

УДК 539.4

DOI: 10.31799/978-5-8088-1556-8-2021-16-98-105

**Э. Б. Завойчинская\***

доктор физико-математических наук, доцент

\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

## О МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИАГНОСТИКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Поставлена и решена задача об определении срока службы конструкций трубопроводов по результатам расчета срока службы его конструктивных элементов на стадии проектирования и остаточного срока службы элементов с дефектами, установленными диагностическими исследованиями, с учетом требований социальной и экологической безопасности. Выписываются определяющие соотношения для функции распределения вероятности разрушения конструкции (высший иерархический уровень) через функции распределения вероятности разрушения ее типовых конструктивных элементов (низший уровень). Срок службы элемента предлагается определять по теории предельных процессов нагружения и стохастической модели усталостного масштабного-структурного разрушения. В предположении, что вероятность разрушения не превышает приемлемого значения (критерий конструктивной надежности), выписываются уравнения для определения срока службы и остаточного срока службы конструкции. Предлагаются выражения для расчета техногенных и антропогенных рисков при разрушении конструкции и критерии для определения долговечности с их учетом, являющиеся обобщением известных соотношений, используемых в расчетной практике при проектировании и на стадии эксплуатации различных участков трубопроводов.

**Ключевые слова:** конструктивная надежность, безопасность эксплуатации, срок службы, функция распределения вероятности разрушения.

**E. B. Zavoychinskaya\***

Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor

\* Moscow State University named after M. V. Lomonosov

## ON THE METHOD FOR ESTIMATION OF PIPELINE DURABILITY TAKING INTO ACCOUNT DIAGNOSTIC RESULTS OF TECHNICAL CONDITION AND SAFETY

The problem of determining of pipeline structure durability based on the results of calculation of its structural element service life at the design stage and the residual service life of elements with defects established by diagnostic explorations and taking into account the requirements of social and environmental safety is formulated and solved. There are proposed relations for the structure failure probability distribution function (the highest hierarchical level) through the failure probability distribution function of its similar structural elements (the lowest hierarchical level). The element durability is proposed to determine according to the theory of failure loading processes and a stochastic model of scale-structural fatigue. Assuming that the failure probability should not exceed its acceptable value (the criterion of structural reliability), the equations for finding of the service and the residual life are written. The ratios for the determination of technogenic and anthropogenesis risks at structure destruction and criteria of durability determining, taking them into account, are given. These criteria are the theoretical generalization of the known relations used in design practice on project and operation stages of pipeline various sections.

**Keywords:** structural reliability, safe operation, durability, failure probability distribution function.

### Введение

Целью настоящего исследования является развитие экспериментальных и теоретических основ стохастического метода оценки долговечности и периодов диагностики технического состояния различных участков трубопроводов, находящихся под действием внутреннего давления перекачиваемого продукта, действию массовых сил, температурного поля и природно-климатических и техногенных воздействиях. Методологической базой разработки предлагае-

мого метода являются работы отечественных и зарубежных ученых по фундаментальному научному направлению техногенной безопасности эксплуатации различных конструкций [1–3]. Рассматриваются три основные техногенные сферы, являющиеся жертвами разрушения конструкций: люди, объекты техносферы и природной среды, и, соответственно, вводятся понятия техногенных рисков: вероятности поражения людей (социальный риск), вероятности разрушения промышленных объектов (промышленный риск) и вероятности уничтожения флоры и

фауны (экологический риск), находящихся в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции при ее потенциальном разрушении. Современное развитие проблемы оценки безопасности идет по следующим основным направлениям: разработка критериев конструкционной надежности конструкций; исследование вероятностей появления и распространения негативных факторов поражения при разрушении конструктивных элементов; оценка социальных, промышленных и экологических рисков на основе обобщения данных по текущему состоянию участка по потенциальным и реализовавшимся рискам; установление приемлемых рисков; разработка компьютерного моделирования определения долговечности и остаточного срока службы конструкций с учетом социальных, промышленных и экологических рисков; создание методов управления долговечностью; расчет потенциального экономического ущерба при строительстве и эксплуатации конструкций.

Характер изменения эксплуатационных нагрузок, существенная неоднородность механических характеристик материалов, вариация конструктивных технологических факторов, а также необходимость учета дефектов технологического и эксплуатационного происхождения делает необходимым применение вероятностных методов оценки долговечности и трещиностойкости элементов конструкций. В расчет долговечности вводятся вероятностные параметры свойств материала (характеристики раскрытия трещины, кривой Велера, уравнения Коффина – Мэнсона и соотношения Пэриса, предел текучести и др.), рассматриваются случайные стационарные процессы нагружения [2, 4–8]. Одним из основных направлений современного развития является создание алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса элементов конструкции на основании устанавливаемых закономерностей развития процесса разрушения на микро-, мезо- и макроуровнях [6–8].

