

УДК 624.953.014.2.004.15

*Насонова С.С., Куприна Л.А., Науменко Т.С.***ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ
РЕЗЕРВУАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ****ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр**

В работе рассматриваются вопросы вероятностного моделирования показателей надежности стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов. В качестве методологической основы такого моделирования принята известная в теории надежности сложных систем гипотеза «слабейшего звена». Нефтяной резервуар рассматривается как сложная система, состоящая из 4-х последовательно соединенных (в смысле надежности) подсистем: днища, кровли, цилиндрической стенки и узла сопряжения стенки с днищем. Сварные соединения принимаются равнопрочными основному металлу резервуара. Считается, что резервуар выполняет свойственные ему функции по приему, хранению и сливу 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. Предложены новые модели комплексной оценки технического состояния нефтяных резервуаров, которые могут использоваться для управления надежностью данных сооружений, как на стадии их проектирования, так и в процессе эксплуатации. Параметры этих моделей могут легко корректироваться по результатам натурных обследований резервуаров в период эксплуатации, что повышает точность прогноза в каждом отдельном случае.

Ключевые слова: нефтяные резервуары, надежность, техническое состояние, математическое моделирование, гипотеза «слабейшего звена».

Стальные вертикальные цилиндрические резервуары для долгосрочного хранения нефтепродуктов (РВС), составляющие значительную часть резервуарного парка Украины, в настоящее время находятся в условиях активного физического износа. В связи с этим, в последние годы в значительной мере повысился фактический риск их отказов и, тем самым, возросла роль фактора своевременного и эффективного восстановления работоспособности в процессе эксплуатации. 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 приме-

нительно к объектам, относящимся к сооружениям высокой степени ответственности, для которых обеспечение надежности имеет решающее значение [1].

Постановка проблемы

С точки зрения надежности большинство строительных конструкций можно рассматривать после декомпозиции как систему с 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 моделированием надежности строительных конструкций возникает проблема формирования некоторого оператора S , связывающего показатели

надежности конструкции с вероятностными характеристиками ее конструктивных элементов. В случае независимости отказов элементов (т.е. отсутствия причинно-следственных связей между отказами) эта проблема легко решается на основе известного правила умножения вероятностей. Если же отказы отдельных элементов рассматриваемой системы статистически зависимы, то построить оператор S , адекватно отображающий зависимость показателей надежности конструкции от вероятностных характеристик ее конструктивных элементов, значительно сложнее, а связанные с этим вопросы требуют дальнейших исследований.

Анализ последних исследований и публикаций

Известный в теории вероятностей подход к построению оператора S в случае зависимых отказов основан на синтезе функций (интегральной или плотности) совместного распределения вероятностей наработок до отказа отдельных конструктивных элементов [2]. Однако для решения практических задач оценки надежности строительных конструкций такой подход крайне неудобен и фактически не используется [1, 3–5]. В данной статье применительно к моделированию надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов обсуждаются вопросы формирования оператора S на основе модели «слабейшего звена» [2].

Формулирование цели исследования

Цель статьи – предложить новые, основанные на гипотезе «слабейшего звена», вероятностные модели оценки технического состояния нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Изложение основного материала исследования

Нефтяной резервуар рассматривается как сложная система, состоящая из 4-х подсистем (основных конструктивных элементов): днища и кровли, цилиндрической стенки (нижние и верхние пояса безмоментной области корпуса резервуара) и узла сопряжения стенки с днищем. Схема декомпозиции резервуара принимается в виде, показанном на рисунке.

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.



Схема декомпозиции резервуара

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 уменьшаются, накапливаются и развиваются другие повреждения, что неминуемо приводит к повышению риска отказов этих сооружений.

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

– условию прочности цилиндрической стенки

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

– условию устойчивости цилиндрической стенки

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

– условию прочности узла сопряжения цилиндрической стенки с днищем

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

– условию герметичности днища

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

– условию герметичности кровли

$$\delta_{kp}(t) \geq \frac{\delta_{kp0}}{2}. \quad (5)$$

В приведенных формулах обозначено:

n – число поясов цилиндрической стенки;
 $\delta_i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) – текущая толщина i -го пояса;
 $\delta_{\partial n}(t), \delta_{kp}(t)$ – 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.

