

УДК 624.953.014.2.004.15+539.3

## УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТНОЮ НАДІЙНІСТЮ НАФТОВИХ РЕЗЕРВУАРІВ

**С.М. Семенець<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій

**С.С. Насонова<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук, доцент кафедри вищої математики

**В.І. Олевський<sup>2</sup>,**

д-р техн. наук, зав. кафедри вищої математики

**Д.Л. Волчок<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент кафедри будівельної механіки

<sup>1</sup>Придніпровська державна академія будівництва та архітектури<sup>2</sup>Український державний хіміко-технологічний університет

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Згідно з діючими в Україні нормативними документами [7,9] нафтові резервуари (РВС) проектується на основі методу граничних станів. Із застосуванням цього методу забезпечується надійність резервуарів в умовах і режимах роботи, передбачених нормами [6, 7]. Однак питання, пов'язані із забезпеченням надійності РВС, що проектується на термін служби, що перевищує нормативний, а також питання економічної ефективності прийнятих проектних рішень вимагають подальшої наукової розробки. У даній статті приводиться загальна методика оцінки надійності РВС протягом заданого напруцювання. Пропонується модель оптимального проектування РВС за критерієм мінімуму проектної вартості при забезпеченні заданого рівня надійності протягом потрібного терміну служби. Дана модель сформульована в термінах нелінійної задачі математичного програмування, а для її чисельної реалізації розроблений спеціальний алгоритм, заснований на принципах побудови «жадібних» алгоритмів. Приводяться отримані в результаті численних експериментів економічно раціональні проектні значення товщини конструктивних елементів резервуара об'ємом 5000 м<sup>3</sup> в залежності від необхідного рівня надійності. *Мета* - в рамках діючих норм проектування і з урахуванням наявних даних технічної діагностики РВС розробити метод раціонального забезпечення заданого рівня проектної надійності РВС протягом необхідного терміну експлуатації. *Висновки.* Запропонована модель оптимального проектування дозволяє управляти надійністю нафтових резервуарів за критерієм мінімуму початкової вартості при заданому терміні експлуатації. Параметри цієї моделі визначаються (і можуть коригуватися стосовно окремо взятого резервуару або парку резервуарів) за результатами статистичної обробки даних натурних обстежень аналогічних об'єктів, що підвищує точність прогнозу в кожному окремому випадку. В результаті розглянуті моделі та алгоритми можуть служити досить ефективним математичним інструментом при дослідженні проблем надійності і довговічності нафтових резервуарів.

**Ключові слова:** нафтовий резервуар; технічна діагностика; математична модель; управління надійністю

### Вступ

Надійність сталевих вертикальних резервуарів наземного типу для довгострокового зберігання нафти і нафтопродуктів (РВС) в основному залежить від надійності їх сталевих конструкцій. В період експлуатації РВС відчувають механічні (статичні і динамічні) навантаження, схильні до впливу агресивних середовищ, температурних впливів і інших негативних чинників, які діють спільно і нерідко в самих несприятливих поєднаннях. Тому відмови нафтових резервуарів викликаються не тільки прикладеними

навантаженнями, але і складними фізико-механічними процесами, що протікають в їх обсязі і на поверхні. Ці процеси носять яскраво виражений випадковий характер, а їх інтенсивність залежить від виду та рівня напружено-деформованого стану, ступеня деградації споруди.

Нафтові резервуари відносяться до споруд високого ступеня відповідальності. Порушення їх цілісності, а тим більше часткові або повні руйнування призводять до значних матеріальних і моральних збитків, що пов'язано з втратою нафтопродукту, забрудненням навколишнього середовища, і в багатьох випадках з людськими жертвами. Аварії великих РВС прийнято відносити до розряду катастроф державного масштабу. Так, тільки екологічний збиток від аварії нафтового резервуара може досягати двадцятикратної проектної вартості самої споруди.

Детальний аналіз досліджень, присвячених проблемі забезпечення надійності нафтових резервуарів, виконаний в огляді [1], показав, що в них належним чином не враховується вплив і значимість конструктивних елементів на оцінку рівня надійності резервуара в цілому. При цьому різні моделі і методи оцінки 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 маловивченою залишається проблема оцінки і забезпечення надійності РВС на різних стадіях їх життєвого циклу. Тому питання, пов'язані з оцінкою і ефективним управлінням надійністю нафтових резервуарів, є актуальними [1,2, 8, 10-12].