Метод оценки долговечности конструкций типа трубопроводов основывается на блочно-иерархическом подходе, согласно которому выделяется несколько иерархических конструктивных уровней, и оценка сроков службы производится последовательно от низшего к высшему иерархическим конструктивных уровням [4, 5, 9–12]. Конструкцию (высший иерархический уровень) условно разбивают на крупные макро-

сегменты  $k$ -тые расчетные участки (фрагменты и т. п.) с линейными размерами  $l_k$ ,  $k=1, \dots, K$ ,  $\sum_{k=1}^K l_k = L_0$  ( $L_0$  – общий линейный размер конструкции) по

функционально-конструкторскому принципу (средний иерархический уровень): линейные участки с ответвлениями и лупингами; переходы через естественные и искусственные препятствия (автодороги, железные дороги, воздушные переходы через водные преграды, овраги, подводные переходы и т. п.); узлы подключения других конструкций; конструкции газо- и нефтеизмерительных станций; установки регенерации газа; узлы пуска и приема очистных устройств; конструкции головных и промежуточных перекачивающих и насосных станций и др. Макросегменты состоят из расчетных сегментов – конструктивных элементов (низший иерархический уровень), для которых внутренние и внешние нагрузки и воздействия приближенно могут рассматриваться как однородные. Каждый участок состоит из значительного количества  $n_{k,q}$  ( $n_{k,q} \geq 5 \cdot 10^2$ )  $q$ -х типовых конструктивных элементов,  $q=1, \dots, Q$  с характерными линейными размерами  $l_q$  (основной металл, кольцевое и продольное сварные соединения, тройниковые соединения, отводы, переходники, днища).

Расчет долговечности  $t_{f,k,q}$   $q$ -го элемента  $k$ -го участка проводится по теории предельных процессов нагружения [4], теории усталостного масштабного-структурного разрушения [6, 8–13] и известным методам механики разрушения. Долговечность трубопроводов при эксплуатационном нагружении описывается случайными процессами, которые учитывают потенциальное стохастическое разрушение элементов, случайное механическое нагружение, случайные природные воздействия окружающей среды и т. д. Поэтому выбирается стохастический подход и методы теории случайных процессов и статистического анализа. В качестве инструментария для численных экспериментов и решения практических задач применяются методы конечных элементов программного комплекса ANSYS.

Регламент эксплуатации трубопроводов предусматривает проведение комплексной диагностики технического состояния в процессе эксплуатации. Диагностика участка или нескольких участков трубопровода (средний иерархический уровень) проводится различными методами: фотограмметрической, цветной, многозональной, инфракрасной и радиочастотной съемкой с привлечением аэрокосмической и вертолетной съемки; физическими неразрушающими методами диагностики (эховибрационными, инфракрасного излучения, электрометрическими, рентгеновскими, радиоактивного излучения); методами измерения твердости поверхностных слоев металла; магнитными и ультразвуковыми методами (при пропуске интел-

лектуальных снарядов); механическими потенциально разрушающими методами диагностики при условии, когда испытательное нагружение конструкций выше рабочего нагружения на 25–50%. Создаются базы данных обнаруженных дефектов конструктивных элементов,  $q$ -й элемент  $k$ -го участка может содержать дефекты  $j$ -го вида,  $j=1, \dots, J$ , имеющие механическое, технологическое и эксплуатационное происхождение, выявленные при  $r$ -м диагностическом исследовании,  $r=1, \dots, R$ .

Крупномасштабные разрушения трубопроводов обусловлены стохастическими процессами развития во времени трещин в основном металле, кольцевых и продольных сварных соединениях конструктивных элементов, коррозионных и стресс-коррозионных трещин, коррозионной потери металла, расслоения металла, образования рисок, вмятин, гофр в стенке элементов. Дефекты могут находиться средствами внутритрубной и наружной диагностики с определенной достоверностью, а также определяться по результатам предыдущей эксплуатации участка и по статистике аварий на аналогичных участках. Каждый вид дефектов обуславливает соответствующий поток разрушения конструктивных элементов. По теории предельных процессов нагружения [4] и теории усталостного масштабного-структурного разрушения [6] проводится расчет остаточного срока службы  $\Delta t_{f,k,q,j}$   $q$ -го элемента  $k$ -го участка с дефектом  $j$ -го вида.

