

МОДЕЛИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВУАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сформульовано умови працездатності основних конструктивних елементів сталевих резервуарів для нафтопродуктів у процесі експлуатації. Запропоновано нові моделі експлуатаційної надійності, що дають узагальнену оцінку впливу факторів початкової дефектності, експлуатаційної пошкоджуваності та відновлення на несучу здатність нафтових резервуарів.

Сформулированы условия работоспособности основных конструктивных элементов стальных резервуаров для нефтепродуктов в процессе эксплуатации. Предложены новые модели эксплуатационной надежности, дающие обобщенную оценку влияния факторов начальной дефектности, эксплуатационной повреждаемости и восстановления на несущую способность нефтяных резервуаров.

Conditions of serviceability of the basic constructive elements of steel tanks for mineral oil while in service are formulated. The new models of operational reliability giving the generalized estimation of influence of factors of initial deficiency, operational damageability and restoration on carrying capacity of oil tanks are offered.

В настоящее время более, 75 % резервуарного парка Украины имеет срок эксплуатации, превышающий нормативный, и находится в стадии активного физического износа [1]. В связи с этим в последние годы в значительной мере повысился фактический риск отказов нефтяных резервуаров (РВС) и, тем самым, возросла роль фактора их восстановления в процессе эксплуатации. Все это требует уточнения действующих нормативных документов [2; 3] в части сроков ревизий технического состояния резервуаров, находящихся в эксплуатации, что связано с разработкой новых моделей и методов управления эксплуатационной надежностью этих сооружений в условиях физического износа.

В статье предлагаются модели эксплуатационного состояния и эксплуатационной надежности стальных конструкций нефтяных резервуаров, отличительной особенностью которых является комплексный учет факторов начальной дефектности, эксплуатационной повреждаемости и восстановления, присущих процессу эксплуатации этих сооружений. Эксплуатационное состояние конструкций описывается в терминах случайных функций, а в качестве показателя надежности рассматривается вероятность безотказной работы. Начальная дефектность конструкций учитывается постоянными коэффициентами, а их эксплуатационная повреждаемость отражается соответствующими поправками, зависящими от времени. Восстановление рассматривается в контексте управления эксплуатационной надежностью РВС.

При проектировании в прообраз резервуара закладываются определенные запасы прочности, устойчивости и герметичности. После изготовления и монтажа резервуар, как правило, имеет те или иные дефекты, обусловленные несовершенством существующих технологий. В процессе эксплуатации происходит физический износ резервуарных конструкций, периодически производятся ремонтно-восстановительные мероприятия. Эти факторы начальной дефектности, физического износа (эксплуатационной повреждаемости) и восстановления влияют на проектные запасы функциональных качеств резервуара и должны учитываться в моделях его эксплуатационного состояния.

Начальная дефектность нефтяных резервуаров связана в основном с отклонениями образующих цилиндрической стенки от вертикали, с отклонениями линии опирания нижнего пояса на днище от правильной окружности и горизонтальной плоскости, а также отрицательными допусками на листовую прокат [4]. Все это всегда снижает проектную несущую способность этих сооружений. Физический износ проявляется главным образом в развитии и накоплении коррозионных и усталостных повреждений, постепенно ухудшающих техническое состояние резервуара в процессе эксплуатации. Коррозия далее рассматривается как фактор, изменяющий сечение конструктивных элементов и их прочностные характеристики. При этом различается необратимый коррозионный износ, регламентирующий остаточную толщину конструктивных элементов, и локальный коррозионный износ, определяемый глубиной местных

коррозионных повреждений. Усталостные повреждения рассматриваются в контексте возможного подрастания трещиновидных дефектов, гипотетически имеющих в корпусе резервуара. Устранение необратимого коррозионного износа и усталостных повреждений требует капитальных ремонтов, а устранение локальных коррозионных повреждений возможно на основе несложных текущих ремонтов.

