

УДК 624.953.014.2.004.15+539.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260220.99.615

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАФТОВИХ РЕЗЕРВУАРІВ У ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ

СЕМЕНЕЦЬ С. М.¹, к. т. н., доц.,
НАСОНОВА С. С.², к. т. н., доц.,
ВОЛЧОК Д. Л.^{3*}, к. т. н., доц.,
ВЕЛЬМАГІНА Н. О.⁴, к. ф.-м. н., доц.

¹ Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 639-60-64, e-mail: ssemenets28@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6359-1069

² Кафедра вищої математики, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 940-98-56, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

^{3*} Кафедра будівельної механіки та опору матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

⁴ Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 106-56-13, e-mail: velmagina24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5584-3748

Анотація. Постановка проблеми. Зміст і періодичність відновлення нафтових резервуарів (РВС) у нормативних документах [6] визначені досить орієнтовно, а з позицій економічної ефективності відповідні питання досліджені недостатньо. Така ситуація, що склалася в практиці ревізій технічного стану РВС, які перебувають в експлуатації, вимагає розроблення нових математичних моделей і методів забезпечення експлуатаційної надійності РВС з урахуванням накопиченого статистичного матеріалу про дефекти та пошкодження цих споруд. У статті технічний стан резервуара в процесі експлуатації описується в термінах випадкових функцій корозійного зносу, що залежать від часу як від параметра. Сформульовано ймовірнісні критерії (необхідні умови) часткового і повного відновлення резервуарних конструкцій. Розглянуто завдання раціонального забезпечення надійності РВС у період експлуатації з урахуванням відновлення. Стосовно типового проекту резервуара об'ємом 5 000 м³ досліджено вплив величини необхідного рівня надійності на стратегії відновлення конструктивних елементів. Отримано відповідні плани-графіки відновлення. **Мета дослідження** – розробити метод ефективного забезпечення експлуатаційної надійності нафтових резервуарів на основі періодичного відновлення їх конструктивних елементів. **Висновки.** Запропоновані ймовірнісні критерії відновлення резервуарних конструкцій і відповідна модель забезпечення надійності можуть бути корисними для обґрунтування стратегії відновлення нафтових резервуарів у період експлуатації. Параметри цих моделей можуть коригуватися за результатами статистичної обробки даних технічної діагностики аналогічних об'єктів. Отримані плани-графіки відновлення резервуарних конструкцій досить добре узгоджуються з періодичністю технічної діагностики, рекомендованою в нормативних документах [6], що підтверджує достовірність отриманих результатів. У результаті розглянуті моделі та алгоритми можуть служити досить ефективним математичним інструментом у дослідженні проблем надійності нафтових резервуарів.

Ключові слова: нафтовий резервуар; забезпечення надійності; відновлення; ревізія технічного стану

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

СЕМЕНЕЦ С. Н.¹, к. т. н., доц.,
НАСОНОВА С. С.², к. т. н., доц.,
ВОЛЧОК Д. Л.^{3*}, к. т. н., доц.,
ВЕЛЬМАГИНА Н. А.⁴, к. ф.-м. н., доц.

¹ Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (067) 639-60-64, e-mail: ssemenets28@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6359-1069

² Кафедра высшей математики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, 49005, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 940-98-56, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

^{3*} Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

⁴ Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (095) 106-56-13, e-mail: velmagina24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5584-3748

Аннотация. Постановка проблемы. Содержание и периодичность восстановления нефтяных резервуаров (РВС) в нормативных документах [6] определены весьма ориентировочно, а с позиций экономической эффективности соответствующие вопросы исследованы недостаточно. Такая ситуация, сложившаяся в практике ревизий технического состояния РВС, находящихся в эксплуатации, требует разработки новых математических моделей и методов обеспечения эксплуатационной надежности РВС с учетом накопленного статистического материала о дефектах и повреждениях этих сооружений. В статье техническое состояние резервуара в процессе эксплуатации описывается в терминах случайных функций коррозионного износа, зависящих от времени как от параметра. Сформулированы вероятностные критерии (необходимые условия) частичного и полного восстановления резервуарных конструкций. Рассмотрена задача рационального обеспечения надежности РВС в период эксплуатации с учетом восстановления. Применительно к типовому проекту резервуара объемом 5 000 м³ исследовано влияние требуемого уровня надежности на стратегии восстановления конструктивных элементов. Получены соответствующие планы-графики восстановления. **Цель статьи** – разработать метод эффективного обеспечения эксплуатационной надежности нефтяных резервуаров на основе периодического восстановления их конструктивных элементов. **Выводы.** Предложенные вероятностные критерии восстановления резервуарных конструкций и соответствующая модель обеспечения надежности могут быть полезными для обоснования стратегии восстановления нефтяных резервуаров в период эксплуатации. Параметры этих моделей могут корректироваться по результатам статистической обработки данных технической диагностики аналогичных объектов. Полученные планы-графики восстановления резервуарных конструкций достаточно хорошо согласуются с периодичностями технической диагностики РВС, рекомендованными в нормативных документах [6], что подтверждает достоверность полученных результатов. В итоге рассмотренные модели и алгоритмы могут служить достаточно эффективным математическим инструментом при исследовании проблем надежности нефтяных резервуаров в рамках экономического подхода.

