

УДК 624.953-027.45

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.170118.52.40

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

СЕМЕНЕЦ С. Н.¹, канд. техн. наук, доц.,
НАСОНОВА С. С.², канд. техн. наук, доц.,
ВЛАСЕНКО Ю. Е.³, канд. техн. наук, доц.,
КРИВЕНКОВА Л. Ю.⁴, ст. препод.

¹Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +380676396064, e-mail: semenets.serg@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0477-8795

²Кафедра высшей математики, Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет», пр. Гагарина, 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +380979409856, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

³Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, +38 (056) 756-34-10

⁴Кафедра прикладной математики и информационных технологий, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, +38 (056) 756-34-10, e-mail: lyuk2406@i.ua.

Аннотация. Постановка проблемы. С точки зрения надежности большинство строительных конструкций можно рассматривать после декомпозиции как систему с логически последовательным соединением элементов. Для нормального функционирования такой системы все ее элементы должны быть работоспособными. Отказ же хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. В случае независимости отказов отдельных элементов вероятность безотказной работы системы легко определяется по известному правилу умножения вероятностей. Если же отказы элементов рассматриваемой системы статистически зависимы, то адекватно отобразить зависимость показателей надежности всей системы от вероятностных характеристик ее элементов значительно сложнее. Известный в теории вероятностей подход к решению этой задачи основан на синтезе функций (интегральной или плотности) совместного распределения вероятностей наработок до отказа отдельных элементов системы. Однако для решения практических задач такой подход крайне неудобен и фактически не используется. В данной статье рассматриваются вопросы моделирования показателей надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов на основе гипотезы «слабейшего звена». **Цель статьи** – показать правомерность применения гипотезы «слабейшего звена» при разработке моделей оценки надежности нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации. **Выводы.** Полученные результаты подтверждают правомерность применения гипотезы «слабейшего звена» при моделировании показателей надежности стальных резервуаров для длительного хранения нефтепродуктов. Предложенные модели позволяют получить комплексную вероятностную оценку технического состояния резервуаров. Параметры этих моделей могут корректироваться по данным натурных обследований, что повышает точность оценки в каждом отдельном случае. Кроме того, данные модели могут использоваться как прогнозные модели на стадии проектирования резервуаров и как модели управления надежностью в период эксплуатации этих сооружений. В итоге рассмотренные модели могут служить достаточно эффективным математическим инструментом при исследовании проблем надежности и долговечности нефтяных резервуаров.

Ключевые слова: нефтяные резервуары; надежность; поврежденность; индекс обеспеченности; «слабейшее звено»

РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ НАФТОВИХ РЕЗЕРВУАРІВ

СЕМЕНЕЦЬ С. М.¹, канд. техн. наук, доц.,
НАСОНОВА С. С.², канд. техн. наук, доц.,
ВЛАСЕНКО Ю. Є.³, канд. техн. наук, доц.,
КРИВЕНКОВА Л. Ю.⁴, ст. викл.

¹Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +380676396064, e-mail: semenets.serg@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0477-8795

²Кафедра вищої математики, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +380979409856, e-mail: ms.nasonova.s@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0920-7417

³Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, +38 (056) 756-34-10

⁴Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, +38 (056) 756-34-10, e-mail: lyuk2406@i.ua.

Анотація. Постановка проблеми. З точки зору надійності більшість будівельних конструкцій можна розглядати після декомпозиції як систему з логічно послідовним з'єднанням елементів. Для нормального

