



УДК 004.05

О.В. ФЕДУХІН*, Ар.А. МУХА*

ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ НАФТОПРОДУКТІВ З УРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ВІДХИЛЕНЬ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена вирішенню низки проблем, пов'язаних з визначенням залишкового ресурсу сталевих циліндричних резервуарів. При дослідженні негативних чинників, що впливають на ресурс експлуатації досліджуваних об'єктів, детальна увага приділяється геометричним конструктивним відхиленням, які з'являються у процесі використання цих технічних споруд. Як визначальний параметр обрані та досліджуються відхилення зовнішнього контуру днища резервуара, утворюючої стінки резервуара від вертикалі на рівні верху кожного поясу стінки та відхилення вимощення основи від горизонталі. В роботі приймається допущення, що прогнозування залишкового ресурсу базується на визначенні розрахунковим шляхом його мінімальної оцінки. Проводиться порівняння мінімальної оцінки із встановленим допустимим рівнем зносу досліджуваних конструкцій. Досягнення максимально допустимих критичних значень відхилень, нижче яких не забезпечується необхідний запас несучої заданості, визначається як граничний стан. Для виконання оцінки об'єктивного технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу вказаних конструкцій, за відсутності значної статистики відмов, використовується ймовірнісно-фізичний підхід. У рамках цього підходу, щодо оцінки довговічності, лежить ймовірнісна модель, яка застосовує ДМ-розподіл відмов. Параметри моделі, що використовується, мають у своїй основі фізичну інтерпретацію. Основними параметрами, які враховуються, є середня швидкість зміни визначального параметра та коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації. У роботі наведено приклад, у якому встановлено залишковий та загальний ресурс служби сталевих циліндричних резервуарів. Отримані при розрахунках результати демонструють співрозмірність із допустимими нормативними значеннями та строками експлуатації, що наводяться в нормативній документації. У статті приведені критерії оцінки залишкового ресурсу досліджуваних сталевих циліндричних резервуарів, використання яких дозволить знизити експлуатаційні витрати за рахунок збільшення міжремонтних інтервалів.

Ключові слова: залишковий ресурс, модель надійності, сталеві циліндричні резервуари.

Abstract. The article is devoted to solving a number of problems associated with determining the residual resource of cylindrical steel tanks. When studying the negative factors that affect the operational resource of the studied objects, detailed attention is paid to the geometric structural deviations that appear in the process of using these technical structures. The deviations of the outer contour of the bottom of the tank, the forming wall of the tank from the vertical at the level of the top of each belt of the wall, and the deviation of the paving of the base from the horizontal are selected as a determining parameter and are investigated. The work assumes that the forecasting of the residual resource is based on the determination of its minimum estimate by calculation. A comparison of the minimum estimate with the established permissible level of wear of the structures under study is carried out. Achieving the maximum permissible critical values of deviations below which the necessary reserve of the load-bearing target is not provided is defined as a limit state. In the absence of significant failure statistics, a probabilistic-physical approach is used to evaluate the objective technical condition and forecast the residual resource of the specified structures. Within this approach to the assessment of durability, there is a probabilistic model that uses the failure

DM-distribution. The parameters of the used model are based on a physical interpretation. The main parameters taken into account are the average rate of change of the determining parameter and the coefficient of variation of the generalized degradation process. The work gives an example in which the residual and total service life of steel cylindrical tanks is determined. The results obtained during the calculations demonstrate proportionality with the permissible normative values and periods of operation specified in the regulatory documentation. The article presents the criteria for assessing the residual resource of the investigated steel cylindrical tanks, the use of which will allow reducing operating costs by increasing the intervals between repairs.

Keywords: residual resource, reliability model, cylindrical steel tanks.

DOI: 10.34121/1028-9763-2022-4-100-107

1. Вступ

Різноманітні сховища нафтопродуктів України налічують десятки тисяч різного виду резервуарів, які є об'єктами підвищеної небезпеки і входять до складу критичної інфраструктури (нафтопереробні заводи, нафтобази, великі підприємства тощо). Не вимагає доказів той факт, що руйнування або порушення їх цілісності може завдати значної моральної та матеріальної шкоди у вигляді забруднення навколишнього середовища, пожеж, вибухів та загибелі людей, що часто є екологічними катастрофами регіонального чи державного масштабу.