Ключевые слова: нефтяной резервуар; обеспечение надежности; восстановление; ревизия технического состояния

MAINTENANCE OF RELIABILITY OF PETROLEUM RESERVOIRS IN THE PERIOD OF OPERATION

SEMENETS S.M.¹, *Cand. Sc.(Tech.), Ass. Prof.*,
NASONOVA S.S.², *Cand. Sc.(Tech.), Ass. Prof.*,
VOLCHOK D.L.^{3*}, *Cand. Sc.(Tech.), Ass. Prof.*,
VELMAHINA N.O.⁴, *Cand. Sc.(Phys. and Math.), Ass. Prof.*

¹ Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (067) 639-60-64, e-mail: ssemenets28@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6359-1069

² Department of Higher Mathematics, State Higher Educational Establishment "Ukrainian State University of Chemical Technology", 8 Gagarina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 940-98-56, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

^{3*} Department of Structural Mechanics and Strength of Materials, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

⁴ Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 106-56-13, e-mail: velmagina24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5584-3748

Abstract. Problem statement. The content and periodicity of the restoration of petroleum reservoirs (RVS) in the regulatory documents [6] are defined very roughly, and from the standpoint of economic efficiency, the relevant issues are not sufficiently studied. Such a situation that has developed in the practice of revisions of the technical state of the

RVS during operation requires the development of new mathematical models and methods to ensure the operational reliability of the RVS, taking into account the accumulated statistical material on defects and damage of these structures. The article describes the technical state of the tank during operation in terms of random functions of corrosive wear, depending on time as a parameter. Probabilistic criteria (the necessary conditions) for partial and complete restoration of RVS are formulated. The task of rational ensuring the reliability of the RVS during the operation period, taking into account the restoration, is considered. With reference to the standard design of a 5,000 m³ tank, the effect of the required level of reliability on the recovery strategies of structural elements was investigated. The corresponding recovery plans are obtained. **Purpose of the article** is to develop a method to ensure effectively the operational reliability of petroleum reservoirs based on the periodic restoration of their structural elements. **Conclusions.** The proposed probabilistic criteria for the restoration of reservoir structures and the corresponding reliability model can be useful in justifying the recovery strategy of RVS during the operation period. The parameters of these models can be adjusted according to the results of statistical processing of data from technical diagnostics of similar objects. The obtained plans for the restoration of reservoir structures are in good agreement with the frequency of technical diagnostics recommended in regulation documents [6], which confirm the reliability of the results obtained. As a result, the considered models and algorithms can serve as a quite effective mathematical tool in the study of problems of reliability of RVS within the framework of the economic approach.

Keywords: *petroleum reservoir; reliability assurance; restoration; technical condition inspection*

Вступ. Надійність сталевих вертикальних резервуарів наземного типу для довгострокового зберігання нафти і нафтопродуктів (РВС) в основному залежить від надійності їх сталевих конструкцій. Ці споруди мають високий ступінь відповідальності. Порушення їх цілісності, а тим більше часткові або повні руйнування спричиняють значні матеріальні і моральні збитки, що пов'язано із втратою нафтопродукту, забрудненням навколишнього середовища і в багатьох випадках із людськими жертвами. Аварії РВС прийнято відносити до розряду катастроф державного масштабу. У зв'язку з цим забезпечення надійності нафтових резервуарів постає головною умовою їх експлуатації.

Огляд досліджень і детальний аналіз сучасного стану проблеми забезпечення експлуатаційної надійності нафтових резервуарів виконано в статтях [1; 2], де, зокрема, відмічається, що в більшості досліджень належним чином не враховується вплив фактора відновлення конструктивних елементів на оцінку рівня надійності резервуара в цілому, а різні методи розрахунку такої оцінки зазвичай дають різні результати. Для попередження можливих 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 оцінювання і забезпечення надійності нафтових резервуарів на різних стадіях їх життєвого циклу. Тому питання, пов'язані з оцінюванням і ефективним керуванням експлуатаційною надійністю РВС, досить актуальні [1; 2; 8; 10–12].

Постановка проблеми. Зміст і періодичність відновлення нафтових резервуарів у нормативних документах [6] визначені досить орієнтовно, а з позицій економічної ефективності відповідні питання досліджені недостатньо. Така ситуація, що склалася в практиці ревізій технічного стану РВС, які перебувають в експлуатації, вимагає розроблення нових математичних моделей і методів забезпечення експлуатаційної надійності РВС з урахуванням накопиченого статистичного матеріалу про дефекти і пошкодження цих споруд.

У статті технічний стан резервуара в процесі експлуатації описується в термінах випадкових функцій корозійного зносу, що залежать від часу як від параметра. Сформульовано імовірнісні критерії (необхідні умови) часткового і повного відновлення резервуарних конструкцій.

