

УДК 624.953.014.2.004.15

УПРАВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТЬЮ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

СЕМЕНЕЦ С.Н. ^{1*}, к.т.н, доц.,
НАСОНОВА С.С. ^{2*}, к.т.н, доц.,
ВЛАСЕНКО Ю.Е. ^{3*}, к.т.н., доц.,
КРИВЕНКОВА Л.Ю. ^{4*}, ст. викл.

^{1*} Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, тел. +380676396064, 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, Дніпро, Україна, тел. +380979409856, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

^{3*} Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, +38 (056) 756-34-10, e-mail: yuvlas@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0001-5628-8195

^{4*} Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина, +38 (056) 756-34-10, e-mail: l_yu_k2406@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0003-4421-058X

Аннотация. *Цель.* В рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов нефтяных резервуаров разработать метод построения эффективных планов-графиков технической диагностики этих сооружений в период эксплуатации. *Постановка проблемы.* Содержание и периодичность проведения технической диагностики нефтяных резервуаров (РВС) регламентируются действующими нормативными документами. Однако с позиций экономической эффективности соответствующие вопросы применительно к конкретно взятому резервуару (или парку резервуаров) в условиях конкретной нефтебазы требуют своего дальнейшего исследования. Такая ситуация, сложившаяся в практике ревизий технического состояния РВС, находящихся в эксплуатации на нефтебазах Украины, требует разработки новых математических моделей и методов, адекватно отражающих сущность проблемы эффективного управления эксплуатационной надежностью рассматриваемых сооружений. *Методика.* В статье предложена модель управления эксплуатационной надежностью РВС по критерию минимума суммарных эксплуатационных затрат, которая сформулирована в терминах задачи нелинейного математического программирования с бинарными переменными. Для численной реализации этой модели разработан специальный алгоритм, основанный на принципах построения «жадных» алгоритмов, с использованием которого получены экономически рациональные периодичности проведения технических обследований резервуара объемом 5000м³ в зависимости от требуемого уровня эксплуатационной надежности. *Выводы.* Предложенная оптимизационная модель управления эксплуатационной надежностью нефтяных резервуаров позволяет формировать экономически рациональные стратегии ревизий их технического состояния на протяжении заданного срока службы. Эта модель может быть полезной в практике планирования ревизий технического состояния РВС как на начальной, так и на любой другой стадии процесса эксплуатации. Кроме того, данную модель можно использовать в задачах обеспечения надежности как применительно к отдельным резервуарам, так и паркам таких резервуаров.

Ключевые слова: нефтяной резервуар; математическая модель; управление надежностью; диагностика; ревизия технического состояния

УПРАВЛІННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЮ НАДІЙНІСТЮ НАФТОВИХ РЕЗЕРВУАРІВ

СЕМЕНЕЦЬ С.М. ^{1*}, к.т.н, доц.,
НАСОНОВА С. С. ^{2*}, к.т.н, доц.,
ВЛАСЕНКО Ю.Є. ^{3*}, к.т.н., доц.,
КРИВЕНКОВА Л.Ю. ^{4*}, ст. викл.

^{1*} Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, +380676396064, 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, Дніпропетровськ, Україна, тел. +380979409856, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

^{3*} Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, +38 (056) 756-34-10, e-mail: yuvlas@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0001-5628-8195

^{4*} Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, +38 (056) 756-34-10, e-mail: l_yu_k2406@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0003-4421-058X