функціонування такої системи усі її елементи мають бути працездатними. Відмова ж хоча б одного елемента спричинює відмову усій системі. У разі незалежності відмов окремих елементів вірогідність безвідмовної роботи системи легко визначається за відомим правилом множення вірогідності. Якщо ж відмови елементів системи, що розглядається, статистично залежні, то адекватно відобразити залежність показників надійності усій системі від імовірнісних характеристик її елементів значно складніше. Відомий в теорії вірогідності підхід до розв'язання цієї задачі ґрунтується на синтезі функцій (інтегральної або щільності) спільного розподілу вірогідності напрацьовань окремих елементів системи. Проте для розв'язання практичних задач такий підхід у край незручний і фактично не використовується. У статті розглядаються питання моделювання показників надійності сталевих резервуарів для нафтопродуктів на основі гіпотези «слабкої ланки». **Мета статті** - показати правомірність застосування гіпотези «слабкої ланки» для розроблення моделей оцінки надійності нафтових резервуарів, що перебувають в експлуатації. **Висновки.** Отримані результати підтверджують правомірність застосування гіпотези «слабкої ланки» для моделювання показників надійності сталевих резервуарів для тривалого зберігання нафтопродуктів. Запропоновані моделі дозволяють отримати комплексну імовірнісну оцінку технічного стану резервуарів. Параметри цих моделей можуть коригуватися за даними натурних обстежень, що підвищує точність оцінки у кожному окремому випадку. Крім того, ці моделі можуть застосовуватися як прогнозні на стадії проектування резервуарів і як моделі управління надійністю в період експлуатації цих споруд. У результаті розглянуті моделі можуть служити досить ефективним математичним інструментом у дослідженні проблем надійності і довговічності нафтових резервуарів.

Ключові слова: нафтові резервуари; надійність; пошкодженість; індекс забезпеченості; «слабка ланка»

CALCULATION MODELS OF RELIABILITY OF PETROLEUM RESERVOIRS

SEMENETS S. N.¹, *PhD, Assoc. Prof.*,
NASONOVA S. S.², *PhD, Assoc. Prof.*,
VLASENKO Yu. E.,³ *Cand. Sc.(Tech), Assoc. Prof.*,
KRIVENKOVA L. Yu.⁴, *senior lect.*

¹Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +380676396064, e-mail: semenets.serg@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0477-8795

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

³Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, +38 (056) 756-34-10

⁴Department of Applied Mathematics and Information Technology, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, +38 (056) 756-34-10, e-mail: lyuk2406@i.ua.

Abstract. Raising of problem. From the point of view of reliability most building constructions can be examined after a decoupling as a system with logically successive connection of elements. For the normal functioning of such system all its elements must be capable of working. The refuse of even one element results in the refuse of all system. In case of independence of refuses of separate elements probability of faultless work of the system is easily determined by well-known rule of increase of probabilities. If the refuses of elements of the examined system are statistically dependent, then it is adequate to represent dependence of reliability of all system indexes on probabilistic descriptions of its elements considerably more difficult. The well-known in the theory of chances going near the decision of this task is based on the synthesis of functions (integral or closenesses) of joint probability of works completely of separate elements of the system distribution. However for the decision of practical tasks such approach is extremely uncomfortable and not used actually. In this article the questions of design of reliability of steel reservoirs indexes are examined for oil products on the basis of hypothesis of the "weakest link". **Purpose of the article** - to show legitimacy of application of hypothesis of the "weakest link" at development of models of estimation of reliability of petroleum reservoirs being in exploitation. **Conclusions.** The gotten results confirm legitimacy of application of hypothesis of the "weakest link" at the design of reliability of steel reservoirs indexes for standing oil product storing. Offer models allow to get the complex probabilistic estimation of the technical state of reservoirs. The parameters of these models can be corrected from data of model inspections, that promotes exactness of estimation in every special case. In addition, these models can be used as prognosis models on the stage of planning of reservoirs and as case frames by reliability in the period of exploitation of these building. The models considered in the total can serve as an effective enough mathematical instrument at research of problems of reliability and longevity of petroleum reservoirs.

Keywords: petroleum reservoirs; reliability; damaged; index of material well-being; "weakest link"

Постановка проблеми. Стальні нафтопродуктові (РВС), складаючі вертикальні циліндричні резервуари значительную часть резервуарного парка для довгосрочного хранения України, в настоящее время находятся в

состоянии активного физического износа. В связи с этим в последние годы в значительной мере повысился фактический риск отказов и, тем самым, возросла роль фактора своевременного и эффективного восстановления их работоспособности. Все это требует уточнения действующих нормативных документов по эксплуатации указанных объектов в части сроков ревизий технического состояния, что связано, прежде всего, с адекватным математическим описанием показателей их надежности и с разработкой новых моделей и методов управления надежностью в условиях физического износа. Соответствующие вопросы тем более актуальны применительно к объектам, относящимся к сооружениям высокой степени ответственности, для которых обеспечение надежности имеет решающее значение [5; 6].