Заметим, что текущая толщина любого конструктивного элемента резервуара $\delta(t)$ описывается 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:

$Z_i(t) = \gamma_c R_y \delta_i(t) - p_i r$ – текущий запас прочности i -го пояса цилиндрической стенки;

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

пас устойчивости цилиндрической стенки;

$Z_{yc}(t) = R_y \gamma_c \delta_1^2(t) - 6M_0$ – текущий запас прочности узла сопряжения стенки с днищем;

$$Z_{kp}(t) = \delta_{kp}(t) - \frac{\delta_{kp0}}{2} - \text{текущий запас гер-}$$

метичности кровли;

$$Z_{\partial n}(t) = \delta_{\partial n}(t) - \frac{\delta_{\partial n0}}{2} - \text{текущий запас гер-}$$

метичности днища.

В процессе эксплуатации резервуара под влиянием коррозионного износа толщина его конструктивных элементов уменьшается. Соответственно, ухудшается техническое состояние резервуара (уменьшаются запасы прочности, устойчивости и герметичности), что может привести к наступлению нормативного отказа (нарушению хотя бы одного из неравенств (1)–(5)). Если своевременно не устранить такой отказ (выполнить ремонт), то наступает отказ физический, который сопряжен с огромными экономическими, экологическими и другими потерями. Поэтому прогнозирование наступления нормативных отказов резервуаров вследствие деградации их конструктивных элементов, обнаружение и устранение эксплуатационных повреждений резервуарных конструкций – это важнейшие задачи технического обслуживания нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Имеющиеся данные многочисленных натурных обследований [3] показывают, что коррозионный износ конструктивных элементов РВС имеет нормальный закон распределения вероятностей. Поэтому все указанные запасы далее рассматриваются как случайные функции коррозионного износа, зависящие от времени как от параметра, а в каждый фиксированный момент времени их значения считаются распределенными по нормальному закону.

Введем в рассмотрение понятия индексов обеспеченности прочности, устойчивости и герметичности резервуарных конструкций. Индексом обеспеченности прочности i -го пояса цилиндрической стенки в текущий момент времени t будем называть функцию следующего вида:

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

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 :

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

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 :

$$w_{\partial n}(t) = \frac{\bar{\delta}_{\partial n}(t) - \delta_{\partial n 0} / 2}{\tilde{\delta}_{\partial n}(t)}; \quad (10)$$

$$w_{kp}(t) = \frac{\bar{\delta}_{kp}(t) - \delta_{kp 0} / 2}{\tilde{\delta}_{kp}(t)}. \quad (11)$$

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

Учитывая то, что критерием нормативного отказа резервуара является исчерпание хотя бы одного из указанных выше запасов прочности, устойчивости или герметичности, вероятности сохранения эксплуатационных качеств резервуарных конструкций в процессе эксплуатации можно выразить через соответствующие индексы обеспеченности следующим образом.

Вероятность сохранения прочности i -го пояса на протяжении времени t :

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

$\overline{i = 1, n.}$

Вероятность сохранения устойчивости цилиндрической стенки на протяжении времени t :

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

Вероятность сохранения прочности узла

сопряжения стенки с днищем на протяжении времени t :

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

Вероятности сохранения герметичности днища и кровли:

$$P_{\partial n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{w_{\partial n}} \exp\left(-\frac{z}{2}\right)^2 dz = \Phi(w_{\partial n}); \quad (15)$$

$$P_{kp}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-w_{kp}} \exp\left(-\frac{z}{2}\right)^2 dz = \Phi(w_{kp}). \quad (16)$$

Здесь $\Phi(\cdot)$ - функция нормированного нормального распределения (функция Лапласа).

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

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. Отказ конструктивных элементов резервуара обуславливается их физическим износом, а первым в процессе эксплуатации отказывает наиболее поврежденный элемент.

3. Поскольку общим механизмом физического износа стального резервуара является коррозия, то отказы его металлоконструкций являются событиями статистически зависимыми.

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

Значения параметра w в зависимости от величины P

P	0,5000	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

конструктивный элемент, который соответствует наименьшему из указанных индексов.

Однако чем меньше индекс, тем больше вероятность отказа соответствующего конструктивного элемента. Поэтому вероятность безотказной работы резервуара (как системы последовательно соединенных днища, узла сопряжения стенки с днищем, цилиндрической стенки и кровли) на протяжении времени t с начала эксплуатации может быть найдена на основе гипотезы «слабейшего звена» [2]. 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 $P_{cm}(t)$ определяются по формуле:

$$P_{cm}(t) = \min\{P_i(t) (i = \overline{1, n}), P_{cm}^y(t)\} = \\ = \min\{\Phi(w_1), \Phi(w_2), \dots, \Phi(w_n), \Phi(w_c)\} \quad (18)$$

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

С учетом моделей (7)–(18) несложно найти и среднее время наработки до нормативного отказа резервуара:

$$\tau_p = \min\{\tau_{cm}, \tau_{yc}, \tau_{дн}, \tau_{кр}\}, \quad (19)$$

где средние наработки до отказа узла сопряжения, днища и кровли (соответственно $\tau_{дн}$, τ_{yc} , $\tau_{кр}$) вычисляются путем приравнивания нулю соответствующего индекса обеспеченности и решения полученного уравнения относительно t , а средняя наработка до отказа цилиндрической стенки находится как минимальное время среди наработок до отказа ее поясов.

