

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЛОЖНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Изложен подход к оценке проектных сроков службы протяженных конструкций (стадия проектирования) и рекомендуемых сроков службы конструкций (стадия эксплуатации). Теория представляет проблему теории долговечности протяженных конструкций в вероятностной постановке, для реализации которой впервые сформулирован принцип о предельной вероятности разрушения конструкции.

Представлены теоретические основы метода определения проектных сроков службы протяженных конструкций при обеспечении требований промышленной безопасности опасных производственных объектов и рекомендуемых сроков службы конструкций при использовании результатов технической диагностики объектов.

Ключевые слова: протяженные конструкции, срок службы, вероятность разрушения конструкции, промышленная безопасность, техническая диагностика.

В настоящей статье реализован подход к оценке проектных сроков службы протяженных конструкций (стадия проектирования) и рекомендуемых сроков службы конструкций (стадия эксплуатации).

Для определения проектных сроков службы конструкций предлагаемая теория использует результаты решения проблемы длительной прочности конструктивных элементов под действием случайных эксплуатационных и внешних нагрузок и воздействий [1-4], [8], [11] и решения проблемы оценки социальной, промышленной и экологической безопасности конструкций как опасных производственных объектов [5-7], [8], а также результаты статистического анализа эксплуатационных разрушений аналогичных конструкций.

Для оценки рекомендуемых сроков службы конструкций на стадии эксплуатации теория привлекает результаты комплексной диагностики их технического состояния, периодически выполняемой при эксплуатации опасных производственных объектов.

Теория представляет проблему теории долговечности протяженных конструкций в вероятностной постановке, для реализации которой впервые сформулирован следующий принцип:

предельная вероятность разрушения конструкции в течение проектного или рекомендуемого срока эксплуатации не должна превышать заданного социально и экономически приемлемого значения вероятности разрушения конструкции для данной отрасли промышленности.

Социально и экономически приемлемое значение вероятности разрушения конструкции зависит от значений приемлемого экологического риска в потенциально - опасной зоне вокруг конструкции, уровня статистических показателей эксплуатационных разрушений аналогичных конструкций и экономически и социально приемлемого срока службы объекта [10], [11].

Компонентами приемлемого экологического риска для потенциально - опасной зоны вокруг конструкции являются приемлемый суммарный коллективный риск базовой возрастной группы,

промышленный риск базовых объектов, экологический риск уничтожения флоры базового клабонитета, экологический риск уничтожения зового вида фауны [2-4], [7], [8].

Экономически и социально приемлемый срок службы конструкции пропорционален сроку окупемости объекта с учетом дисконтирования, собственной и коммерческой эффективности инвестиционного проекта [10]. Так, сроки окупаемости магистральных газонефтепроводов и продуктопроводов равны восьми годам. Экономически и социально приемлемые сроки службы магистральных трубопроводов находятся в интервале 35÷45 лет. Понятие "приемлемый срок службы объекта" введено в терминологию по аналогии с понятием "назначенный срок службы", который традиционно применяют другие методы оценки долговечности конструкций.

Характеристики технического состояния протяженных конструкций на основных стадиях и вестационного проекта учитываются настоящей теорией [8-11]:

- на стадии проектирования протяженных конструкций учитывается качество проектных решений конструкций и качество проектных решений по технологии строительства, экономические аспекты и правила страхования объектов;

- на стадии строительства протяженных конструкций учитывается качество строительных монтажных работ, определяемое качеством заводского производства базовых конструктивных элементов, качеством монтажных сварных соединений, типом и качеством изоляционного покрытия, качеством собственно строительно-монтажных работ, применяемыми заводскими методами и объемами контроля качества конструктивных элементов;

- на стадии эксплуатации протяженных конструкций учитывается качество эксплуатации регламенты проведения комплексной диагностики их технического состояния (методы, объемы, периодичность диагностики).

Настоящая теория реализуется в виде методов оценки проектных и рекомендуемых сроков службы магистральных трубопроводов.

1. ТЕОРИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ - СТАДИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Метод определения проектных сроков службы протяженных конструкций заданного значения базируется на следующих положениях [1], [2], [11], [12]:

- основной принцип - предельная вероятность разрушения конструкции в течение проектного срока службы не должна превышать значения социально и экономически приемлемой вероятности разрушения объекта;

- критерий для определения сроков безопасной эксплуатации конструктивных элементов конструкции под действием расчетных нагрузок и воздействий;

- аппроксимации для описания зависимости определяющих функций вышеупомянутого критерия от основных параметров нагружения и базовых механических свойств материалов.