### Критерий конструктивной надежности

Вводится функция распределения вероятности разрушения конструкции (конструкционный риск)  $Q = Q(\tau)$ ,  $0 \leq Q \leq 1$ , в момент времени  $\tau$ ,  $\tau \in [0, t]$  [8 – 12]. Также рассматривается функция распределения вероятности разрушения  $k$ -го участка,  $k=1, \dots, K$ ,  $Q_k = Q_k(\tau)$  и функция распределения вероятности разрушения  $n_{k,q}$   $q$ -х элементов,  $q=1, \dots, Q$ ,  $k$ -го участка.  $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$

Предполагается, что функция  $Q = Q(\tau)$  определяется через  $Q_k = Q_k(\tau)$  следующим образом:  
оптимистический сценарий

$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^K \left( \frac{Q_k(\tau)}{1 - Q_k(\tau)} \right) \prod_{k=1}^K [1 - Q_k(\tau)] \quad (1)$$

пессимистический сценарий

$$Q(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - Q_k(\tau)] \quad (2)$$

Выражение (1) определяет сумму независимых событий – разрушений  $k$ -го участка при от-

сутствии разрушения остальных участков. Выражение (2) определяет сумму независимых событий – разрушений по крайней мере  $k$ -го участка. Аналогично имеем:

оптимистический сценарий

$$Q(\tau) = \sum_{q=1}^Q \left( \frac{Q_{k,q}(\tau)}{1 - Q_{k,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,q}(\tau)] \quad (3)$$

пессимистический сценарий

$$Q_k(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,q}(\tau)] \quad (4)$$

Функцию распределения вероятности разрушения  $Q_{k,q} = Q_{k,q}(\tau)$  предлагается описывать распределением типа Пуассона по первому разрушению  $q$ -го элемента в следующем виде:

$$Q_{k,q}(\tau) = \varphi_{k,q}(\tau) e^{-\varphi_{k,q}(\tau)},$$

$$\varphi_{k,q}(\tau) = \lambda_q l_q n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,q}} \tau, \quad q=1, \dots, Q, \quad k=1, \dots, K \quad (5)$$

В выражение (5) входит параметр  $\tilde{t}$  – экономически и социально приемлемый срок службы конструкции, назначаемый нормами проектирования объектов. Например, для магистральных трубопроводов  $\tilde{t}$  находятся в интервале 35÷45 лет, для обвязочных трубопроводов – 60÷65 лет, для промысловых трубопроводов – 15÷20 лет. Под  $\lambda_q$  обозначены коэффициенты интенсивности потока разрушений  $q$ -го элемента, т.е. количество разрушений  $q$ -го элемента в единицу времени (год) на единицу длины (км), известные по статистике разрушений при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях. Для тройниковых соединений в качестве  $\lambda_q$  рассматривается количество разрушенных элементов в единицу времени к общему количеству элементов и в выражение (5) не входит величина  $l_q$ .

Критерий конструктивной надежности конструкции формулируется таким образом:

$$Q(\tau) \leq \tilde{Q}, \quad (6)$$

при условии  $t_{f,k,q} \geq \tilde{t}$ ,  $k=1, \dots, K$ ,  $q=1, \dots, Q$ , функция  $Q = Q(\tau)$  определяется по (1) – (5);  $\tilde{Q}$  – приемлемый конструкционный риск согласно проекта. Срок службы конструкции  $t_f$  определяется как решение уравнения:

$$Q(t_f) = \tilde{Q} \quad (7)$$

Функция распределения вероятности разрушения конструкции  $Q_R = Q_R(\tau)$ ,  $t_R \leq \tau$  ( $t_R$  – суммарное время всех  $R$  нормативных диагностик), после проведения  $R$  нормативных диагностик ее технического состояния и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами определяется через функции распределения вероятности разрушения  $k$ -го участка после  $R$  диагностик  $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$  согласно (1), (2) следующим образом:

оптимистический сценарий

$$Q_R(\tau) = \sum_{k=1}^K \left( \frac{Q_{k,R}(\tau)}{1 - Q_{k,R}(\tau)} \right) \prod_{k=1}^K [1 - Q_{k,R}(\tau)] \quad (8)$$

пессимистический сценарий

$$Q_R(\tau) = 1 - \prod_{k=1}^K [1 - Q_{k,R}(\tau)]. \quad (9)$$

Соответственно для  $Q_{k,R} = Q_{k,R}(\tau)$  имеем следующие выражения:

