

УДК 614.841.332

*Грінченко Є.М., канд. техн. наук, докторант, НУЦЗУ,
Соколов Д.Л., канд. техн. наук, доц., НУЦЗУ,
Федоренко Р.М., заст. нач. НІРЧ, НУЦЗУ*

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНУ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТІНКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРУ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

(представлено д-ром техн. наук Ключкою Ю.П.)

Розглядається задача визначення показників надійності елементів вертикального сталевих резервуару під час експлуатації. Проведені розрахунки ймовірності безвідмовної роботи як окремих елементів так і резервуару в цілому. Розроблено відповідні математичні моделі для визначення ймовірності безвідмовної роботи резервуару в експлуатації.

Ключові слова: показник, надійність, сталевий резервуар, безвідмовна робота

Постановка проблеми. Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів в процесі їх переробки і транспортування. Велике скупчення легкозаймистих і горючих рідин на порівняно невеликій площі призводить до високого рівня пожежної небезпеки. У разі виникнення пожежі її тепловий вплив може призвести до займання або вибуху сусідніх резервуарів, тобто призвести до каскадного розвитку аварійної ситуації. Такі групові пожежі причиняють значні матеріальні втрати, наносять серйозний удар екологічній системі району, що прилягає до місця пожежі, і призводять до загибелі людей.

Враховуючи збільшення об'ємів споживання нафтопродуктів як в Україні, так і в світі, можна очікувати подальшого ускладнення ситуації. Небезпека збільшується і у зв'язку з ростом резервуарних парків і збільшенням об'ємів резервуарів.

Проектування резервуарних парків, їх протипожежний захист, дії пожежних підрозділів по захисту резервуарів регламентується рядом нормативних документів. Але, не зважаючи на заходи, що вживаються, кількість пожеж в резервуарних парках залишається практично незмінною протягом останніх 30 років. В середньому в резервуарних парках на те-

риторії СНД відбувається близько 12 великих пожеж на рік. З них в Україні відбувається 2 пожежі кожні 3 роки. При цьому кожна четверта пожежа має затяжний характер і закінчується повним вигоранням нафтопродукту. Це означає як недостатність сил та засобів або неефективне їх використання, так і недостатнє врахування різноманітних факторів, що впливають на розвиток пожежі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В процесі експлуатації вертикальні сталеві резервуари (РВС), що використовуються для зберігання нафти і нафтопродуктів, накопичують ті або інші пошкодження і поступово знижують свої технічні кондиції. Питання фізичного зносу елементів РВС найфундаментальніше розглядалися в роботах [1-3], питання підвищення надійності використовуваного парку РВС в роботах [4, 5], а розв'язок задачі надійності об'єктів підвищеної небезпеки з урахуванням умов експлуатації – в роботі [6]. Проте, управлінню надійністю резервуарів в експлуатації, що враховує можливі пошкодження, і дозволяє продовжувати терміни корисного використання, з погляду надійності, приділена недостатня увага.

Постановка завдання та його вирішення. Основним завданням статті є визначення терміну безпечної експлуатації стінки РВС з урахуванням дії впливу експлуатаційних чинників. Матеріал РВС розглядається як суцільне середовище, що підкоряється законам континуальної механіки. При цьому в кожній точці тіла (матеріалу) враховуються процеси накопичення і розвитку мікрodefektів за допомогою додаткового узагальненого параметра, який в загальному випадку може бути пов'язаний з властивостями матеріалу і/або параметрами відгуку механічної системи в даній точці. В будь-який момент часу резервуар може перебувати тільки в одному з двох можливих станів: працездатному і непрацездатному. Перехід з працездатного стану в непрацездатний розглядається як відмова, і ймовірність відмови або безвідмовності приймається в якості головного показника як проектної, так і експлуатаційної надійності.

Математична модель експлуатаційної надійності сталевих резервуарів будується на таких основних положеннях:

1. В якості відмови розглядається невиконання тієї чи іншої нормативної (базової) умови або обмеження, що визначає працездатність резервуара.