Ревизии технического состояния резервуарных конструкций периодически восстанавливают их работоспособность в период эксплуатации. Для нефтяных резервуаров характерны три способа восстановления: полное, частичное и усиление. Полное восстановление конструкции приводит к обновлению ее технического состояния, частичное восстановление – к устранению локальных повреждений, ограничивающих работоспособность, а усиление производится применительно к несущим конструкциям резервуара с целью повышения их несущей способности. Полное восстановление и усиление связаны с капитальными ремонтами, а частичному восстановлению соответствуют текущие ремонты.

Стальной вертикальный цилиндрический резервуар можно рассматривать как систему четырех основных конструктивных элементов: цилиндрической стенки, узла сопряжения стенки с днищем (уторного узла), днища и кровли. Прочность резервуара определяется совместной прочностью его цилиндрической стенки и уторного узла, устойчивость резервуара обычно рассматривается в контексте общей устойчивости цилиндрической стенки, а его герметичность обуславливается герметичностью перечисленных выше конструктивных элементов.

Цилиндрическая стенка резервуара, находящегося в эксплуатации, должна отвечать требованиям прочности, устойчивости и герметичности. Принимая во внимание нормативные документы [2,3], модель эксплуатационного состояния этого конструктивного элемента можно сформулировать в виде следующей системы неравенств:

$$\eta_i R_{yi} \psi_i(t) v_i(t) [\delta_{i0} - \varepsilon_i(t)] - p_i r \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

$$1 - \frac{\sigma_1 [\delta_{\min}(t)]}{\sigma_{cr1} [\delta_{\min}(t)]} - \frac{\sigma_2 [\delta_c(t)]}{\sigma_{cr2} [\delta_c(t)]} \geq 0, \quad (2)$$

$$\delta_{i0} - \xi_i(t) - \Delta_i^- \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где η_i – поправка, учитывающая возможное снижение проектной несущей способности i -го

пояса вследствие его начальной дефектности после изготовления и монтажа (согласно [1; 5] среднестатистическое значение этой поправки равно 0,87...0,88 для нижнего пояса и 0,97...0,98 – для остальных поясов); R_{yi}, δ_{i0} – соответственно, расчетное сопротивление и проектная толщина i -го пояса; p_i, r – соответственно, расчетное значение внутреннего давления в i -м поясе и радиус срединной поверхности резервуара; n, t – соответственно число поясов стенки и время пребывания резервуара в эксплуатации; $\psi_i(t)$ – поправка, учитывающая возможное изменение несущей способности i -го пояса вследствие усталостных повреждений, возникающих в нем под воздействием циклического заполнения резервуара нефтепродуктом; $v_i(t)$ – поправка, учитывающая возможное изменение прочности i -го пояса вследствие его повреждений коррозией; $\varepsilon_i(t)$ – поправка, учитывающая возможное изменение толщины i -го пояса вследствие коррозионного износа; $\sigma_1 [\delta_{\min}(t)], \sigma_2 [\delta_c(t)]$ – текущие значения, соответственно меридиональных и кольцевых напряжений, возникающих в стенке от продольных и радиальных внешних нагрузок [7]; $\sigma_{cr1} [\delta_{\min}(t)], \sigma_{cr2} [\delta_c(t)]$ – критические значения напряжений при сжатии соответственно, в осевом и радиальном направлении [7]; $\delta_{\min}(t)$ – текущее значение минимальной толщины цилиндрической стенки

$$\delta_{\min}(t) = \min [\delta_{i0} - \varepsilon_i(t)], \quad i = \overline{1, n};$$

$\delta_c(t)$ – текущее значение средней толщины цилиндрической стенки

$$\delta_c(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\delta_{i0} - \varepsilon_i(t)];$$

$\xi_i(t)$ – поправка, учитывающая изменение глубины локальных коррозионных повреждений i -го пояса; Δ_i^- – величина отрицательного допуска на толщину листового проката [4], используемого при изготовлении i -го пояса.

На протяжении всего срока службы нефтяных резервуаров в рамках действующей системы технического обслуживания и ремонтов производится периодическое восстановление работоспособности их стальных конструкций. Тем самым техническое состояние конструктивных элементов резервуаров в процессе эксплуатации не только ухудшается вследствие физического износа, но и улучшается.