оптимистический сценарий

$$Q_{k,R}(\tau) = \sum_{r=1}^R \left( \frac{Q_{k,r}(\tau)}{1 - Q_{k,r}(\tau)} \right) \prod_{r=1}^R [1 - Q_{k,r}(\tau)], \quad (10)$$

пессимистический сценарий

$$Q_{k,R}(\tau) = 1 - \prod_{r=1}^R [1 - Q_{k,r}(\tau)], \quad (11)$$

где функция распределения вероятности разрушения  $k$ -го участка, выявленного  $r$ -м диагностическим обследованием  $r=1, \dots, R$ ,  $Q_{k,r} = Q_{k,r}(\tau)$  выражается через функцию распределения вероятности разрушения  $q$ -х элементов  $k$ -го участка, выявленного при  $r$ -м диагностическом обследовании  $Q_{k,r,q} = Q_{k,r,q}(\tau)$  в виде:

оптимистический сценарий

$$Q_{k,r}(\tau) = \sum_{q=1}^Q \left( \frac{Q_{k,r,q}(\tau)}{1 - Q_{k,r,q}(\tau)} \right) \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,r,q}(\tau)] \quad (12)$$

пессимистический сценарий

$$Q_{k,r}(\tau) = 1 - \prod_{q=1}^Q [1 - Q_{k,r,q}(\tau)] \quad (13)$$

Функция распределения вероятности разрушения  $n_{k,q}$   $q$ -х элементов  $k$ -го участка, выявленного  $r$ -м диагностическим обследованием,  $Q_{k,r,q} = Q_{k,r,q}(\tau)$  определяется через функцию распределения вероятности разрушения  $n_{k,q}$   $q$ -х элементов  $k$ -го участка по дефекту  $j$ -го вида, вы-

явленном при  $r$ -м диагностическом обследовании,  $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$  так:

оптимистический сценарий

$$Q_{k,r,q}(\tau) = \sum_{j=1}^J \left( \frac{Q_{k,r,q,j}(\tau)}{1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)} \right) \prod_{j=1}^J [1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)] \quad (14)$$

пессимистический сценарий

$$Q_{k,r,q}(\tau) = 1 - \prod_{j=1}^J [1 - Q_{k,r,q,j}(\tau)] \quad (15)$$

И, наконец, для  $Q_{k,r,q,j} = Q_{k,r,q,j}(\tau)$  имеем следующие выражения:

$$Q_{k,r,q,j}(\tau) = \varphi(\tau) e^{1 - \varphi(\tau)},$$

$$\varphi(\tau) = \lambda_{r,q,j} l_q n_{k,q} \frac{\tilde{t}}{\Delta t_{f,k,q,j}} \tau, \quad (16)$$

в которых  $\lambda_{r,q,j}$  – коэффициенты интенсивности потока разрушений, т. е. количество разрушений  $q$ -го элемента по дефекту  $j$ -го вида, выявленное  $r$ -м диагностическим обследованием или известное по статистике разрушений (в этом случае примем  $r=1$ ) в единицу времени (год) на единицу длины (км).

Критерий конструктивной надежности конструкции после проведения  $R$  нормативных диагностик ее технического состояния и замене конструктивных элементов с недопустимыми дефектами формулируется таким образом:

$$Q_R(\tau) \leq \tilde{Q} \quad (17)$$

где функция  $Q_R = Q_R(\tau)$  определяет конструкционный риск на интервале  $[t_R, t]$  по (8)–(16);  $\tilde{Q}$  – приемлемый конструкционный риск согласно проекта. Остаточный срок службы конструкции  $\Delta t_f$  определяется согласно (7) как решение уравнения:

$$Q(\Delta t_f) = \tilde{Q} \quad (18)$$

#### Определение долговечности конструктивного элемента

Нагружение трубопровода внутренним давлением падает от компрессорной станции по длине, происходят случайные и плановые (в зависимости от объема потребления) колебания давления с амплитудой до 10–15% от максимального значения. Экспериментально обнаружено, что эти колебания определяют разрушение конструктивных элементов, особенно в зонах концентрации напряжений. Зависимость давления от времени предлагается рассматри-