### **1. Постановка проблеми**

Згідно з діючими в Україні нормативними документами [7,9] нафтові резервуари проектуються на основі методу граничних станів. Із застосуванням цього методу забезпечується надійність РВС в умовах і режимах роботи, передбачених нормами [6,7]. Однак питання, пов'язані із забезпеченням надійності резервуарів, що проектуються на термін служби, що перевищує нормативний, а також питання економічної ефективності прийнятих проектних рішень вимагають подальшої наукової розробки.

У даній статті наводиться загальна методика оцінки надійності РВС протягом заданого напруження. Параметри відповідних розрахункових моделей визначаються на основі статистичної обробки даних технічної діагностики резервуарів, що раніше перебували в експлуатації, що підвищує точність прогнозу і достовірність отриманих результатів. Пропонується модель оптимального проектування РВС за критерієм мінімуму проектної вартості при забезпеченні заданого рівня надійності протягом необхідного терміну служби. Дана модель сформульована в термінах нелінійної задачі математичного програмування, а для її чисельної реалізації розроблений спеціальний алгоритм, заснований на принципах побудови «жадібних» алгоритмів. Наводяться отримані в результаті чисельних експериментів економічно раціональні проектні значення товщини конструктивних елементів резервуара об'ємом 5000 м<sup>3</sup> в залежності від необхідного рівня надійності.

## 2. Мета і задача дослідження

Мета - в рамках діючих норм проектування [7, 9] і з урахуванням наявних даних технічної діагностики РВС, що раніше перебували в експлуатації, розробити метод раціонального забезпечення заданого рівня проектної надійності РВС протягом необхідного терміну експлуатації.

Відповідно до даної мети ставляться такі завдання:

1. Розробити модель оптимального проектування РВС за критерієм мінімуму проектної вартості при забезпеченні заданого рівня надійності протягом необхідного терміну служби.

2. Розробити ефективний алгоритм чисельного розв'язання сформульованої задачі оптимального проектування.

3. На прикладі розрахунку резервуара об'ємом 5000 м<sup>3</sup> досліджувати вплив величини заданого рівня надійності на проектні значення товщини конструктивних елементів.

## 3. Основний матеріал

Відповідно до [7,8] нафтовий резервуар розглядається як складна система, що складається з 4-х логічно послідовно з'єднаних підсистем (основних конструктивних елементів): днища і покрівлі, що виконують захисну функцію; циліндричної стінки (безмоментної області корпусу резервуара, що працює на міцність і стійкість); вузла сполучення стінки з днищем (моментної області корпусу резервуара, що ще має назву уторного вузла, що працює на міцність). Загальна схема резервуара показана на рис. 1, а його структурна схема надійності зображена на рис. 2. Зварні з'єднання приймаються рівними по міцності до основного металу резервуару. Вважається, що резервуар виконує властиві йому функції з приймання, зберігання та відпуску нафтопродуктів в нормальних режимах роботи відповідно до діючих нормативних документів і з проектним рівнем заливу, а погіршення технічного стану резервуара в період експлуатації відбувається поступово і обумовлюється фізичним зносом його металоконструкцій. Під відмовою розуміється перехід об'єкта з працездатного стану в непрацездатний стан. Основним механізмом відмов резервуара вважається корозійний знос. При цьому приймається, що локальні корозійні пошкодження конструктивних елементів усуваються на основі поточних ремонтів, що проводяться в рамках діючої системи технічного обслуговування і ремонтів. Як критерій відмов резервуара приймається порушення хоча б одного з нормативних умов його міцності, стійкості і герметичності. Форс-мажорні ситуації типу катастроф, грубих помилок проектування, виготовлення і монтажу і т.д. не розглядаються.

Згідно [6,7] РВС протягом усього терміну служби повинні відповідати наступним нормативним вимогам ненастання граничного стану:

$$\gamma_c R_y \delta_i(t) - p_i r \geq 0, i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$\gamma_c R_y \delta_1^2(t) - 6M_0 \geq 0; \quad (2)$$

