies, Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs, 26, Naharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (063) 848-06-80, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7228-7499

Abstract. Problem statement. According to state regulations, the main method of ensuring the reliability of steel vertical above-ground tanks for long-term storage of oil and petroleum products is the limit states method. This method ensures the reliability of tanks under the conditions and modes of operation envisaged by the relevant standards. However, issues relating to the reliability of tanks whose service life exceeds the normative one, as well as the economic efficiency of project decisions, require further scientific study. In this article, in accordance with the normative documents regulating the oil tanks design, the general method of oil storage tanks optimal design according to the criterion of minimum total expected costs while ensuring the required reliability level during a specified operation period is considered. Within the framework of this methodology, a model of optimal tanks design is formulated and an algorithm for its numerical realization is proposed. The results of numerical experiments using this model are given. The dependence of the rational values of the structural elements thickness for the tank with a volume of 5 000 cubic

meters on the required level of reliability is investigated. *The purpose of the article* is to develop a method of making economically justified design decisions that ensure the required reliability level of oil tanks during a specified operation period, taking into account the current design standards. *Conclusions*. This article proposes an optimal oil tank design model formulated in terms of a non-linear mathematical programming problem with integer variables. With this model, rational design decisions can be made based on the criterion of the minimum total expected costs while ensuring the required reliability level during a specified operation period. The components of this model are the calculation models for assessing the reliability of the tanks, the parameters of which are determined based on the available results of statistical data processing from field surveys of similar objects. A special “greedy” algorithm was developed for the numerical realization of the proposed optimal design model. The obtained results show, in particular, that ensuring the oil tanks reliability is mainly related to ensuring the strength of the two lower wall belts and the tightness of the bottom. At the same time, the strength of the 1st belt has a key role. All this is in good agreement with the available data of field surveys and statistics of oil tanks capital repairs, which confirms the reliability of the obtained results.

Keywords: *optimal design; economic efficiency; mathematical model; reliability; oil tank*

Постановка проблеми. Як відмічено в [1–2], сталеві вертикальні резервуари наземного типу для довгострокового зберігання нафти і нафтопродуктів (РВС) належать до споруд із високим ступенем відповідальності. Порушення їх цілісності, часткові або повні руйнування спричиняють значні матеріальні, екологічні та соціальні збитки, що пов'язано із втратою нафтопродукту і забрудненням навколишнього середовища. Аварії нафтових резервуарів прийнято відносити до розряду катастроф державного масштабу. Тому нафтові резервуари – це споруди, надійність експлуатації яких є безумовно головною умовою.

Згідно з нормами [1–3], основним методом забезпечення надійності нафтових резервуарів є метод граничних станів. Із застосуванням цього методу забезпечується надійність РВС в умовах і режимах роботи, які передбачені в [3]. Однак питання, пов'язані із забезпеченням надійності резервуарів, термін служби яких перевищує нормативний, а також питання економічної ефективності проектних рішень вимагають подальшої наукової розробки.

У цій статті відповідно до нормативних документів, які регламентують проектування нафтових резервуарів, розглядається загальна методика оптимального проектування РВС за критерієм мінімуму повних очікуваних витрат при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого терміну експлуатації. У рамках даної методики сформульовано модель оптимального проектування РВС та розроблено алгоритм

її чисельної реалізації. Наведено результати чисельних експериментів за цією моделлю. Досліджено залежність раціональних значень товщини конструктивних елементів резервуара об'ємом 5 000 м³ від необхідного рівня надійності.

Аналіз публікацій. Аналіз останніх досліджень, присвячених проблемі забезпечення надійності нафтових резервуарів [4–5], показав, що різні моделі і методи оцінювання надійності зазвичай дають різні результати, які часто не відповідають даним натурних обстежень. Для попередження можливих великих аварій резервуарів необхідно класифікувати і систематизувати причини їх виникнення, що вимагає подальшого накопичення статистичного матеріалу про відмови РВС і передумови їх настання. Крім того, мало вивчена методологія кількісної оцінки надійності нафтових резервуарів на різних стадіях їх життєвого циклу та проблема прийняття економічно обґрунтованих проектних рішень. Тому питання, пов'язані з кількісною оцінкою та ефективним забезпеченням надійності РВС, бачаться актуальними [6–10].

