

В. П. АФАНАСЬЕВ, Г. И. СЕМЕНЕЦ (ДИИТ)

НАДЕЖНОСТЬ ТОНКОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА

У термінах випадкових функцій сформульовані умови працездатності нижнього пояса циліндричної стінки сталевих резервуарів для довгострокового зберігання нафтопродуктів. Запропонована модель експлуатаційної надійності даного конструктивного елемента.

В терминах случайных функций сформулированы условия работоспособности нижнего пояса цилиндрической стенки стальных резервуаров для долгосрочного хранения нефтепродуктов. Предложена модель эксплуатационной надежности данного конструктивного элемента.

In terms of stochastic functions conditions of serviceability of the bottom zone of a wall of steel tanks for long-term storage of mineral oil are formulated. The model of operational reliability of this constructive element is received.

Нефтебазы Украины и других стран СНГ укомплектованы в основном стальными вертикальными цилиндрическими резервуарами (РВС), которые в настоящее время находятся в стадии активного физического износа, что обуславливает повышение риска их отказов. Нарушение целостности, а тем более частичные или полные разрушения РВС связаны с потерей нефтепродукта, загрязнением окружающей среды, значительными материальными убытками. Поэтому эти крупногабаритные конструкции относятся к сооружениям, безопасность эксплуатации которых является главным условием. Важнейшим конструктивным элементом, в значительной мере определяющим техническое состояние резервуара в целом, является нижний пояс его корпуса – тонкостенная цилиндрическая оболочка, корродирующая в процессе эксплуатации. Проблема обеспечения надежной работы данного конструктивного элемента изучена недостаточно и требует дальнейших исследований.

Рассматривается нижний пояс стенки стального вертикального цилиндрического резервуара, представляющий собой замкнутую круговую цилиндрическую оболочку постоянной толщины, которая жестко закреплена в основании и подвержена комбинированному действию внутреннего гидростатического давления, равномерного сжатия в осевом направлении и равномерного внешнего давления, нормального к боковой поверхности. Многочисленные данные натурных обследований РВС [1; 2] показывают, что основным видом физического износа этих сооружений в процессе эксплуатации является коррозионный износ, причем для нижнего пояса характерно совместное воздействие неравномерной поверхностной и локальной коррозии. Поверхностная

коррозия обуславливает уменьшение толщины листов и снижение прочности оболочки, а локальная коррозия, проявляющаяся в виде коррозионных язвин, питтингов и пятен, является основным механизмом развития возможных сквозных повреждений.

На протяжении всего срока службы нижний пояс цилиндрической стенки стального резервуара должен отвечать требованиям прочности, устойчивости и герметичности. Условие прочности этого конструктивного элемента в процессе эксплуатации в соответствии с [3; 4] определяется следующей системой неравенств:

$$R_y \psi(t) \upsilon(t) [\delta_0 - \varepsilon(t)] \geq pr, \quad (1)$$

$$\gamma_c R_y \psi(t) \upsilon(t) [\delta_0 - \varepsilon(t)]^2 \geq 6M_0(t), \quad (2)$$

где δ_0, r, R_y – соответственно проектная толщина, радиус срединной поверхности и расчетное сопротивление оболочки; $\psi(t)$ – поправка, учитывающая возможное снижение прочности оболочки в процессе эксплуатации вследствие усталостных повреждений, определяемая по [3]; $\varepsilon(t)$ – поправка, учитывающая возможное уменьшение толщины оболочки вследствие коррозионного износа

$$\varepsilon(t) = \int_0^t u dt; \quad (3)$$

u – скорость поверхностной коррозии оболочки, рассматриваемая далее как случайная величина, распределенная по нормальному закону; $\upsilon(t)$ – поправка, учитывающая возможное изменение прочности оболочки вследствие кор-

розионных повреждений, определяемая по следующей формуле [3]:

$$v(t) = \exp\left[-\frac{\beta\varepsilon(t)}{k_p\delta_0}\right]; \quad (4)$$

β, k_p – соответственно коэффициенты шероховатости и питтингообразования [3]; p – расчетная величина внутреннего гидростатического давления в оболочке

$$p = \rho x; \quad (5)$$

ρ, x – соответственно удельный вес и высота залива нефтепродукта; $M_0(t)$ – текущее значение изгибающего момента в точках сопряжения оболочки с основанием, определяемое по известной методике [5]; γ_c – коэффициент условий работы узла сопряжения нижнего пояса резервуара с основанием, согласно [4] принимаемый равным $\gamma_c = 1, 2$.

Заметим, что неравенство (1) описывает условие прочности безмоментной области оболочки, а неравенство (2) – это условие прочности оболочки в зоне краевого эффекта.

При отсутствии в резервуаре нефтепродукта его нижний пояс цилиндрической стенки может подвергаться воздействию целого ряда нагрузок, вызывающих сжатие как в окружном, так и в меридиональном направлениях. Условие устойчивости рассматриваемой оболочечной конструкции в процессе эксплуатации согласно [4] определяется неравенством следующего вида:

$$\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_{cr1}(t)} + \frac{\sigma_2(t)}{\sigma_{cr2}(t)} \leq 1, \quad (6)$$

где $\sigma_1(t), \sigma_2(t)$ – текущие значения меридионального и кольцевого напряжений, возникающих в оболочке соответственно от продольных и радиальных внешних нагрузок; $\sigma_{cr1}(t), \sigma_{cr2}(t)$ – текущие значения критических напряжений при сжатии оболочки соответственно в осевом и радиальном направлениях.