Анотація. Мета. В рамках діючої системи технічного обслуговування і ремонтів нафтових резервуарів розробити метод побудови ефективних планів-графіків технічної діагностики цих споруд в період експлуатації. **Постановка проблеми.** Зміст і періодичність проведення технічної діагностики нафтових резервуарів (РВС) регламентуються діючими нормативними документами. Однак з позицій економічної ефективності відповідні питання стосовно конкретно взятого резервуару (або парку резервуарів) в умовах конкретної нафтобази потребують свого подальшого дослідження. Така ситуація, що склалася в практиці ревізій технічного стану РВС, що знаходяться в експлуатації на нафтобазах України, вимагає розробки нових математичних моделей і методів, які адекватно відображають сутність проблеми ефективного управління експлуатаційною надійністю розглянутих споруд. **Методика.** У статті запропонована модель управління експлуатаційною надійністю РВС за критерієм мінімуму сумарних експлуатаційних витрат. Для чисельної реалізації цієї моделі розроблений спеціальний алгоритм, заснований на принципах побудови «жадібних» алгоритмів, з використанням якого одержано економічно раціональні плани-графіки проведення технічних обстежень резервуара об'ємом 5000м³ в залежності від необхідного рівня експлуатаційної надійності. **Висновки.** Запропонована оптимізаційна модель управління експлуатаційною надійністю нафтових резервуарів дозволяє формувати економічно раціональні стратегії ревізій їх технічного стану на протязі заданого терміну служби. Ця модель може бути корисною в практиці планування ревізій технічного стану РВС як на початковій, так і на будь-якій іншій стадії процесу експлуатації. Крім того, дану модель можна використовувати в задачах забезпечення надійності як стосовно до окремих резервуарів, так і паркам таких резервуарів.

Ключові слова: нафтовий резервуар; математична модель; управління надійністю; діагностика; ревізія технічного стану

OPERATIONAL RELIABILITY MANAGEMENT OF PETROLEUM RESERVOIRS

SEMENETS S.N. ^{1*}, *PhD, Assoc. Prof.*,
 NASONOVA S. S. ^{2*}, *PhD, Assoc. Prof.*,
 VLASENKO Yu. E., ^{3*}, *PhD, Assoc. Prof.*,
 KRIVENKOVA L.Yu. ^{4*}, *senior lect.*

^{1*} Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +380676396064, e-mail: ssemenets28@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6359-1069

^{2*} Department of higher mathematics, State Higher Education Establishment "Ukrainian state chemical - technological university", Gagarin str., 8, Dnipropetrovsk 49005, Ukraine, tel. +380979409856, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

^{3*} Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, +38 (056) 756-34-10, e-mail: yuvlas@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0001-5628-8195

^{4*} Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, +38 (056) 756-34-10, e-mail: l_yu_k2406@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0003-4421-058X

Abstract. Purpose. In the framework of the current system of maintenance and repair of petroleum reservoirs to develop a method for constructing effective schedules for the technical diagnostics of these structures during operation **Raising of problem.** The content and frequency of technical diagnostics of petroleum reservoirs (RVS) are regulated by the current regulatory documents. However, from the point of view of economic efficiency, the relevant questions with regard to the particular reservoir (or reservoirs park) under the conditions of a particular petroleum depot require further investigation. Such a situation, which has developed in the practice of audits of the technical condition of RVS in service in Ukraine, requires the development of new mathematical models and methods that adequately reflect the essence of the problem of effective management of operational reliability of the facilities in question. **Methodology.** The article proposes a model of management of operational reliability of RVS based on the minimum of total operating costs, which is formulated in terms of the problem of nonlinear mathematical programming with binary variables. For the numerical realization of this model, a special algorithm based on the principles of constructing "greedy" algorithms was developed, using which economically rational intervals for carrying out technical inspections of the reservoir with a volume of 5000 m³, depending on the required level of operational reliability. **Conclusions.** The proposed optimization model for managing the operational reliability of petroleum reservoirs makes it possible to form economically rational strategies for auditing their technical condition over a given service life. This model can be useful in the practice of planning revisions of the technical condition of the RVS both at the initial and at any other stage of the operation process. In addition, this model can be used in reliability problems both for individual reservoir and parks of such reservoirs.

Keywords: petroleum reservoir; mathematical model; reliability management; diagnostics; technical condition audit

Постановка проблеми

Основным способом управления эксплуатационной надежностью стальных

резервуаров для хранения нефтепродуктов (РВС) являются периодические ревизии их технического состояния, состоящие в проведении мероприятий

системы технических обследований и ремонтов, направленных на восстановление технических кондиций этих сооружений.

Содержание и периодичность проведения технической диагностики нефтяных резервуаров регламентируются действующими нормативными документами [1, 6]. Однако при всей очевидной практической полезности этих общих рекомендаций обращает на себя внимание то, что они определены весьма ориентировочно, а с позиций экономической эффективности затрат на ревизию соответствующие вопросы применительно к конкретно взятому резервуару (или парку резервуаров) в условиях конкретной нефтебазы требуют своего дальнейшего исследования.