Основну частину фонду резервуарів складають сталеві циліндричні резервуари (СЦР), а проблеми їх тривалої експлуатації залишаються актуальними у зв'язку з повільними темпами їх реконструкції та оновлення основного обладнання у нафтогазовій галузі [1], що пов'язано зі значними капіталовкладеннями. У той же час накопичений досвід експлуатації наявного резервуарного парку показує, що багато резервуарів мають значний запас міцності, а це дозволяє обґрунтовано продовжити час безпечної експлуатації після проведення відповідного планового технічного обстеження та підтвердження їх залишкового ресурсу.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Результати аналізу досліджень у галузі надійності СЦР [1, 2] показують, що більшість існуючих методів оцінки надійності таких об'єктів є або детерміністичними (не враховують випадкову природу процесів деградації), або базуються на ймовірнісних моделях відмов, запозичених із математичної статистики (наприклад, нормальний розподіл, розподіл Вейбулла та ін.).

Згідно з останніми дослідженнями в області визначення залишкового ресурсу різноманітних об'єктів (механічних, електричних, електромеханічних та електронних) [3–7], найбільш фізичними та поширеними методами аналізу надійності є ймовірнісно-фізичні методи, що базуються на аналізі динаміки зміни основних визначальних параметрів-критеріїв придатності об'єктів та прогнозування моменту досягнення їх гранично допустимого значення.

3. Постановка проблеми

У багатьох типових роботах, наприклад [8, 9], присвячених вирішенню проблеми оцінки залишкового ресурсу СЦР, не запропоновано методу обчислення залишкового ресурсу та обґрунтування можливості продовження терміну подальшої експлуатації на його основі, а пропонується лише обчислення деякого ресурсного параметра без подальшого ймовірнісного прогнозування залишкового ресурсу СЦР із залученням теоретичної моделі надійності.

Відповідно до нормативних документів [10, 11], до відхилень геометричної форми СЦР, які впливають на його експлуатаційну безпеку, належать такі показники:

- кут відхилення зовнішнього контуру днища резервуара;
- кут відхилення утворюючої стінки резервуара від вертикалі на рівні верху кожного поясу стінки;
- кут нахилу вимощення основи;
- величини «випучин» та вм'ятин на стінці;
- величини «хлопунів» та вм'ятин на днищі резервуара.

Якщо величини вм'ятин і «випучин» мають слабку кореляцію з часом і більшою мірою залежать від умов експлуатації, то кути відхилення зовнішнього контуру днища, утворюючої стінки та основи вимощення є динамічними характеристиками, які залежать від часу та умов експлуатації.

Відповідно до найкращих методів дефектування зовнішнього контуру днища є їх виявлення та пряме вимірювання. Методи таких вимірювань детально описані в [12], а дослідження підвищених напружень області їх виникнення описані в [8]. Але цього недостатньо у випадках з відхиленнями зовнішнього контуру днища, утворюючої стінки та основи вимощення. Тому відкритим залишається питання прогнозування залишкового ресурсу СЦР з урахуванням аналізу статистики вимірів цих ресурсних параметрів у часі.

4. Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Як впливає зі сказаного вище, у представленій роботі ми сфокусуємося на визначенні швидкості зміни динамічних показників, які залежать від часу експлуатації, зокрема, кутів відхилення зовнішнього контуру днища, утворюючої стінки та основи вимощення.

Методи вимірювання зазначеної групи параметрів досить добре опрацьовані та описані в [13], їх величини можуть бути отримані в результаті прямих вимірювань, що здійснюються при проведенні технічного обстеження приблизно раз на 4 роки.

Таким чином, величини вищезгаданих кутів вважатимемо визначальними (ресурсними) параметрами, перевищення встановлених значень яких не забезпечує необхідний запас міцності несучої здатності об'єкта, а, отже, призводить до настання його граничного стану.

Прогнозування залишкового ресурсу СЦР полягає у визначенні розрахунковим шляхом його точкової оцінки на основі даних про динаміку зміни ресурсного параметра. Отримана розрахункова оцінка може бути використана при продовженні терміну експлуатації, призначенні терміну подальшого діагностування, а також розробки плану майбутніх ремонтних заходів.

5. Мета статті

Метою статті є розробка методу оцінки залишкового ресурсу СЦР за результатами дослідження зміни в часі визначального (ресурсного) параметра та встановлення зв'язку з граничним значенням.

6. Теоретичні основи витрачання ресурсу СЦР внаслідок появи геометричних конструкційних відхилень

Граничним станом СЦР вважатимемо досягнення максимально допустимих значень кутів відхилення:

- зовнішнього контуру днища резервуара;
- утворюючої стінки резервуара від вертикалі на рівні верху кожного поясу стінки;
- вимощення основи.