С точки зрения надежности большинство строительных конструкций можно рассматривать после декомпозиции как систему с логически последовательным соединением элементов. Для нормального функционирования такой системы все ее элементы должны быть работоспособными. Отказ же хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Под отказом понимается переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное состояние.

В разнообразных прикладных задачах, связанных с оценкой и прогнозированием надежности строительных конструкций, возникает проблема моделирования показателей надежности всей системы в зависимости от вероятностных характеристик ее конструктивных элементов. В случае статистической независимости отказов отдельных элементов вероятность безотказной работы системы легко определяется по известному правилу умножения вероятностей. Если же отказы элементов рассматриваемой системы статистически зависимы, то адекватно отобразить зависимость показателей надежности всей системы от вероятностных характеристик ее элементов значительно сложнее. Известный в теории вероятностей подход к решению этой задачи основан на

синтезе функций (интегральной или плотности) совместного распределения вероятностей наработок до отказа отдельных элементов системы. Однако для решения практических задач такой подход крайне неудобен и фактически не используется. В данной статье рассматриваются вопросы моделирования показателей надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов на основе гипотезы «слабейшего звена» [3; 4].

Цель статьи - показать правомерность применения гипотезы «слабейшего звена» при разработке моделей оценки надежности нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Основной материал. Нефтяной резервуар рассматривается как сложная система, состоящая из четырех логически последовательно соединенных подсистем (основных конструктивных элементов): днища, узла сопряжения стенки с днищем (моментная область корпуса резервуара, называемая еще уторным узлом), цилиндрической стенки (нижние и верхние пояса безмоментной области корпуса резервуара) и кровли. Общая схема резервуара показана на рисунке 1, а его структурная схема надежности изображена на рисунке 2. Сварные соединения принимаются равнопрочными основному металлу резервуара.

Считается, что резервуар выполняет свойственные ему функции по приему, хранению и отпуску нефтепродуктов в нормальных режимах работы в соответствии с действующими нормативными документами и с проектным уровнем залива, а ухудшение технического состояния резервуара в период эксплуатации происходит постепенно и обуславливается физическим износом его металлоконструкций. Форс-мажорные ситуации типа катастроф, грубых ошибок проектирования, изготовления и монтажа и т. д. не рассматриваются.

РВС проектируются с определенным запасом толщины конструктивных элементов, что обуславливает соответствующие начальные запасы прочности, устойчивости и герметичности. В период эксплуатации техническое

состояние резервуарных конструкций объективно ухудшается. Вследствие коррозионного износа толщина конструктивных элементов РВС уменьшается, накапливаются и развиваются другие повреждения, что неминуемо приводит к повышению риска отказов этих сооружений.

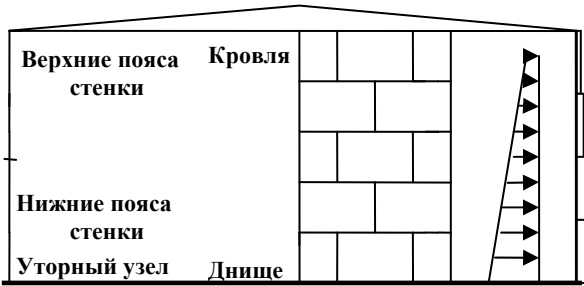


Рис. 1. Общая схема РВС / A general chart RVS

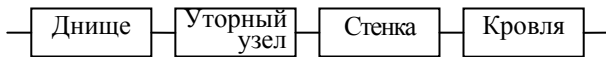


Рис. 2. Структурная схема надежности РВС / The flow diagram of reliability RVS

Согласно действующим нормативным документам [5; 6], РВС на протяжении всего срока службы должны отвечать следующим нормативным требованиям прочности, устойчивости и герметичности:

1) условию прочности цилиндрической стенки

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

2) условию устойчивости цилиндрической стенки

$$\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_{cr1}(t)} + \frac{\sigma_2(t)}{\sigma_{cr2}(t)} \leq 1; \quad (2)$$