2. Всі відмови вважаються відновлюваними. Однак, одні з них, як правило, локальні відмови, відновлюються поточними ремонтами, інші, що є відмовами повними, відновлюються тільки шляхом проведення капітального ремонту.

3. У процесі всього періоду експлуатації проводяться періодичні ревізії технічного стану, які включають діагностику та виконання необхідних поточних або капітальних ремонтів.

В якості основних показників надійності [7] приймаються ймовірності $p(\tau)_i$ безвідмовності конструктивних елементів і резервуара в цілому, що визначаються як ймовірності виконання тієї чи іншої нормативної умови або обмеження після τ років експлуатації.

В будь-який момент часу надійність резервуара повністю характеризується комплексом наступних показників:

1. Ймовірність безвідмовності стінки резервуара за умовою міцності $P(\tau)_\sigma$

$$P(\tau)_\sigma = P(\tau)_{\sigma M} \cdot P(\tau)_\sigma^{cm}, \quad (1)$$

де $P(\tau)_{\sigma M}$ - ймовірність безвідмовності вузла сполучення за умовою міцності ; $P(\tau)_\sigma^{cm}$ - ймовірність безвідмовності циліндричної стінки за умовою міцності.

2. Ймовірність безвідмовності днища за загальним зносом (сукупність наявних дефектів і накопичених ушкоджень) $P(\tau)_{дн}$.

3. Те ж покрівлі $P(\tau)_{кр}$.

4. Ймовірність безвідмовності днища по нормативному обмеженню на локальні корозійні пошкодження.

5. Те ж покрівлі $P(\tau)_{loc кр}$.

Працездатний стан резервуара буде мати місце за умови, коли кожен з наведених вище показників $P(\tau)_i$ буде не нижче свого нормативного (у загальному випадку, що заздалегідь задається) значення $P(\tau)_i^*$. Порушення вказаної умови означає перехід резервуара в непрацездатний стан.

В якості узагальнюючих показників надійності можуть бути використані загальна ймовірність безвідмовності $P(\tau)$

резервуара (ймовірність знаходження резервуара в працездатному стані) після τ років експлуатації, його технічний T або залишковий ΔT терміни безпечної експлуатації. Значення $P(\tau)$ найбільш об'єктивно і надійно характеризується його нижньою оцінкою, яка визначається добутком

$$P(\tau) = \prod_{i=1}^{i=k} P(\tau)_i. \quad (2)$$

Величини T і ΔT доцільно визначати як мінімальну тривалість експлуатації резервуара до першого (чергового) капітального ремонту (до настання повної відмови) одного з його конструктивних елементів. Тобто $T = T_{i\min}$, і відповідно $\Delta T = \Delta T_{i\min}$.

Ймовірності безвідмовності $P(\tau)_i$ конструктивних елементів, які є складовими для визначення загальних показників надійності резервуара, визначаються математичними моделями зміни технічного стану конструктивних елементів протягом усього періоду їх життєвого циклу, починаючи від стадії проектування і до настання повної відмови.

Узагальнена умова міцності [8] представляється у вигляді нерівності

$$F \leq S, \quad (3)$$

де F це в загальному випадку ефект (напруження або зусилля), викликаний зовнішніми навантаженнями і впливами; S це несуча здатність конструкції.

Імовірність настання події, що складається в максимальному рівні заповнення резервуара нафтопродуктом і одночасно в максимально можливою для даного нафтопродукту щільності, настільки велика, що можна розглядати як величину детерміновану, рівну максимально можливому її значенню. Зазначені обставини призводять до того, що імовірнісне трактування умови (3) зводиться в даному випадку тільки до розгляду його правій частині, яка представляється в вигляді [8]

Визначення терміну безпечної експлуатації стінки вертикального резервуару для збереження нафтопродуктів в експлуатації

$$S(\tau) = \gamma(\tau)_c \cdot \Phi \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m}, \quad (4)$$

де $\gamma(\tau)_c$ коефіцієнт, що є в загальному випадку функцією часу і враховує вплив на міцність всіх основних можливих для розглянутої конструкції дефектів виготовлення (виготовлення, транспортування та монтаж) і пошкоджень експлуатаційного характеру; Φ - геометрична характеристика перетину; R_{yn} - межа міцності; γ_m - коефіцієнт надійності за матеріалом, що враховує можливі відхилення характеристик міцності.