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

$$\delta_{\text{дн}}(t) - \frac{\delta_{\text{дн}0}}{2} \geq 0; \quad (4)$$

$$\delta_{\text{кр}}(t) - \frac{\delta_{\text{кр}0}}{2} \geq 0. \quad (5)$$

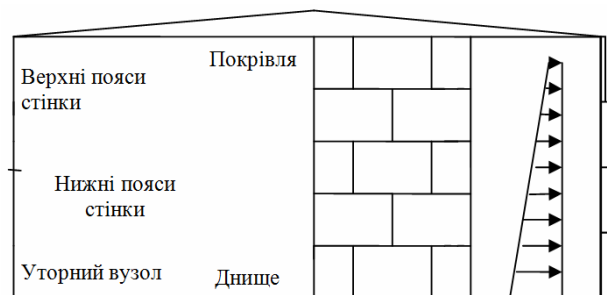


Рис. 1. Загальна схема РВС

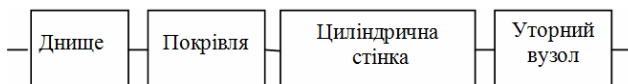


Рис. 2. Структурна схема надійності РВС

У наведених формулах (1) – (5) позначено:  $t$  – напрацювання конструктивного елемента;  $R_y$  – розрахунковий опір сталі;  $n$  – число поясів циліндричної стінки;  $\delta_i(t)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – залишкове (поточне) значення товщини  $i$ -го поясу;  $\delta_{\text{дн}}(t)$ ,  $\delta_{\text{кр}}(t)$  – залишкові (поточні) значення товщини, відповідно, днища і настилу покрівлі;  $\delta_{\text{дн}0}$ ,  $\delta_{\text{кр}0}$  – проектні значення товщини, відповідно, днища і настилу покрівлі;  $r$  – радіус серединної поверхні резервуара;  $\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи (для нижнього поясу  $\gamma_c = 0,6$ , для інших поясів циліндричної стінки  $\gamma_c = 0,9$ , для уторного вузла  $\gamma_c = 1,2$ );  $p_i$  – гідростатичний тиск на  $i$ -й пояс;  $\sigma_1(t)$ ,  $\sigma_2(t)$  – поточні значення меридіональних і кільцевих напружень, що виникають в стінці від, відповідно, поздовжніх і радіальних зовнішніх навантажень;  $\sigma_{cr1}(t)$ ,  $\sigma_{cr2}(t)$  – критичні значення напружень при стисканні, відповідно, в осьовому і радіальному напрямку;  $M_0$  – момент, що вигинає, в зоні сполучення стінки з днищем.

Далі ліві частини нерівностей (1) – (5) позначимо, відповідно,  $Z_i(t)$ ,  $Z_s(t)$ ,  $Z_y(t)$ ,  $Z_d(t)$ ,  $Z_k(t)$ . Функції  $Z_i(t)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) назвемо залишковими запасами міцності поясів циліндричної стінки, функцію  $Z_s(t)$  – залишковим запасом міцності вузла сполучення стінки з днищем,  $Z_y(t)$  – залишковим запасом

стійкості циліндричної стінки,  $Z_d(t)$ ,  $Z_k(t)$  – залишковими запасами герметичності, відповідно, днища і покрівлі.

Внаслідок корозійного зносу товщина конструктивних елементів РВС в період експлуатації зменшується. Залишкове значення товщини будь-якого конструктивного елемента резервуара, що має напрацювання  $t$ , можна описати співвідношенням

$$\delta(t) = \delta_0 - \Delta(t), \quad (6)$$

де  $\delta_0$  і  $\Delta(t)$  – відповідно, проектне значення товщини і поточна величина незворотного корозійного зносу конструктивного елемента.

Важливо відзначити, що система функцій  $Z_i(t)$ ,  $Z_s(t)$ ,  $Z_y(t)$ ,  $Z_d(t)$ ,  $Z_k(t)$  спільно з співвідношенням (6) описує зміну технічного стану нафтових резервуарів внаслідок корозійного зносу їх конструктивних елементів. З огляду на випадковий характер корозії, кожну з перерахованих функцій будемо розглядати як випадкову функцію величини незворотного корозійного зносу, що залежить від часу як від параметра.

Результати статистичної обробки даних великого числа натурних обстежень [3] показують, що корозійний знос сталевих конструкцій нафтових резервуарів досить добре описується нормальним законом розподілу ймовірностей. Тому, з огляду на роботи [4, 8], далі приймається, що при будь-якому фіксованому напрацюванні  $t$  значення зазначених вище залишкових запасів також розподіляються за нормальним законом.

Введемо до розгляду індекси забезпеченості міцності, стійкості та герметичності резервуарних конструкцій, що визначаються як відношення математичного очікування до середньоквадратичного відхилення відповідних залишкових запасів. Індексом забезпеченості міцності  $i$ -го пояса циліндричної стінки при заданому напрацюванні  $t$  будемо називати функцію виду

$$w_i(t) = \frac{\bar{Z}_i(t)}{\tilde{Z}_i(t)} = \frac{\gamma_c R_y [\delta_{i0} - \bar{\Delta}_i(t)] - p_i r}{\gamma_c R_y \tilde{\Delta}_i}, \quad i = \bar{1}, n, \quad (7)$$

де надстроchna риса і хвиляста лінія позначають, відповідно, математичне очікування і середньоквадратичне відхилення випадкової величини.

