

УДК 539.3

Є.С. Дехтярюк, д-р техн. наук  
 О.О. Лук'яненко, канд. техн. наук  
 В.В. Шах

## ОЦІНКА РІВНЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НАФТОНАЛИВНОГО РЕЗЕРВУАРА

Визначено рівень конструкційної безпеки нафтоналивного резервуара з урахуванням реальних недосконалостей форми, які виникли після десятирічної експлуатації об'єкта. На основі ймовірнісного підходу Болотіна, методик дослідження стійкості недосконалих оболонки і прогнозування ризику аварії будівельних об'єктів визначені математичне очікування рівня надійності резервуара, фактичний рівень ризику аварії та безпечний ресурс об'єкта.

Конструкційна безпека будівельного об'єкта характеризується його здатністю сприймати перенавантаження в аварійних ситуаціях і трактується як відсутність в об'єкті недопустимого ризику аварії. Статистика показує, що близько 80% випадків аварій об'єктів відбувається за рахунок людських помилок при їх проектуванні, будівництві та експлуатації [1,2]. Будівельний об'єкт, який має достатній запас міцності по відношенню до зовнішніх впливів, може бути ненадійним по відношенню до людських помилок. Тому проблема визначення конструкційної безпеки та ресурсу об'єкта є важливою, особливо це стосується споруд з підвищеною вимогою безпеки.

Конструкційна безпека об'єкта оцінюється на основі теорем теорії ймовірності, підходах нечіткої логіки та методах прийняття рішень в умовах невизначеності [3,4]. Дослідження показують, що до закінчення будівництва за рахунок помилок людей фактична ймовірність аварії  $P_{\Phi}$  у порівнянні з теоретичною (проектною)  $P_T$  збільшується у декілька разів, тобто виникає додаткова ймовірність аварії  $P_D$ . Закони розподілу зовнішнього впливу, теоретичної та фактичної реакції об'єкта на цей вплив представлені на рис. 1.

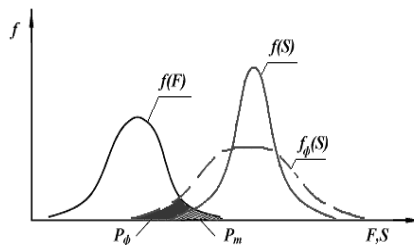


Рис. 1. Закони розподілу зовнішнього навантаження, теоретичної та фактичної реакції об'єкта на цей вплив

Для визначення додаткової ймовірності аварії застосовується формула Байеса:

$$P_D = P_T \cdot P(C/A) / [P_T \cdot P(C/A) + (1 - P_T) \cdot P(C/A^*)]. \quad (1)$$

Тут вводяться дві протилежні події:  $C$  – існують помилки при будівництві,  $C^*$  – не існують. Ймовірність події  $C$  при умові, що аварія відбудеться позначено через  $P(C/A)$ ; через  $P(C/A^*)$  – при умові, що аварія не відбудеться.

Ймовірності аварії є малими величинами порядку  $10^{-6}$  ступені. Для їх сприйняття вводиться поняття ризику аварії об'єкта, величина якого визначається за формулою

$$r = P_\Phi / P_T. \quad (2)$$

Ризик аварії показує перевищення фактичною ймовірністю аварії теоретичної, що вноситься за умовчанням при проектуванні будівельного об'єкта. Величина ризику аварії завжди більше за 1. Закон його розподілу відповідає однопараметричному розподілу Релея (рис. 2):

$$f(r) = \frac{(r-1)}{a} \exp\left[-\frac{(r-1)^2}{2a}\right], \quad (3)$$

де параметр  $a = \frac{(R-1)}{1,25}$ ,  $R = \frac{1}{M_p} \exp\left[-\frac{(r-1)^2}{2a}\right]$  – середнє значення

ризик аварії,  $M_p$  – математичне очікування випадкової величини рівня надійності об'єкту, яке характеризує його відповідність до вимог проекту по забезпеченню міцності, жорсткості та стійкості.

Дослідження показали, що існують порогові значення ризику аварії, які характеризують безпечний, аварійний та граничний стан об'єкту. Вони відповідають стандартним значенням ризику аварії, які є інваріантами і не залежать від виду об'єкта. Нормальне значення  $R_H$  регламентує величину ризику аварії після закінчення будівництва. Гранично допустимий ризик аварії  $R_{ГД}$  відповідає переходу об'єкта із безпечного стану у аварійний, тобто виникає необхідність проведення



Рис. 2. Закон розподілу ризику аварії об'єкта

капітальних ремонтних робіт. Граничний ризик аварії  $R_{\Gamma}$  відповідає стану об'єкта, при якому його несуча спроможність вичерпана і виникає пряма загроза руйнування об'єкта. Рівень конструкційної безпеки об'єкта вважається достатнім, поки фактичний ризик аварії залишається усередині області прийнятних значень, межами якої є стандартні значення ризику аварії, і також якщо фізичний знос об'єкту менше 50%.