Принимая во внимание [6], функции $\sigma_1(t), \sigma_2(t), \sigma_{cr1}(t), \sigma_{cr2}(t)$ с учетом коррозионного износа оболочки можно описать следующими соотношениями:

$$\sigma_1(t) = \frac{G}{2\pi r[\delta_0 - \varepsilon(t)]}, \quad (7)$$

$$\sigma_2(t) = \frac{Fr}{\delta_0 - \varepsilon(t)}, \quad (8)$$

$$\sigma_{cr1}(t) = \frac{CE[\delta_0 - \varepsilon(t)]}{r}, \quad (9)$$

$$\sigma_{cr2}(t) = 0,55E\left(\frac{r}{L}\right) \left[\frac{[\delta_0 - \varepsilon(t)]}{r}\right]^{3/2}, \quad (10)$$

где G – сила, сжимающая оболочку в осевом направлении; F – расчетное значение внешнего равномерного давления, нормального к боковой поверхности; E – модуль упругости; L – высота оболочки; C – параметр, определяемый по [6] в зависимости от соотношения r и δ_0 .

Условие герметичности нижнего пояса цилиндрической стенки резервуара в процессе эксплуатации с учетом коррозионного износа можно записать в виде неравенства следующего вида:

$$\delta_0 - \varepsilon(t) - \xi(t) \geq \Delta, \quad (11)$$

где Δ – величина отрицательного допуска на листовую прокат, используемый при изготовлении оболочки [7]; $\xi(t)$ – поправка, определяющая текущую глубину локальных коррозионных повреждений оболочки

$$\xi(t) = \int_0^t v dt; \quad (12)$$

v – скорость локальной коррозии оболочки, рассматриваемая далее как случайная величина, распределенная по нормальному закону.

Приведенные условия прочности (1) и (2), устойчивости (6) и герметичности (11) описывают эксплуатационное состояние рассматриваемой оболочки. При совместном выполнении неравенств (1), (2), (6) и (11) данная конструкция находится в работоспособном состоянии. Нарушение хотя бы одного из этих неравенств является критерием неработоспособного состояния конструкции, т. е. ее отказа.

Основными показателями надежности строительных конструкций в процессе эксплуатации является вероятность безотказной работы и долговечность. Вероятность сохранения прочности рассматриваемой оболочки на протяжении времени t можно определить вероятностью совместного выполнения неравенств (1) и (2), вычисляемой по формуле

$$P_{\Pi}(t) = \int_{-\infty}^{u^*} f(u) du, \quad (13)$$

где $f(u)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины u , а верхний предел

интегрирования u_1^* равен наибольшему из корней следующей системы уравнений:

$$R_{y\Psi}(t) \cup(t) [\delta_0 - u_1^* t] - pr = 0, \quad (14)$$

$$\gamma_c R_{y\Psi}(t) [\delta_0 - u_1^* t]^2 - 6M_0(t) = 0. \quad (15)$$

Вероятность сохранения устойчивости рассматриваемой оболочки на протяжении времени t определяется вероятностью выполнения неравенства (6), вычисляемой по формуле

$$P_y(t) = \int_{-\infty}^{u_2^*} f(u) du, \quad (16)$$

где верхний предел интегрирования u_2^* вычисляется путем численного решения уравнения

$$\frac{\sigma_1(t)}{\sigma_{cr1}(t)} + \frac{\sigma_2(t)}{\sigma_{cr2}(t)} = 1. \quad (17)$$

Вероятность сохранения герметичности рассматриваемой оболочки на протяжении времени t определяется вероятностью выполнения неравенства (11)

$$P_\Gamma(t) = \iint_D f(u) f(v) dudv, \quad (18)$$

где $f(v)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины v , а область интегрирования D описывается неравенством (11).

Принимая во внимание соотношения (13)–(18) и полагая сохранение прочности, устойчивости и герметичности оболочки на протяжении t лет эксплуатации событиями независимыми, вероятность безотказной работы рассматриваемой конструкции как функцию времени можно представить в виде следующей модели:

$$P(t) = P_\Pi(t) P_y(t) P_\Gamma(t). \quad (19)$$

При этом долговечность оболочки, рассматриваемая как среднее время наработки до отказа, находится по формуле

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (20)$$

Заметим, что математические ожидания и дисперсии скоростей поверхностной и локальной коррозии, требуемые для численной реализации моделей (13)–(20), могут быть определены на основе статистической обработки данных натурных обследований нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Выводы

Предложенные модели эксплуатационной надежности тонкостенной цилиндрической оболочки в условиях коррозионного износа могут быть полезны при прогнозировании технического состояния стальных конструкций нефтяных резервуаров. Кроме того эти модели могут быть легко распространены на любые тонкостенные стальные оболочечные конструкции (силосы, газгольдеры и т. д.), используемые для долгосрочного хранения агрессивных продуктов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоров Е. А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации. – Д.: Навчальна книга, 2002. – 95 с.
2. Овчинников И. Г. Эксплуатационная надежность и оценка состояния резервуарных конструкций / И. Г. Овчинников, Н. Б. Кудайбергенов, А. А. Шейн. – Саратов: СГТУ, 1999. – 316 с.
3. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту // Доповнення та зміни. – К.: Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.
4. ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Держбуд України. – К.: Укрнафтопродукт, 1995. – 46 с.
5. Лессиг Е. Н. Листовые конструкции / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 480 с.
6. СНиП 11-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
7. ГОСТ 19903-74. Сталь листовая горячекатаная. Сортамент. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 16 с.

Поступила в редколлегию 20.10.2005.