

МОДЕЛЬ «СЛАБЕЙШЕГО ЗВЕНА» И ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Визначено клас задач математичного моделювання надійності будівельних конструкцій, в яких може застосовуватися модель «найслабкішої ланки». Методика використання цієї моделі розглядається на прикладі формування показників надійності сталевих резервуарів для нафтопродуктів.

Определен класс задач математического моделирования надежности строительных конструкций, в которых может применяться модель «слабейшего звена». Методика использования этой модели рассматривается на примере формирования показателей надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов.

The class of mathematical modeling tasks of building constructions reliability, wherein the model of the «weak-link» can be used, is determined. The method of using this model is examined on the example of formation of reliability indices of steel reservoirs for petroleum products.

Постановка проблемы

В настоящее время значительная часть строительных конструкций и сооружений в Украине имеют срок службы, существенно превышающий нормативный, и находятся в стадии 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 [1, 2, 3]. 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 [4, 5].

С точки зрения надежности большинство строительных конструкций можно рассматривать после декомпозиции как систему с последовательным соединением элементов. Соответствующая структурная схема показана на рис. 1.

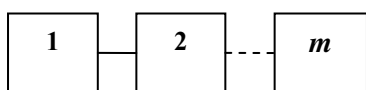


Рис. 1. Структура системы с последовательным соединением элементов

Для нормального функционирования такой системы все её 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. В разнообразных прикладных задачах, связанных с моделированием надежности строительных конструкций, возникает проблема формирования оператора S , связывающего показатели надежности конструкции с вероятностными характеристиками её 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 [5]. Если же отказы отдельных элементов рассматриваемой системы статистически зависимы, то построить оператор S , адекватно отображающий зависимость показателей надежности конструкции от вероятностных характеристик её конструктивных элементов, значительно сложнее. 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. Однако для решения практических задач такой подход крайне неудобен и при $m > 2$ фактически не используется. В данной статье применительно к моделированию надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов обсуждаются вопросы формирования оператора S на основе модели «слабейшего звена» [5, 6]. Если $P_s(t)$ – вероятность безотказной работы

всей системы, а $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента (см. рис. 1), то эту модель можно записать в виде следующего соотношения:

$$P_s(t) = \min P_i(t), \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Заметим, что модель (1) выражает в математической форме гипотезу, согласно которой, если в процессе эксплуатации причиной отказов всех элементов системы является воздействие совокупности одних и тех же факторов, то первым выходит из строя тот элемент, вероятность безотказной работы которого наименьшая на момент отказа. Прообразом этой модели является механическая цепь, состоящая из некоторого числа звеньев, когда она разрушается, если приложена нагрузка, превышающая прочность какого-либо одного звена.

Основной материал

Рассматривается стальной резервуар, который в период эксплуатации выполняет свойственные ему функции по приему, хранению и отпуску нефтепродуктов в условиях физического износа. Структурная схема такого сооружения приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема стального резервуара для нефтепродуктов

В контексте надежности нефтяной резервуар можно рассматривать как систему, состоящую из 4-х основных конструктивных элементов (днища, узла сопряжения стенки с днищем, цилиндрической стенки и кровли), которые последовательно соединены между собой. В свою очередь, цилиндрическая стенка состоит из последовательно соединенных поясов, которые подразделяются на пояса нижние и верхние. Цилиндрическая стенка и узел сопряжения являются несущими конструкциями, днище и кровля выполняют ограждающую функцию. В соответствии с нормативными документами [7, 8], резервуар на протяжении всего времени эксплуатации должен удовлетворять требованиям прочности, устойчивости и герметичности. Заметим, что для корпуса нефтяных резервуаров не характерны эксплуатационные повреждения, приводящие к нарушению герме-

тичности. Если же такие повреждения и возникают, то в виде сквозных пор в сварных швах, что не приводит к сколько-нибудь серьезным последствиям и практически не влияет на техническое состояние резервуара, поскольку этот вид повреждений обычно своевременно обнаруживается и сравнительно легко устраняется на основе осмотровых ремонтов без вывода резервуара из эксплуатации. Поэтому можно считать, что резервуар в процессе эксплуатации находится в работоспособном состоянии, если его цилиндрическая стенка отвечает условиям прочности и устойчивости, узел сопряжения стенки с днищем – условию прочности, а днище и кровля – условию герметичности.

Статистический анализ многочисленных натурных обследований нефтяных резервуаров [3] показывает, что наработки до отказа всех их стальных конструкций являются случайными величинами, имеющими положительную корреляционную зависимость. Это объясняется следующими обстоятельствами. Основными факторами, негативно влияющими на техническое состояние нефтяных резервуаров и понижающими их эксплуатационную надежность, являются: а) коррозионный износ; б) несовершенства технологий изготовления и монтажа; в) подрастание трещиновидных дефектов под воздействием циклического заполнения резервуара нефтепродуктом; г) неравномерные осадки основания по нижнему контуру и под днищем. Если наступление отказа нефтяного резервуара рассматривать как следствие накопления в нем недопустимой совокупности дефектов и повреждений, то отказы конструктивных элементов этого сооружения не являются статистически независимыми событиями, поскольку все эти элементы в той или иной мере подвержены коррозии. Поэтому наработки до отказа резервуарных конструкций являются коррелированными (а значит, и зависимыми) случайными величинами. Покажем, что вероятность безотказной работы резервуара можно найти на основе модели «слабейшего звена».