Такая ситуация, сложившаяся в практике ревизий технического состояния РВС, находящихся в эксплуатации, требует разработки новых математических моделей и методов, адекватно отражающих сущность проблемы эффективного управления эксплуатационной надежностью рассматриваемых сооружений. Эти модели и методы могут и должны способствовать принятию обоснованных, экономически рациональных решений при планировании проведения ревизий технического состояния нефтяных резервуаров в процессе их эксплуатации.

Цель

– в рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов нефтяных резервуаров разработать метод построения эффективных планов-графиков технической диагностики этих сооружений в период эксплуатации.

Методика

Актуальной является следующая задача управления эксплуатационной надежностью РВС. Рассматривается стальной резервуар для хранения товарных нефтепродуктов, находящийся в эксплуатации некоторое время t_0 ($t_0 \geq 0$). Известны проектные параметры, и другие паспортные характеристики резервуара, условия и способ его эксплуатации, а также предыстория ревизий технического состояния резервуара. Требуется при заданном сроке эксплуатации T определить экономически рациональную периодичность ревизий технического состояния резервуара, позволяющую обеспечить требуемый уровень надежности сооружения на временном интервале $[t_0, T]$ его дальнейшей эксплуатации.

Для записи математической модели сформулированной задачи введем следующие основные допущения.

1. Относительная продолжительность производства ревизий технического состояния РВС (т.е. время проведения обследований и соответствующих ремонтно-восстановительных мероприятий) пренебрежимо мала по сравнению со сроками бесперебойной работы этих сооружений. Заметим, что данное допущение обычно

справедливо, если резервуар грамотно запроектирован, изготовлен, смонтирован и правильно эксплуатируется.

2. После проведения ревизии РВС находится в исправном или работоспособном состоянии.

3. Стартовая точка t_0 рассматриваемого интервала эксплуатации $[t_0, T]$ является начальным моментом эксплуатации или моментом проведения ревизии технического состояния РВС.

4. После проведения любой ревизии технического состояния резервуар продолжает эксплуатироваться с проектным уровнем залива.

Заметим, что перечисленные выше допущения традиционны, достаточно очевидны (за исключением последнего) и, в основном, правильно отражают реальную картину проведения ремонтно-восстановительных мероприятий по поддержанию эксплуатационной надежности РВС. Что касается допущения 4, то его следует рассматривать как ограничение на область применения предлагаемой ниже моделей оптимизации.

В дополнение к приведенным допущениям далее будем учитывать, что общая стоимость денежных вложений, требуемых для эффективного управления надежностью РВС на рассматриваемом интервале эксплуатации должна определяться с учетом одновременности затрат. Это объясняется тем, что стальные резервуары для хранения товарных нефтепродуктов находятся в эксплуатации десятки лет, что означает одновременные вложения капитала, необходимые для обеспечения их надежной работы. Для корректного экономического сопоставления одновременных затрат, имеющих место на протяжении заданного интервала времени $[t_0, T]$, эти затраты должны быть дисконтированы (приведены к единому моменту времени, например, к стартовому моменту времени t_0).

Стоимость денежных вложений, сделанных в момент времени t , приведенную к начальному моменту времени t_0 ($t_0 \leq t$), можно определить следующим образом [2]

$$C^* = C \exp[-r^*(t-t_0)], \quad (1)$$

где C – затраты, требуемые для проведения ревизии технического состояния РВС в момент времени t ; C^* – те же затраты, но приведенные к начальному моменту времени t_0 ;

r^* – параметр дисконтирования, вычисляемый по формуле

$$r^* = \ln(1 + r_0);$$

r_0 – средняя доходность экономической деятельности в обществе, определяемая банковской процентной ставкой с капитала.

Следует отметить, что дисконтирование затрат учитывает точку зрения владельца капитала, который считает, что любые средства должны приносить прибыль. Дисконтирование «удешевляет» будущие затраты и заставляет более дорожить сиюминутными

затратами, чем перспективными доходами и затратами.