Аналогічно (7) визначаються індекси забезпеченості міцності уторного вузла  $w_s(t)$ , стійкості циліндричної стінки  $w_y(t)$ , а також герметичності днища  $w_d(t)$  і покрівлі  $w_k(t)$ . Відповідні формули наведені в [8].

Зауважимо, що всі зазначені вище індекси забезпеченості є безрозмірними детермінованими функціями часу і виражаються через математичні 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 при технічних обстеженнях резервуарів.

З огляду на співвідношення (1) і прийнятий нормальний закон розподілу значень розглянутих вище запасів, можна записати наступну

розрахункову модель збереження міцності  $i$ -го поясу циліндричної стінки резервуара протягом заданого напрацювання:

$$P_i(t) = P(Z_i(t) \geq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_i} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (8)$$

Аналогічно, беручи до уваги співвідношення (2) - (5), через функцію нормованого нормального розподілу і відповідні індекси забезпеченості виражаються ймовірності збереження міцності уторного вузла  $P_s(t)$ , стійкості циліндричної стінки  $P_y(t)$ , герметичності днища  $P_d(t)$  і покрівлі  $P_k(t)$ . Розрахункові моделі для оцінки цих ймовірностей при заданому напрацюванні  $t$  наведені в [8].

При визначенні ймовірності безвідмовної роботи всього резервуару будемо виходити з таких очевидних положень.

1. Відмова резервуара настає при відмові хоча б одного з його основних конструктивних елементів.

2. Корозія є головним і загальним механізмом відмов конструктивних елементів резервуара.

3. Відмови конструктивних елементів є статистично залежними подіями (що робить некоректним застосування відомого правила множення ймовірностей при визначенні ймовірності безвідмовної роботи всього резервуара).

З урахуванням даних положень, ймовірність безвідмовної роботи резервуара протягом заданого напрацювання може бути наближено оцінена на основі моделі «слабшої ланки» [4, 8]. Відповідно до цієї моделі, якщо відмови елементів системи з логічно послідовним з'єднанням елементів викликаються однією і тією ж причиною, то першим виходить з ладу «слабший» елемент, ймовірність відмови якого найбільша (прикладом може служити руйнування механічного ланцюга, якщо прикладене навантаження, що перевищує міцність однієї довільної ланки). Стосовно до нафтових резервуарів модель «слабшої ланки» має такий вигляд [8]:

$$P_{rez}(t) = \min\{P_c(t), P_s(t), P_d(t), P_k(t)\}, \quad (9)$$

де  $P_c(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи циліндричної стінки, яка оцінюється за формулою

$$P_c(t) = \min\{P_i(t), \dots, P_n(t), P_y(t)\}, \quad (10)$$

Слід зазначити, що ймовірність  $P_{rez}(t)$  розглядається нами як ймовірність ненастання граничного стану резервуара в умовах і режимах роботи, передбачених діючою системою технічного обслуговування і ремонтів. Цю ймовірність ще можна трактувати як ймовірність того, що протягом заданого напрацювання  $t$  не буде потрібно проводити капітальний ремонт резервуару.

Поставимо наступну задачу оптимального проектування. Розглядається проект РВР, визначений з точністю до значень товщини основних конструктивних елементів: днища, настилу покрівлі, поясів циліндричної

стілки і вузла сполучення стінки з днищем. Обшивка резервуару повинна витримувати комбіноване навантаження гідростатичного тиску, а також поздовжнього (снігове навантаження) і поперечного (вітрове навантаження) стиснення. Задані строк служби  $T$  і необхідний рівень надійності резервуара  $P^*$ . Потрібно знайти такі значення товщини конструктивних елементів резервуара, які протягом часу  $T$  з ймовірністю не менш ніж  $P^*$  забезпечують його нормальну роботу (в умовах і режимах, передбачених діючою системою технічного обслуговування і ремонтів) при мінімально можливій початкової (проектної) вартості.

Вважаючи, що проектна вартість резервуара пропорційна його проектній масі, отримаємо наступну оптимізаційну модель:

$$2\pi r \frac{L}{n} \rho \sum_{i=1}^n x_i + \pi r^2 \rho (x_{n+1} + x_{n+2}) \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$P_{rez}(x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, t) \geq P^*, t \in [0, T]; \quad (12)$$

$$\delta^- \leq x_i \leq \delta^+, i = \overline{1, n+2}, \quad (13)$$

де  $P_{rez}$  – ймовірність безвідмовної роботи резервуара, що визначається за (9);  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – проектні значення товщини поясів циліндричної стінки;  $x_{n+1}, x_{n+2}$  – проектні значення товщини, відповідно, днища і настилу покрівлі;  $\delta^-, \delta^+$  – відповідно, нижня і верхня границі зміни проектної товщини конструктивних елементів, що визначаються сортаментом листової сталі;  $r, L$  – відповідно, радіус і висота резервуару;  $\rho$  – питома вага сталевого прокату.