Рассмотрим цилиндрическую стенку резервуара. Пусть $P_c^n(t)$ – вероятность ненаступления предельного состояния (ПС) цилиндрической стенки по условию прочности в течение времени t . Эта вероятность определяется вероятностью события, состоящего в том, что на протяжении времени t все пояса стенки отвечают условию прочности

$$P_c^n(t) = P(\tau_c^n > t) = P(\tau_{c1}^n > t \cap \tau_{c2}^n > t \dots \cap \tau_{cn}^n > t), \quad (2)$$

где τ_c^n – наработка цилиндрической стенки до наступления ПС по условию прочности;

τ_{ci}^n – наработка i -го пояса до наступления ПС по условию прочности, рассматриваемая далее как нормально распределенная случайная величина с математическим ожиданием μ_{ci} и среднеквадратическим отклонением σ_{ci} ;

n – количество поясов цилиндрической стенки.

Поскольку τ_{ci}^n – случайная величина, имеющая нормальный закон распределения вероятностей, то вероятность ненаступления ПС i -го пояса по условию прочности легко определяется через известную функцию Лапласа

$$P_{ci}^n(t) = \Phi(w_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_i}^{\infty} \exp\left(-\frac{z_i^2}{2}\right) dz_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $w_i = (t - \mu_{ci}) / \sigma_{ci}$; z_i – нормированная нормально распределенная случайная величина с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением, равным 1:

$$z_i = \frac{\tau_{ci}^n - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}}. \quad (4)$$

Важно отметить, что функция Лапласа является монотонно убывающей. Её значения тем больше, чем меньше величина нижнего предела интегрирования. Причем $\Phi(w_i) \geq 0,5$ при $w_i \leq 0$ и $\Phi(w_i) < 0,5$ при $w_i > 0$.

Обозначим

$$w_c^* = \frac{t - \mu_{ci_*}}{\sigma_{ci_*}} = \max \frac{t - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где i_* – номер пояса, имеющего наибольшую вероятность отказа по условию прочности.

Если наработки до отказа всех поясов стенки по условию прочности $\tau_{c1}^n, \tau_{c2}^n \dots \tau_{cn}^n$ рассматривать как коррелированные случайные величины и обозначить через $\tau_{ci_*}^n$ наработку до отказа элемента, имеющего наибольшую вероятность отказа, то с учетом (4) можно записать

$$z_i \approx r_i z_{i_*}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где r_i – коэффициент корреляции τ_{ci}^n на $\tau_{ci_*}^n$.

С учетом (4)–(6) следующие три события являются эквивалентными:

$$(\tau_{ci}^n > t) \sim \left(\frac{\tau_{ci}^n - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}} > \frac{t - \mu_{ci}}{\sigma_{ci}} \right) \sim (r_i z_{i_*} > w_i). \quad (7)$$

Принимая во внимание (2) и (7), можно записать следующее соотношение эквивалентности:

$$(\tau_c^n > t) \sim (z_{i_*} > \frac{w_1}{r_1}) \cap (z_{i_*} > \frac{w_2}{r_2}) \dots \cap (z_{i_*} > \frac{w_n}{r_n}). \quad (8)$$

Нефтяные резервуары относятся (в зависимости от объема) к строительным конструкциям 1-го и 2-го класса ответственности, а их эксплуатация производится в рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов [8, 9]. Если на протяжении всего срока службы риск отказа по условию прочности каждого пояса цилиндрической стенки не превосходит 0,5 (при правильной организации технического обслуживания этот риск в действительности значительно меньше 0,5), то все w_i в (8) можно считать неположительными величинами, из чего следует (с учетом $0 < r_i \leq 1$) эквивалентность следующих двух событий:

$$(\tau_c^n > t) \sim (z_{i_*} > w_c^*). \quad (9)$$

Это значит, что вероятность ненаступления ПС цилиндрической стенки по условию прочности на протяжении времени t может быть найдена на основе модели «слабейшего звена»

$$P_c^n(t) = \Phi(w_c^*) = \min P_{ci}^n(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Пусть τ_c^y – наработка цилиндрической стенки до наступления ПС по условию устойчивости. Если рассматривать τ_c^y как нормально распределенную случайную величину с математическим ожиданием μ_c^y и среднеквадратическим отклонением σ_c^y , то вероятность ненаступления ПС цилиндрической стенки по условию устойчивости определяется по формуле

$$P_c^y(t) = \Phi\left(\frac{t - \mu_c^y}{\sigma_c^y}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{t - \mu_c^y}{\sigma_c^y}}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (11)$$