Разобьем рассматриваемый временной интервал эксплуатации $[t_0, T]$ на N частей равной длины $[t_i, t_{i+1}]$, которые назовем элементарными интервалами эксплуатации. Очевидно, что длина каждого такого интервала вычисляется по формуле

$$\Delta = \frac{T - t_0}{N}.$$

Начальную точку t_0 первого элементарного интервала назовем стартовой, а крайнюю правую точку последнего элементарного интервала $t_N = T$ назовем конечной. Моменты времени t_0, t_1, \dots, t_{N-1} будем называть контрольными, а всю совокупность t_0, t_1, \dots, t_N будем называть расчетной сеткой.

Заметим, что число разбиений N , определяющее длину элементарного временного интервала, выбирается исходя из требуемой точности определения моментов проведения ревизий РВС.

Контрольные точки t_i ($i = \overline{0, N-1}$) – это потенциальные моменты проведения ревизий технического состояния стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации. В каждой контрольной точке может приниматься один из следующих двух вариантов управления эксплуатационной надежностью РВС:

1. Эксплуатировать резервуар дальше без каких-либо обследований и ремонтов.
2. Произвести обследование технического состояния РВС, выполнить ремонтно-восстановительные мероприятия, соответствующие полученному техническому заключению и эксплуатировать сооружение дальше.

Учитывая принятую в Украине классификацию видов технических обследований стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов [6], в контрольных точках t_0, t_1, \dots, t_{N-1} возможны следующие варианты принятия решения по проведению обследований.

1. Продолжение эксплуатации резервуара без каких-либо ревизий технического состояния.
2. Проведение частичного технического обследования резервуара (Ч) и выполнение соответствующих ремонтно-восстановительных мероприятий.
3. Проведение полного технического обследования резервуара (П) и выполнение соответствующих ремонтно-восстановительных мероприятий.
4. Проведение полного с дефектоскопией обследования резервуара (ПД) и выполнение соответствующих ремонтно-восстановительных мероприятий.
5. Проведение технического обследования днища (Д) и выполнение соответствующих ремонтно-восстановительных мероприятий.

В дальнейшем за каждым из перечисленных пяти вариантов принятия решения закрепим свой код,

определяемый соответствующим порядковым номером.

Обозначим через x_{ij} ($i = \overline{0, N-1}, j = \overline{1, 5}$) бинарную переменную, которая равна 1, если в контрольной точке t_i принимается j -й вариант проведения ревизии, и равна 0 – в противном случае.

Вектор вида

$$\bar{x}(i) = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5})$$

назовем вектором ревизий технического состояния РВС в момент времени t_i . Данный вектор определяет тот или иной вариант проведения (или не проведения) ревизии в контрольной точке t_i . Так, если

$$\bar{x}(i) = (1, 0, 0, 0, 0),$$

то в контрольный момент времени t_i никакие ревизии технического состояния резервуара не производятся.

Если

$$\bar{x}(i) = (0, 1, 0, 0, 0),$$

то в контрольный момент t_i производится частичное обследование резервуара и выполняются соответствующие ремонтно-восстановительные мероприятия.

Если

$$\bar{x}(i) = (0, 0, 0, 1, 0),$$

то в контрольный момент t_i производится полное с дефектоскопией обследование резервуара и выполняются соответствующие ремонтно-восстановительные мероприятия.

Если

$$\bar{x}(i) = (0, 0, 0, 0, 1),$$

то в контрольный момент t_i производится обследование днища резервуара и выполняются соответствующие ремонтно-восстановительные мероприятия.

Поскольку приведенные выше варианты принятия решения являются альтернативными, то только одна из координат вектора ревизий $\bar{x}(i)$ может быть отлична от 0 и равна 1. Это значит, что для любой контрольной точки t_i имеет место равенство

$$\sum_{j=1}^5 x_{ij} = 1, \quad i = \overline{0, N-1}.$$

Матрицей ревизий технического состояния РВС в момент времени t_i назовем матричную функцию размерностью $i \times 5$, строки которой – это векторы ревизий резервуара в предыдущих контрольных точках

$$X(i) = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & x_{03} & x_{04} & x_{05} \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{i-11} & x_{i-12} & x_{i-13} & x_{i-14} & x_{i-15} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Данная матрица определяет предысторию проведения ревизий технического состояния резервуара, находящегося в эксплуатации время t_i , описывает типы, очередность и сроки ревизий РВС, производимых до контрольного момента времени t_i .