У загальному випадку коефіцієнт $\gamma(\tau)_c$ визначається як добуток складових

$$\gamma(\tau)_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n \cdot \xi(\tau)_1 \cdot \xi(\tau)_2 \cdot \dots \cdot \xi(\tau)_n, \quad (5)$$

де коефіцієнти η_i є коефіцієнтами впливу на несучу здатність тих чи інших, типових для даної конструкції, дефектів виготовлення, а коефіцієнти $\xi(\tau)_i$ визначають вплив тих чи інших можливих видів пошкоджень, викликаних фізичним зносом конструкції. Останні є функціями часу τ і визначають зв'язок з часовим фактором.

Для розрахунків зміни міцності і надійності поясів циліндричної стінки резервуара необхідно використовувати наступні елементи формули (5):

η_1 - коефіцієнт, що враховує можливий вплив на міцність дефектів геометрії поясів циліндричної стінки;

η_2 - коефіцієнт, що враховує можливе відхилення фактичної товщини конструктивного елемента від проектної внаслідок плюсових або мінусових допусків на товщину листового прокату;

$\xi(\tau)_1$ - коефіцієнт, що враховує можливе зменшення товщини конструктивного елемента в результаті корозії;

$\xi(\tau)_2$ - коефіцієнт, що враховує можливе зниження властивостей міцності конструктивного елемента в результаті їх пошкодження поверхневою корозією;

$\xi(\tau)_3$ - коефіцієнт, що враховує можливе зниження міцності конструкцій в результаті підростання гіпотетично наявних в них трещіновідних дефектів;

ξ_4 - коефіцієнт, що враховує можливий вплив на несучу здатність нерівномірних осідань.

Коефіцієнти $\xi(\tau)_1$, $\xi(\tau)_2$, $\xi(\tau)_3$ є функціями часу і визначаються наступними формулами [9].

Для $\xi(\tau)_1$

$$\xi(\tau)_1 = 1 - \frac{v_0 \int_0^{\tau} e^{A_{cor} \cdot \sigma} d\tau}{t_0}, \quad (6)$$

де v_0 - швидкість корозії ненапруженого металу; t_0 - початкова

товщина стінки резервуару; $A_{cor} = \frac{V \cdot k_1}{R_e \cdot T}$; $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ - гід-

ростатична складова тензора напружень в конструктивному елементі; V - молярний об'єм металу; R_e - число Рейнольдса; T - температура в градусах Кельвіна. Коефіцієнт k_1 був введений для забезпечення найкращої збіжності результатів випробувань з розрахунковими значеннями.

Для $\xi(\tau)_2$

$$\xi(\tau)_2 = \exp \left(- \frac{v_0 \int_0^{\tau} e^{A_{cor} \cdot \sigma} d\tau}{k_p t_0} \right), \quad (7)$$

де k_p - коефіцієнт пітингоутворення.

Для $\xi(\tau)_3$

$$\xi(\tau)_3 = \frac{\sigma_p(\tau)}{\sigma_{p0}} \quad (8)$$

де $\sigma_p(\tau)$ та σ_{p0} відповідно поточне і початкове і значення руйнівного напруження.

Вплив на міцність нерівномірних осідань враховується в даному випадку коефіцієнтом ξ_4 [10], який вводиться як величина постійна.