Поскольку безотказность цилиндрической стенки в течение времени t состоит в ненаступлении ПС по условиям прочности и устойчивости, то учитывая формулы (10)–(11) и полагая, что $P_c^y(t) \geq 0,5$ и $P_c^n(t) \geq 0,5$, вероятность

безотказной работы этого конструктивного элемента можно найти по формуле:

$$P_c(t) = \Phi(w_c^{**}) = \min(P_c^n(t), P_c^y(t)), \quad (12)$$

$$\text{где } w_c^{**} = \max\left(w_c^*, \frac{t - \mu_c^y}{\sigma_c^y}\right).$$

Рассуждая аналогично и принимая во внимание формулы (2)–(12), нетрудно показать, что вероятность безотказной работы всего резервуара определяется на основе модели «слабейшего звена»:

$$P_s(t) = \Phi(w_s^*) = \min(P_c(t), P_{yc}(t), P_d(t), P_k(t)), \quad (13)$$

где $P_{yc}(t)$ – вероятность безотказной работы (ненаступления ПС по условию прочности) узла сопряжения

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

$P_d(t), P_k(t)$ – вероятности безотказной работы, соответственно, днища и кровли

$$P_d(t) = \Phi(w_d^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_d^*}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz; \quad (15)$$

$$P_k(t) = \Phi(w_k^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{w_k^*}^{\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz; \quad (16)$$

$$w_s^* = \max(w_c^{**}, w_{yc}^*, w_d^*, w_k^*); \quad w_{yc}^* = \frac{t - \mu_{yc}}{\sigma_{yc}};$$

$$w_d^* = \frac{t - \mu_d}{\sigma_d}; \quad w_k^* = \frac{t - \mu_k}{\sigma_k};$$

μ_{yc}, σ_{yc} – соответственно, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение наработки узла сопряжения до наступления ПС по условию прочности;

$\mu_d, \sigma_d, \mu_k, \sigma_k$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение наработки до отказа, соответственно, днища и кровли.

На основе моделей (10)–(16) легко определяются и другие важнейшие показатели надежности нефтяных резервуаров, такие как, например, среднее время безотказной работы на протяжении заданного срока службы, вероятность отказа в данном промежутке времени, интенсивность отказов в заданный момент времени и т.д. Приведем расчетные модели перечислен-

ных показателей надежности для произвольной резервуарной конструкции с вероятностью безотказной работы $P(t)$ и наработкой до отказа τ , распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием μ и среднеквадратическим отклонением σ .

Среднее время безотказной работы конструкции на протяжении срока службы T :

$$T_{cp} = \int_0^T P(t) dt; \quad (17)$$

Вероятность отказа в промежутке времени $[t_1, t_2]$:

$$P(t_1 \leq \tau \leq t_2) = P(t_1) - P(t_2). \quad (18)$$

Интенсивность отказов в момент времени t :

$$h(t) = \frac{f(w)}{\sigma P(t)}, \quad (19)$$

где $f(w)$ – плотность нормированного нормального распределения вероятностей; $w = (t - \mu) / \sigma$.

Выводы

Полученные в статье результаты показывают, что математическое моделирование надежности стальных резервуаров для нефтепродуктов может производиться на основе модели «слабейшего звена». Кроме того, данная модель может использоваться при анализе надежности многих других строительных конструкций и сооружений в случае их периодического восстановления в процессе эксплуатации и положительной корреляционной зависимости наработок до отказа отдельных конструктивных элементов. Эта модель правильно отражает зависимость между показателями надежности конструкции и вероятностными характеристиками её конструктивных элементов, если вероятность отказа последних в рассматриваемом промежутке времени не превышает 0,5, что практически всегда имеет место в случае технического обслуживания конструкции в период эксплуатации. Кроме того, если коэффициенты корреляции наработок до отказа конструктивных элементов близки к 1, то модель «слабейшего звена» может быть полезной для приближенной оценки вероятности безотказной работы всей конструкции независимо от того, производится или нет её техническое обслуживание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельмутер, А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций [Текст] / А. В. Перельмутер. – К: УкрНИИпроектстальконструкция, 1999. – 212 с.
2. Егоров, Е. А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации [Текст] / Е. А. Егоров. – Д.: Навчальна книга, 2002. – 95 с.
3. Егоров, Е. А. Систематизация фактора восстановления в моделях эксплуатационного состояния нефтяных резервуаров [Текст] / Е. А. Егоров, С. С. Семенец // Вісник ПДАБА. – 2006. – № 2. – С. 10-18.
4. Болотин, В. В. Ресурс машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М: Машиностроение, 1990. – 448 с.
5. Капур, К. Надежность и проектирование систем [Текст] : [пер. с англ.] / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.
6. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] : [пер. с англ.] / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
7. СНиП 11-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
8. Резервуари вертикальні сталеві для збереження нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [Текст] // Відомчі будівельні норми України ВБН 2.2-58.2-94. – К., 1994. – 98 с.
9. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту. Доповнення та зміни [Текст]. – К.: Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.

Поступила в редколлегию 09.02.2010.
Принята к печати 11.02.2010.