В моделях эксплуатационного состояния резервуарных конструкций данное обстоятельство можно учесть посредством должной коррекции поправок, отражающих влияние фактора эксплуатационной повреждаемости на их работоспособность. Применительно к цилиндрической стенке возможно как полное и частичное восстановление, так и усиление ее поясов.

В зависимости от предыстории ремонтно-восстановительных мероприятий поправки $\varepsilon_i(t)$, $\xi_i(t)$, $v_i(t)$, $\psi_i(t)$ в моделях (1)–(3) могут быть определены следующим образом.

1. Если на протяжении времени t восстановление поясов цилиндрической стенки вообще не производилось, то указанные поправки согласно [3] определяются по формулам:

$$\varepsilon_i(t) = \int_0^t u_i dt; \quad (4)$$

$$\xi_i(t) = \int_0^t V_i dt; \quad (5)$$

$$v_i(t) = \exp\left(-\frac{\beta_i \varepsilon_i(t)}{k_{pi} \delta_{i0}}\right), \quad (6)$$

$$\psi_i(t) = \psi_i^*(t), \quad (7)$$

где u_i , V_i – скорости соответственно поверхностной и локальной коррозии i -го пояса, определяемые по модели Э. М. Гутмана [8]

$$u_i = u_0 \exp[\bar{k} \sigma_i(t)];$$

$$V_i = V_0 \exp[\hat{k} \sigma_i(t)];$$

u_0, V_0 – скорости соответственно поверхностной и локальной коррозии ненапряженного металла, рассматриваемые как случайные величины, статистические характеристики которых определяются по данным натурных обследований резервуаров;

$\sigma_i(t)$ – текущее значение напряжений в i -м поясе; \bar{k}, \hat{k} – адаптационные параметры моделей скорости коррозии, определяемые путем статистической обработки данных натурных обследований резервуаров; β_i, k_{pi} – коэффициенты соответственно шероховатости и питтингообразования i -го пояса [3]; $\psi_i^*(t)$ – текущее значение коэффициента подрастания трещиновидных дефектов, гипотетически имеющих в i -м поясе, которое определяется по табличным данным [3] в зависимости от рас-

четного количества циклов нагружения и разности напряжений в i -м поясе при максимальном и минимальном уровнях залива резервуара нефтепродуктом.

2. Если на протяжении времени t производились только частичные восстановления i -го пояса, то поправки $\varepsilon_i(t)$, $v_i(t)$ и $\psi_i(t)$ определяются по формулам (4), (6) и (7), а поправка $\xi_i(t)$ вычисляется так

$$\xi_i(t) = \int_{\tau_i^q}^t V_i dt, \quad (8)$$

где τ_i^q – момент проведения последнего частичного восстановления i -го пояса.

3. Если на протяжении времени t производились полные и возможно частичные восстановления i -го пояса, то

$$\varepsilon_i(t) = \int_{\tau_i^n}^t u_i dt, \quad (9)$$

$$\xi_i(t) = \int_{\tau_i^*}^t V_i dt, \quad (10)$$

$$v_i(t) = \exp\left(-\frac{\beta_i \int_{\tau_i^n}^t u_i dt}{k_{pi} \delta_{i0}}\right), \quad (11)$$

$$\psi_i(t) = \psi_i^*(t - \tau_i^n), \quad (12)$$

где τ_i^n – момент проведения последнего полного восстановления i -го пояса, а

$$\tau_i^* = \max(\tau_i^q, \tau_i^n).$$

4. Если на протяжении времени t производилось усиление и возможно частичные восстановления i -го пояса, то поправки $\xi_i(t)$, $v_i(t)$ и $\psi_i(t)$ определяются по (5)–(7), а поправка $\varepsilon_i(t)$ имеет вид

$$\varepsilon_i(t) = \int_0^t u_i dt - \Delta_i^y, \quad (13)$$

где Δ_i^y – приведенная толщина конструкций усиления i -го пояса, зависящая от выбранной технологии усиления.