Полное представление о системе ревизий технического состояния резервуара, производимых за весь период эксплуатации $[t_0, T]$, дает следующая матрица ревизий

$$X(N) = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{02} & x_{03} & x_{04} & x_{05} \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{N-11} & x_{N-12} & x_{N-13} & x_{N-14} & x_{N-15} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Рассмотрим многошаговый процесс принятия решений. На каждом i -м шаге этого процесса определяются вектор $\bar{x}(i)$, идентифицирующий содержание ревизии технического состояния РВС, производимой в контрольный момент времени t_i . Требуется за $N-1$ шаг построить такую матрицу $X(N)$, которая позволяет обеспечить требуемый уровень надежности РВС на рассматриваемом интервале эксплуатации при наименьших суммарных эксплуатационных затратах. Формальная запись этой задачи имеет следующий вид

$$C_3 \rightarrow \min \quad (4)$$

$$P(t) \geq P^*, \quad t \in [t_0, T]; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^5 x_{ij} = 1, \quad i = \overline{0, N-1}; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \leq c_i^*, \quad i = \overline{0, N-1}. \quad (7)$$

Здесь C_3 – суммарные эксплуатационные затраты, требуемые для поддержания надежной работы РВС за период службы $[t_0, T]$;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы резервуара на протяжении времени t ;

P^* – требуемый уровень надежности резервуара;

c_{ij} – стоимость соответствующей ревизии, производимой в момент времени t_i ;

c_i^* – предельная стоимость ревизии технического состояния сооружения в i -й контрольной точке, отражающая финансовые возможности нефтебазы по техническому обслуживанию РВС в момент времени t_i .

Заметим, значения c_i^* определяются исходя из нормы ежегодных амортизационных отчислений для нефтесооружений, которая составляет 5% сметной стоимости резервуара.

Следует также отметить, что ограничение (5) – это условие надежной работы РВС на протяжении времени t , а его нарушение является критерием проведения предупреждающей ревизии технического

состояния РВС; ограничение (7) – это условие финансовой обеспеченности ревизии технического состояния резервуара, производимой в момент времени t_i ; ограничение (6) определяет структуру вектора ревизий в контрольных точках.

Суммарные эксплуатационные затраты складываются из затрат на проведение ревизий C_x и гипотетических убытков C_z от отказов РВС за рассматриваемый период эксплуатации

$$C_3 = C_x + C_z. \quad (8)$$

Принимая во внимание одновременность вложений капитала на рассматриваемом временном интервале $[t_0, T]$, суммарные затраты на проведение ревизий технического состояния РВС, приведенные к начальному моменту времени t_0 , определяются так

$$C_x = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \exp[-r^*(t_i - t_0)], \quad (9)$$

где c_{ij} – стоимость j -го вида ревизии в момент времени t_i .

При этом стоимость ревизии технического состояния отдельного конструктивного элемента резервуара в момент времени t_i можно приближенно оценить так

$$c_i = c_0 \cdot k_i,$$

где c_0 – проектная стоимость элемента;

k_i – коэффициент, характеризующий степень необратимого коррозионного износа элемента, определяемый по формуле

$$k_i = \frac{h_0 - h(t_i)}{h_0};$$

h_0 – проектная толщина конструктивного элемента;

$h(t_i)$ – остаточная толщина элемента в момент времени t_i , определяемая по упрощенной формуле

$$h(t_i) = h_0 - u_{cp} \cdot t_i;$$

u_{cp} – средняя скорость необратимого коррозионного износа элемента.

Гипотетические убытки от отказов РВС за рассматриваемый период эксплуатации в соответствии с [2] определим так

$$C_z = \int_{t_0}^T \omega^* [1 - P(t)] dt, \quad (10)$$

где ω^* – усредненная величина убытков, с которыми сопряжен отказ РВС, определяемая исходя из априорного анализа последствий (экономических, экологических и т.д.) отказа сооружения.