Мета і завдання дослідження. Мета статті – з урахуванням діючих норм проектування розробити метод прийняття економічно обґрунтованих проектних рішень, які забезпечують необхідний рівень надійності нафтових резервуарів протягом заданого терміну експлуатації.

Відповідно до даної мети ставляться такі завдання:

1. Розробити модель оптимального проектування РВС за критерієм мінімуму

повних очікуваних затрат при забезпеченні заданого рівня надійності протягом необхідного терміну служби.

2. Розробити ефективний алгоритм чисельної реалізації сформульованої оптимізаційної моделі.

3. На прикладі оптимального проектування резервуара об'ємом 5 000 м³ за критерієм повних очікуваних витрат дослідити вплив заданого рівня надійності на проектну товщину конструктивних елементів.

Результати досліджень. Відповідно до [6–9], нафтовий резервуар розглядається як система, що складається з чотирьох підсистем (основних конструктивних елементів): днища, покрівлі, циліндричної стінки (безмоментна область корпусу резервуара) та вузла сполучення стінки з днищем (моментна область корпусу резервуара). Вважається, що ці підсистеми з'єднані логічно послідовно. Днище і покрівля виконують огорожувальну функцію і забезпечують герметичність, а корпус забезпечує міцність і стійкість резервуара. Структурну схему надійності нафтового резервуара показано на рисунку.



Рис. Структурна схема надійності РВС:
1 – днище; 2 – покрівля; 3 – циліндрична стінка;
4 – вузол сполучення стінки з днищем

Згідно з [6] приймається, що резервуар виконує властиві йому функції з приймання, зберігання та відпуску нафтопродуктів у нормальних режимах роботи відповідно до діючих нормативних документів і проектного рівня затоки, а погіршення технічного стану резервуара в період експлуатації відбувається поступово і зумовлюється фізичним зносом його металоконструкцій.

Основним механізмом відмов резервуара вважається корозійний знос, який розглядається в контексті комбінованого впливу поверхневої і локальної корозії. Корозійний знос розглядається як випадкова величина, розподілена за нормальним законом.

Приймається, що усунення незворотного зносу конструктивних елементів вимагає відповідного капітального ремонту, а локальні корозійні пошкодження усуваються на основі поточних ремонтів, що проводяться в рамках діючої системи технічного обслуговування і ремонтів. Критерієм відмови резервуара вважається порушення хоча б одного з нормативних вимог ненастання його граничних станів за умовами міцності, стійкості та герметичності.

Згідно з нормами [1–2], нафтові резервуари протягом усього терміну експлуатації повинні відповідати вимогам ненастання граничних станів за умовами міцності, стійкості та герметичності. Враховуючи [6; 7], ці вимоги можна записати таким чином:

1. Вимога ненастання граничного стану циліндричної стінки за умовою міцності:

$$\gamma_c R_y \delta_i(\tau) \geq p_i r, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

2. Вимога ненастання граничного стану вузла сполучення стінки з днищем за умовою міцності:

$$\gamma_c R_y \delta_1^2(\tau) - 6M_0 \geq 0. \quad (2)$$

3. Вимога ненастання граничного стану циліндричної стінки за умовою стійкості:

$$1 - \left[\frac{\sigma_1(\tau)}{\sigma_{cr1}(\tau)} + \frac{\sigma_2(\tau)}{\sigma_{cr2}(\tau)} \right] \geq 0. \quad (3)$$

4. Вимога ненастання граничного стану днища за умовою герметичності:

$$\delta_d(\tau) - \frac{\delta_d^0}{2} \geq 0. \quad (4)$$

5. Вимога ненастання граничного стану покрівлі за умовою герметичності:

$$\delta_k(\tau) - \frac{\delta_k^0}{2} \geq 0. \quad (5)$$

У наведених формулах (1) – (5) введено такі позначення: τ – напрацювання резервуара; n – число поясів циліндричної стінки; $\delta_i(\tau), \delta_d(\tau), \delta_k(\tau)$ – поточна

(залишкова) товщина, відповідно, i -го поясу стінки, днища і покрівлі; δ_d^0 , δ_k^0 – проектні значення товщини, відповідно, днища і покрівлі. Усі інші складові співвідношень (1) – (5) та необхідні формули для їх розрахунку визначаються згідно з [1; 2].