При досягненні меж граничних відхилень зазначених параметрів не забезпечується необхідний запас несучої здатності конструкції. При цьому резервуар не можна експлуатувати, якщо хоча б один елемент досяг свого граничного стану.

Примітка. У разі проведення вимірів теодолітом вимірюються значення кутів відхилень, а у випадку використання спеціального рівня вимірюються одразу значення відхилень від вертикалі.

У табл. 1, 2 вказано значення таких граничних величин.

Таблиця 1 – Граничні відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної поверхні (СНіП 3.03.01-87)

| Об'єм резервуара в м ³ | Різниця відміток, мм | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| | При незаповненому резервуарі | | При заповненому резервуарі | |
| | Суміжних точок на будь-якій відстані 6 м по периметру | Будь-яких інших точок | Суміжних точок на будь-якій відстані 6 м по периметру | Будь-яких інших точок |
| Менше 700 | 10 | 25 | 20 | 40 |
| 700–1000 | 15 | 40 | 30 | 60 |
| 2000–5000 | 20 | 50 | 40 | 80 |
| 10000–20000 | 15 | 45 | 35 | 75 |
| 30000–50000 | 30 | 60 | 50 | 100 |

Таблиця 2 – Граничні відхилення утворюючої стінки від вертикалі на рівні верху поясів (СНіП 3.03.01-87)

| Об'єм резервуара в м ³ | Номери поясів, починаючи з нижнього | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | Граничні відхилення, мм | | | | | | | | | | | |
| Менше 700 | 10 | 20 | 30 | 40 | 45 | 50 | – | – | – | – | – | – |
| 700–10000 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | – | – |
| 10000–20000 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 90 | 90 |
| 30000–50000 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 90 | 90 | 90 |

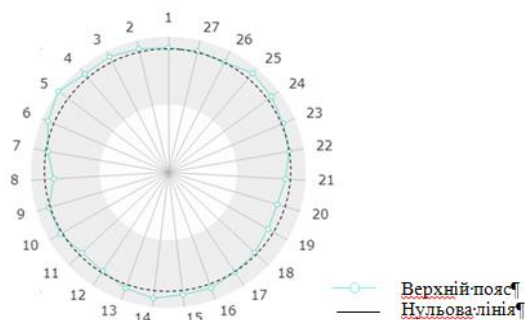


Рисунок 1 – Циклограма відхилення верхнього поясу СЦР

З приходом нових технологій у нафтозберігаючі компанії все частіше знаходить застосування так зване 3D-сканування СЦР [14, 15]. У рамках цієї технології будується 3D-модель, яка з високим ступенем достовірності відображає основні показники геометричної форми досліджуваного резервуара та положення його у просторі (потрібні для прогнозування залишкового ресурсу кути та відхилення). В результаті проведення вимірювань при дослідженні СЦР будуються графіки (рис. 1–3).



Рисунок 2 – Профілограма просадки зовнішнього контуру днища СЦР



Рисунок 3 –Діаграма відхилення від вертикалі зовнішньої стінки СЦР

Так як процедура вимірювання параметрів, що нас цікавлять, проводиться згідно з регламентними документами кожні 4 роки експлуатації, при цьому накопичується статистична інформація про деградаційну картину об'єкта, то на її підставі можливо вибудовувати процедуру прогнозування залишкового ресурсу досліджуваного СЦР, в рамках якої необхідною і достатньою умовою є реєстрація тренду значень визначальних параметрів у відповідних точках об'єкта.

7. Ймовірно-фізичний метод розрахунку залишкового ресурсу СЦР з урахуванням динаміки геометричних відхилень

Припустимо, завжди існує можливість вимірювання або встановлення значень ресурсного (визначального) параметра $\varphi(t)$, а також відомо, чи може бути задано його граничне значення $\varphi(t) = \Pi_{np}$.

Якщо вимірювання значень визначального параметра здійснюється через рівні проміжки часу Δt експлуатації об'єкта, що досліджується, то виміряні значення можливо представити у вигляді ряду неубутніх значень $\varphi(t)$, які отримані для певних моментів напруження:

$$\varphi(t_1), \varphi(t_2) = \varphi(t_1 + \Delta t), \varphi(t_n) = \varphi(t_{n-1} + \Delta t), \varphi(t_{n+1}) = \varphi(t_n + \Delta t),$$

де n – кількість приставів виміряних значень.