Визначення області прийнятних значень ризику аварії пов'язано з величиною інформаційної ентропії  $H$ , яка характеризує ступінь невизначеності технічного стану будівельного об'єкта і є функцією величини ризику аварії

$$H(R) = \log_{2,15} \cdot R. \quad (4)$$

Інформаційна ентропія може бути представлена у вигляді ідеалізованого графіку (рис. 3).

Для його побудови були прийняті гіпотези, які обґрунтовані дослідженнями ресурсу конструкцій в теорії надійності [2,3]: 1 – формою моделі зростання фізичного зносу об'єкту в процесі його експлуатації є експонента; 2 – з моменту початку будівництва фізичний знос об'єкту зростає від нуля до значення, залежного від величини фактичного ризику аварії у фіксований момент часу його експлуатації; при досягненні граничного значення ризику аварії фізичний знос об'єкту стає рівним 0,95 (95%).

Залежність фізичного зносу об'єкта від величини ризику аварії дає можливість отримати важливу характеристику об'єкта – безпечний ресурс, який визначається як проміжок часу з моменту закінчення будівництва до аварійного стану об'єкта.

В роботі дана оцінка рівня конструкційної безпеки нафтоналивного резервуара після 10 років його експлуатації (рис. 4), яка виконана за допомогою розробленої авторами методики визначення надійності циліндричних оболонки з початковими недосконалістями із застосуванням імовірнісного підходу Болотіна [5] та аналітичного підходу до визначення ризику аварії будівельних об'єктів, який представлений в роботі [4].

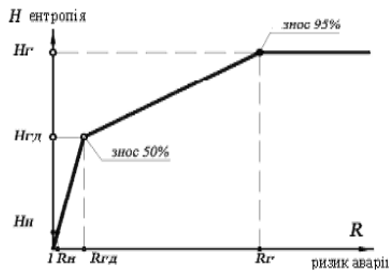


Рис. 3. Інформаційна ентропія будівельного об'єкта

Згідно імовірнісного підходу Болотіна надійність конструкції є ймовірністю того, що вона не втратить стійкість, якщо навантаження буде менше деякої заданої величини і має місце функціональна залежність критичного навантаження від величини початкової недосконалості конструкції. Надійність конструкції визначається за формулою

$$\tilde{R}(\alpha) = \text{Prob}(P_{кр} > \alpha) = \text{Prob}(X < \xi), \quad (5)$$

де  $\tilde{R}(\alpha)$  – надійність конструкції при заданому безрозмірному навантаженні  $\alpha$ ;  $P_{кр}$  – випадкове безрозмірне критичне навантаження;  $X$  – випадкова безрозмірна величина початкової недосконалості;  $\xi$  – максимально можлива безрозмірна величина початкової недосконалості.

Надійність за стійкістю оболонки з різними законами розподілу функції щільності ймовірності початкової недосконалості представляється в наступному вигляді

$$\tilde{R}(\alpha) = \begin{cases} 0 & (\alpha > 1) \\ f_X(u) & (\alpha^* < \alpha < 1), \\ 1 & (\alpha < \alpha^*) \end{cases}, \quad (6)$$

де  $u = \delta/t$  – безрозмірна початкова недосконалість,  $\delta$  – відхилення стінки оболонки від вертикалі,  $t$  – мінімальна товщина стінки оболонки,  $\alpha^*$  – критичне безрозмірне навантаження, яке відповідає максимально можливій безрозмірній величині початкової недосконалості оболонки,  $f_X(u)$  – функція щільності ймовірності початкової недосконалості.

В роботі [5] представлені результати дослідження надійності за стійкістю оболонки, недосконалість якої моделювалася у вигляді форми втрати стійкості при дії поверхневого тиску. Визначені функціональна залежність надійності оболонки від випадкового навантаження та значення допустимого навантаження, яке забезпечує проектну надійність оболонки. Якщо недосконалість стінок резервуара прийняти у вигляді форми втрати стійкості з максимальною амплітудою  $\xi = 2t$  і за допомогою реальних відхилень стінки від вертикалі побудувати її закон розподілу функції щільності ймовірності, то математичне очікування

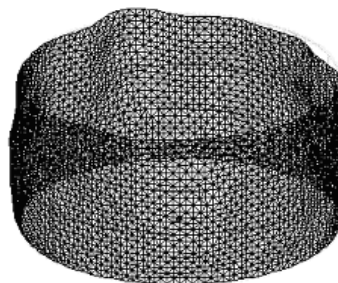


Рис. 4. Скінченноелементна модель нафтоналивного резервуару

випадкової величини рівня надійності резервуара  $M_p$  можна прийняти за надійність  $\tilde{R}(\alpha_{кр})$ , що визначається з графіку надійності оболонки [5].