Нафтові резервуари проектується з певним запасом товщини конструктивних елементів, що створює початкові запаси міцності, стійкості та герметичності цих споруд. У період експлуатації внаслідок корозійного зносу товщина конструктивних елементів РВС зменшується. Поточне значення товщини будь-якого конструктивного елемента резервуара, що має напрацювання τ , можна описати співвідношенням:

$$\delta(\tau) = \delta^0 - \Delta(\tau), \quad (6)$$

де δ^0 і $\Delta(\tau)$ – відповідно, проектне значення товщини і поточна величина незворотного корозійного зносу елемента.

Зазначимо, що система нерівностей (1) – (5) спільно зі співвідношенням (6) описує зміну технічного стану нафтових резервуарів у період експлуатації внаслідок корозійного зносу їх конструктивних елементів. Ліві частини нерівностей (1) – (5) надалі будемо позначати через, відповідно, $Z_i(\tau)$, $Z_x(\tau)$, $Z_c(\tau)$, $Z_d(\tau)$, $Z_k(\tau)$ і називати їх залишковими запасами міцності, стійкості та герметичності РВС. З огляду на випадковий характер корозії, кожен із цих запасів будемо розглядати як випадкову функцію величини незворотного корозійного зносу, яка залежить від часу як від параметра [7].

Введемо до розгляду індекси забезпеченості міцності, стійкості та герметичності резервуарних конструкцій, з урахуванням даних технічної діагностики. Відповідно до [6; 7] ці індекси визначаються як відношення математичного очікування до середньоквадратичного відхилення відповідних залишкових запасів. Індексом забезпеченості міцності i -го поясу циліндричної стінки при напрацюванні τ будемо називати функцію виду:

$$\omega_i(\tau) = \frac{\bar{Z}_i}{\tilde{Z}_i} = \frac{\gamma_c R_y [\delta_i^0 - \bar{\Delta}(\tau)] - p_i r}{\gamma_c R_y \tilde{\Delta}_i}, \quad (7)$$

де надрядкова риска і хвиляста лінія позначають, відповідно, математичне очікування і середньоквадратичне відхилення випадкової величини незворотного корозійного зносу.

Аналогічно (7) визначаються інші індекси забезпеченості інших конструктивних елементів РВС:

Індекс забезпеченості міцності вузла сполучення стінки з днищем:

$$\omega_x(\tau) = \frac{\gamma_c R_y [\delta_1^0 - \bar{\Delta}_1(\tau)]^2 - 6M_0}{2\gamma_c R_y [\delta_1^0 - \bar{\Delta}_1(\tau)] \tilde{\Delta}_1(\tau)}. \quad (8)$$

Індекс забезпеченості стійкості циліндричної стінки:

$$\omega_c(\tau) = \frac{\bar{Z}_c(\tau)}{\tilde{Z}_c(\tau)}. \quad (9)$$

Індекс забезпеченості герметичності днища:

$$\omega_d(\tau) = \frac{\delta_d^0 - \bar{\Delta}_d(\tau)}{2 \tilde{\Delta}_d(\tau)}. \quad (10)$$

Індекс забезпеченості герметичності покрівлі:

$$\omega_k(\tau) = \frac{\delta_k^0 - \bar{\Delta}_k(\tau)}{2 \tilde{\Delta}_k(\tau)}. \quad (11)$$

Слід зазначити, що всі визначені вище індекси забезпеченості міцності, стійкості та герметичності являють собою безрозмірні детерміновані функції часу і виражаються через математичне очікування і середньоквадратичне відхилення незворотного корозійного зносу конструктивних елементів резервуара. Їх значення можуть прогнозуватися в часі і коригуватися в кожному окремому випадку за фактичними вимірами товщини конструктивних елементів.