Поставлено завдання раціонального забезпечення надійності РВС у період експлуатації з урахуванням відновлення, сформульоване в термінах нелінійної задачі математичного програмування з бінарними змінними. Для її числового розв'язання

розроблено спеціальний алгоритм, заснований на принципах «жадібних» алгоритмів. Стосовно до типового проекту резервуара об'ємом 5 000 м³ досліджено вплив величини необхідного рівня надійності на стратегії відновлення конструктивних елементів. Отримано відповідні плани-графіки відновлення.

Мета і завдання дослідження. Мета – розробити метод ефективного забезпечення експлуатаційної надійності нафтових резервуарів на основі періодичного відновлення їх конструктивних елементів.

Відповідно до даної мети ставляться такі завдання:

1. Розробити імовірнісні критерії часткового і повного відновлення резервуарних конструкцій.

2. Розробити модель раціонального забезпечення надійності РВС з урахуванням відновлення в період експлуатації.

3. Розробити ефективний алгоритм числового розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі.

4. На прикладі типового проекту резервуара об'ємом 5 000 м³ дослідити вплив величини необхідного рівня надійності на стратегії відновлення конструктивних елементів.

Основний матеріал. Відповідно до [7; 8] нафтовий резервуар розглядається як складна система, що складається з чотирьох логічно послідовно з'єднаних підсистем: днища, покрівлі, циліндричної стінки і вузла сполучення стінки з днищем. Загальна схема резервуара показана на рисунку 1.

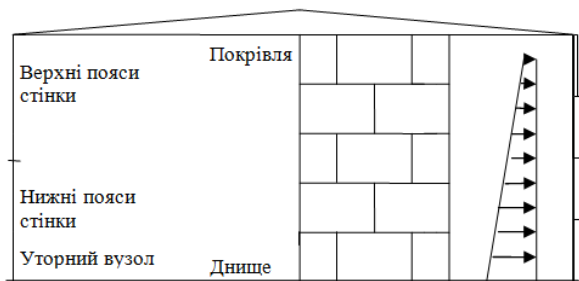


Рис. 1. Загальна схема РВС

Вважається, що резервуар виконує властиві йому функції з приймання, зберігання та відпуску нафтопродуктів у нормальних режимах роботи відповідно до

діючих нормативних документів і з проектним рівнем заливу.

Основним механізмом відмов резервуара вважається корозійний знос, який розглядається в контексті комбінованого впливу поверхневої і локальної корозії. Технічний стан резервуара описується в термінах випадкових функцій корозійного зносу, що залежать від часу як від параметра. Приймається, що усунення незворотного зносу конструктивних елементів вимагає відповідного капітального ремонту, а локальні корозійні пошкодження усуваються на основі поточних ремонтів, що проводяться в рамках системи технічного обслуговування і ремонтів. Критерієм відмови резервуара вважається порушення хоча б однієї з нормативних вимог ненастання граничних станів, а також умов герметичності.

Згідно з нормами [7; 9] нафтові резервуари в період експлуатації повинні відповідати вимогам ненастання граничних станів за умовами міцності, стійкості і герметичності. Ці вимоги можна описати наступною системою нерівностей [7]:

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

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

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

$$\delta_{он}(t) - \frac{\delta_{он0}}{2} \geq 0; \quad (4)$$

$$\delta_{кр}(t) - \frac{\delta_{кр0}}{2} \geq 0. \quad (5)$$

Тут позначено: t – напрацювання резервуара від початку експлуатації; R_y – розрахунковий опір сталі; n – число поясів циліндричної стінки; $\delta_i(t), i = \overline{1, n}$ – залишкове (поточне) значення товщини i -го поясу; $\delta_{он}(t), \delta_{кр}(t)$ – залишкові (поточні) значення товщини, відповідно, днища і настилу покрівлі; $\delta_{он0}, \delta_{кр0}$ – проектні значення товщини, відповідно, днища і настилу покрівлі; r – радіус

серединної поверхні резервуара; γ_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 – згинальний момент в зоні сполучення стінки з днищем.

З урахуванням незворотного корозійного зносу залишкове значення товщини будь-якого конструктивного елемента резервуара в нерівностях (1)–(7) визначається за формулою

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

де δ_0 і $\Delta(t)$ – відповідно, проектне значення товщини і поточна величина незворотного корозійного зносу конструктивного елемента.

Дані технічної діагностики нафтових резервуарів [3] показують, що корозійний знос днища і покрівлі характеризується спільним впливом двох складових: поверхневої корозії, що викликає незворотне зменшення товщини конструктивних елементів, і локальної корозії (корозійні виразки, каверни, піттинги та ін.), розвиток якої пов'язаний з ризиками появи наскрізних пошкоджень. При цьому швидкість локальної корозії може значно перевищувати швидкість поверхневої корозії. Це означає, що ненастання граничних станів днища і покрівлі (виконання умов (4) і (5)), взагалі кажучи, ще не забезпечує герметичності резервуара в період експлуатації. Тому аналіз технічного стану днища і покрівлі, крім перевірки нормативних умов (4) і (5), повинен передбачати додаткову перевірку вимоги недопущення наскрізних пошкоджень. Цю вимогу можна описати наступною системою нерівностей:

$$\delta_{он}(t) - \zeta_{он}(t) \geq \delta_{он}^-, \quad (7)$$

$$\delta_{кр}(t) - \zeta_{кр}(t) \geq \delta_{кр}^-, \quad (8)$$

де $\zeta_{он}(t), \zeta_{кр}(t)$ – поточні величини локального корозійного зносу, відповідно, днища і покрівлі; $\delta_{он}^-, \delta_{кр}^-$ – негативні допуски на листовий прокат, який використовується для виготовлення, відповідно, днища і покрівлі.