Оскільки руйнування, як правило, незворотні, то як теоретичну модель надійності механічних об'єктів пропонується використовувати дифузійний монотонний розподіл. DM -розподіл напруження до відмови [3]:

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right), \quad (1)$$

де $F(t) = DM(t; \mu, \nu)$ – інтегральна функція DM -розподілу (ймовірність відмови на момент сумарного напруження t);

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU \text{ – нормований нормальний розподіл;}$$

μ – параметр масштабу (середнє напруження повністю);

ν – параметр форми (коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації).
 Параметрична форма запису DM -розподілу виглядає так:

$$F(t) = DM(t; a, \nu) = \Phi\left(\frac{at + \Pi_1 - \Pi_0}{\nu \sqrt{at(\Pi_0 - \Pi_1)}}\right), \quad (2)$$

де a – середня швидкість зміни визначального параметра – критерію придатності;

Π_0 – початкове вимірне значення визначального параметра;

Π_1 – максимальне вимірне значення визначального параметра.

У нашому випадку як визначальний параметр DM -розподілу приймається відхилення зовнішнього контуру днища СЦР від горизонтальної площини з середньою лінійною швидкістю a .

За наявності вимірювань тренду визначального параметра у часі можна обчислити середню швидкість за формулою

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i. \quad (3)$$

Примітка. Дослідженнями встановлено, що коефіцієнт варіації в залежності від виду руйнування об'єкта (механічне, електричне або електромеханічне) може змінюватися в широкому діапазоні від 0,05 до 1,5.

Якщо для дослідження резервуара встановлені різні види деградаційних процесів ν_i і може бути визначено їхню пайову участь p_i ($\sum_{i=1}^k p_i = 1$), то очікуване (середньо виважене) значення коефіцієнта варіації узагальненого процесу деградації можна визначити за формулою

$$\nu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \nu_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}}, \quad (4)$$

де ν_i – значення коефіцієнта варіації i -го процесу деградації (руйнування) (наприклад, ерозія ґрунту під основою фундаменту, ерозія бетону, корозія або втома конструкцій із металу тощо);

k – кількість процесів деградації, $i = 1, 2, \dots, k$.

Так як при дослідженні СЦР встановлено, що визначальний параметр змінюється монотонно (тобто тягне за собою незворотні зміни), то всі $\Delta \varphi_i$ мають додатний знак або деякі з них можуть дорівнювати нулю), тому середній залишковий ресурс СЦР обчислюється за такою формулою:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi_{np} - \Pi_1)}{a} \left(1 + \frac{\nu^2}{2}\right), \quad (5)$$

де Π_{np} – граничне значення визначального параметра (критерію придатності);

τ – момент експлуатації (сумарне напрацювання), в який проводиться оцінка значення залишкового ресурсу (терміну служби).

Приклад. Оцінити залишковий ресурс резервуара на основі відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини.

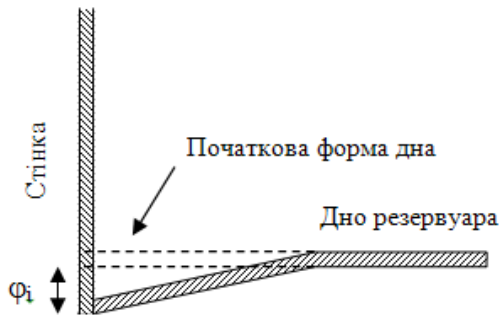


Рисунок 4 – Відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини Рисунок 5 – Зовнішній вид просадки дна СЦР

Резервуар СЦР 7000 має такі характеристики:
 – термін експлуатації резервуара 16 років;
 – середнє відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини $\varphi_{cp} = 35$ мм (рис. 4) (при заповненому резервуарі), отримане з профілограми виду (рис. 5);
 – середнє квадратичне відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини $\sigma = 4,25$ мм.

Критерій граничного стану – максимальне допустиме відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини: $\varphi_m = 75$ мм (табл. 1).

Рішення. Обчислюємо залишкове відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини: $\bar{\varphi} = \varphi_m - \varphi_{cp} = 75 - 35 = 40$ мм.

Обчислюємо коефіцієнт варіації відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини: $\nu = \frac{\sigma_h}{h} = 4,25/35 = 0,121$.