вать в виде конечного ряда Фурье [9–12]. Нагружение  $q$ -го элемента  $k$ -го участка внутренним давлением можно представить кольцевым  $\sigma_{\theta\theta,q}(k,\tau) \equiv \sigma_{1,q}(k,\tau)$  и осевым  $\sigma_{zz,q}(k,\tau) = \sigma_{2,q}(k,\tau)$ , напряжениями на интервале времени  $\tau \in [0, t]$  следующим образом:

$$\begin{cases} \sigma_{1,q} = K_{\theta,q} \sigma_{\theta} f(l_k) \left( \alpha + \sum_{s=1}^4 \sigma^s \sin \omega_s \tau \right) \\ \sigma_{zz,q} = K_{z,q} \left( \frac{\nu \sigma_{1,q}(\tau)}{K_{\theta,q}} + \sigma_z(k) \right) \end{cases},$$

$$k=1, \dots, K, q=1, \dots, Q, \tau \in [0, t]; \quad (19)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p(R - \delta^*)}{\delta^*}, f(l_k) = 1 - C_k \frac{l_k}{L_0},$$

$$\sigma_z(k) = E \left[ -\alpha T_k \pm R \sqrt{\frac{1}{\rho_{1,k}^2} + \frac{1}{\rho_{2,k}^2}} \right],$$

$$T_k = T_0 \left( 1 - \beta \frac{l_k}{L_0} \right),$$

$p$  – рабочее (нормативное) давление перекачиваемого продукта,  $\delta^*$  – толщина стенок с определенными допусками,  $R$  – радиус основной трубы,  $\alpha$ ,  $\sigma^s$  – параметр асимметрии и амплитуды напряжений соответственно,  $\omega_s$  – частота,

$$\omega_s = 10^s \left[ \frac{\text{ЦИКЛОВ}}{\text{ГОД}} \right], s=1, \dots, 4, T_k, T_0 – рабочая и$$

начальная температура после строительства,  $0,25 \leq C_k \leq 0,35$  – коэффициент, учитывающий скорость падения средних значений внутреннего давления газа,  $0 \leq \beta \leq 0,55$  – коэффициент, учитывающий скорость падения температуры стенок элементов по длине участка,  $\rho_{1,k}$ ,  $\rho_{2,k}$  – радиусы изгиба оси участка при его укладке,  $K_{\theta,q}$  и  $K_{z,q}$  – коэффициенты концентрации напряжений в тангенциальном и осевом направлении соответственно.

Для определения функции распределения вероятности разрушения  $q$ -го элемента

$$Q_q = Q_q(\tau), 0 \leq Q_q \leq 1, \tau \in [0, t], q=1, \dots, Q,$$

при однородном нагружении элемента предлагается следующее определяющее соотношение [4, 9–12]:

$$Q_q(\tau) = \frac{\sigma_{\theta} f(l_k) \alpha^2}{\Pi_1(\tau, k)} + \frac{|\sigma_z(k) + \nu \sigma_{\theta} f(l_k) \alpha|}{\sqrt{\Pi_1(\tau, k) \Pi_2(\tau, k)}} + \frac{(\sigma_z(k) + \nu \sigma_{\theta} f(l_k) \alpha)^2}{\Pi_2(\tau, k)} \quad (20)$$

$$\Pi_1(\tau) = \alpha \sigma^*(\tau) + \sum_{s=1}^4 \sigma^s \sigma_{-1}(\tau, \omega_s), \Pi_2(\tau) = \nu \sigma_{\theta} f(l_k) \Pi_1(\tau) + |\sigma_z| \sigma^*(\tau)$$

где  $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\tau, \omega_s)$  – кривая усталости по уровням дефектности или по полному разрушению (с учетом развития трещин по механике разрушения) при симметричном одноосном нагружении основного металла,  $\sigma^* = \sigma^*(\tau)$  – кривая длительной прочности основного металла (или  $\sigma^* = \sigma_{\theta p}^*, \sigma_{\theta p}$  – временное сопротивление).

Для  $q$ -ого элемента при неоднородном нагруженном состоянии определяющее соотношение для функции распределения вероятности разрушения  $Q_q = Q_q(\tau)$  записывается так:

$$Q_q(\tau) = R_q(\tau, k) + \sqrt{R_{1,q}(\tau, k) R_{2,q}(\tau, k)} + R_{2,q}(\tau, k), \quad (21)$$

$$R_{1,q}(\tau, k) = K_{\theta,q} \sigma_{\theta} f(l_k) \times \left( \frac{\alpha}{\sigma_q^*(\tau, K_{\theta,q})} + \sum_{s=1}^4 \frac{\sigma^s}{\sigma_{-1,q}(\tau, \omega_s, K_{\theta,q})} \right),$$

$$R_{2,q}(\tau, k) = K_{z,q} \left( \frac{\nu R_{1,q}(\tau, k)}{K_{\theta,q}} + \frac{|\sigma_z(k)|}{\sigma_q^*(\tau, K_{z,q})} \right)$$