Учитывая вышеизложенное, математическая модель управления надежностью РВС, находящихся в эксплуатации, по критерию минимума суммарных эксплуатационных затрат имеет вид

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \exp[-r^*(t_i - t_0)] + \quad (11)$$

$$+ \int_{t_0}^T \omega^* [1 - P(t)] dt \rightarrow \min$$

$$P(t) \geq P^*, \quad t \in [t_0, T] \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^5 x_{ij} = 1, \quad i = \overline{0, N-1} \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^5 c_{ij} x_{ij} \leq c_i^*, \quad i = \overline{0, N-1} \quad (14)$$

На основе данной модели оптимизации определяется такая система ревизий технического состояния резервуарных конструкций (матрица $X(N)$), которая позволяет обеспечить требуемый уровень надежности РВС при наименьших суммарных эксплуатационных затратах.

Модель (11) - (14) сформулирована в терминах задачи нелинейного математического программирования с бинарными переменными. Для численного решения этой задачи был разработан модифицированный «жадный» алгоритм, который для построения оптимального плана-графика ревизий технического состояния всего резервуара предусматривает последовательное построение локально оптимальных периодичностей ревизий технического состояния отдельных конструктивных элементов (днища, кровли, нижних и верхних поясов цилиндрической стенки, узла сопряжения стенки с днищем) и последующее согласование полученных результатов. Согласование локально оптимальных планов-графиков сводилось к объединению работ, связанных с ревизиями технического состояния разных конструктивных элементов в смежных контрольных точках t_i и t_{i+1} в одну ревизию, производимую в момент времени t_i . В качестве необходимого условия проведения ревизии технического состояния резервуара в момент времени

t_i рассматривалось совместное выполнение следующих двух неравенств:

$$P(t_i) \geq P^*; P(t_{i+1}) \leq P^*. \quad (15)$$

Численные расчеты проводились применительно к типовому проекту РВС -5000 при следующих исходных данных: $T=40$ лет; $t_0=0$; $\Delta t=1$ год; $r_0=0,03$; высота стенки - 1490см; диаметр стенки - 2092см; толщина днища - 5мм; толщина кровли - 3мм; количество поясов стенки - 10; толщина поясов стенки, начиная с нижнего, - соответственно 10, 7, 7, 6, 5, 5, 4, 4, 4, 4мм; плотность хранимого нефтепродукта - 0.0009кг/см³; величина избыточного давления в газовом пространстве резервуара - 2.0кПа; вакуум - 0.25кПа; высота залива - 1420см; расчетное сопротивление стали - 230 МПа; количество нагружений в год - 60; стоимость одной тонны металлопроката - \$300. Величина гипотетических убытков ω^* принималась равной проектной стоимости резервуара.

Вероятность безотказной работы резервуара в период эксплуатации оценивалась на основе гипотезы «слабейшего» звена [4,7] по следующей формуле

$$P(t) = \min \{P_{сн}(t), P_{св}(t), P_{ус}(t), P_{дн}(t), P_{кр}(t)\}, \quad (16)$$

где $P_{сн}(t), P_{св}(t), P_{ус}(t), P_{дн}(t), P_{кр}(t)$ - вероятности безотказной работы, соответственно, нижних и верхних поясов цилиндрической стенки, узла сопряжения стенки с днищем, днища и кровли. Эти вероятности вычислялись по расчетным формулам, приведенным в [7].

Проектная стоимость отдельной резервуарной конструкции считалась равной утроенной стоимости металлопроката, требуемого на ее изготовление, а величины средних скоростей необратимого и локального коррозионного износа резервуарных конструкций принимались по [3].

Таблица 1

Рациональные периодичности технических обследований РВС-5000 / Rational periodicity of technical surveys RVS 5000

P*	Продолжительность эксплуатации, годы																				
	5	6	8	9	10	12	15	16	18	20	23	24	25	27	30	32	35	36	37	39	40
0,950				Д					П						ПД				ПД		
0,960				Д					П						ПД				ПД		
0,970			П						П				ПД			П			П		
0,980		П				П			П			ПД			П			П			П
0,990		П				П			П			ПД			П		П			П	
0,999		П				П			ПД			П			П		ПД		П	П	

В таблице 1 приведены полученные по модели (11)-(14) планы-графики проведения технических обследований РВС в расчете на 40 лет эксплуатации в зависимости от требуемого уровня надежности P^* .