Выводы

Предложенные модели (7)–(19) позволяют получить комплексную вероятностную оценку технического состояния нефтяных 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 модели на стадии проектирования резервуаров и как модели управления надежностью в процессе эксплуатации этих сооружений. В итоге рассмотренные модели могут служить методологической основой при исследовании проблем надежности и долговечности резервуаров, находящихся в эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насонова С.С., Семенец С.Н. Оценка фактора восстановления нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации // *Інформаційні технології в освіті, науці та управлінні*. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2015. – № 3. – С.72-77.
2. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 605 с.
3. Егоров Е.А. Исследование и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации // *Сб. научных трудов ПГАСА*. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – С.99.
4. Насонова С.С., Семенец С.Н. Моделирование критериев оценки эксплуатационного состояния нефтяных резервуаров // *Сб. научных трудов НГУ*. – Днепропетровск: НГУ, 2013. – № 1. – С.87-89.
5. Семенец С.Н., Насонова С.С. Управление эксплуатационным состоянием нефтяных резервуаров по экономическим критериям // *Інформаційні технології в освіті, науці та управлінні*. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2012. – № 1. – С.184-187.

Поступила в редакцию 05.10.2016

Рецензент: д.т.н. Олевский В.И.

ІМОВІРНІСНІ МОДЕЛІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ РЕЗЕРВУАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ*Насонова С.С., Купріна Л.О., Науменко Т.С.*

У роботі розглядаються питання імовірнісного моделювання показників надійності сталевих резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Як методологічна основа такого моделювання прийнята відома в теорії надійності складних систем гіпотеза «слабкої ланки». Нафтовий резервуар розглядається як складна система, що складається з 4-х послідовно сполучених (у сенсі надійності) підсистем: днища, покрівлі, циліндричної стінки і вузла сполучення стінки з днищем. Зварні з'єднання приймаються рівними за міцністю основному металу резервуару. Вважається, що резервуар виконує властиві йому функції по прийому, зберіганню і зливу нафтопродуктів в нормальних режимах роботи відповідно до чинних нормативних документів і з проектним рівнем заливки, а погіршення технічного стану резервуару в період експлуатації відбувається поступово і обумовлюється фізичним зносом його металокопункцій. Ситуації типу катастроф, грубих помилок проектування, виготовлення і монтажу і т.п. не розглядаються. Запропоновані нові моделі комплексної оцінки технічного стану нафтових резервуарів, які можуть використовуватися для управління надійністю цих споруд, як на стадії їх проектування, так і в процесі експлуатації. Параметри цих моделей можуть коригуватися за результатами натурних обстежень резервуарів в період експлуатації, що підвищує точність прогнозу у кожному окремому випадку.

Ключові слова: нафтові резервуари, надійність, технічний стан, математичне моделювання, гіпотеза «слабкої ланки».

PROBABILISTIC MODELS OF THE OPERATING STATE OF RESERVOIR CONSTRUCTIONS*Nasonova S.S., Kuprina L.A., Naumenko T.S.*

The questions of probabilistic design of reliability of steel reservoirs indexes are in-process examined for storage of oil products. As methodological basis of such design the known is accepted in the theory of reliability of the difficult systems hypothesis of the «weakest link». A petroleum reservoir is examined as a difficult system consisting of 4 the consistently united (in sense of reliability) subsystems: bottom, roof, cylindrical wall and knot of interface of wall with a bottom. The weld fabricated connections are accepted by equal on durability to the parent metal of reservoir. It is considered that a reservoir executes peculiar to it functions on a reception, storage and weathering of oil products in normal office hours in accordance with operating normative documents and with the project level of bay, and worsening of the technical state of reservoir in the period of exploitation takes place gradually and stipulated by the physical wear of its metallic constructions. Situations of type of catastrophes, flagrant errors of planning, making and editing not examined. The new models of complex estimation of the technical state of petroleum reservoirs are offered that can be used for a management by reliability of these building both on the stage of their planning and in the process of exploitation. The parameters of these models can easily be corrected on results the model inspections of reservoirs in the period of exploitation that promotes exactness of prognosis in every special case.

Keywords: petroleum reservoirs, reliability, technical state, mathematical design, hypothesis of the «weakest link».