5. Если на протяжении времени t применялись все способы восстановления i -го пояса, то при $\tau_i^y < \tau_i^n$ (τ_i^y – момент производства усиления i -го пояса) поправки $\varepsilon_i(t)$, $\xi_i(t)$, $v_i(t)$, $\psi_i(t)$ определяются по формулам (9)–(12), а при $\tau_i^y > \tau_i^n$ поправки $\xi_i(t)$, $v_i(t)$, $\psi_i(t)$ определяются по тем же формулам, а $\varepsilon_i(t)$ имеет следующий вид:

$$\varepsilon_i(t) = \int_{\tau_i^n}^t u_i dt - \Delta_i^y. \quad (14)$$

Узел сопряжения цилиндрической стенки с днищем (уторный узел) в период эксплуатации должен отвечать требованиям прочности и герметичности. Принимая во внимание нормативные документы [2; 3], модель эксплуатационного состояния этого конструктивного элемента можно сформулировать в виде следующей системы неравенств:

$$\gamma_c \psi_x(t) v_x(t) R_{y1} [\delta_{10} - \varepsilon_x(t)]^2 - 6M_0(t) \geq 0, \quad (15)$$

$$\delta_{10} - \xi_x(t) - \Delta_1^- \geq 0, \quad (16)$$

где γ_c – коэффициент условий работы, согласно [2] принимаемый равным $\gamma_c = 1,22$, (в [1] показано, что этим коэффициентом в нормах [2] учитывается возможная начальная дефектность уторного узла и развития в нем умеренных пластических деформаций); R_{y1} , δ_{10} – соответственно, расчетное сопротивление и проектная толщина нижнего пояса; $\psi_x(t)$, $v_x(t)$, $\varepsilon_x(t)$ и $\xi_x(t)$ – поправки, отражающие фактор эксплуатационной повреждаемости нижнего пояса в зоне краевого эффекта, имеющие тот же смысл, что и поправки $\psi_i(t)$, $v_i(t)$, $\varepsilon_i(t)$ и $\xi_i(t)$ в (1); $M_0(t)$ – текущее значение изгибающего момента в точках сопряжения нижнего пояса стенки с днищем, определяемое по известной методике [6].

В процессе эксплуатации возможны полные и частичные восстановления уторного узла. Поправки $\varepsilon_x(t)$, $\xi_x(t)$, $v_x(t)$ и $\psi_x(t)$ в моделях (15) и (16) зависят от предыстории восстановлений и в общем случае могут быть определены по следующим формулам:

$$\varepsilon_x(t) = \int_{\tau_x^n}^t u_x dt, \quad (17)$$

$$\xi_x(t) = \int_{\tau_x^*}^t V_x dt, \quad (18)$$

$$v_x(t) = \exp\left(-\frac{\beta_x \varepsilon_x(t)}{k_{px} \delta_{10}}\right), \quad (19)$$

$$\psi_x(t) = \psi_1^*(t - \tau_x^n), \quad (20)$$

где u_x , V_x – скорости соответственно поверхностной и локальной коррозии в зоне краевого эффекта, определяемые аналогично скоростям коррозии u_i и V_i в (4), (5);

$$\tau_x^* = \max(\tau_x^n, \tau_x^q),$$

τ_x^q – момент проведения последнего частичного восстановления уторного узла (если за время эксплуатации t данный конструктивный элемент вообще не восстанавливается, то $\tau_x^* = 0$).

Условие герметичности днища в процессе эксплуатации определяется исходя из требования отсутствия сквозных повреждений и связанного с ним ограничения на минимально допустимую толщину листов, которая регламентируется действующими нормами [2]. Это условие можно сформулировать в виде следующей системы неравенств:

$$\delta_{d0} - \varepsilon_d(t) - \xi_d(t) - \Delta_d^- \geq 0, \quad (21)$$

$$\delta_{d0} - \varepsilon_d(t) - \delta_d^- \geq 0, \quad (22)$$

где δ_{d0} – проектное значение толщины листов днища; δ_d^- – минимально допустимая остаточная толщина листов днища, определяемая по [2]; Δ_d^- – величина отрицательного допуска на толщину листового проката [4]; $\varepsilon_d(t)$ – поправка, отражающая возможное изменение толщины листов днища вследствие коррозионного износа; $\xi_d(t)$ – поправка, определяющая глубину локальных коррозионных повреждений листов днища.