Предельная вероятность разрушения конструкции $P = P(t^*)$ в течение проектного срока ее безопасной эксплуатации t^* не должна превышать заданного значения социально и экономически приемлемой вероятности разрушения $I = I(t^*, t_{p,e})$:

$$P(t^*) \leq I(t^*, t_{p,e}), \quad (1)$$

где $t_{p,e}$ - экономически и социально приемлемый срок службы конструкции.

Значения вероятности разрушения конструкции $P = P(t^*)$ (левая часть неравенства (1)) предполагается находить по следующим соотношениям:

$$P(t^*) = \sum_{q=1}^{14} \frac{P_q(t^*)}{1 - P_q(t^*)} \prod_{k=1}^{14} [1 - P_k(t^*)], \quad (2)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^{I_0} \frac{P_{y,i}(t^*)}{1 - P_{y,i}} \prod_{j=1}^{I_0} (1 - P_{y,j}), \quad y = q, k$$

$$P_{y,x} = F(p_{y,x} \cdot t^* \cdot L_x) \cdot F\left(\frac{t^*}{t_{y,x}^*}\right),$$

$$y = q, k, \quad y = 1, \dots, 6, \quad x = i, j, \quad x = 1, \dots, I_0$$

$$P_{7,x} = F(p_{7,x} \cdot t^* \cdot L_x),$$

$$y = 7, \quad x = i, j, \quad x = 1, \dots, I_0$$

$$P_{y,x} = F(p_{y,x} \cdot t^*) \cdot F\left(\frac{\sigma_{y,x}}{\sigma_b(1 - 1/k_\sigma)}\right),$$

$$y = q, k, \quad y = 8, \dots, 10, \quad x = (i, j) \quad x = 1, \dots, I_0$$

$$P_{y,x} = F(p_{y,x} \cdot t^* \cdot L_{y,x}) \cdot F\left(\frac{t^*}{t_{y,x}^*}\right),$$

$$y = q, k, \quad y = 11, \dots, 14, \quad x = i, j, \quad x = 1, \dots, I_0$$

$$\sum_{i=1}^{I_0} L_i = L_0,$$

где $i, j = 1, \dots, I_0$ - расчетные участки конструкции;

$y = q, k$ - обобщенные элементы расчетного участка:

$y = 1$ - монтажные кольцевые сварные соединения,

$y = 2$ - заводские продольные сварные соединения,

$y = 3$ - основной металл зоны геометрических концентраторов (вмятины, гофры, риски), зоны расслоения металла,

$y = 4, 5, 6$ - тройники, отводы переходники соответственно,

$y = 7$ - элемент с механическим повреждением от деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары),

$y = 8$ - элемент с повреждением от техногенных воздействий (при разрушении соседних газонепроводов, химических объектов, гидроузлов, атомных станций и т.п.),

$y = 9$ - элемент с повреждением от гидрологических, геодинамических, механических воздействиях при природных оползнях и просадках, проседании и горизонтальных сдвигах толщин пород над резервуаром и т.п.,

$y = 10$ - элемент с повреждением от сейсмических воздействий (8 баллов и выше) при природных местных и «транзитных» землетрясениях и при техногенных землетрясениях с очагами в резервуаре и вмещающей геосреде,

$y = 11$ - элемент, подвергающийся почвенной коррозии и коррозии перекачиваемого продукта, химической незащищенности участка (разрушение изоляционного покрытия),

$y = 12$ - элемент, подвергающийся электромагнитному воздействию из-за влияния близлежащих энергосистем постоянного и переменного тока,

$y = 13, 14$ - соответственно элементы, подвергающиеся стресскоррозионным и биокоррозионным воздействиям;

$P_{y,x}$, ($[P_{y,x}] = 1/\text{год}$), $y = 1 \dots 6$, $x = 1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления растущих трещин и дефектов, подобных трещинам, в монтажных кольцевых сварных соединениях при возможном смещении кромок ($y = 1$), в заводских продольных сварных соединениях ($y = 2$), в основном металле, в зонах геометрических концентраторов (во вмятинах, гофрах, рисках), а также в зо-

нах расслоения металла ($y=3$), в основном металле и в сварных соединениях тройников ($y=4$), отводов ($y=5$) и переходников ($y=6$) на x -ом расчетном участке;