Важливо зазначити, що система нерівностей (1)–(5), (7)–(8) спільно з (6) описує зміну технічного стану РВС внаслідок корозійного зносу їх конструктивних елементів у період експлуатації (до першого капітального ремонту). При цьому, з огляду на випадковий характер корозії, ліві частини кожної з перелічених нерівностей потрібно розглядати як випадкові функції корозійного зносу, що залежать від часу як від параметра.

Результати статистичної обробки даних товщинометрії сталевих конструкцій нафтових резервуарів [3] показують, що їх корозійний знос досить добре описується нормальним законом розподілу ймовірностей. Беручи до уваги дану обставину, а також співвідношення (1)–(8), показники надійності РВС можна виразити через індекси забезпеченості [8] і функцію нормованого нормального розподілу.

Загальна методика і відповідні розрахункові моделі оцінки ймовірностей ненастання граничних станів циліндричної стінки і її поясів, вузла сполучення стінки з днищем, днища і покрівлі, наведені в статті [8]. Ймовірності відсутності наскрізних ушкоджень днища та покрівлі протягом напрацювання t можна знайти за такими формулами:

$$P_d^r(t) = P[\delta_{он}(t) - \zeta_{он}(t) - \delta_{он}^- \geq 0] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mu_d} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad ; \quad (9)$$

$$P_k^r(t) = P[\delta_{кр}(t) - \zeta_{кр}(t) - \delta_{кр}^- \geq 0] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\mu_k} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad . \quad (10)$$

Тут μ_d, μ_k – поточні значення індексів забезпеченості герметичності,

відповідно, днища і покрівлі, які обчислюють за формулами:

$$\begin{aligned} \mu_d &= \frac{\delta_{\text{дн}0} - \bar{\Delta}_{\text{дн}}(t) - \bar{\zeta}_{\text{дн}}(t) - \delta_{\text{дн}}^-}{\sqrt{\Delta_{\text{дн}}^2(t) + \zeta_{\text{дн}}^2(t)}}, \\ \mu_k &= \frac{\delta_{\text{кр}0} - \bar{\Delta}_{\text{кр}}(t) - \bar{\zeta}_{\text{кр}}(t) - \delta_{\text{кр}}^-}{\sqrt{\Delta_{\text{кр}}^2(t) + \zeta_{\text{кр}}^2(t)}}, \end{aligned} \quad (11)$$

де риска і хвиляста лінія позначають, відповідно, математичне очікування і середньоквадратичне відхилення випадкових величин.

Оскільки корозійний знос – це головний і загальний механізм деградації резервуарних конструкцій, то їх відмови є статистично залежними подіями, що робить «неробочим» відоме правило множення ймовірностей при визначенні ймовірності безвідмовної роботи всього резервуара. У такій ситуації ймовірність безвідмовної роботи РВС 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, першим виходить із ладу «найслабший» елемент, ймовірність відмови якого найбільша (прикладом може служити руйнування механічного ланцюга, якщо прикладене навантаження, яке перевищує міцність будь-якої однієї ланки). Стосовно нафтових резервуарів модель «слабшої ланки» має такий вигляд [8]:

$$P_{\text{рез}}(t) = \min\{P_c(t), P_s(t), P_d(t), P_k(t)\} \quad (12)$$

Тут $P_c(t)$, $P_s(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи, відповідно, циліндричної стінки і вузла сполучення стінки з днищем; $P_d(t)$, $P_k(t)$ – ймовірності безвідмовної роботи, відповідно, днища і покрівлі, що визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} P_d(t) &= \min\{P_d^q(t), P_d^r(t)\}, \\ P_k(t) &= \min\{P_k^q(t), P_k^r(t)\}, \end{aligned} \quad (13)$$

де $P_d^q(t)$, P_k^q – ймовірності ненастання граничного стану, відповідно, днища і

покрівлі, $P_d^r(t)$, P_k^r – ймовірності збереження герметичності, відповідно, днища і покрівлі.

Зауважимо, що розрахункові моделі оцінки ймовірностей $P_c(t)$, $P_s(t)$, $P_d^q(t)$, $P_k^q(t)$ наведені в [8], а ймовірності $P_d^r(t)$, P_k^r обчислюються за (9)–(10).

Для підтримки надійності нафтових резервуарів, що перебувають в експлуатації, періодично проводяться ревізії їх технічного стану. Під ревізією розуміється комплекс діагностичних і ремонтних заходів, спрямованих на відновлення резервуарних конструкцій. Ревізію, пов'язану з капітальним ремонтом, будемо називати повним відновленням, а ревізію, вироблену на основі поточного ремонту, – частковим відновленням.