Зрештою

$$S(\tau) = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \left(1 - \frac{v_0 \int_0^\tau e^{A_{cor} \cdot \sigma} d\tau}{t_0} \right) \cdot \exp \left(- \frac{v_0 \int_0^\tau e^{A_{cor} \cdot \sigma} d\tau}{k_p t_0} \right) \times \\ \times \frac{\sigma_p(\tau)}{\sigma_{p0}} \cdot \Phi \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m} \quad (9)$$

Умова (9) є математичною моделлю, яка може розглядатися як модель зміни міцності (несучої здатності) i -го поясу циліндричної стінки резервуара залежно від часу знаходження резервуара в експлуатації. У цьому випадку $\Phi_i = t_i$ (t_i - товщина i -го поясу), а $F = P \cdot r$ (розрахункове зусилля в i -ому поясі від внутрішнього тиску нафтопродукту), і ймовірність безвідмовності i -го поясу циліндричної стінки за умовою міцності через τ років експлуатації визначиться за формулою

$$p(\tau)_{\sigma_i} = p(S(\tau) - P \cdot r \geq 0). \quad (10)$$

З рівняння

$$p(\tau)_{\sigma_i} = p(S(\tau) - P \cdot r \geq 0) = p_{\sigma_i}^*, \quad (11)$$

де $p_{\sigma_i}^*$ - гранично допустиме значення розглянутої ймовірності, можна визначити технічний T_{σ_i} або залишковий ΔT_{σ_i} терміни безпечної експлуатації i -го поясу.

Якщо розглянутий пояс циліндричної стінки піддавався капітальним ремонтам, то у всіх формулах параметр τ відраховується від терміну закінчення останнього такого ремонту.

По відношенню до циліндричної стінки в цілому формулювати умови міцності не має сенсу, а основні показники на-

дійності можуть бути визначені на основі наступних основних положень :

- циліндрична стінка може вважатися працездатною лише в разі виконання умов міцності у всіх складових її елементах (в даному випадку поясах) ;
- настання відмови якого-небудь елемента по нормативній умові міцності не приводить до відмови по міцності інших елементів;
- настання відмови по нормативній умові міцності може мати місце одночасно в декількох конструктивних елементах ;
- порушення умови міцності в будь-якому з конструктивних елементів циліндричної стінки може відбутися тільки в результаті впливу експлуатаційних факторів, які є загальними для всіх елементів, як за природою, так і по інтенсивності дії.

У зазначених положеннях одночасно присутні, як ознаки незалежності відмов окремих поясів стінки, так і ознаки, що вказують на наявність такого взаємозв'язку. Останні обумовлюються єдиною зовнішньою причиною настання відмов, а саме корозією в умовах одного і того ж середовища. Враховуючи це, загальну ймовірність безвідмовності циліндричної стінки доцільно визначати перемноженням відповідних ймовірностей окремих її поясів, тобто по її нижній оцінці

$$P(\tau)_{\sigma}^{cm} = \prod_{i=1}^k p(\tau)_{\sigma_i}, \quad (12)$$

де k - кількість поясів в циліндричній стінці.

А технічний або залишковий терміни безпечної експлуатації за принципом слабкої ланки, тобто

$$T_{\sigma}^{cm} = T_{\sigma_i \min}, \quad \Delta T_{\sigma}^{cm} = \Delta T_{\sigma_i \min} \quad (13)$$

З розрахункових позицій оцінка ймовірності не руйнування і часу напрацювання на відмову вузла сполучення стінки з днищем не викликає будь-яких принципових труднощів. Узагальнений вид умови міцності залишається таким же (3), проте в якості узагальненого зусилля приймається згинальний момент M_0 в точках сполучення стінки з днищем, ви-

значень за звичайною методикою [11], і вираз для визначення несучої здатності запишеться у вигляді

$$S_M = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \xi(\tau)_1 \cdot \xi(\tau)_2 \cdot \xi(\tau)_2 \cdot \xi(\tau)_3 \xi_4 \cdot \Phi \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m}, \quad (14)$$

де $\Phi = \frac{t_1^2}{6}$; C_x - коефіцієнт, що враховує можливість розвитку помірних пластичних деформацій у зоні сполучення, для даного випадку $C_x = 1.5$.

Всі інші складові по (3), (4), (9).