$P_{7,x}$, $x=1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления потенциальных механических воздействий на конструктивные элементы x -ого расчетного участка в результате деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары);

$P_{y,x}$, $y=8, \dots, 10$, $x=1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления потенциальных техногенных воздействий (при разрушениях соседних газонефтепроводов, химических объектов, гидроузлов, атомных станций и т.д.) ($y=8$), гидрологических, геодинамических, механических воздействий (при природных оползнях и просадках, проседании и горизонтальных сдвигах толщи пород над резервуаром, в котором снижается пластическое давление) ($y=9$), сейсмических воздействий 8 баллов и выше при природных местных и "транзитных" землетрясениях и при техногенных землетрясениях с очагами в резервуаре и вмещающей геосреде ($y=10$) на x -ом расчетном участке;

$\sigma_{y,x}$, $y=8, \dots, 10$, $x=1, \dots, I_0$ - максимальное растягивающее продольное напряжение в конструктивных элементах x -ого расчетного участка от техногенных воздействий, гидрологических, геодинамических и механических воздействий и сейсмических воздействий соответственно;

k_σ - нормативный коэффициент запаса прочности по нагружению, используемый при выборе геометрических параметров конструктивных элементов;

σ_b - временное сопротивление металла конструктивных элементов;

$P_{11,x}$, $x=1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления потенциальных растущих равномерных и локальных коррозионных дефектов из-за почвенной коррозии, коррозионной активности продукта и коррозионной активности грунта на x -ом расчетном участке, обусловленных состоянием его химической защищенности (учет предельного срока эксплуатации изоляционного покрытия без ремонта) и катодной защищенности по его протяженности;

$P_{12,x}$, $x=1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления потенциальных растущих коррозионных дефектов на x -ом расчетном участке от электромагнитных воздействий, вызванных близлежащими энергосистемами постоянного и переменного тока;

$P_{13,x}$, $x=1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления потенциальных растущих стресскоррозионных дефектов на x -ом расчетном участке;

$P_{14,x}$, $([p_q]_{q=1, \dots, 14} = 1/(\text{год} \times \text{км}))$; $x=1, \dots, I_0$ - удельная вероятность появления потенциальных растущих биокоррозионных дефектов на x -ом расчетном участке;

$t_{y,x}^*$, $y=1, \dots, 6$, $x=1, \dots, I_0$ - предельное время эксплуатации x -го расчетного участка, имею го допустимый y -дефект;

$t_{11,x}^*$, $x=1, \dots, I_0$, $([t] = \text{год})$ - предельное время коррозионного разрушения x -ого расчетного участка, обусловленного почвенной коррозией в процессе работы системы пассивной и активной защиты металла трубопровода, которое предлагается определить в виде:

$t_{11,x}^* = \delta_x / (1.25 \cdot v_{11,x})$, где $v_{11,x}$, $([v_{11,x}] = \text{мм/год})$ - средняя скорость коррозионных равномерных и локальных макроразрушений x -ого расчетного участка в течение проектного срока службы t^* , где δ_x , $([\delta] = \text{мм})$ - толщина x -го расчетного участка конструктивного элемента;

$t_{12,x}^*$, $x=1, \dots, I_0$ - предельное время коррозионного разрушения x -ого расчетного участка, обусловленного наличием блуждающих токов, наведенных близлежащими энергосистемами постоянного и переменного тока; $t_{12,x}^* = \delta_x / (1.25 \cdot v_{12,x})$, где $v_{12,x}$ - средняя скорость коррозионных макроразрушений x -ого расчетного участка в течение проектного срока службы, обусловленная наличием блуждающих токов;

$t_{13,x}^*$, $x=1, \dots, I_0$, $([t] = \text{год})$ - предельное время стресскоррозионного разрушения x -ого расчетного участка, включающее время формирования "колоний" стресскоррозионных трещин $t_{b,13}$, время их слияния до образования магистральной макротрещины $t_{m,13}$ и время достижения макротрещиной критических размеров $t_{c,c}$;

$t_{14,x}^*$, $x=1, \dots, I_0$ - предельное время биокоррозионного разрушения x -ого расчетного участка, включающее время формирования "колоний" биокоррозионных трещин $t_{b,14}$, время их слияния до образования магистральной макротрещины $t_{m,14}$ и время достижения макротрещиной критических размеров $t_{c,c}$;