Поставимо наступну задачу раціонального забезпечення надійності РВС. Розглядається сталевий резервуар для зберігання товарних нафтопродуктів, що перебуває в експлуатації. Відомі проектні параметри й інші паспортні характеристики резервуара, а також умови і режими його експлуатації. Потрібно при заданому терміні служби T визначити економічно раціональні періодичності відновлення конструктивних елементів резервуара, що дозволяють забезпечити необхідний рівень надійності споруди на часовому інтервалі $[t_0, t_0 + T]$ його експлуатації.

Для запису математичної моделі цієї задачі введемо наступні основні припущення.

1. Стартова точка t_0 розглянутого інтервалу часу $[t_0, t_0 + T]$ є початковим моментом експлуатації РВС. Для визначеності в розрахунках будемо вважати, що $t_0 = 0$.

2. Відносна тривалість ревізій технічного стану резервуара (тобто час проведення технічної діагностики і відповідних ремонтно-відновлювальних заходів) дуже мала порівняно з термінами його безперебійної роботи. Зауважимо, що дане припущення зазвичай справедливе, якщо резервуар грамотно запроектований,

виготовлений, змонтований і правильно експлуатується.

3. Після проведення будь-якої ревізії резервуар перебуває у справному або працездатному стані і продовжує експлуатуватися з проектним рівнем заливу.

На додаток до введених припущень далі будемо враховувати, що загальна вартість грошових вкладень, необхідних для підтримки надійності РВС, повинна визначатися з урахуванням різночасності витрат. Це пояснюється тим, що сталеві резервуари для зберігання товарних нафтопродуктів перебувають в експлуатації десятки років, що означає різночасові вкладення капіталу, необхідні для забезпечення їх надійної роботи. Для коректного економічного зіставлення різночасових витрат, що мають місце протягом заданого інтервалу часу $[t_0, t_0 + T]$, ці витрати повинні бути дисконтовані (приведені до єдиного моменту часу, наприклад, до стартової точки t_0).

Вартість грошових вкладень, зроблених у момент часу t , приведена до початкового моменту часу $t_0 = 0$, можна визначити таким чином [5]:

$$Z_0 = Z_t \exp(-\omega t), \quad (14)$$

де Z_t – витрати, необхідні для проведення ревізії технічного стану РВС в момент часу t ; Z_0 – ті ж витрати, але приведені до початкового моменту часу t_0 ; ω – параметр дисконтування, обчислюється за формулою $\omega = \ln(1 + \omega_{cp})$; ω_{cp} – середня банківська відсоткова ставка з капіталу.

Слід зазначити, що дисконтування витрат враховує точку зору власника капіталу, який вважає, що будь-які засоби повинні приносити прибуток. Дисконтування «здешевлює» майбутні витрати і змушує більше дорожити миттєвими витратами, ніж перспективними доходами і витратами.

Розіб'ємо часовий інтервал експлуатації резервуара $[t_0, t_0 + T]$ на деяке число N елементарних інтервалів $[t_{i-1}, t_i]$, $i = \overline{1, N}$

довжиною $\Delta t = T / N$. Моменти часу t_1, t_2, \dots, t_N будемо називати контрольними. Контрольні точки – це потенційні моменти ревізій технічного стану резервуара в період експлуатації.

Для формалізації процесу періодичного відновлення РВС із множини можливих варіантів прийняття рішення в контрольних точках приймемо до розгляду такі варіанти, вважаючи їх для спрощення альтернативними:

1. Продовжувати експлуатацію резервуара без будь-яких ревізій.
2. Провести часткове відновлення покрівлі та продовжувати експлуатацію.
3. Провести часткове відновлення днища і вузла сполучення і продовжувати експлуатацію.
4. Провести повне відновлення покрівлі та продовжувати експлуатацію.
5. Провести повне відновлення днища і вузла сполучення і продовжувати експлуатацію.
6. Провести повне відновлення вузла сполучення і продовжувати експлуатацію.
7. Провести повне відновлення 1-го поясу і продовжувати експлуатацію.

За кожним із перелічених семи варіантів прийняття рішення далі закріпимо код, який визначається відповідним порядковим номером. Позначимо через x_{ij} ($i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, 7}$) бінарну змінну, яка дорівнює 1, якщо в контрольній точці t_i приймається j -й варіант проведення ревізії, і дорівнює 0 – в іншому випадку.

Вектор виду $\bar{x}(i) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i7})$ назвемо вектором ревізій технічного стану РВС у контрольній точці t_i . Даний вектор визначає той або інший варіант прийняття рішення в момент часу t_i . Наприклад, якщо $\bar{x}(i) = (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, в контрольній точці t_i ніякі перевірки не проводяться, якщо $\bar{x}(i) = (0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$, то в момент t_i проводиться поточний ремонт покрівлі і т. д. Оскільки наведені вище варіанти прийняття рішення вважаються альтернативними, очевидно, що тільки одна з координат

вектора ревізій $\bar{x}(i)$ може бути відмінна від 0 і дорівнює 1.