Аналогично (21)–(22) записывается условие герметичности кровли в процессе эксплуатации

$$\delta_{k0} - \varepsilon_k(t) - \xi_k(t) - \Delta_k^- \geq 0 \quad (23)$$

$$\delta_{k0} - \varepsilon_k(t) - \delta_k^- \geq 0, \quad (24)$$

где все обозначения имеют тот же смысл, что и в модели (21)–(22), но относятся к листам настила кровли.

В процессе эксплуатации возможны полные и частичные восстановления днища и кровли. Поправки $\varepsilon_d(t)$, $\xi_d(t)$, $\varepsilon_k(t)$ и $\xi_k(t)$, отражающие в моделях (21)–(24) фактор эксплуатационной повреждаемости, зависят от предыстории ремонтно-восстановительных мероприятий и в общем случае могут быть определены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_d(t) &= \int_{\tau_d^{\text{II}}}^t u_d dt \\ \xi_d(t) &= \int_{\tau_d^*}^t V_d dt; \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_k(t) &= \int_{\tau_k^{\text{II}}}^t u_k dt, \\ \xi_k(t) &= \int_{\tau_k^*}^t V_k dt, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

где u_d , V_d , u_k , V_k – скорости соответственно необратимого и локального коррозионного износа листов днища и настила кровли, рассматриваемые как случайные величины, статистические характеристики которых определяются по данным натурных обследований нефтяных резервуаров; τ_d^{II} , τ_k^{II} – моменты последнего полного восстановления, соответственно, днища и кровли (если за время эксплуатации t такое восстановление не производилось, то $\tau_d^{\text{II}} = \tau_k^{\text{II}} = 0$);

$$\tau_d^* = \max(\tau_d^{\text{II}}, \tau_d^{\text{Ч}});$$

$\tau_d^{\text{Ч}}$ – момент последнего частичного восстановления днища (если за время эксплуатации t восстановление днища вообще не производилось, то $\tau_d^{\text{Ч}} = 0$);

$$\tau_k^* = \max(\tau_k^{\text{II}}, \tau_k^{\text{Ч}});$$

$\tau_k^{\text{Ч}}$ – момент последнего частичного восстановления кровли (если за время эксплуатации t восстановление кровли вообще не производилось, то $\tau_k^{\text{Ч}} = 0$);

Модели (1)–(26) составляют методологическую основу для вероятностного анализа эксплуатационного состояния резервуарных конструкций. Ниже рассматриваются модели, определяющие вероятности сохранения прочности,

устойчивости и герметичности, а также вероятности безотказной работы основных конструктивных элементов нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации от момента последнего восстановления до текущего момента времени t .

Вероятность сохранения прочности i -го пояса цилиндрической стенки в процессе эксплуатации определяется вероятностью выполнения i -го неравенства системы (1) в момент времени t . Эту вероятность можно представить в виде интеграла

$$P_i^{\text{II}}(t) = \int_0^{u_i^*} f(u_0) du_0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (27)$$

где $f(u_0)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины u_0 , а верхний предел интегрирования u_i^* находится из уравнения

$$\eta_i R_{yi} \psi_i(t) v_i(t) [\delta_{i0} - \varepsilon_i(t)] - p_i r = 0, \quad (28)$$

решаемого относительно u_0 при фиксированном значении t .