$F = F(z)$ - функция распределения вероятности макроразрушений участка (часто рассматривается в виде распределения Пуассона);

L_x , $([L_x] = \text{км})$ - длина x -ого расчетного участка, равная расстоянию между смежными линейными и охранными кранами, т.е. между $(x-1)$ и x кранами;

L_0 - длина участка трубопровода между смежными компрессорными или насосными станциями;

$L_{y,x}$, $y=11, \dots, 14$ - суммарная длина зон на x -ом расчетном участке трубопровода, подверженных почвенному коррозионному воздействию ($y=11$), воздействию близлежащих энергосистем постоянного и переменного тока ($y=12$), включающих "колонии" стресс ($y=13$) и био ($y=14$) коррозионных макроразрушений.

Социально и экономически приемлемая вероятность разрушения $I = I(t^*, t_{p,e})$ (правая часть неравенства (1)) определяется по известным при-

емлемым значениям риска разрушения конструкций:

$$I(t^*, t_{p,e}) = I_0(t^*) + I_1(t_{p,e}) - 2I_0(t^*)I_1(t_{p,e});$$

$$I_0(t^*) = \left\{ \sum_{z=1}^4 \frac{I_z^S(t^*)}{1 - I_z^S(t^*)} \right\} \cdot \prod_{j=1}^4 [1 - I_j^S(t^*)];$$

$$I_r^S(t^*) = \{[K_r^*] - S_r(t^*)\} / S_r, \quad r = (z, j), \quad r = 1, \dots, 4;$$

$$I_1(t_{p,e}) = \left\{ \sum_{q=1}^{10} \frac{F_q(t_{p,e})}{1 - F_q(t_{p,e})} \right\} \cdot \prod_{k=1}^{10} [1 - F_k(t_{p,e})], \quad (3)$$

$$F_y(t_{p,e}) = F(p_y(t_{p,e})), \quad p_y(t_{p,e}) = \lambda_y \cdot L_0 \cdot t_{p,e},$$

$$y = q, k, \quad y = 1, \dots, 10,$$

где

$I_0 = I_0(t^*)$ - приемлемый экологический риск в потенциально-опасной зоне вокруг конструкции в течение проектного срока службы t^* ;

$I_1 = I_1(t_{p,e})$ - приемлемое значение вероятности разрушения конструкции в течение социально и экономически приемлемого срока $t_{p,e}$, которое определяется по статистике разрушения аналогичных участков при их эксплуатации в аналогичных природно-климатических условиях;

$S_x, x=1, \dots, 4$ - эквивалентное значение коллективного территориального риска, суммарного промышленного риска, суммарного экологического риска для флоры, суммарного экологического риска для фауны соответственно в потенциально-опасной зоне при разрушении конструкции;

$S_r(t^*), x=1, \dots, 4$ - эквивалентное значение коллективного территориального риска участка трубопровода, суммарного промышленного риска, суммарного экологического риска для флоры, суммарного экологического риска для фауны соответственно в потенциально-опасной зоне вокруг конструкции при строительстве и безаварийной эксплуатации конструкции в течение срока t^* ;

$[K_r^*], x=1, \dots, 4$ - приемлемое значение коллективного территориального риска, суммарного промышленного риска, суммарного экологического риска для флоры, суммарного экологического риска для фауны соответственно;

$\lambda_y, y=1, \dots, 6, ([\lambda_q] = 1 / (\text{км} \times \text{год}))$ - коэффициент интенсивности потока разрушений из-за допущения критических размеров потенциальных трещинами и дефектами, подобными трещинам, в монтажных кольцевых сварных соединениях при возможном смещении кромок; в продольных сварных соединениях; в основном металле; в зонах геометрических концентраторов (во вмятинах, гофрах, рисках), а также в зонах расслоения металла, в основном металле и в сварных соединениях тройников, отво-

дов и переходников соответственно на x -ом расчетном участке;

$\lambda_7, ([\lambda_7] = 1 / (\text{км} \times \text{год}))$ - коэффициент интенсивности потока разрушений, обусловленного появлением механических воздействий на расчетном участке в результате деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары);

$\lambda_q, q=8, 9, 10$ - коэффициенты интенсивности потока разрушений, характеризующие распределение вероятности достижения критических напряжений от техногенных воздействий (при разрушениях соседних газо-нефтепроводов, химических объектов, гидроузлов, атомных станций и т.д.), от гидрологических, геодинамических, механических воздействий (при природных оползнях и просадках, проседании и горизонтальных сдвигах толщи пород над резервуаром, в котором снижается пластическое давление), от сейсмических воздействий 8 баллов и выше при природных местных и "транзитных" землетрясениях и при техногенных землетрясениях с очагами в резервуаре и вмещающей геосреде.

2. ТЕОРИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Крупномасштабные разрушения протяженных конструкций при эксплуатации происходят вследствие процессов развития трещин, геометрических дефектов, коррозионных поражений металла конструктивных элементов.

При проведении комплексной диагностики технического состояния протяженных конструкций используют методы фотограмметрической, цветной, многозональной, инфракрасной и радиочастотной съемок с привлечением аэрокосмической и вертолетной съемки, физические неразрушающие методы диагностики (эхо-вибрационные, инфракрасного излучения, электрометрические, ультразвуковые, электромагнитные, магнитные, акустической эмиссии, рентгеновские, радиоактивного излучения), методы измерения твердости поверхностных слоев металла, магнитные и ультразвуковые методы (при пропуске интеллектуальных снарядов), механические потенциально разрушающие методы диагностики - испытательное нагружение конструкций выше рабочего нагружения на 25%+50%. Создается база данных о различных дефектах, которая содержит данные о трещинах в основном металле конструктивных элементов, трещины в кольцевых и продольных сварных соединениях, коррозионных трещинах, стрессо-биокоррозионных трещинах, коррозионной потере металла, о расслоении металла конструктивных элементов, рисках, вмятинах, гофрах в стенке элементов. Дефекты могут находиться средствами внутренней и наружной диагностики с определенной достоверностью, а также задаваться по результа-

там предыдущей эксплуатации участка и по статистике аварий на аналогичных участках [8], [9].

Каждый вид дефектов $y, y=1, \dots, Q$ обуславливает соответствующий поток разрушения конструктивных элементов участка:

массивам каждого вида дефектов $y, y=1, \dots, Q$, обнаруживаемых средствами внутритрубной диагностики, ставят в соответствие массивы предельных времен $t_{u,k,y}^{(1)}$, где $t_{u,k,y}^{(1)}$ - предельные времена достижения дефектом вида «у» с порядковым номером «u» месторасположения по длине участка, $u=1, \dots, U$; $k=1 \leq k \leq K$, - k-ое диагностическое обследование участка разными методами;

массивам каждого вида дефектов $y, y=1, \dots, Q$, обнаруживаемых средствами наружного диагностического обследования - массив предельных времен $t_{z,k,y}^{(2)}$, где $t_{z,k,y}^{(2)}$ - предельные времена достижения дефектом вида «у» с порядковым номером «z» месторасположения по длине участка $z=1, \dots, Z$;

массивам каждого вида дефектов $y, y=1, \dots, Q$, обнаруживаемых средствами как внутритрубной, так и наружной диагностики - массив предельных времен $t_{w,k,y}^{(3)}$, где $t_{w,k,y}^{(3)}$ - предельные времена достижения дефектом вида «у» с порядковым номером «w» месторасположения по длине участка $w=1, \dots, W$.

Порядковым текущим номерам «u», «z», «w» соответствуют координаты расположения дефектов по длине x-ого расчетного участка трубопровода $L_i = (L_{i,u}, L_{i,z}, L_{i,w})$, $i=1, \dots, I_0$ соответственно.

Метод определения рекомендуемых сроков службы протяженных конструкций по значениям рекомендуемых сроков службы их конструктивных элементов с дефектами, геометрия которых устанавливается методами технической диагностики, базируется на следующих положениях:

- на принципе - предельная вероятность разрушения конструкции в течение рекомендуемого срока службы не должна превышать значения социально и экономически приемлемой вероятности разрушения объекта;

- на выражении для определения вероятности разрушения элементов с дефектами различного происхождения, которые выявлены методами внутритрубной и внешней диагностики, по кинематическим или другим гипотезам прочности;

- на соотношении для определения приемлемых сроков социально и экологически безопасной эксплуатации конструкции.

Предельная вероятность разрушения конструкции $P = P(t_r^*)$ в течение рекомендуемого срока службы t_r не должна превышать значения социально и экономически приемлемой вероятности разрушения $I = I(t_r^*, t_{p,e})$

$$P(t_r^*) \leq I(t_r^*, t_{p,e}), \quad (4)$$

где $I = I(t_r^*, t_{p,e})$ находят по соотношениям (3).