Матрицею відновлень резервуара в контрольний момент часу t_i назвемо матричну функцію розмірністю $i \times 7$, рядками якої є вектори ревізій у відповідних контрольних точках:

$$X(i) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & x_{17} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & x_{27} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdot & x_{i7} \end{pmatrix}.$$

Дана матриця визначає тип, черговість і терміни відновлень резервуара протягом напрацювання t_i .

Повне уявлення про систему відновлень резервуара, вироблених за весь період експлуатації, дає наступна матриця відновлень:

$$X(T) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdot & x_{17} \\ x_{21} & x_{22} & \cdot & x_{27} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdot & x_{N7} \end{pmatrix}.$$

Розглянемо багатокроковий процес прийняття рішень. На кожному i -му кроці цього процесу визначається вектор $\bar{x}(i)$, що ідентифікує зміст ревізії технічного стану РВС, виробленої в контрольний момент часу t_i . Потрібно за N кроків побудувати таку матрицю відновлень $X(T)$, яка дозволяє забезпечити необхідний рівень надійності РВС на розглянутому інтервалі експлуатації при найменших сумарних експлуатаційних витратах.

Сумарні експлуатаційні витрати на утримання РВС будемо розглядати як суму витрат на проведення ревізій Z_x і гіпотетичних збитків Z_y від відмов за аналізований період експлуатації. Беручи до уваги формулу (14), витрати на проведення ревізій технічного стану РВС з урахуванням дисконтування визначаються так:

$$Z_x = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^7 c_{ij} x_{ij} \exp(-\omega t_i),$$

де c_{ij} – вартість j -го виду ревізії в контрольній точці t_i , яка наближено розраховується, виходячи з припущення, що вартість часткового відновлення (поточний ремонт) конструктивних елементів пропорційна їх початковій вартості і величині незворотного корозійного зносу. При цьому вартість повного відновлення елементів (капітальний ремонт) приймається рівною їх початковій вартості.

Гіпотетичні збитки від відмови РВС за аналізований період експлуатації відповідно до [5] визначимо так:

$$Z_y = \int_0^T \psi [1 - P_{rez}(t)] dt,$$

де ψ – усереднена величина збитків від гіпотетичної відмови резервуара, що визначається виходячи з апіорного аналізу можливих наслідків; $P_{rez}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи резервуара протягом напрацювання t , обумовлена з урахуванням відновлення.

З огляду на вищевикладене, математична модель задачі забезпечення надійності РВС за критерієм мінімуму сумарних експлуатаційних витрат має такий вигляд:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^7 c_{ij} x_{ij} \exp(-\omega t_i) + \int_0^T \psi [1 - P_{rez}(t)] dt \rightarrow \min; \quad (15)$$

$$P_{rez}(t_i) \geq P^*, t_i \in [0, T]; \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^7 x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, N}; \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^7 c_{ij} x_{ij} \leq c_i^*, \quad i = \overline{1, N}. \quad (18)$$

Тут P^* – необхідний рівень надійності резервуара; c_i^* – гранична вартість ревізії в i -й контрольній точці, що відображає фінансові можливості нафтобази з технічного обслуговування РВС у момент часу t_i , і визначається виходячи з норми

щорічних амортизаційних відрахувань, які становлять 5 % кошторисної вартості резервуара.

На основі моделі (15)–(18) визначається така система відновлень резервуарних конструкцій (матриця $X(T)$), яка дозволяє забезпечити необхідний рівень надійності РВС при найменших сумарних експлуатаційних витратах.

Модель (15)–(18) сформульована в термінах задачі нелінійного математичного програмування з бінарними змінними. Для наближеного числового вирішення цієї задачі був розроблений модифікований «жадібний» алгоритм, який передбачає поетапне будівництво локально оптимальних періодичностей відновлення окремих конструктивних елементів (днища, покрівлі, нижнього поясу циліндричної стінки і вузла сполучення стінки з днищем). Рішення про необхідність відновлення резервуара в поточний момент часу t_i приймалося за такими критеріями:

Будь-яке відновлення не потрібне:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge P_{rez}(t_{i+1}) \geq P^*. \quad (19)$$

Часткове відновлення покрівлі:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge P_k^r(t_{i+1}) < P^*. \quad (20)$$

Часткове відновлення днища і вузла сполучення:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge P_d^r(t_{i+1}) < P^*. \quad (21)$$

Повне відновлення покрівлі:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge P_k^q(t_{i+1}) < P^*. \quad (22)$$

Повне відновлення днища і вузла сполучення:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge P_d^q(t_{i+1}) < P^*. \quad (23)$$

Повне відновлення вузла сполучення:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge (P_s(t_{i+1}) < P^* \vee P_d^q(t_{i+1}) < P^*). \quad (24)$$