На основі моделі (11) - (13) визначаються такі (оптимальні) значення невідомих  $x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, x_{n+2}$ , які доставляють мінімум цільовій функції (11) при виконанні обмежень (12) і (13).

Дана модель відноситься до класу задач нелінійного математичного програмування і має такі особливості:

1. Цільова функція (11) є адитивною.
2. Обмеження (12) рівносильно наступній системі нерівностей

$$\begin{aligned} w_1(X, T) \geq w^*, \dots, w_n(X, T) \geq w^*, w_s(X, T) \geq w^*, \\ w_y(X, T) \geq w^*, w_d(X, t) \geq w^*, w_k(X, T) \geq w^*, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n+2})$  – вектор невідомих;  $w^*$  – мінімально допустиме значення індексів забезпеченості міцності, стійкості і герметичності, яке визначається по таблиці значень функції нормованого нормального розподілу в залежності від величини  $P^*$ .

З огляду на зазначені особливості, а так само те, що нижні пояси корпусу резервуара працюють, головним чином, на міцність, а верхні пояси - на стійкість, для чисельної реалізації моделі (11) - (13) був розроблений «жадібний» алгоритм, який передбачає виконання  $n+2$  кроків. На кожному з цих кроків визначалося локально оптимальне (мінімальне) значення товщини окремого конструктивного елемента, що

відповідає відповідним обмеженням системи (14), з наступним округленням до більшого значення.

Чисельні розрахунки проводилися стосовно проекту РВС-5000 при наступних вихідних даних:  $L=1490$  см;  $r=1046$  см;  $n=10$ ;  $R_y=230$  МПа;  $T=40$  років. Висота затоки приймалася рівною 1420 см, щільність нафтопродукту, що зберігається –  $0.0009$  кг/см<sup>3</sup>, надлишковий тиск в 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  $t$  визначалася за спрощеною формулою

$$\Delta(t) = v_s t,$$

де  $v_s$  – середня швидкість поверхневої корозії конструктивного елементу, яка розглядалася як випадкова величина, розподілена за нормальним законом. У розрахунках використовувалися статистичні характеристики швидкостей поверхневої корозії конструктивних елементів резервуарів для зберігання світлих нафтопродуктів (бензин, гас, дизельне паливо). Їх значення приймалися по [3].

На рис. 3 наведені графіки, що показують зміну проектної товщини конструктивних елементів РВС-5000 в залежності від заданої величини  $P^*$  при проектному терміні експлуатації  $T=40$  років.

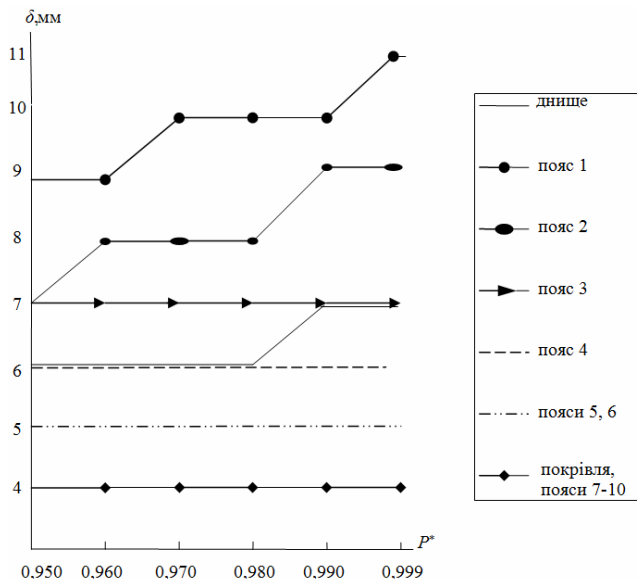


Рис. 3. Зміна проектної товщини конструктивних елементів РВС -5000 в залежності від необхідного рівня надійності  $P^*$



Аналізуючи показані графіки, неважко помітити, що збільшення необхідного рівня надійності  $P^*$  призводить, в першу чергу, до збільшення проектних значень товщини днища і перших двох поясів корпусу резервуара. Це говорить про те, що забезпечення надійності РВС пов'язано, 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 графіки показують, що збільшення величини  $P^*$  практично не впливає на проектні значення товщини верхніх поясів і настилу покрівлі. Це означає, що для резервуарів даного типу втрата стійкості не характерна, а жорсткість вимог до надійності покрівлі пов'язано, перш за все, зі збільшенням обсягу діагностичних та ремонтно-відновлювальних робіт, вироблених в рамках діючої системи технічного обслуговування і ремонтів.