Вероятность разрушения конструкции $P = P(t_r^*)$ в течение рекомендуемого срока безной эксплуатации t_r^* определяют по следующим зависимостям

$$P(t_r^*) = P(t_r^*) + P_y(t_r^*)[1 - 2P(t_r^*)].$$

Вероятность разрушения элемента $P = P$ и для зависимости (5) определяют по соотношениям (2).

Вероятность разрушения элемента $P^f = P^f$ по дефектам различного происхождения, которые выявляются методами внутренней и внешней диагностики, в течение рекомендуемого срока безопасной эксплуатации t_r^* для зависимости вычисляют по соотношениям

$$P^f(t_r^*) = \sum_{i=1}^{I_0} \frac{P_i^f(t_r^*)}{1 - P_i^f(t_r^*)} \prod_{j=1}^{I_0} [1 - P_j^f(t_r^*)].$$

Вероятность разрушения x-го участка $P_x^f = P_x^f(t_r^*)$ по дефектам различного происхождения, которые выявляются методами внутритрубной и внешней диагностики, в течение рекомендуемого срока его безопасной эксплуатации t_r^* в вычисляют по следующим соотношениям:

$$P_x^f(t_r^*) = \sum_{k=1}^K \frac{P_{x,k}^f(t_r^* - t_{d,k})}{1 - P_{x,k}^f(t_r^* - t_{d,k})} \prod_{k=1}^K [1 - P_{x,k}^f(t_r^* - t_{d,k})],$$

$$P_{x,k}^f(t_r^* - t_{d,k}) = \left[\sum_{q=1}^Q \frac{Q_{q,x,k}(t_r^* - t_{d,k})}{1 - Q_{q,x,k}(t_r^* - t_{d,k})} \right] \times \prod_{k=1}^K [1 - Q_{k,x,k}(t_r^* - t_{d,k})]$$

где $k, 1 \leq k \leq K$ - k-ое диагностическое обследование участка методами внутритрубной и внешней диагностики;

$y, 1 \leq y \leq Q$ - y - ый дефект в конструктивных элементах участка.

Вероятность разрушения участка $Q_{y,x,k} = Q_{y,x,k}(t_r^* - t_{d,k})$, обусловленного дефектами y-с вида, которые выявлены при k - ом диагностическом обследовании участка методами внутритрубной и внешней диагностики после времени эксплуатации $t_{d,k}$, в течение рекомендуемого остаточного срока его безопасной эксплуатации $t_r^* = t_r^* - t_{d,k}$, вычисляют по следующему соотношению:

$$Q_{y,x,k}(t_r^* - t_{d,k}) = \left\{ \sum_{g=1}^3 \frac{Q_{y,x,k}^{(g)}(t_r^* - t_{d,k})}{1 - Q_{y,x,k}^{(g)}(t_r^* - t_{d,k})} [1 - P_{y,x}^{(4)}(t_r^* - t_{d,k})] [1 - P_{y,x}^{(5)}(t_r^* - t_{d,k})] + \right.$$

$$\left. + \sum_{j=4}^5 P_{y,x}^{(j)}(t_r^*) h(P_{y,x}^{(j)}(t_{d,k})) \right\} \prod_{g=1}^3 [1 - Q_{y,x,k}^{(g)}(t_r^* - t_{d,k})], \quad (6)$$

$$h(P_{y,x}^{(j)}(t_{d,k})) = P_{y,x}^{(j)}(t_{d,k}) \vee (1 - P_{y,x}^{(j)}(t_{d,k})), \quad j=4, \quad (6)$$

$$Q_{y,x,k}^{(1)}(t_r^* - t_{d,k}) = \sum_{u_i} \frac{P_{y,i,k}^{(1)}(t_r^* - t_{d,k})}{1 - P_{y,i,k}^{(1)}(t_r^* - t_{d,k})} \prod_{u_j} [1 - P_{y,j,k}^{(1)}(t_r^* - t_{d,k})], \quad (10)$$

$$Q_{y,x,k}^{(2)}(t_r^* - t_{d,k}) = \sum_{z_j} \frac{P_{y,j,k}^{(2)}(t_r^* - t_{d,k})}{1 - P_{y,j,k}^{(2)}(t_r^* - t_{d,k})} \prod_{z_j} [1 - P_{y,j,k}^{(2)}(t_r^* - t_{d,k})], \quad (11)$$

$$Q_{y,x,k}^{(3)}(t_r^* - t_{d,k}) = \sum_{w_i} \frac{P_{y,i,k}^{(3)}(t_r^* - t_{d,k})}{1 - P_{y,i,k}^{(3)}(t_r^* - t_{d,k})} \prod_{w_i} [1 - P_{y,j,k}^{(3)}(t_r^* - t_{d,k})]. \quad (12)$$