Приймаючи нормальний закон розподілу ймовірностей випадкової функції $Z_i(\tau)$ при будь-якому фіксованому напрацюванні τ , можна записати (через функцію нормованого нормального розподілу) наступну розрахункову модель для оцінювання ймовірності ненастання граничного стану i -го поясу циліндричної стінки за умовою міцності [7]:

$$P_i(\tau) = P(Z_i(\tau) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\omega_i} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (12)$$

Аналогічно (12) через функцію нормованого нормального розподілу і відповідні індекси забезпеченості виражаються ймовірності збереження міцності уторного вузла $P_x(\tau)$, стійкості циліндричної стінки $P_c(\tau)$, герметичності днища $P_d(\tau)$ і покрівлі $P_k(\tau)$. Розрахункові моделі для оцінювання цих ймовірностей при заданому напрацюванні τ наведені нижче:

$$P_x(\tau) = P(Z_x(\tau) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\omega_x} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (13)$$

$$P_c(\tau) = P(Z_c(\tau) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\omega_c} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (14)$$

$$P_d(\tau) = P(Z_d(\tau) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\omega_d} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (15)$$

$$P_k(\tau) = P(Z_k(\tau) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\omega_k} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (16)$$

Оскільки відмова резервуара настає за відмови хоча б однієї з його підсистем, а

корозія є головним і загальним механізмом відмов нафтового резервуара [11–13], ймовірність ненастання граничного стану циліндричної стінки за умовою міцності та ймовірності ненастання нормативних відмов корпусу та резервуара в цілому можуть бути наближено оцінені на основі моделі «слабшої ланки» [6–9] таким чином:

$$P_s(\tau) = \min[P_1(\tau), \dots, P_n(\tau)], \quad (17)$$

$$P_{cor}(\tau) = \min[P_1(\tau), \dots, P_n(\tau), P_x(\tau)], \quad (18)$$

$$P_{rez}(\tau) = \min[P_c(\tau), P_x(\tau), P_d(\tau), P_k(\tau)]. \quad (19)$$

Зауважимо, що ймовірності $P_i(t)$, $P_x(\tau)$, $P_c(\tau)$, $P_d(\tau)$, $P_k(\tau)$, $P_s(\tau)$, $P_{cor}(\tau)$, $P_{rez}(\tau)$ розглядаються нами як ймовірності ненастання нормативних відмов резервуара в рамках діючих нормативних документів. Ці ймовірності ще можна трактувати як ймовірності того, що протягом напрацювання τ не буде потрібний капітальний ремонт відповідних конструктивних елементів резервуара.

З урахуванням вищевикладеного поставимо наступну задачу оптимального проектування. Розглядається проект РВС, визначений з точністю до значень товщини основних конструктивних елементів: днища, настилу покрівлі, поясів циліндричної стінки і вузла сполучення стінки з днищем.

Обшивка резервуара повинна витримувати комбіноване навантаження гідростатичного тиску, а також поздовжнього (снігове навантаження) і поперечного (вітрове навантаження) стиснення. Задано строк служби T і необхідний (гарантований) рівень надійності резервуара P^* . Потрібно знайти такі значення товщини конструктивних елементів резервуара, які протягом часу T з ймовірністю не менше ніж P^* забезпечують його нормальну роботу при мінімально можливій очікуваній вартості.

Вважаючи, що повні очікувані витрати на будівництво та експлуатацію резервуара складаються з проектної вартості C_0 ,

витрат на технічне обслуговування і ремонти A та гіпотетичних збитків унаслідок відмов резервуара протягом заданого терміну експлуатації, отримуємо наступну модель оптимального проектування:

$$3\left[2\pi r \frac{L}{n} \rho \sum_{i=1}^{nx} x_i + \pi r^2 (x_{n+1} + x_{n+2})\right] + \int_0^T \psi [1 - P_{rez}(t)] dt \rightarrow \min \quad (20)$$

$$P_{rez}(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, t) \geq P^*, \quad t \in [0, T]; \quad (21)$$

$$\delta^- \leq x_i \leq \delta^+, \quad i = \overline{1, n+2}. \quad (22)$$

де перша складова цільової функції – це типова оцінка проектної вартості резервуара C_0 , яка визначається як потроєна вартість металопрокату, необхідного для побудови резервуара; друга і третя складові цільової функції – це, відповідно, витрати на технічне обслуговування і ремонти (величина A визначається виходячи з норми щорічних амортизаційних відрахувань, що становить 5 % проектної вартості резервуара) і наближена оцінка гіпотетичних збитків внаслідок відмов резервуара протягом заданого терміну експлуатації; ψ – усереднена величина збитків від відмови резервуара, яка визначається виходячи з апіорного економічного аналізу наслідків відмови споруди; $P_{rez}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи резервуара, що визначається за (19); x_1, x_2, \dots, x_n – шукані проектні значення товщини поясів циліндричної стінки; x_{n+1}, x_{n+2} – шукані проектні значення товщини, відповідно, днища і покрівлі; δ^-, δ^+ – відповідно, нижня і верхня межі варіювання проектної товщини конструктивних елементів, що визначаються сортаментом листової сталі.