Повне відновлення 1-го поясу:

$$P_{rez}(t_i) > P^* \wedge P_1(t_{i+1}) < P^*. \quad (25)$$

Числові розрахунки проводилися стосовно типового проекту РВР-5000 при наступних вихідних даних: $R_y = 230$ МПа; $r = 1046$ см; $n = 10$; $T = 40$ років; $\Delta t = 1$ рік;

$\omega = 0,03$; $\psi = \$ 10\,000$. Висота і діаметр стінки, відповідно, 1 490 і 2 092 см. Проектна товщина поясів стінки, починаючи з нижнього, відповідно, 10, 7, 7, 6, 5, 5, 4, 4, 4, 4 мм. Проектна товщина днища і покрівлі, відповідно, 5 мм і 3 мм. Висота затоки приймалася рівною 1 420 см. Щільність нафтопродукту – 0,0009 кг/см³, надлишковий тиск у газовому просторі – 2,0 кПа, вакуум – 0,25 кПа, кількість циклів навантаження в рік – 60, вартість однієї тонни металопрокату – \$ 300. Проектна вартість окремого конструктивного елемента вважалася рівною потроєній вартості металопрокату, необхідного на його виготовлення.

Ймовірності безвідмовної роботи конструктивних елементів резервуару з урахуванням відновлення обчислювалися за формулами (9)–(13) і розрахунковими моделями, наведеними в [8], на основі перерахунку відповідних індексів забезпеченості конструктивних елементів після кожної ревізії.

Величини незворотного і локального корозійного зносу резервуарних конструкцій при заданому напрацюванні визначалися на основі спрощених формул:

$$\Delta(t) \approx u_{cp}t; \quad \zeta(t) \approx v_{cp}t,$$

де u_{cp}, v_{cp} – середні швидкості, відповідно, поверхневої і локальної корозії, які розглядалися як випадкові величини, розподілені за нормальним законом. У розрахунках використовувалися статистичні характеристики швидкостей корозії конструктивних елементів резервуарів для зберігання світлих нафтопродуктів (бензин, гас, дизельне паливо). Їх значення приймалися за [3].

На рисунках 2–5 показано планиграфіки відновлення резервуарних конструкцій (П – повне, Ч – часткове відновлення), отримані на основі оптимізаційної моделі (15)–(18).

P*	Тривалість експлуатації, роки																																							
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40				
0,9			Ч					Ч						Ч					Ч					Ч					П									Ч		
0,95			Ч					Ч						Ч					Ч					Ч					П									Ч		
0,99			Ч					Ч						Ч					Ч					Ч					П									Ч		
0,999	Ч							Ч						Ч					Ч					Ч				П								Ч				

Рис. 2. Плани-графіки відновлення покрівлі залежно від необхідного рівня надійності

P*	Тривалість експлуатації, роки																																							
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40				
0,9			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,95			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,99			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,999	Ч							Ч					Ч					Ч					Ч			П					Ч					Ч				

Рис. 3. Плани-графіки відновлення днища залежно від необхідного рівня надійності

P*	Тривалість експлуатації, роки																																							
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40				
0,9			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,95			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,99			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,999	Ч							Ч					Ч					Ч					Ч			П					Ч					Ч				

Рис. 4. Плани-графіки відновлення вузла сполучення стінки з днищем залежно від необхідного рівня надійності

P*	Тривалість експлуатації, роки																																							
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40				
0,9			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,95			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,99			Ч					Ч					Ч					Ч					Ч				П					Ч					Ч			
0,999	Ч							Ч					Ч					Ч					Ч			П					Ч					Ч				

Рис. 5. Плани-графіки відновлення 1-го поясу залежно від необхідного рівня надійності

Аналіз цих періодичностей зокрема показує, що при значеннях $P^* \leq 0,99$ обмеження на ймовірність безвідмовної роботи $P_{rez}(t_i) \geq P^*$ є пасивним. Це означає, що оптимальна періодичність відновлень визначається, головним чином, величиною гіпотетичних збитків ψ і не залежить від P^* . Якщо ж $P^* > 0,99$, то обмеження $P_{rez}(t_i) \geq P^*$ стає активним, що спричинює різке збільшення обсягу ремонтно-відновлювальних заходів. Крім того, отримані плани-графіки досить добре узгоджуються з періодичністю технічної діагностики нафтових резервуарів, рекомендованими в [6].

Висновки. Запропоновані критерії (необхідні умови) відновлення (20)–(25) і відповідна модель забезпечення надійності