### Висновки

Оптимізаційна модель (11) - (13) дозволяє управляти проектною надійністю нафтових резервуарів за критерієм мінімуму початкової вартості при заданому терміні експлуатації. Параметри цієї моделі визначаються (і можуть коригуватися стосовно окремо взятому резервуару або парку резервуарів) за результатами статистичної обробки даних натурних обстежень аналогічних об'єктів, що підвищує точність прогнозу в кожному окремому випадку. В результаті розглянуті моделі та алгоритми можуть служити досить ефективним математичним інструментом при дослідженні проблем надійності і довговічності нафтових резервуарів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гайсин Э.Ш.* Современное состояние проблемы обеспечения надежности резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Э.Ш. Гайсин, М.Ш. Гайсин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М: ОБРАКАДЕМНАУКА, 2016. – №2. – С.31–40.
2. *Гайсин Э.Ш.* Оценка надежности резервуаров вертикальных стальных по критерию вероятности безаварийной работы / Э.Ш. Гайсин, Ю.А. Фролов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М: ОБРАКАДЕМНАУКА, 2014. – №4. – С.11–15.
3. *Егоров Е.А.* Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации: монография / Е.А. Егоров. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – 99 с.
4. *Капур К.* Надежность и проектирование систем / К. Капур , Л. Ламберсон: пер. с англ. Коваленко Е.Г., под ред. Ушакова И.А. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
5. *Каштанов В. А.* Теория надежности сложных систем: учебное пособие / В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – М.: Физматлит, 2010. – 606 с.
6. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту: [змінені розділи та пункти розділів] / ДПІ УкрДНПРОнафтотранс. – [Чинні від 03.07. 1999]. – Київ.: Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.
7. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа: ВН 2.2-58.2-94 / Держ. ком. України по нафті і газу. – [Чинні від 01.10.1994]. – Київ: Держкомнафтогаз, 1994. – 98 с.
8. *Семенец С.Н.* Расчетные модели надежности нефтяных резервуаров / С.Н. Семенец, С.С. Насонова, Ю.Е. Власенко, Л.Ю. Кривенкова // Вісник ПДАБА.– Дніпропетровськ: ПДАБА, 2018. – №1. – С.60-67.
9. Сталеві конструкції. Норми проектування: ДБН В.2.6-198:2014.– [Чинний з 1.01. 2015]. – Київ.: Мінрегіон України, 2014. – 205с.

10. *Andrianov I. V., Olevskiy V. I. and Olevska Yu. B.* Estimation of parameter-dependent plates vibrations on the basis of the asymptotic method in AMiTaNS'18, AIP Conference Proceedings. – 2018, 2025, edited by M. D. Todorov (American Institute of Physics, Melville, NY), P. 070001. doi: 10.1063/1.5064913.
11. *Olevskiy V.I.* Asymptotic estimation of free vibrations of nonlinear plates with complicated boundary conditions / I.V. Andrianov, V.I. Olevskiy, Yu.B. Olevska / AIP Conference Proceedings. – 2017, 1895, P. 080001-1–080001-10. doi: 10.1063/1.5007395.
12. *Olevska Yu.* Mathematical models of magnetite desliming for automated quality control systems / Yu. Olevska, V. Mishchenko, and V. Olevskiy / AIP Conference Proceedings. – 2016, 1773, P. 040007-1–040007-6. doi: 10.1063/1.4964970.