$P_{y,x,k}^{(1)}(t_r^* - t_{d,k})$ - вероятность разрушения x -ого расчетного участка в течение рекомендуемого остаточного срока эксплуатации $(t_r^* - t_{d,k})$ дефектами вида "у", $y = 1, \dots, Q$, расположенными по его длине на расстояниях L_u , $u = 1, \dots, U$, которые обнаружены средствами только внутритрубной диагностики (магнитные и ультразвуковые методы при пропуске интеллектуальных снарядов) после времени эксплуатации $t_{d,k}$ (конструктивный риск);

$P_{y,x,k}^{(2)}(t_r^* - t_{d,k})$ - вероятность разрушения x -ого расчетного участка в течение рекомендуемого остаточного срока эксплуатации $(t_r^* - t_{d,k})$ от дефектов вида "у", $y = 1, \dots, Y$, расположенных по его длине на расстоянии L_z , $z = 1, \dots, Y$, $L_z \neq L_y$ и обнаруживаемых только средствами наружного диагностического обследования (электрометрические методы контроля технического состояния изоляционного покрытия и металла, акустической эмиссии, рентгеновские, радиоактивного излучения методы) после времени эксплуатации $t_{d,k}$;

$P_{y,x,k}^{(3)}(t_r^* - t_{d,k})$ - вероятность разрушения конструктивных элементов x -ого расчетного участка в течение рекомендуемого остаточного срока эксплуатации $(t_r^* - t_{d,k})$; дефекты вида "у", $y = 1, \dots, Q$ расположенные по его длине на расстоянии L_w , $w = 1, \dots, W_x$ и обнаруженные совместно как средствами внутритрубной, так и наружной диагностики;

$P_{y,x}^{(4)}(t_r^* - t_{d,k})$ - вероятность разрушения x -ого расчетного участка в течение рекомендуемого остаточного срока $(t_r^* - t_{d,k})$; экспертные значения вероятности прогнозируют по результатам косвенных методов наружной диагностики (магнитные градиентометры), а также учитывают результаты анализа проектной, исполнительной и эксплуатационно-технической документации и

статистики разрушений по дефектам вида "у", $y = 1, \dots, Y$, в процессе эксплуатации аналогичных участков в заданном районе;

$P_{y,x,k}^{(5)}(t_r^* - t_{d,k})$ - вероятность разрушения x -ого расчетного участка в течение рекомендуемого остаточного срока эксплуатации $(t_r^* - t_{d,k})$, определяемая по результатам предыдущей эксплуатации участка с учетом деятельности третьих лиц и статистики предыдущих разрушений конструктивных элементов x -ого участка.

С учетом соотношений (5) - (12) основное неравенство теории (4) записывается следующим образом

$$P^f(t_r^*) \leq [I(t^*, t_{p,e}) - P(t_r^*)] / [1 - 2P(t_r^*)], \quad (13)$$

где $I = I(t^*, t_{p,e})$ находят по соотношениям (3),

$P = P(t_r^*)$ определяют по (2). Функция $P^f = P^f(t_r^*)$ описывается формулами (6) - (12), в которых вероятности разрушения x -ого расчетного участка по дефектам y -ого вида принимают вид:

$$P_{y,x,k}^{(g)} = P_{y,x,k}^{(g)}(t_r^* - t_{d,k}), \quad g = 1, 2, 3;$$

$$P_{y,x}^{(j)} = P_{y,x}^{(j)}(t_r^*), \quad j = 4, 5;$$

$$P_{y,x,k}^{(g)}(t_r^* - t_{d,k}) = F((t_r^* - t_{d,k}) / t_{y,x,k}^{(g)}), \quad g = 1, 2, 3;$$

$$P_{y,x,k}^{(g)}(t_{d,k}) = F(t_{d,k} / t_{y,x,k}^{(g)}), \quad g = 1, 2, 3;$$

$$P_{y,x}^{(j)}(t_r^*) = F(p_{y,x}^{(j)} \cdot t_r^* \cdot L_i), \quad j = 4, 5.$$