Анализируя планы-графики, представленные в таблице 1, можно, в частности, отметить, что ужесточение требований к надежности сопряжено с увеличением объема технической диагностики, причем планирование частичных обследований при разработке системы технического обслуживания резервуаров, находящихся в эксплуатации в условиях перевалочно-распределительных нефтебаз Украины, следует считать экономически нецелесообразным.

Выводы

Предложенная оптимизационная модель управления эксплуатационной надежностью нефтяных резервуаров позволяет формировать экономически рациональные стратегии их технической диагностики на протяжении заданного срока службы. Эта модель может быть полезной в практике планирования ревизий технического состояния РВС как на начальной, так и на любой другой стадии процесса эксплуатации. Кроме того, данную модель можно использовать в задачах обеспечения надежности как применительно к отдельным резервуарам, так и паркам таких резервуаров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будинки і споруди. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа : ВБН 2.2-58.2-94 / Держ. ком. України по нафті і газу. – Чинні від 01.10.1994. – Київ: Держкомнафтогаз, 1994. – 98 с.
2. Дорохов А. Н. Обеспечение надежности сложных технических систем: учебник для вузов / А. Н. Дорохов, В.А. Кержоницкий, А.Н. Миронов, О.Л. Шестопалова. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
3. Егоров Е. А. Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации: монография / Е.А. Егоров. – Днепропетровск: ПГАСА., 1996. – 99 с.
4. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон; пер. с англ. Коваленко Е.Г., под ред. Ушакова И.А. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
5. Каштанов В. А. Теория надежности сложных систем: учебное пособие / В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – М: Физматлит, 2010. – 606 с.
6. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту: [змінені розділи та пункти розділів] / ДПП УкрДНІПРОнафтогаз. – [Чинні від 03.07. 1999]. – Київ. : Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.
7. Семенец С. Н. Расчетные модели надежности нефтяных резервуаров / С.Н. Семенец, С.С. Насонова, Ю.Е. Власенко, Л.Ю. Кривенкова // Вісник ПДАБА. – Дніпро: ПДАБА, 2018. – №1. – С.60-67.

REFERENCES

1. *Budynky i sporudy. Reservuary vertikalni stalevi dlia sberigannia nafty i naftoproduktiv s tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93.3 kPa* [Buildings and structures. Reservoirs are vertical steel for storage oils and oil products with pressure of saturated pariv not higher 93.3 kPa]. *Vidomchi budivelni normy Ukrainy VBN 2.2-58.2-94* [Department building norms of Ukraine VBN 2.2-58.2-94]. Kyiv, 1994, p. 98 (in Ukrainian).
2. Dorokhov A.N., Kerzhonitskiy V.A., Mironov A.N. and Shestopalova O.L. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Ensuring the reliability of complex technical systems]. Saint Petersburg: Lan Publ., 2011, 349 p. (in Russian).
3. Egorov E.A. *Issledovaniye i metody raschetnoy otsenki prochnosti, ustoychivosti i ostatochnogo resursa stalnykh rezervuarov, nakhodiashchikhsia v ekspluatatsii* [Research and methods of calculation estimation of durability, stability and remaining resource of steel reservoirs being in exploitation]: *Sb. nauch. trudov* [Coll. scientific. works], 1996, 99 p. (in Russian).
4. Kapur K. and Lamberson L. *Nadezhnost i proektirovaniye sistem* [Reliability and designing systems]. Moscow: Mir Publ., 1980, 604p. (in Russian)
5. Kashtanov V.A. and Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem* [Theory of reliability of complex system]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2010, 606 p. (in Russian)
6. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii rezervuariv ta instruktсии po yikh remontu . Dopovnennia ta smyny* [Rules of technical exploitation of reservoirs and instruction are on their repair. Addition and changes]. Kyiv, Ukrnaftoprodukt Publ., 1997, p. 297 (in Ukrainian).
7. Semenets S.N., Nasonova S.S., Vlasenko Yu.E. and Krivenkova L.Yu. *Raschetnyye modeli nadezhnosti neftyanykh rezervuarov* [Calculation models of reliability of petroleum reservoirs] *Visnyk PDABA*[Bulletin of Prydniprovs`ka State Academy of Civil Engineering and Architecture], Dnipro, PDABA, 2018, no. 1, pp. 60 - 67. (in Russian)