Аналогично (27) определяются вероятности сохранения устойчивости цилиндрической стенки и прочности уторного узла в процессе эксплуатации

$$P_{\text{ст}}^{\text{V}}(t) = \int_0^{u^*} f(u_0) du_0, \quad (29)$$

$$P_x^{\text{II}}(t) = \int_0^{u_x^*} f(u_0) du_0, \quad (30)$$

где u^* , u_x^* – это положительные корни уравнений соответственно

$$1 - \frac{\sigma_1 [\delta_{\text{min}}(t)]}{\sigma_{\text{cr1}} [\delta_{\text{min}}(t)]} - \frac{\sigma_2 [\delta_c(t)]}{\sigma_{\text{cr2}} [\delta_c(t)]} = 0 \quad (31)$$

и

$$\gamma_c \psi_x(t) v_x(t) R_{y1} [\delta_{10} - \varepsilon_x(t)]^2 - 6M_0(t) = 0, \quad (32)$$

решаемых относительно u_0 при фиксированном значении t .

Вероятность сохранения прочности цилиндрической стенки в процессе эксплуатации определяется вероятностью выполнения всех n неравенств системы (1) в текущий момент времени. Учитывая то, что левые части данных неравенств являются функциями одной и той же случайной величины u_0 , эту вероятность можно найти по формуле

$$P_{\text{ст}}^{\text{II}}(t) = \int_0^{u_c^*} f(u_0) du_0, \quad (33)$$

где верхний предел интегрирования u_c^* – это минимальный из корней уравнений

$$\eta_i R_{yi} \psi_i(t) v_i(t) [\delta_{i0} - \varepsilon_i(t)] - p_i r = 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (34)$$

решаемых относительно u_0 при фиксированном значении t .

Из (33) легко видеть, что с уменьшением верхнего предела интегрирования уменьшается вероятность $P_{\text{ст}}^{\text{II}}(t)$. Это значит, что при величине этого предела равной u_c^* достигается наименьшая вероятность сохранения прочности поясов цилиндрической стенки в текущий момент времени. Отсюда следует равенство

$$P_{\text{ст}}^{\text{II}}(t) = \min P_i^{\text{II}}(t), \quad i = \overline{1, n}. \quad (35)$$

Тем самым вероятность сохранения прочности цилиндрической стенки в процессе эксплуатации определяется в соответствии с моделью наислабейшего звена [9], если в качестве звеньев рассматривать пояса стенки. Эта же модель наислабейшего звена справедлива при определении вероятности сохранения прочности всего (включая безмоментную и моментную зоны) корпуса резервуара в процессе эксплуатации

$$P_{\text{кор}}^{\text{II}}(t) = \min [P_{\text{ст}}^{\text{II}}(t), P_x^{\text{II}}(t)]. \quad (36)$$

Аналогично (27), (30), (35) и (36) записываются вероятности сохранения герметичности отдельных поясов, уторного узла, цилиндрической стенки и корпуса резервуара в процессе эксплуатации

$$\left. \begin{aligned} P_i^{\text{I}}(t) &= \int_0^{V_i^*} f(V_0) dV_0, \quad i = \overline{1, n}, \\ P_x^{\text{I}}(t) &= \int_0^{V_x^*} f(V_0) dV_0; \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{ст}}^{\text{I}}(t) &= \min P_i^{\text{I}}(t), \quad i = \overline{1, n}, \\ P_{\text{кор}}^{\text{I}}(t) &= \min [P_{\text{ст}}^{\text{I}}(t), P_x^{\text{I}}(t)], \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

где $f(V_0)$ – плотность распределения вероятностей случайной величины V_0 , а V_i^* и V_x^* – корни уравнений соответственно

$$\left. \begin{aligned} \delta_{i0} - \xi_i(t) - \Delta_i^- &= 0; \\ \delta_{i0} - \xi_x(t) - \Delta_i^- &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

решаемых относительно V_0 при фиксированном значении t .

Вероятность сохранения герметичности днища резервуара в процессе эксплуатации определяется вероятностью выполнения системы неравенства (21)–(22) в момент времени t . Эту вероятность можно представить в виде интеграла

$$P_{\text{дн}}^{\text{I}}(t) = \iint_{D_{\text{д}}} f(u_{\text{д}}) f(V_{\text{д}}) du_{\text{д}} dV_{\text{д}}, \quad (40)$$

где область интегрирования $D_{\text{д}}$ описывается системой ограничений (21)–(22).