(15)–(18) можуть бути корисними для обґрунтування стратегій відновлення нафтових резервуарів у період експлуатації. Параметри цих моделей можуть коригуватися за результатами статистичної обробки даних технічної діагностики аналогічних об'єктів. Побудовані плани-графіки відновлення резервуарних конструкцій досить добре узгоджуються з періодичністю технічної діагностики РВС, рекомендованою в нормативних документах [6], що підтверджує достовірність отриманих результатів. У результаті розглянуті моделі та алгоритми можуть служити досить ефективним математичним інструментом для дослідження проблем надійності нафтових резервуарів у рамках економічного підходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ 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. 31–40.
2. Гайсин Э. Ш., Фролов Ю. А. Оценка надежности резервуаров вертикальных стальных по критерию вероятности безаварийной работы. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2014. № 4. С. 11–15.
3. Егоров Е. А. Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации : монография. Днепропетровск : ПГАСА, 1996. 99 с.
4. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем : учеб. пособ. / пер. с англ. Коваленко Е. Г., под ред. Ушакова И. А. Москва : Мир, 1980. 604 с.
5. Каштанов В. А., Медведев А. И. Теория надежности сложных систем : учеб. пособ. Москва : Физматлит, 2010. 606 с.
6. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції з їхнього ремонту [змінені розділи та пункти розділів; чинні від 1999-03-07]. Вид. офіц. Київ : Укрнафтопродукт, 1997. 297 с. URL : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60191
7. ВБН 2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [на заміну СНиП 2.09.03-85, СНиП 3.03.01-87; чинні від 1994-01-10]. Вид. офіц. Київ : АТ «Інститут транспорту нафти», 1994. 98 с. (Відомчі будівельні норми України). http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=4889
8. Семенец С. Н., Насонова С. С., Власенко Ю. Е., Кривенкова Л. Ю. Расчетные модели надежности нефтяных резервуаров. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 1. С. 60–67.
9. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування [чинні з 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 205 с. (Державні будівельні норми України). URL : https://dbn.co.ua/dbn_v_2_6_198_2014_stalevi_konstrukciji
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*; edited by M. D. Todorov. 2018, 2025, American Institute of Physics, Melville, New York, 2018. Pp. 070001. URL : [doi: 10.1063/1.5064913](https://doi.org/10.1063/1.5064913).
11. Andrianov I. V., Olevskiy V. I., Olevska Yu. B. Asymptotic estimation of free vibrations of nonlinear plates with complicated boundary conditions. *AIP Conference Proceedings*. 2017, 1895, pp. 080001-1–080001-10. URL : [doi: 10.1063/1.5007395](https://doi.org/10.1063/1.5007395).
12. Olevska Yu., Mishchenko V., Olevskiy V. Mathematical models of magnetite desliming for automated quality control systems. *AIP Conference Proceedings*. 2016, 1773, pp. 040007-1–040007-6. URL : [doi: 10.1063/1.4964970](https://doi.org/10.1063/1.4964970).

REFERENCES

1. Gaysin E.Sh. and Gaysin M.Sh. *Sovremennoe sostoyaniye problemy obespecheniya nadezhnosti rezervuarov dlia nefiti i nefteproduktov* [The current state of the problem of ensuring the reliability of petroleum reservoirs]. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syria* [Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons]. 2016, no. 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 khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syria* [Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbons]. 2014, no. 4, pp. 11–15 (in Russian).
3. Egorov E.A. *Issledovaniye i metody raschetnoy otsenki prochnosti, ustoychivosti i ostatochnogo resursa stalnykh rezervuarov, nakhodiashchikhsia v ekspluatstsii* [Research and methods of calculation estimation of durability, stability and remaining resource of steel reservoirs being in exploitation]: Dnipropetrovsk : PSACEA, 1996, 99 p. (in Russian).
4. Kapur K. and Lamberson L. *Nadezhnost i proektirovaniye sistem* [Reliability and designing systems]. Translation from Eng. Kovalenko Ye.G. Edited by Ushakova I.A. Moscow : Mir Publ., 1980, 604 p. (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 instruktсии po yikh remontu* [Rules of technical exploitation of reservoirs and instruction are on their repair]. Modified sections and section items; in force since 1999-03-07; official publication. Kyiv : Ukrnaftoproduct, 1997, 297 p. (in Ukrainian).
7. VBN 2.2-58.2-94. *Reservuary vertikalni stalevi dlia sberigannia nafty i naftoproductiv 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]. Instead SNIP 2.09.03-85, SNIP 3.03.01-87; in force since 1994-01-10; official publication. Kyiv : JSC "Institute of Oil Transport", 1994, 98 p. (Department building norms of Ukraine). (in Ukrainian).

8. Semenets S.N., Nasonova S.S., Vlasenko Y.E. and Krivencova L.Y. *Raschetniye modeli nadezhnosti neftiannykh rezervuarov* [Calculation models of reliability of petroleum reservoirs]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 1, pp. 60–67 (in Russian).

9. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia*. [DBN V.2.6-198:2014. Steel construction. Design standards]. In force since 2015-01-01; publication official. Kyiv : Minregionbud of Ukraine, 2014, 205 p. (State Building Norms of Ukraine). (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, New York, 2018, pp. 070001.

11. Andrianov I.V., Olevskiy V.I. and Olevska Yu.B. Asymptotic estimation of free vibrations of nonlinear plates with complicated boundary conditions. AIP Conference Proceedings, 2017, 1895, pp. 080001-1–080001-10.

12. Olevska Yu., Mishchenko V. and Olevskiy V. Mathematical models of magnetite desliming for automated quality control systems. AIP Conference Proceedings, 2016, 1773, pp. 040007-1–040007-6.

Надійшла до редакції : 26.12.2019.