(14)

В соотношениях (14) использованы следующие обозначения:

$t_{y,x,k}^{(g)}$; $g = 1, 2, 3$ - предельное время эксплуатации конструктивных элементов с y -дефектами, обнаруженными при k -ом диагностическом обследовании участка методами внутритрубной и внешней технической диагностики объекта;

$P_{y,x}^{(4)}$ - удельная вероятность появления потенциальных растущих y - дефектов x -ого расчетного участка, экспертное значение которой прогнозируют по результатам косвенных методов наружной диагностики, по результатам анализа проектной, исполнительной и эксплуатационно-технической документации и статистики разрушений по дефектам вида "у", $y = 1, \dots, Q$ в процессе эксплуатации аналогичных участков в заданном районе;

$P_{y,x}^{(5)}$ - удельная вероятность появления потенциальных механических воздействий на конструктивные элементы x -ого расчетного участка в результате деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары);

$F = F(z)$ - функции распределения вероятности y -ого макроразрушения участка.

Литература

1. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. - М.: Недра, 1992, 271с.
2. Методика оценки сроков службы газопроводов. - М.: ИРЦ ОАО Газпром, 1997, 84 с.
3. Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании. - М.: ИРЦ Газпром, 2002, 160 с.
4. Машиностроение. Энциклопедия. Том IV. Надежность машин. Глава 4.7. Надежность газонефтепроводов. 1998, с. 525-585.
5. Завойчинский Б.И., Федоров М.С., Завойчинская Э.Б. Проектная оценка долговечности и безопасности подземных трубопроводов. Доклады участников второй международной конференции «Безопасность трубопроводов». - М.: 1997, с. 23-32.
6. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. О критерияльных условиях оценки социальной, промышленной и экологической безопасности трубопроводов. Доклады участников третьей международной конференции «Безопасность трубопроводов». - М.: 1999, том 1, с. 113-123.
7. Завойчинская Э.Б., Завойчинский Б.И. Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов (в четырех частях). Справочник. Инженерный журнал. Изд-во "Машиностроение". часть 1, № 5, 1998, с. 48-52; часть 2, №6, 1998, с.41-47; часть 3, № 1, 1999, с. 31-40; часть 4, №4, 1999, с.47-51.
8. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика оценки остаточного срока службы и периодичности проведения диагностики технического состояния трубопроводов (в четырех частях): Контроль. Диагностика. Изд-во "Машиностроение": часть 1. Определение вероятности разрушения и сроков безопасной эксплуатации и очередного обследования участка трубопровода. № 5 (95) 2006, с. 15 - 23; часть 2. Промышленная безопасность и приемлемый конструкционный риск участка. № 8 (98), 2006, с. 54 - 61; часть 3. Классификация трубопроводов по продолжительности эксплуатации и принципиальная схема расчета и срока службы. № 6 (108), 2007, с. 43-49; часть 4. Теоретические основы метода прогнозирования ресурса трубопровода на стадиях проектирования и эксплуатации. № 8 (110), 2007, с 36-45.
9. E.B.Zavoichinskaya, B.I.Zavoichinskiy. Estimation of Structure Durability using the State Diagnostic and Safety Requirements. / Engineering & Automation problems. International Journal. v. 5, № 1, 2006 p. 70-76.
10. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Теоретические основы экспертной оценки сроков службы газопроводов на стадии проектирования./ Газовая промышленность. № 8, 2007, с. 82-86.
11. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Методика экспертной оценки срока службы газопроводов на стадии проектирования./ Газовая промышленность. № 12, 2007, с. 35-38.

B.I. Zavoichinskiy, E.B. Zavoichinskaya

GENERAL THEORY OF LENGTHY STRUCTURES USING IN THE COMPLEX NATURAL CONDITIONS

An approach to estimate of lengthy structures design durability (a design phase) and recommended durability (an operation phase) is given. The theory is the problem of lengthy structures durability theory in probability statement. For solution the postulate of structure fracture probability is formulated.

There is presented the theoretical basis of a method of design structure durability determination provided for industrial safety requirements of dangerous structures operation and recommended durability by using of the technical diagnostics results.

Keywords: lengthy structures, design durability, fracture probability, industrial safety requirements, technical diagnostics.