Дана модель належить до класу задач нелінійного математичного програмування з

цілочисловими змінними. Враховуючи те, що нижні пояси корпусу резервуара працюють, головним чином, на міцність, а верхні пояси – на стійкість, для розв'язання цієї задачі розроблено спеціальний «жадібний» алгоритм, який передбачає виконання $n+2$ кроків. На кожному із цих кроків визначалося локально оптимальне (мінімальне) значення товщини окремого конструктивного елемента з наступним округленням до більшого цілого.

Зазначимо, що на основі моделі (20) – (22) визначаються такі (оптимальні) значення невідомих $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, x_{n+2}$, які доставляють мінімум цільовій функції (20) при виконанні обмеження на рівень надійності резервуара (21) і конструктивних обмежень (22).

Числові розрахунки проводилися стосовно проекту РВС-5000 для зберігання світлих нафтопродуктів за наступних вихідних даних: $L = 1\,490$ см; $r = 1\,046$ см; $n = 10$; $R_y = 230$ МПа; $T = 40$ років; $\psi = 50 C_0$. Висота затоки приймалася рівною $1\,420$ см, щільність нафтопродукту, що зберігається, – $0,0009$ кг/см³, надлишковий тиск у газовому просторі – $2,0$ кПа, вакуум – $0,25$ кПа; кількість циклів навантаження в рік – 60 . Значення товщини конструктивних елементів варіювалися від $\delta^- = 1$ мм до $\delta^+ = 12$ мм.

Величина незворотного корозійного зносу конструктивних елементів резервуара при заданому напрацюванні τ визначалася за спрощеною формулою:

$$\Delta = v\tau,$$

де v – середня швидкість поверхневої корозії конструктивного елемента, яка розглядалася як випадкова величина, розподілена за нормальним законом. Математичні очікування і середньоквадратичні відхилення поверхневої корозії металоконструкцій резервуара приймалися за [11].

У таблицях 1 і 2 показано отримані оптимальні значення проектної товщини конструктивних елементів резервуара

залежно від необхідного рівня надійності P^* .

Таблиця 1

Оптимальні значення товщини днища, покрівлі та вузла сполучення стінки з днищем

Конструктивний елемент	Необхідний рівень надійності	Товщина елемента, мм
Днище	0,950	6
	0,990	7
	0,999	7
Покрівля	0,950	4
	0,990	4
	0,999	5
Вузол сполучення стінки з днищем	0,950	9
	0,990	10
	0,999	11

Таблиця 2

Оптимальні значення товщини поясів циліндричної стінки

Конструктивний елемент	Необхідний рівень надійності	Товщина елемента, мм
Пояс 1	0,950	9
	0,990	10
	0,990	11
Пояс 2	0,950	7
	0,990	8
	0,999	9
Пояс 3	0,950	7
	0,990	7
	0,999	7
Пояс 4	0,950	6
	0,990	6
	0,999	6
Пояси 5–6	0,950	5
	0,990	5
	0,999	5
Пояси 7–10	0,950	4
	0,990	4
	0,999	4

Аналізуючи дані, наведені в цих таблицях, легко помітити, що збільшення величини P^* зумовлює, в першу чергу, збільшення проектних значень товщини днища і перших двох поясів корпусу резервуара. Це говорить, що забезпечення надійності РВС пов'язане, головним чином, із забезпеченням міцності двох нижніх

поясів і герметичності днища. При цьому ключову роль відіграє міцність 1-го поясу, що підтверджується даними численних натурних обстежень цих споруд.

Крім того, наведені дані показують, що збільшення величини P^* практично не впливає на проектні значення товщини верхніх поясів і настилу покрівлі. Це означає, що для резервуарів такого типу втрата стійкості не характерна.