## REFERENCES

1. *Gaysin E.Sh. and Gaysin M.Sh.* *Sovremennoe sostoyanie problemy obespecheniya nadezhnosti rezervuarov dlia nefi i nefteproduktov* [The current state of the problem of ensuring the reliability of petroleum reservoirs]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syria* [Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons]. Moscow: Obrakademnauka Publ., 2016. – №2. – pp. 31–40 (in Russian).
2. *Gaysin E.Sh. and Frolov Yu.A.* *Otsenka nadezhnosti rezervuarov vertikalnykh stalnykh po kriteriyu veroyatnosti bezavariynoy raboty* [Evaluation of the reliability of vertical steel reservoirs by the criterion of the probability of trouble-free operation]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syria* [Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons]. Moscow: Obrakademnauka Publ., 2014. – №4. – pp. 11–15 (in Russian).
3. *Egorov E.A.* *Issledovaniye i metody raschetnoy otsenki prochnosti, ustoychivosti i ostatochnogo resursa stalnykh rezervuarov, nakhodiashchikhsia v ekspluatatsii* [Research and methods of calculation estimation of durability, stability and remaining resource of steel reservoirs being in exploitation]: *Sb. nauch. trudov* [Coll. scientific. works], 1999, 99 p. (in Russian).
4. *Kapur K. and Lamberson L.* *Nadezhnost i proektirovaniye sistem* [Reliability and designing systems]. Moscow: Mir Publ., 1980, 604p. (in Russian).
5. *Kashtanov V.A. and Medvedev A.I.* *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem* [Theory of reliability of complex system]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2010, 606 p. (in Russian).
6. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii rezervuariv ta instruksii po yikh remontu . Dopovnennia ta sminy* [Rules of technical exploitation of reservoirs and instruction are on their repair. Addition and changes]. Kyiv: Ukrnaftoprodukt Publ., 1997, 297 p. (in Ukrainian).
7. *Reservuary vertikalni stalevi dlia sberigannia nafty i naftoproduktiv s tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93.3 kPa* [Reservoirs are vertical steel for storage oils and oil products with pressure of saturated napiv not higher 93.3 kPa]. *VBN 2.2-58.2-94* [Department building norms of Ukraine VBN 2.2-58.2-94]. Kyiv: 1994, 98 p. (in Ukrainian).
8. *Semenets S.N., Nasonova S.S., Vlasenko Y.E. and Krivencova L.Y.* *Raschetniye modeli nadezhnosti nefiannykh rezervuarov* [Calculation models of reliability of petroleum reservoirs]. *Visnyk PDABA* [Newspaper of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk: PDABA, 2018. – №1. pp. 60-67 (in Russian).
9. *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia.* [Steel construction. Design standards]. *DBN V.2.6-198:2014.* [State building norms of Ukraine DBN V.2.6-198:2014]. Kyiv: Minregion Ukraine Publ., 2014, 205p. (in Ukrainian).
10. *Andrianov I. V., Olevskiy V. I. and Olevska Yu. B.* Estimation of parameter-dependent plates vibrations on the basis of the asymptotic method in AMiTaNS'18, AIP Conference Proceedings. – 2018, 2025, edited by M. D. Todorov (American Institute of Physics, Melville, NY), P. 070001. doi: 10.1063/1.5064913.
11. *Olevskiy V.I.* Asymptotic estimation of free vibrations of nonlinear plates with complicated boundary conditions / I. V. Andrianov, V. I. Olevskiy, Yu. B. Olevska / AIP Conference Proceedings. – 2017, 1895, P. 080001-1–080001-10. doi: 10.1063/1.5007395.
12. *Olevska Yu.* Mathematical models of magnetite desliming for automated quality control systems / Yu. Olevska, V. Mishchenko and V. Olevskiy / AIP Conference Proceedings. –2016, 1773, P.040007-1–040007-6. doi: 10.1063/1.4964970

*Semenets S.N., Nasonova S. S., Olevskiy V.I., Volchok D.L.*

## PROJECT RELIABILITY MANAGEMENT OF PETROLEUM RESERVOIRS

**Abstract. Raising of the problem.** According to the regulatory documents in Ukraine [7,9], petroleum reservoirs (RVS) are designed on the basis of the limit state method. Using this method ensures the reliability of tanks in the conditions and modes of operation stipulated by regulatory documents [6,7]. However, issues related to ensuring the reliability of RVS designed for a service life exceeding the normative, as well as questions of the economic efficiency of the design decisions made, require further scientific study. This article provides a general methodology for assessing the reliability of the RVS over a given operating time. A model of optimal design of RVS is proposed according to the criterion of the minimum project cost while ensuring a given level of reliability over the required service life. This model is formulated in terms of a non-linear mathematical programming problem, and a special algorithm has been developed for its numerical implementation, based on the principles of constructing "greedy" algorithms. The economically rational design values of the thickness of the structural elements of the reservoir with a volume of 5000 m<sup>3</sup> depending on the required level of reliability are given as a result of numerical experiments.

**Purpose of the article** is to develop a method for rationally ensuring a given level of design reliability of the RVS over the required service life within the framework of the existing design standards and taking into account the available data of the technical diagnostics of the RVS.

**Conclusions.** The proposed optimization model allows you to manage the design reliability of the RVS by the criterion of the minimum initial cost for a given period of operation. The parameters of this model are determined (and can be adjusted for a single tank or a fleet of tanks) based on the results of statistical processing of data from field surveys of similar objects, which improves the accuracy of the forecast in each individual case. As a result, the considered models and algorithms can serve as a rather effective mathematical tool in the study of the problems of reliability and durability of the RVS.