Таблиця 3 – Приклад залежності середнього відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини СЦР від терміну експлуатації

| № н/п | Термін експлуатації, годин | Залишкове відхилення, мм | Середнє відхилення φ_i , мм |
|-------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 35040 | 61 | 9 |
| 2 | 70080 | 51 | 19 |
| 3 | 105120 | 42,5 | 27,5 |
| 4 | 140160 | 40 | 35 |

Обчислюємо середню швидкість зміни визначального параметра середнього відхилення зовнішнього контуру днища від горизонтальної площини (табл. 3):

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i .$$

$\Delta t = 35040$ годин, $\Delta \varphi_1 = 9$ мм, $\Delta \varphi_2 = 10$ мм, $\Delta \varphi_3 = 8,5$ мм, $\Delta \varphi_4 = 6,5$ мм,

$a = 35/35040 \cdot 4 = 0,000249$ мм/час = 2,49 мм/год;

$\Pi_1 = 35$ мм – максимальне вимірне значення визначального параметра;

$\Pi_{np} = 75$ мм – граничне значення визначального параметра.

Далі можна обчислити значення залишкового ресурсу СЦР на момент напрацювання протягом 16 років (140–160 годин):

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(P_{np} - P_1)}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2} \right) = 160643 * 1,0073 = 161818 \text{ годин} = 18,47 \text{ років.}$$

Обчислюємо повний середній ресурс СЦР: $R = \tau + \tilde{\pi}(\tau) = 18,47 + 16 = 34,47$ років.

8. Висновки

На розглянутому модельному прикладі продемонстровано застосування ймовірнісно-фізичного методу оцінки залишкового ресурсу СЦР з урахуванням геометричних відхилень конструкції. Запропонований у статті метод дозволяє обчислити як значення залишкового $\tilde{\pi}(\tau) = 18,47$ років, так і повного ресурсу $R = 34,47$ років після експлуатації резервуара протягом 16 років. Отримані результати можна порівняти із встановленими допустимими нормами та термінами експлуатації [10] для резервуарів даного типу, що підтверджує працездатність даного методу.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. 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. 32–40.
2. Аммосов Г.С., Иванов Дж.С., Аммосов А.П. Особенности коррозионного истощения ресурса резервуаров и оценка интенсивности возрастания напряженного состояния в сварных швах. *Наука и образование*. 2017. № 1. С. 75–80.
3. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.
4. Федухин А.В. К вопросу о прогнозировании остаточного ресурса изделий электронной техники. *Математичні машини і системи*. 2020. № 1. С. 149–156.
5. Федухин А.В., Муха Ар.А. Прогнозирование остаточного ресурса опор контактной сети железных дорог. *Молодий вчений*. 2021. № 9 (97). С. 73–90.
6. Федухин А.В., Муха Ар.А. Оценка остаточного ресурса высоковольтных быстродействующих выключателей тяговой электросети железных дорог. *Молодий вчений*. 2022. № 1 (101). С. 120–123.
7. Федухин А.В., Муха Ар.А. Оцінка залишкового ресурсу контактної провладу електрофікованих залізничних доріг. *Математичні машини і системи*. 2022. № 2. С. 91–101.
8. Колесов А.И., Агеева М.А. Остаточный ресурс стальных резервуаров химии и нефтехимии, отработавших нормативные сроки эксплуатации. *Вестник МГСУ*. 2011. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ostatochnyy-resurs-stalnyh-rezervuarov-himii-i-neftehimii-otrabotavshih-normativnye-sroki-ekspluatatsii-1/viewer>.
9. Овчинников И.Г., Кудайбергенов Н.Б., Шеин А.А. Эксплуатационная надежность и оценка состояния резервуарных конструкций. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. 316 с.
10. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції з їхнього ремонту. Вид. офіц. Київ: Укрнафтопродукт, 1997. 297 с. URL: <https://budinfo.org.ua/doc/1810566/Pravila-tekhnichnoi-ekspluatatsii-rezervuariv-i-instruktsii-po-ikh-remontu-Chastina-I-Chastina-2>.
11. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М.: ФГУП Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2005. Вып. 3. 173 с.
12. СТО-03-001-06. Нормативный документ межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Экспертиза промышленной безопасности стальных вертикальных сварных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М., 2006. 242 с.
13. Крючкова С.О., Манабаев К.К. Трёхмерное сканирование сложнопрофильной объемной модели. *Горное дело. Разработка рудных и нерудных полезных ископаемых. Машини и комплексы*. 2015. С. 469–470.
14. blog.iqb.ru. URL: <https://blog.iqb.ru/faro-oil-reservoir-inspection/>.

Стаття надійшла до редакції 08.08.2022