где  $\sigma_{-1,q} = \sigma_{-1,q}(\tau, \omega_s, K_{\theta,q})$  – экспериментально определяемая предельная амплитуда кольцевого напряжения  $q$ -го элемента с концентратором по уровням дефектности или по полному разрушению (с учетом развития трещин по механике разрушения) при симметричном внутреннем давлении,  $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau, K_{\theta,q})$ ,  $\sigma_q^* = \sigma_q^*(\tau, K_{z,q})$  – экспериментально определяемые предельные кольцевые и осевые напряжения  $q$ -ого элемента с концентратором при внутреннем давлении.

Параметр асимметрии  $\alpha$  и амплитуды  $\sigma^s$ ,  $s=1, \dots, 4$  являются случайными величинами. Рассматривая различные группы значений  $(\alpha, \sigma^0 \dots \sigma^4)$ ,  $g=1, \dots, G$ , определяется срок службы  $q$ -ого элемента  $k$ -го участка  $t_{f,q,g}$  (в этом пункте  $t_{f,q,g}$  обозначена для простоты  $t_{f,q} = t_{f,q}(k)$ ) из следующих уравнений:

$$Q_q(t_{f,q,g}) = 1, q=1, \dots, Q, g=1, \dots, G, \quad (22)$$

где для  $Q_q = Q_q(\tau)$  имеем (20), (21). Далее в качестве срока службы  $t_{f,q}$   $q$ -го элемента  $k$ -го участка рассматривается минимальное значение из сроков службы  $t_{f,q,g}$ :

$$t_{f,q} = \min \{ t_{f,q,g}, g=1, \dots, G \} \quad (23)$$

Аналогично находится остаточный срок службы  $q$ -го элемента  $k$ -го участка по  $j$ -му разрушению  $\Delta t_{f,q,j}$ . Для функции распределения вероятности разрушения  $q$ -го элемента по  $j$ -му разрушению  $Q_{q,j} = Q_{q,j}(\tau)$ ,  $0 \leq Q_{q,j} \leq 1$ ,  $\tau \in [0, t]$ ,  $q = 1, \dots, Q$ ,  $j = 1, \dots, J$ , справедливы соотношения (20), (21), при этом все экспериментально определяемые кривые строятся для элемента с дефектом  $j$ -го вида.

### О безопасности эксплуатации конструкций

На основе анализа литературных источников и нормативных документов выделяются следующие основные негативные факторы поражения при разрушении конструкций продуктопроводов: токсическое воздействие от истечения перекачиваемых токсических жидкостей и газов ( $i=1$ ); термическое воздействие при возгорании струи газа, истекающего из сквозной трещины ( $i=2$ ); термическое воздействие при загорании облака газозооушной смеси ( $i=3$ ); ударные воздушные волны, обусловленные расширением газа и продуктов его сгорания ( $i=4$ ); поражение от разлета фрагментов разрушенных конструктивных элементов ( $i=5$ ). Эти факторы возникают с вероятностью  $J_i$ ,  $i=1, \dots, 5$ , которая определяется в отрасли по статистике их появления при разрушении аналогичных конструкций.

Рассматриваются известные понятия: социального риска  $I_1, 0 \leq I_1 \leq 1, \tau \in [0, t]$ , – вероятности поражения человека, промышленного риска  $I_2, 0 \leq I_2 \leq 1, \tau \in [0, t]$ , – вероятности разрушения промышленных объектов, находящихся в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции, экологического риска уничтожения флоры  $I_3, 0 \leq I_3 \leq 1, \tau \in [0, t]$  – вероятности уничтожения флоры, растущей в потенциально-опасной зоне вблизи конструкции, и экологического риска уничтожения фауны  $I_4, 0 \leq I_4 \leq 1, \tau \in [0, t]$  – вероятности уничтожения фауны при строительстве и эксплуатации конструкции. Нормами и ГОСТами для конкретных конструкций определяются приемлемые значения  $\tilde{I}_m, m=1, \dots, 4$ , социального, промышленного и экологического рисков как их приемлемое количество при разрушении конструкции в течении приемлемого срока службы  $\tilde{t}$ .