3) условию прочности узла сопряжения цилиндрической стенки с днищем

$$\gamma_c R_y \delta_1^2(t) \geq 6M_0; \quad (3)$$

4) условию герметичности (ненаступления предельного состояния) днища

$$\delta_{дн}(t) \geq \frac{\delta_{дн0}}{2}; \quad (4)$$

5) условию герметичности (ненаступления предельного состояния) кровли

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

В приведенных формулах обозначено: n – число поясов цилиндрической стенки; $\delta_i(t) (i = \overline{1, n})$ – текущая толщина i -го пояса; $\delta_{дн}(t), \delta_{кр}(t)$ – текущая толщина, соответственно, днища и кровли; r – радиус срединной поверхности резервуара; R_y – расчетное сопротивление стали; γ_c – коэффициент условий работы (для нижнего пояса $\gamma_c = 0.6$; для остальных поясов цилиндрической стенки $\gamma_c = 0.9$; для уторного узла $\gamma_c = 1.2$); p_i – гидростатическое давление на i -й пояс; $\sigma_1(t), \sigma_2(t)$ – текущие значения меридиональных и кольцевых напряжений, возникающих в стенке от, соответственно, продольных и радиальных внешних нагрузок; $\sigma_{cr1}(t), \sigma_{cr2}(t)$ – критические значения напряжений при сжатии, соответственно, в осевом и радиальном направлении; M_0 – изгибающий момент в зоне сопряжения стенки и днища.

Полагая, что локальные коррозионные повреждения конструктивных элементов резервуара устраняются на основе текущих ремонтов, выполняемых в период эксплуатации в рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов, текущую толщину любого конструктивного элемента $\delta(t)$ можно описать соотношением

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

где δ_0 и $\Delta(t)$ – соответственно, проектное значение толщины и текущая величина необратимого коррозионного износа конструктивного элемента.

Введем следующие обозначения:

$$Z_i(t) = \gamma_c R_y \delta_i(t) - p_i r$$

– запас прочности i -го пояса цилиндрической стенки;

$$Z_c(t) = 1 - \left(\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_{cr1}(t)} + \frac{\sigma_2(t)}{\sigma_{cr2}(t)} \right)$$

– запас устойчивости цилиндрической стенки;

$$Z_{yc}(t) = \gamma_c R_y \delta_1^2(t) - 6M_0$$

– запас прочности узла сопряжения стенки с днищем;

$$Z_{kp}(t) = \delta_{kp}(t) - \frac{\delta_{kp0}}{2}$$

– запас герметичности кровли;

$$Z_{dn}(t) = \delta_{dn}(t) - \frac{\delta_{dn0}}{2}$$

– запас герметичности днища.

В процессе эксплуатации проектные запасы прочности, устойчивости и герметичности резервуара объективно уменьшаются, что так или иначе приводит к наступлению нормативного отказа (нарушению хотя бы одного из неравенств (1) – (5)). Если своевременно не устранить такой отказ (выполнить соответствующий ремонт), наступает отказ физический, который применительно к нефтяным резервуарам обычно сопряжен с огромными экономическими, экологическими и другими потерями. Поэтому прогнозирование наступления нормативных отказов резервуаров вследствие деградации их конструктивных элементов, своевременное обнаружение и устранение эксплуатационных повреждений резервуарных конструкций – это важнейшие задачи технического обслуживания нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Имеющиеся данные многочисленных натурных обследований [2] показывают, что главный механизм отказов РВС – коррозионный износ конструктивных элементов - имеет случайный характер, а его величина достаточно хорошо описывается нормальным законом распределения вероятностей. Поэтому все указанные выше запасы $Z(t)$ далее рассматриваются как случайные функции величины необратимого коррозионного износа, зависящие от времени как от параметра, а также принимается, что в любой фиксированный момент времени их значения распределяются по нормальному закону.

Введем в рассмотрение понятия индексов обеспеченности прочности, устойчивости и герметичности резервуарных конструкций как отношение математического ожидания к

среднеквадратичному отклонению соответствующих запасов. Индексом обеспеченности прочности i -го пояса цилиндрической стенки в текущий момент времени t будем называть функцию времени следующего вида:

$$w_i(t) = \frac{\gamma_c R_y \bar{\delta}_i(t) - p_i r}{\gamma_c R_y \tilde{\delta}_i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где надстрочная черта и волнистая линия обозначают, соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение толщины пояса.