Висновки

Розроблено модель оптимального проектування нафтових резервуарів, яка сформульована в термінах нелінійної задачі математичного програмування з цілочисловими змінними. Ця модель дозволяє приймати раціональні проектні рішення за критерієм мінімуму повних очікуваних витрат при забезпеченні необхідного рівня надійності протягом заданого терміну експлуатації. Складовими даної моделі є розрахункові моделі оцінки надійності РВС, параметри яких визначаються за наявними результатами статистичної обробки даних натурних обстежень аналогічних об'єктів.

Для чисельної реалізації запропонованої моделі оптимального проектування розроблено спеціальний «жадібний» алгоритм. Отримані результати показують, зокрема, що забезпечення надійності РВС пов'язане, головним чином, із забезпеченням міцності двох нижніх поясів і герметичності днища. При цьому ключову роль відіграє міцність 1-го поясу. Все це добре узгоджується з наявними даними численних натурних обстежень і статистикою капітальних ремонтів РВС, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

Запропоновані моделі та методи можуть служити досить ефективним математичним інструментом для розв'язання (на ранніх етапах проектування) задач раціонального забезпечення надійності нафтових резервуарів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [чинні від 01.01.2015]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. 205 с. (Державні будівельні норми України).
2. ВБН 2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа [чинні від 01.10.1994]. Вид. офіц. Київ : Держкомнафтогаз, 1994. 98 с. (Ведомственные Строительные Нормы).
3. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту [чинні від 03.07. 1999]. Вид. офіц. Київ : Укрнафтопродукт, 1997. 297с.
4. Гайсин Э. Ш., Фролов Ю. А. Оценка надежности резервуаров вертикальных стальных по критерию вероятности безаварийной работы. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2014. № 4. С. 11–15.
5. Гайсин Э. Ш., Гайсин М. Ш. Современное состояние проблемы обеспечения надежности резервуаров для нефти и нефтепродуктов. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2016. № 2. С. 31–40.
6. Семенец С. М., Насонова С. С., Олевський В. І., Волчок Д. Л. Управління проектною надійністю нафтових резервуарів. *Опір матеріалів і теорія споруд*. Вип. 103. Київ : КНУБА, 2019. С. 165–176.
7. Семенец С. Н., Насонова С. С., Власенко Ю. Е., Кривенкова Л. Ю. Расчетные модели надежности нефтяных резервуаров. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 1. С. 60–67.
8. Семенец С. Н., Насонова С. С., Власенко Ю. Е., Кривенкова Л. Ю. Управление эксплуатационной надежностью нефтяных резервуаров. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2018. Вып. 106. С. 122–128.
9. Семенец С. Н., Насонова С. С., Волчок Д. Л., Вельмагина Н. А. Обеспечение надежности нефтяных резервуаров в период эксплуатации. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 1(261–262). С. 99–110.
10. Насонова С. С., Рижков Е. В. Комп'ютерне моделювання прототипу складної технічної системи за економічними критеріями. *Інтернаука : Міжнародний науковий журнал*. № 8 (108). 2021. С. 42–44.
11. Егоров Е. А. Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации : монография. Днепропетровск: ПГАСА, 1996. 99 с.
12. Егоров Е. А., Дейнега А. С. Исследование зависимости основных компонентов НДС в уторном узле РВС от характера взаимодействия днища с основанием. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. № 3. С. 47–54.
13. Егоров Е. А. Анализ надежности стальных резервуаров для хранения товарных нефтепродуктов. *Современные строительные конструкции из металла и древесины*. Одесса : ОГАСА, 1999. С. 61–65.