Согласно развиваемому подходу [4 – 12] критерии безопасности с учетом социальных, промышленных и экологических рисков при эксплуатации конструкций предлагается записывать следующим образом:

$$Q(\tau)I_m(\tau) \leq \tilde{Q}\tilde{I}_m, m=1, \dots, 4 \quad (24)$$

оптимистический сценарий

$$I_m = \sum_{i=1}^5 \left( \frac{J_i I_{m,i}}{1 - J_i I_{m,i}} \right) \prod_{i=1}^5 [1 - J_i I_{m,i}], \quad (25)$$

пессимистический сценарий

$$I_m = 1 - \prod_{i=1}^5 [1 - J_i I_{m,i}], \quad (26)$$

$$I_{m,i} = \max \left\{ \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} \rho_m(r, \theta) I_i(r, \theta, \tau) r dr d\theta : 0 \leq \tau \leq t_i \right\}, \quad (27)$$

$$m = 2, 3,$$

$$I_{m,i} = \max \left\{ \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} \left( \rho_m(r, \theta, \xi) I_i(r, \theta, \tau) r dr d\theta : \begin{matrix} 0 \leq \xi \leq t_p; \\ 0 \leq \tau \leq t_i \end{matrix} \right) \right\}, \quad (28)$$

$$m = 1, 4,$$

$$I_1(r, \theta, \tau) = a_1 \ln \left\{ \left( \frac{D(r, \theta, \tau)}{D_1} \right)^2 \frac{\tau}{t_1} \right\}, \quad (29)$$

$$0 \leq \tau \leq t_1, a_1, D_1 = \text{const},$$

$$I_2(r, \tau) = a_2 \ln \left\{ \left( \frac{q(r, \tau)}{q_2} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_2} \right\}, \quad (30)$$

$$0 \leq \tau \leq t_2, a_2, q_2 = \text{const},$$

$$I_3(r, \tau) = a_3 \ln \left\{ \left( \frac{q(r, \tau)}{q_3} \right)^{4/3} \frac{\tau}{t_3} \right\}, \quad (31)$$

$$0 \leq \tau \leq t_3, a_3, q_3 = \text{const},$$

$$I_4(r, \tau) = a_4 \ln \left\{ \left( \frac{p_0}{p(r, \tau)} \right)^\alpha + \left( \frac{I_0}{I(r, \tau)} \right)^\beta \right\}, \quad (32)$$

$$0 \leq \tau \leq t_4, a_4, p_0, I_0, \alpha, \beta = \text{const},$$

$$I_5(r) = a_4 + b_5 \left\{ \left( \frac{mv(r, \tau)}{I_0} \right)^2 \right\}, \quad (33)$$

$$0 \leq \tau \leq t_5, a_5, b_5, I_0 = \text{const},$$

где  $(r, \theta)$  – полярная система координат с центром в точке  $i$ -го негативного фактора,  $\rho_m = \rho_m(r, \theta, t)$  – функция распределения плотности людей, промышленных объектов, представителей флоры и фауны в зоне  $[0, r_0]$  в зависимости от времени,  $r_0$  – радиус действия  $i$ -го негативного фактора,  $t_i$  – время действия  $i$ -го негативного фактора. Функция  $D = D(r, \theta, t)$  в (29) – удельная концентрация (отнесенная к единице объема) токсического вещества в точке  $(r, \theta)$  в

момент времени  $\tau$ , зависящая от плотности газа, средней скорости ветра, интенсивности и длительности выбросов и определяемая методами гидроаэродинамики; константы  $(\alpha_1, D_0, t_1)$  лежат в таких диапазонах:

$$0,2 \leq \alpha_1 \leq 2,5;$$

$$7 < -\alpha_1 \ln(D_1^2 t_1) < 60; \quad 0,2 \leq \alpha_1 \leq 2,5.$$

Функция  $q = q(r, \tau)$  в (30) и (31) – удельный тепловой поток в точке  $r$  в момент времени  $\tau$ ,  $t_2$  – полное время горения струи,  $t_3$  – время существования огневого шара, константа  $a_3$  выбирается равной  $a_3 = 2,5$ . В выражении (32) функции  $p = p(r, \tau)$  и  $I = I(r, \tau)$  соответственно импульс и максимальное избыточное давление на фронте волны (в зависимости от расстояния  $r$  от центра взрыва) и  $t_4$  – время действия взрывной волны, коэффициенты

$$a_4 = -0,2, \quad p_0 = 40 \text{ МПа},$$

$$I_0 = 450 \text{ кг} \cdot \text{м/с},$$

$$\alpha = 7,5, \quad \beta = 11,5.$$

В (33) параметры  $m$  и  $v = v(r, \tau)$  соответственно масса и скорость фрагмента и  $t_5$  – время разлета фрагментов находятся из решения задачи об ударном разрушении сосудов давления; параметры  $a_5 = 10,5$ ,  $b_5 = -21$