**Keywords:** petroleum reservoir; technical diagnostics; mathematical model; reliability management

*Семенец С.Н., Насонова С.С., Олевский В.И., Волчок Д.Л.*

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

**Аннотация. Постановка проблемы.** Согласно действующим в Украине нормативным документам [7,9] нефтяные резервуары (РВС) проектируются на основе метода предельных состояний. С применением этого метода обеспечивается надежность резервуаров в условиях и режимах работы, предусмотренных нормами [6,7]. Однако вопросы, связанные с обеспечением надежности РВС, проектируемых на срок службы, превышающий нормативный, а также вопросы экономической эффективности принимаемых проектных решений требуют дальнейшей научной проработки. В данной статье приводится общая методика оценки надежности РВС на протяжении заданной наработки. Предлагается модель оптимального проектирования РВС по критерию минимума проектной стоимости при обеспечении заданного уровня надежности на протяжении требуемого срока службы. Данная модель сформулирована в терминах нелинейной задачи математического программирования, а для ее численной реализации разработан специальный алгоритм, основанный на принципах построения «жадных» алгоритмов. Приводятся полученные в результате численных экспериментов экономически рациональные проектные значения толщины конструктивных элементов резервуара объемом 5000 м<sup>3</sup> в зависимости от требуемого уровня надежности. **Цель** – в рамках действующих норм проектирования и с учетом имеющихся данных технической диагностики РВС разработать метод рационального обеспечения заданного уровня проектной надежности РВС на протяжении требуемого срока эксплуатации. **Выводы.** Предложенная оптимизационная модель позволяет управлять проектной надежностью нефтяных резервуаров по критерию минимума начальной стоимости при заданном сроке эксплуатации. Параметры этой модели определяются (и могут корректироваться применительно к отдельно взятому резервуару или парку резервуаров) по результатам статистической обработки данных натурных обследований аналогичных объектов, что повышает точность прогноза в каждом отдельном случае. В итоге рассмотренные модели и алгоритмы могут служить достаточно эффективным математическим инструментом при исследовании проблем надежности и долговечности нефтяных резервуаров

**Ключевые слова:** нефтяной резервуар; техническая диагностика; математическая модель; управление надежностью.

УДК 624.953.014.2.004.15+539.3

Семенець С.М., Насонова С.С., Олевський В.І., Волчок Д.Л. **Управління проектною надійністю нафтових резервуарів** // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2019. – Вип. 103. – С. 165 – 176.

*В рамках діючих норм проектування і з урахуванням наявних даних технічної діагностики РВС розроблений метод раціонального забезпечення заданого рівня проектною надійності РВС протягом необхідного терміну експлуатації.*

Іл. 3. Бібліогр. 12 назв.

Semenets S.N., Nasonova S. S., Olevskiy V.I., Volchok D.L. **Project reliability management of petroleum reservoirs** // Strength of material and theory of structure. – 2019. – Issue 103. – P. 165 – 176. – Ukr.

*In the framework of the existing design standards and taking into account the available technical diagnostics data for RVS, a method has been developed for rationally ensuring the specified level of RVS design reliability over the required service life.*

Fig. 3. Ref. 12 items.

Семенец С.Н., Насонова С.С., Олевский В.И., Волчок Д.Л. **Управление проектной надежностью нефтяных резервуаров** // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 2019. – Вып. 103. – С. 165 – 176.

*В рамках действующих норм проектирования и с учетом имеющихся данных технической диагностики РВС разработан метод рационального обеспечения заданного уровня проектной надежности РВС на протяжении требуемого срока эксплуатации.*

Ил. 3. Библиогр. 12 назв.

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):**

*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики та інформаційних технологій,*

*Адреса: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, СЕМЕНЕЦЬ Сергій Миколайович.*

**Мобільний тел.:** +380676396064;

**Імейл:** [ssemenets28@gmail.com](mailto:ssemenets28@gmail.com)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-6359-1069>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):**

*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики*

*Адреса: 49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 8, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», НАСОНОВА Світлана Сергіївна.*

**Мобільний тел.:** +380979409856

**Імейл:** [ms.nasonova.s@gmail.com](mailto:ms.nasonova.s@gmail.com)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-0920-7417>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):**

*доктор технічних наук, завідувач кафедри вищої математики*

*Адреса: 49005, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 8, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», ОЛЕВСЬКИЙ Віктор Ісаакович*

**Мобільний тел.:** +380503402207

**Імейл:** [ileft@i.ua](mailto:ileft@i.ua)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-3824-1013>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):**

*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки та опору матеріалів, заступник декана факультету промислового та цивільного будівництва*

*Адреса: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, ВОЛЧОК Денис Леонідович*

**Мобільний тел.:** +38(066) 727-656-0

**Імейл:** [Denys.L.Volchok@gmail.com](mailto:Denys.L.Volchok@gmail.com)

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-7914-321X>