REFERENCES

1. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normi proektuvannya chynni vid 01.01.2015* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design norms valid from 01.01.2015]. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2014, 205 p. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
2. *VBN 2.2-58.2-94. Rezervuari vertikalni stalevi dlya zberigannya nafti i naftoproduktiv z tiskom nasichenih pariv ne vische 93.3 kPa chynni vid 01.10.1994* [VBN 2.2-58.2-94. Vertical steel tanks for storing oil and oil products with a pressure of saturated vapors not higher than 93.3 kPa valid from 01.10.1994]. Official edition. Kyiv : Derzhkomnaftogaz Publ., 1994, 98 p. (Departmental Building Regulations). (in Ukrainian).
3. *Pravila tehnichnoyi ekspluatatsiyi rezervuariv ta instruktsiyi po yih remontu chynni vid 01.01.2015* [Rules for the technical operation of tanks and instructions for their repair valid from 01.01.2015]. Official edition. Kyiv : Ukrnaftoprodukt Publ., 1997, 297 p. (in Ukrainian).
4. Gaysin E.Sh. and Frolov Yu.A. *Otsenka nadezhnosti rezervuarov vertikalnykh stalnykh po kriteriyu veroyatnosti bezavariynoy raboty* [Evaluation of the reliability of vertical steel tanks according to the criterion of the probability of trouble-free operation]. *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syrya* [Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbons]. 2014, no. 4, pp. 11–15. (in Russian).
5. Gaysin E.Sh. and Gaysin M.Sh. *Sovremennoe sostoyaniye problemy obespecheniya nadezhnosti rezervuarov dlya nefiti i nefteproduktov* [The current state of the problem of ensuring the reliability of tanks for oil and oil products]. *Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syrya* [Transport and Storage of Petroleum Products and Hydrocarbons]. 2016, no. 2, pp. 31–40. (in Russian).
6. Semenets S.M., Nasonova S.S., Olevskiy V.I. and Volchok D.L. *Upravlinnya proektnoyu nadiynistyuu naftovykh rezervuariv* [Management of design reliability of oil tanks]. *Opir materialiv i teoriya sporud* [Resistance of materials and theory of structures]. Kyiv : KNUBA Publ., 2019, iss. 103, pp. 165–176. (in Ukrainian).

7. Semenets S.N., Nasonova S.S., Vlasenko Yu.E. and Krivenkova L.Yu. *Raschetnyie modeli nadezhnosti neftyanyih rezervuarov* [Calculation models of the reliability of oil tanks]. *Visnik Prydniprovskoyi derzhavnoi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, iss. 1, pp. 60–67. (in Russian).

8. Semenets S.N., Nasonova S.S., Vlasenko Yu.E. and Krivenkova L.Yu. *Upravlenie ekspluatatsionnoy nadezhnostyu neftyanyih rezervuarov* [Operational reliability management for oil tanks]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2018, iss. 106, pp. 122–128. (in Russian).

9. Semenets S.N., Nasonova S.S., Volchok D.L. and Velmagina N.A. *Obespechenie nadezhnosti neftyanyih rezervuarov v period ekspluatatsii* [Ensuring the reliability of oil tanks during operation]. *Visnik Prydniprovskoyi derzhavnoi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, iss. 1 (261–262), pp. 99–110. (in Russian).

10. Nasonova S.S. and Rizhkov Yev.V. *Komp'yuterne modelyuvannya prototipu skladnoyi tehichnoyi sistemi za ekonomichnimi kriteriyami* [Computer modeling of a prototype of a complex system according to economic criteria]. *Internauka : Mizhnarodniy naukoviy zhurnal* [Internauka : International Scientific Journal]. 2021, no. 8 (108), pp. 42–44. (in Ukrainian).

11. Yegorov Yev.A. *Issledovanie i metodyi raschetnoy otsenki prochnosti, ustoychivosti i ostatochnogo resursa stalnyih rezervuarov, nahodyaschihsya v ekspluatatsii : monografiya* [Research and methods for calculating the strength, stability and residual life of steel tanks in operation : a monograph]. Dnipropetrovsk : PGASA Publ., 1996, 99 p. (in Russian).

12. Yegorov Yev.A. and Deynega A.S. *Issledovanie zavisimosti osnovnyih komponentov NDS v utornom uzle RVS ot haraktera vzaimodeystviya dnischa s osnovaniem* [Investigation of the dependence of the main components of the stress-strain state in the morning node of an oil reservoir on the nature of the interaction of the bottom with the base]. *Visnik Prydniprovskoyi derzhavnoi akademiyi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2017, iss. 3, pp. 47–54. (in Russian).

13. Yegorov Yev.A. *Analiz nadezhnosti stalnyih rezervuarov dlya hraneniya tovarnyih nefteproduktov* [Analysis of the reliability of steel tanks for the storage of commercial petroleum products]. *Sovremennyye stroitelnyie konstruksii iz metalla i drevesiny* [Modern Building Structures Made of Metal and Wood]. Odessa : OGASA Publ., 1999, pp. 61–65. (in Russian).

Надійшла до редакції: 26.10.22.