Аналогично (40) определяется вероятность сохранения герметичности кровли резервуара в процессе эксплуатации

$$P_{\text{кр}}^{\text{I}}(t) = \iint_{D_{\text{к}}} f(u_{\text{к}}) f(V_{\text{к}}) du_{\text{к}} dV_{\text{к}}, \quad (41)$$

где область интегрирования $D_{\text{к}}$ описывается системой ограничений (23)–(24).

Рассматривая скорости коррозии u_0 , V_0 , $u_{\text{д}}$, $V_{\text{д}}$, $u_{\text{к}}$ и $V_{\text{к}}$ как независимые случайные величины и принимая во внимание соотношения (27)–(41), вероятности безотказной работы i -го пояса $P_i(t)$, уторного узла $P_x(t)$, цилиндрической стенки $P_{\text{ст}}(t)$, корпуса резервуара $P_{\text{кор}}(t)$, днища $P_{\text{дн}}(t)$, кровли $P_{\text{кр}}(t)$ и всего резервуара $P_{\text{р}}(t)$ в процессе эксплуатации от момента последнего восстановления до текущего момента времени можно определить следующим образом:

$$P_i(t) = P_i^{\text{II}}(t) P_i^{\text{I}}(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (42)$$

$$P_x(t) = P_x^{\text{II}}(t) P_x^{\text{I}}(t), \quad (43)$$

$$P_{\text{ст}}(t) = \min [P_{\text{ст}}^{\text{II}}(t), P_{\text{ст}}^{\text{I}}(t)] P_{\text{ст}}^{\text{I}}(t), \quad (44)$$

$$P_{\text{кор}}(t) = \min [P_{\text{ст}}^{\text{II}}(t), P_{\text{ст}}^{\text{I}}(t), P_x^{\text{II}}(t)] \times \min [P_{\text{ст}}^{\text{I}}(t), P_x^{\text{I}}(t)], \quad (45)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{дн}}(t) &= P_{\text{дн}}^{\text{I}}(t); \\ P_{\text{кр}}(t) &= P_{\text{кр}}^{\text{I}}(t), \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

$$P_{\text{р}}(t) = P_{\text{кор}}(t) P_{\text{дн}}(t) P_{\text{кр}}(t). \quad (47)$$

Заметим, что приведенные выше модели (1)–(26) описывают эксплуатационное состояние основных конструктивных элементов стальных

резервуаров в терминах случайных функций, модели (27)–(41) позволяют с позиций прочности, устойчивости и герметичности дать вероятностную оценку эксплуатационного состояния резервуарных конструкций, а модели (42)–(47) отражают изменение во времени их эксплуатационной надежности.

Выводы

Предложенные модели эксплуатационной надежности резервуарных конструкций дают обобщенную оценку влияния факторов начальной дефектности, эксплуатационной повреждаемости и восстановления на несущую способность нефтяных резервуаров. Параметры этих моделей могут уточняться по данным натурных обследований, что повышает точность прогноза в каждом отдельном случае. Кроме того, данные модели могут быть полезны при решении разнообразных задач технической диагностики и управления надежностью нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоров Е. А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного

- ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации. – Д.: Навч. кн., 2002. – 95 с.
2. ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Держбуд України. – К.: Укрнафтопродукт, 1995. – 46 с.
3. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту // Доповнення та зміни. – К.: Укрнафтопродукт, 1997. – 297 с.
4. ГОСТ 19903-74. Сталь листовая горячекатаная. Сортамент. – М.: Изд-во Стандартов, 1974. – 16 с.
5. Овчинников И. Г. Эксплуатационная надежность и оценка состояния резервуарных конструкций / И. Г. Овчинников, Н. Б. Кудайбергенов, А. А. Шеин. – Саратов: СГТУ, 1999. – 316 с.
6. Лессиг Е. Н. Листовые конструкции / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 480 с.
7. СНиП 11-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
8. Гутман Э. М. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа. – М.: Недра, 1983. – 150 с.
9. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 604 с.

Поступила в редколлегию 05.12.2005.