Для газопроводов Российской Федерации федеральные приемлемые риски эксплуатации в течение приемлемого срока службы следующие:

$$\tilde{I}_1 = \left(2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}\right) \left[ \frac{\text{число людей}}{\text{км}} \right] \cdot L_0,$$

$$\tilde{I}_2 = \left(10^{-3} - 10^{-4}\right) \left[ \frac{\text{число объектов}}{\text{кв. км}} \right] \cdot S_0,$$

$$\tilde{I}_3 = \left(10^{-1} - 10^{-2}\right) \left[ \frac{\text{число представителей флоры}}{\text{кв. км}} \right] \cdot S_0,$$

$$\tilde{I}_4 = \left(10^{-2} - 10^{-3}\right) \left[ \frac{\text{число представителей фауны}}{\text{кв. км}} \right] \cdot S_0,$$

$S_0$  – площадь потенциально опасной зоны.

Сроки службы конструкции  $t_{f,m}$  с учетом социальных, промышленных и экологических рисков соответственно находятся как решение уравнений:

$$Q(t_{f,m}) = \frac{\tilde{I}_m}{I_m} \tilde{Q}, \quad m = 1, \dots, 4. \quad (34)$$

Выполняется следующее неравенство:  $t_{f,m} \leq t_f$ , где долговечность  $t_f$  определяется по (7) без учета рисков. Величины  $t_{f,m}$  – сроки службы конструкции с учетом социальных, промышленных и экологических рисков соответственно.

Остаточный срок службы конструкции  $\Delta t_{f,m}$  с учетом социальных, промышленных и экологических рисков соответственно определяется согласно (18) как решение уравнения:

$$Q(\Delta t_{f,m}) = \frac{\tilde{I}_m}{I_m} \tilde{Q}, \quad m = 1, \dots, 4. \quad (35)$$

Предложенный метод был применен при оценке долговечности и безопасной эксплуатации конструкций нефте- и газопроводов. Был подготовлен ряд Заключений о сроках службы и остаточных сроках службы различных участков с определенным уровнем накопленных дефектов [5–12].

#### Библиографический список

1. Махутов Н. А. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М.: Знание, 2018. 1016 с.
2. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / под ред. Н. А. Махутова, Ю. Г. Матвиенко, А. Н. Романова. М.: Ленанд, 2018. 720 с.
3. Махутов Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука, 2017. 724 с.
4. Завойчинский Б. И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. М.: Недра, 1992. 271 с.
5. Машиностроение: энциклопедия. Т. IV-3: Надежность машин / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. С. 525–585.
6. Завойчинская Э. Б. Усталостное масштабное структурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Генезис, 2018. 46 с.
7. Завойчинская Э. Б., Овчинникова Н. В. К оценке долговечности протяженных конструкций в сложных природно-климатических условиях // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А. Г. Горшкова: Материалы XXV Международ. симп. Т. 2. М.: ТРИП, 2019. С. 163–171.

8. *Zavoychinskaya E. B.* A Stochastic Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading // Understanding complex systems. Germany: Springer, 2020. P. 71–89.

9. *Завойчинский Б. И., Завойчинская Э. Б., Волчанин А. В.* Вероятностная оценка остаточных сроков безопасной эксплуатации протяженных конструкций // Справочник. Инженерный журнал. М.: Машиностроение. № 7. 2012. С. 41–46.

10. *Завойчинский Б. И., Гиллер Г. П., Завойчинская Э. Б.* Рекомендации по оценке безопасности и долговечности газопроводов при проектировании. М.: ИРЦ Газпром, 2002. 160 с.

11. *Завойчинский Б. И., Тутнов И. А., Завойчинская Э. Б.* Рекомендации по оценке безопасности магистрального газопровода при проектировании. М.: ИРЦ Газпром, 2000. 105 с.

12. *Завойчинская Э. Б., Завойчинский Б. И.* Теоретические основы и практические подходы анализа безопасности конструкций трубопроводов (в четырех частях) // Справочник. Инженерный журнал. М.: Машиностроение. Ч. 1: № 5. 1998. С. 48–52; Ч. 2: № 6. 1998. С. 41–47; Ч. 3: № 1. 1999. С. 31–40. Ч. 4: № 4. 1999. С. 47–51.

13. *Zavoychinskaya E. B.* On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading // Journal of Physics. 2020. Vol. 1431. P. 012024–012032.