Статистична обробка реальних недосконалостей оболонки виявила, що функція щільності імовірності початкової недосконалості розподіляється за трикутником (рис. 5, а):

$$f_X(\delta/t) = \int_0^{\delta/t} \frac{2}{\xi} \left(1 - \frac{x}{\xi}\right) dx. \quad (7)$$

Безрозмірне значення критичного навантаження, яке отримано при дослідженні стійкості резервуару з реальними недосконалостями при дії бокового тиску складає  $\alpha_{кр} = 0,679$ . Тоді надійність за стійкістю оболонки з реальними недосконалостями  $\tilde{R}(\alpha_{кр})$  можна визначити з графіку надійності, який представлений на рис. 5, б і побудований в роботі [5].

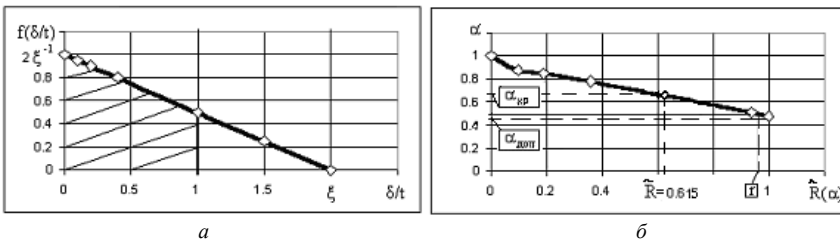


Рис. 5. Надійність за стійкістю оболонки з регулярними недосконалостями:  
а) функція щільності імовірності недосконалості, б) графік надійності за стійкістю

Згідно графіку математичне очікування випадкової величини рівня надійності резервуару дорівнює  $M_p = \tilde{R}(\alpha_{кр}) = 0,615$ . Ця величина є показником відповідності надійності оболонки до вимог проекту по забезпеченню стійкості.

Проектні та фактичні значення величин, які дадуть змогу оцінити рівень конструкційної безпеки резервуару, визначимо згідно аналітичного підходу до визначення ризику аварії будівельних об'єктів [4]. У зв'язку з тим, що відомості про термін і стан резервуару після закінчення його будівництва відсутні, приймаємо фактичний ризик аварії на час закінчення будівництва рівним нормальному значенню  $R = R_H = 2$ , а

термін будівництва рівним  $T_B = 2$  роки. Тоді проектний знос об'єкта до моменту здачі його в експлуатацію складає:

$$J_{\text{пр}}^B = 1 - \exp\{-k \cdot (R - 1)\} = 1 - \exp\{-0,0365(2 - 1)\} = 0,0358(3,58\%). \quad (8)$$

Тут коефіцієнт  $k$  визначений з гіпотези, що фізичний знос резервуара при  $R = R_r = 83$  дорівнює 0,95 (95%).

Інтенсивність фізичного зносу резервуару за кожен рік його можливої подальшої експлуатації знаходимо за формулою

$$i_{\text{пр}} = 0,0365(R - 1)/T_B = 0,0365(2 - 1)/2 = 0,0183(1,83\%). \quad (9)$$

Термін досягнення резервуаром гранично допустимого ризику аварії при 50 %-му фізичному зносі об'єкту складає

$$T_{\text{ГД}} = 0,657 / i = 0,657 / 0,0183 = 36 \text{ років}. \quad (10)$$

Тоді проектний безпечний ресурс резервуара дорівнює

$$T_{\text{БР}} = T_{\text{ГД}} - T_B = 36 - 2 = 34 \text{ роки}. \quad (11)$$

Таким чином, нафтоналивний резервуар можна експлуатувати без проведення капітального ремонту на протязі 34 років.

Для визначення фактичного зносу резервуара після 10 років його експлуатації ( $T_E = 10$  років) з урахуванням терміну його будівництва застосовуємо формулу [4]:

$$J_{\text{ф}} = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{1 - M_p}{M_p}\right]\right\} = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{1 - 0,615}{0,615}\right]\right\} = 0,4653(46,53\%). \quad (12)$$

Фактичний фізичний знос резервуару склав 46,53%, що у 2 рази більше за проектний  $J_{\text{пр}} = J_{\text{пр}}^B + i_{\text{пр}} \cdot T_E = 3,58 + 1,83 \cdot 10 = 21,88\%$ .