Аналогично определяются:

- индекс обеспеченности прочности уторного узла в текущий момент времени t :

$$w_{yc}(t) = \frac{\gamma_c R_y \bar{\delta}_1^2(t) - 6M_0}{\gamma_c R_y \tilde{\delta}_1^2}; \quad (8)$$

- индекс обеспеченности устойчивости цилиндрической стенки в текущий момент времени t :

$$w_c(t) = \frac{\bar{Z}_c(t)}{\tilde{Z}_c(t)}; \quad (9)$$

- индексы обеспеченности герметичности днища и кровли в текущий момент времени t :

$$w_{dn}(t) = \frac{\bar{\delta}_{dn}(t) - \delta_{dn0}/2}{\tilde{\delta}_{dn}(t)}; \quad (10)$$

$$w_{kp}(t) = \frac{\bar{\delta}_{kp}(t) - \delta_{kp0}/2}{\tilde{\delta}_{kp}(t)}. \quad (11)$$

Следует отметить, что все приведенные выше индексы являются безразмерными детерминированными функциями времени и выражаются через математические ожидания и среднеквадратические отклонения толщин основных конструктивных элементов резервуара. Их значения могут прогнозироваться во времени и корректироваться по фактическим замерам толщины конструктивных элементов при технических обследованиях резервуара.

Учитывая принятый нормальный закон распределения вероятностей всех указанных выше запасов, а также то, что критерием отказа резервуара является исчерпание (отрицательность) хотя бы одного из этих запасов, вероятности сохранения прочности,

устойчивости и герметичности резервуара в процессе эксплуатации можно выразить через соответствующие индексы обеспеченности следующим образом:

Вероятность сохранения прочности i -го пояса на протяжении времени t

$$P_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_i} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (12)$$

Вероятность сохранения устойчивости цилиндрической стенки на протяжении времени t

$$P_{cm}^y(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_c} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (13)$$

Вероятность сохранения прочности уторного узла на протяжении времени t

$$P_{yc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_{yc}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (14)$$

Вероятности сохранения герметичности (ненаступления предельного состояния) днища и кровли:

$$P_{дн}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_{дн}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du; \quad (15)$$

$$P_{кр}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_{кр}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (16)$$

Заметим, что для того, чтобы по заданному значению индекса обеспеченности w найти соответствующую ему вероятность P (или наоборот), можно воспользоваться известной в теории вероятностей табуляционной таблицей функции нормированного нормального распределения вероятностей. Фрагмент этой таблицы приведен ниже (табл. 1).

Таблица 1

Значения P в зависимости от параметра w /
Values of probability of P depending on a parameter w

P	0,5	0,8413	0,9332	0,9773	0,9934	0,9987	0,9997	0,9999
w	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4

При определении вероятности безотказной работы всего резервуара будем исходить из следующих положений.

1. Отказ резервуара наступает при переходе в неработоспособное состояние хотя бы одного из его основных конструктивных элементов.

2. Поскольку коррозия является общим и главным механизмом физического износа металлоконструкций нефтяного резервуара, их отказы нельзя рассматривать как статистически независимые события.

3. Отказы основных конструктивных элементов резервуара являются следствием их физического износа, а первым в процессе эксплуатации отказывает наиболее поврежденный (слабейший) элемент (аналогично механической цепи, работающей на растяжение в агрессивной среде).

Учитывая данные положения (их справедливость достаточно очевидна) и принимая в качестве меры поврежденности металлоконструкций резервуара на том или ином этапе эксплуатации индексы обеспеченности прочности, устойчивости и герметичности, можно считать, что первым в процессе эксплуатации отказывает тот конструктивный элемент, который соответствует наименьшему из указанных индексов. Однако, чем меньше индекс обеспеченности, тем больше вероятность отказа соответствующего конструктивного элемента. Поэтому вероятность безотказной работы резервуара (как системы, состоящей из четырех конструктивных элементов, соединенных логически последовательно) на протяжении времени t от начала эксплуатации может быть найдена на основе модели «слабейшего звена». Эта вероятность определяется следующим образом:

$$P_p(t) = \min\{P_{cm}(t), P_{yc}(t), P_{дн}(t), P_{кр}(t)\} \quad (17)$$

где вероятность безотказной работы цилиндрической стенки $P_{cm}(t)$ вычисляется по формуле

$$P_{cm}(t) = \min\{P_i(t), \dots, P_n(t), P_{cm}^y(t)\}, \quad (18)$$

а вероятности безотказной работы узла сопряжения, днища и кровли – по формулам (14) – (16).