У результаті ймовірність безвідмовності вузла сполучення стінки з днищем за умовою міцності після τ років експлуатації буде визначатися як ймовірність виконання умови

$$P(\tau)_{\sigma_M} = P(S(\tau) - M_0(\tau) \geq 0). \quad (15)$$

У даному випадку ліва частина також буде функцією τ , що пов'язано з особливостями визначення M_0 .

Технічний T_M або залишковий ΔT_M терміни безпечної експлуатації визначається як τ з рівності

$$P(\tau)_{\sigma_M} = P_{\sigma_M}^*, \quad (16)$$

де $P_{\sigma_M}^*$ - гранично допустиме значення ймовірності безвідмовності вузла сполучення за умовою міцності.

Якщо вузол сполучення циліндричної стінки з днищем або розглянутий пояс циліндричної стінки піддавався капітальним ремонтам, то у всіх формулах параметр τ відраховується від терміну закінчення останнього такого ремонту.

Висновки. Запропоновані формули дозволяють отримати значення ймовірності відмови, або значення залишкового терміну безпечної експлуатації елементів РВС (окремого поясу циліндричної стінки, циліндричної стінки в цілому а також вузла сполучення циліндричної стінки з днищем) з урахуванням пошкоджень від корозії за відповідний термін експлуатації резервуару. Okремо можна відзначити, що визначення напружень, які виникають в елементах резервуару з ураху-

ванням зміни від корозії є досить складною задачею, яка планується до вирішення в подальшому.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котельников В.С., Покровская О.В., Коновалов Н.Н., Шевченко В.П. Мониторинг технического состояния оборудования на опасных производственных объектах / Контроль. Диагностика. -2003. ~№8. - С. 6-13
2. Беляев Б. Ф., Горицкий В. М., Кулахметьев Р. Р., Шнейдеров Г. Р. Коррозионная повреждаемость стальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти//Промышленное и гражданское строительство, 1998.-№5.-С. 33-36.
3. Егоров Е. А. Альтернативные оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных нефтерезервуаров//Материалы международной научно-практической конференции «Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж». -Донецк, 2003.-С. 414-421.
4. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М. и др. Надежность технических систем и техногенный риск. - М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002.-367 с.
5. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. -М.: Мир, 1980.- 605 С.
6. Вопросы эксплуатационной надежности резервуаров на нефтеперерабатывающих заводах. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991,67 с.
7. Бахтизин Р.Н., Буренин В.А., Дмитриев Е.Н. Исследование надежности и эффективности системы хранения нефтепродуктов на АЗС (основные задачи и методы их решения). - Уфа: Изд-во Фонда Содействия развитию научных исследований, 1999. - 42 с.
8. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. - С. 148.
9. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. - М.: Металлургия. - 1981. - 269 с.
10. Егоров Е.А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных

резервуаров, находящихся в эксплуатации.-
Днепропетровск: «Навчальна книга», 2002. -95 с.

11. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. М.: Недра, 1987.- 200 с.

Гринченко Е.Н., Соколов Д.Л., Федоренко Р.Н.

Определение срока безопасной эксплуатации стенки вертикальных резервуаров для сохранения нефтепродуктов в эксплуатации

Рассматривается задача определения показателей надежности элементов вертикального стального резервуара при эксплуатации. Проведенные расчеты вероятности безотказной работы как отдельных элементов так и резервуара в целом. Разработаны соответствующие математические модели для определения вероятности безотказной работы резервуара в эксплуатации.

Ключевые слова: показатель, надежность, стальной резервуар, безотказная работа

Grinchenko Ye.N., Sokolov D.L., Fedorenko R.N.

Determination of the safe use of wall vertical tanks to store petroleum products in service

The problem of determining the reliability indices elements vertical steel tank during operation. The calculations of probability uptime as separate elements and the tank as a whole. Develop appropriate mathematical models to determine the probability of failure-free operation of the reservoir.

Key words: index, reliability, steel tank, failure-free operation