Фактична інтенсивність фізичного зносу резервуару після 10 років його експлуатації

$$i_{\text{ф}} = k \frac{(1/M_p - 1)}{T_b + T_e} = 0,686 \frac{(1/0,615 - 1)}{2 + 10} = 0,0358(3,58\%). \quad (13)$$

Термін досягнення резервуаром гранично допустимого ризику, коли  $R = R_{\text{ГД}} = 19$  і фізичний знос об'єкту складає 0,5 (50%) визначається за формулою

$$T_{ГД} = 0,657 / i = 0,657 / 0,0358 = 18 \text{ років.} \quad (14)$$

Тоді безпечний ресурс нафтоналивного резервуару складає

$$T_{БР} = T_{ГД} - T_{Б} - T_{Е} = 18 - 2 - 10 = 6 \text{ років.} \quad (15)$$

Граничний термін служби споруди за умови, що не будуть проведені ремонтно-відновлювальні роботи по зниженню ризику аварії

$$T_{Г} = 0,686 \frac{(1/M_{Р} - 1)}{i} = 0,429 / 0,0358 = 12 \text{ років.} \quad (16)$$

На рис. 6 представлені результати розрахунку конструкційної безпеки нафтоналивного резервуару на стадії проектування та після 10 років його експлуатації. Рівень конструкційної безпеки є достатнім, бо фактичний ризик аварії знаходиться усередині області прийнятних значень.

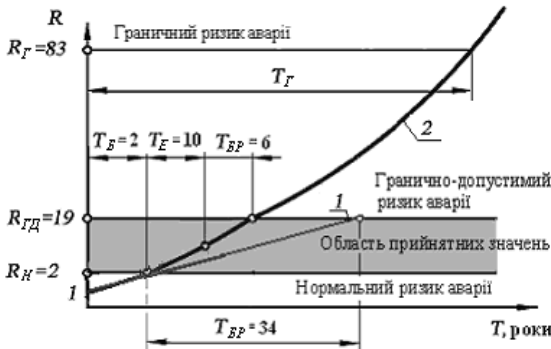


Рис. 6. Конструкційна безпека нафтоналивного резервуару:  
1 – проектна, 2- фактична

**Висновок:** нафтоналивний резервуар знаходиться в безпечному стані. Через 6 років його експлуатації з метою зниження величини ризику аварії повинні бути проведені роботи по посиленню стінок резервуара. Якщо ремонтні роботи не будуть виконані, то через 12 років резервуар буде непридатний для подальшої експлуатації, тобто аварійний стан буде граничним.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании/ Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1988.-584 с.

2. *Болотин В.В.* Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. –М.: Стройиздат, 1982.-351 с.
3. *Хенли Э. Дж., Кумamoto Х.* Надежность технических систем и оценка риска/ Пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г. С. Деминой; под общ. ред. В. С. Сыромятникова.–М.: Машиностроение, 1984.
4. *Мельчаков А.П.* Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов. (Теория, методики и инженерные приложения): Учебное пособие. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 49 с.
5. *Гоцуляк Е.А., Лукьянченко О.А., Шах В.В.* Об устойчивости цилиндрических оболочек переменной толщины с начальными несовершенствами// Прикладная механика: Междунар. научн. журнал. – 2009. – Т.45. - № 4. – С.103-108.

Отримано 16.07.2010

*Дехтярук Е.С., Лукьянченко О.А., Шах В.В.*

#### **ОЦЕНКА УРОВНЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕНАЛИВНОГО РЕЗЕРВУАРА**

Определен уровень конструкционной безопасности нефтеналивного резервуара с учетом реальных несовершенств формы, которые возникли после десятилетней эксплуатации объекта. На основе вероятностного подхода Болотина, методик исследования устойчивости несовершенных оболочек и прогнозирования риска аварии строительных объектов определены математическое ожидание уровня надежности резервуара, фактический уровень риска аварии и безопасный ресурс объекта.

*Dehtiaruk E.S., Lukianchenko O.O., Shah V.V.*

#### **ESTIMATION OF LEVEL OF STRUCTIONAL SAFETY OF PETROLEUM RESERVOIR**

The level of structional safety of petroleum reservoir with real imperfections of forms which arose up after ten year exploitation of object was determined. On the basis of Bolotin's probabilistic approach and research methods for stability of imperfect shells and prognostication of risk of their accidents the expected value of reliability level, actual level of risk of accidents and safe resource of object were determined.