Заметим, что вероятность $P_p(t)$ рассматривается нами как вероятность сохранения работоспособности резервуара в рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов. Эту вероятность еще можно трактовать как вероятность того, что на протяжении времени t не потребуется капитальный ремонт резервуара.

Численные расчеты проводились применительно к типовому проекту РВС –5000 со следующими геометрическими характеристиками: высота стенки – 1 490 см; диаметр стенки – 2 092 см; толщина днища – 5 мм; толщина кровли – 3 мм; количество поясов стенки – 10; толщина поясов стенки, начиная с нижнего, – соответственно 9, 7, 7, 6, 5, 5, 4, 4, 4, 4 мм.

Плотность хранимого нефтепродукта принималась равной 0.0009 кг/см^3 , величина избыточного давления в газовом пространстве резервуара – 2.0 кПа, вакуум – 0.25 кПа, высота залива 1420 см, расчетное сопротивление стали – 230 МПа.

Величина необратимого коррозионного износа конструктивных элементов резервуара вычислялась по упрощенной формуле

$$\Delta = v_s t,$$

где v_s – средняя скорость поверхностной коррозии конструктивного элемента, которая рассматривалась как случайная величина, распределенная по нормальному закону. Статистические характеристики этой скорости для отдельных элементов принимались по [2].

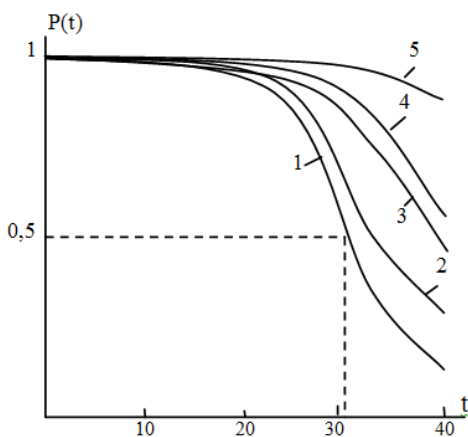


Рис. 3. Графики изменения вероятностей безотказной работы / Charts of change of probabilities of faultless work

На рисунке 3 приведены графики изменения во времени (на протяжении 40 лет эксплуатации) вероятностей безотказной работы основных конструктивных элементов резервуара. На этом рисунке обозначено: 1 и 3 – соответственно, вероятности ненаступления предельного состояния днища и кровли; 2 – вероятность безотказной работы узла сопряжения стенки с днищем; 4 и 5 – соответственно, вероятности сохранения прочности и устойчивости цилиндрической стенки. Эти графики показывают, в частности, что средняя наработка резервуара до первого капитального ремонта (замены днища) составляет немногим более 30 лет, а потеря устойчивости цилиндрической стенки для данного типа резервуаров не характерна, что полностью согласуется с данными натурных обследований [2] и статистикой капитальных ремонтов нефтяных резервуаров. Тем самым, гипотеза «слабейшего звена» в целом правильно отражает процессы деградации нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации.

Выводы. Полученные результаты подтверждают правомерность применения гипотезы «слабейшего звена» при моделировании показателей надежности стальных резервуаров для длительного хранения нефтепродуктов. Предложенные модели (7)-(18) позволяют получить комплексную вероятностную оценку технического состояния резервуаров. Параметры этих моделей могут корректироваться по данным натурных обследований, что повышает точность прогноза в каждом отдельном случае. Кроме того, данные модели могут использоваться как прогнозные на стадии проектирования резервуаров и как модели управления надежностью в период эксплуатации этих сооружений. В итоге рассмотренные модели могут служить достаточно эффективным математическим инструментом при исследовании проблем надежности и долговечности нефтяных резервуаров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обеспечение надежности сложных технических систем : учеб. для вузов / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов, О. Л. Шестопалова. – Санкт Петербург : Лань, 2011. – 352 с.
2. Егоров Е. А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации : монография / Е. А. Егоров. – Днепропетровск : ПГАСА, 1996. – 99 с.
3. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон ; пер. с англ. Коваленко Е. Г., под ред. Ушакова И. А. – Москва : Мир, 1980. – 604 с.
4. Каштанов В. А. Теория надежности сложных систем : учеб. пособие / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – 2-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2010. – 606 с.
5. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту : [змінені розділи та пункти розділів] / ДПІ УкрДІПРОнафтотранс. – [Чинні від 03.07.1999]. – Київ : Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.
6. 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.
7. Семенец С. Н. Оценка фактора восстановления нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации / С. Н. Семенец, С. С. Насонова // Інформаційні технології в освіті, науці та управлінні : зб. наук. праць / ДВНЗ "Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури", Укр. асоціація "Жінки в науці та освіті" (Дніпропетр. вид-ня) ; голов. ред. В. В. Кулябко. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2015. – Вип. 3. – С. 72–77.

REFERENCES

1. Dorokhov A.N., Kernozhickij V.A., Mironov A.N. and Shestopalova L.O. *Obespechenie nadezhnosti slozhnykh texnicheskix sistem* [Ensuring the reliability of complex technical systems]. Sankt Peterburg: Lan', 2011, 352 p. (in Russian).
2. Egorov E.A. *Issledovanie i metody raschetnoj ocenki prochnosti, ustojchivosti i ostatochnogo resursa stalnykh rezervuarov, naxodyashixsya v ekspluacii* [Research and methods of calculation estimation of durability, stability and remaining resource of steel reservoirs being in exploitation]: Dnepropetrovsk: PGASA, 1996, 99 p. (in Russian).
3. Kapur K. and Lamberson L., ed. by Ushakov I.A. *Nadezhnost' i proektirovanie sistem* [Reliability and designing systems]. Moskva: Mir, 1980, 604 p. (in Russian).
4. Kashtanov V.A. and Medvedev A.I. *Teoriya nadezhnosti slozhnykh system* [Theory of reliability of complex system]. Ed. 2, Moskva: Fizmatlit, 2010, 606 p. (in Russian).
5. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii rezervuariv ta instruktsii po ikh remontu: [zmineni rozdily ta punkty rozdily]* [Rules of technical operation of tanks and instructions for their repair: [sections and subsections were changed]]. *PI UkrDIPRONaftotrans* [The State Project Institute UkrDIPRONaftotrans]. Dated on 03.07.1999. Kyiv: Ukrnaftoprodukt, 1997, 297 p. (in Ukrainian).
6. *Reservuary vertikalni stalevi dlia sberigannia nafty i naftoproduktiv s tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93.3 kPa: VBN 2.2-58.2-94* [Reservoirs are vertical steel for storage oils and oil products with pressure of saturated парів not higher 93.3 kPa: the Departmental Building Regulations 2.2-58.2-94]. *Derzh. kom. Ukrainy po naftii i gazu* [State companies on fuel and gas]. Dated on 01.10.1994. Kyiv: Derzhkomnaftogaz, 1994, 98 p. (in Ukrainian).
7. Semenets S.N. and Nasonova S.S., ed. by Kulyabko V.V. *Otsenka faktora vosstanovleniia neftiannykh rezervuarov v protsesse ekspluatatsii* [Estimation of factor of renewal of petroleum reservoirs in the process of exploitation]. *Informazhiini tekhnolohii v osviti, nauzhi ta upravlinni* [Information technologies in education, science and management]. DVNZ "Prydnipr. derzh. akad. bud-va ta arkhitektury", Ukr. asotsiatsiia "Zhinky v nautsi ta osviti" [SHEE "Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture", Ukrainian Association "Women in science and education"]. Dnipropetrovsk: PDABA, 2015, iss. 3, pp. 72–77. (in Russian).

Рецензент: Красовський В. Л., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 20.12.2017 р.