

Российская академия наук
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Научный совет по машиностроению РАН
Российский национальный комитет по теории машин и механизмов
Межведомственный научный совет по трибологии



НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

VII Международной научной конференции
«Фундаментальные исследования и
инновационные технологии в
машиностроении»

Москва
2021

УДК 621.9
ББК 34.5

Редакционная коллегия:

академик Ганиев Р.Ф., д.т.н., проф. Глазунов В.А., д.т.н., проф. Албагачиев А.Ю., д.т.н., проф. Романов А.Н., к.ф.-м.н. Хрущов М.М.

Издание трудов конференции осуществлено при поддержке ООО «Сайнтифик», г. Санкт-Петербург.

Научные труды VII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”. – М.: ИМАШ РАН. – 2021. – 274 с.

В сборник включены статьи, написанные по материалам докладов, представленных на VII Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”, проходившей в онлайн формате с 14 по 16 декабря 2021 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. На конференции были представлены результаты работ по следующим пяти научным направлениям:

1. Робототехника и автоматизация технологических процессов.
2. Инновационные, цифровые и аддитивные технологии в машиностроении.
3. Трибология, триботехнологии и сварка трением.
4. Перспективные конструкционные и трибологические материалы, наноматериалы и покрытия.
5. Проблемы прочности и надежности в инновационном машиностроении.

Организаторы конференции – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Российская академия наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Научный совет по машиностроению РАН, Российский национальный комитет по теории машин и механизмов; Межведомственный научный совет по трибологии; Российский союз научных и инженерных объединений (обществ); Ассоциация технологов–машиностроителей; Ассоциация инженеров–трибологов России.

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-904282-13-4

О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Э.Б. Завойчинская

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; elen@evlogos.com

Представляется метод оценки долговечности и остаточного ресурса участка трубопровода при переменном эксплуатационном нагружении и коррозионных и стресскоррозионных воздействиях. В качестве распределения вероятности разрушения участка рассматривается распределение Пуассона, долговечность участка находится по теории предельных процессов нагружения, теории усталостного масштабного структурного разрушения и известным методам механики разрушения, базовые функции определяются с учетом вида и агрессивности окружающей среды, распределения защитного потенциала и пассивной защищенности (работы защитных покрытий, изоляции, искусственной среды и др.) участка.

Участки продуктопроводов состоят из большого числа конструктивных элементов, находящихся под переменным внутренним давлением перекачиваемого продукта, действием изгибающих и крутильной компонент вектор - момента, продольной и перерезывающих компонент вектор – усилия в поперечных сечениях и температурного поля. Кроме этого, вследствие большой протяженности участки трубопроводов находятся под действием различных природно-климатических и техногенных воздействий вероятностного характера, и возникает задача определения долговечности при эксплуатационном нагружении с учетом воздействий. В процессе эксплуатации возможны экстремальные ситуации в результате изменения этих воздействий, порождающие непроектные предельные напряженно-деформированные состояния. Кроме того, существует проблема больших сроков эксплуатации, например, в настоящее время около 53% магистральных газопроводов эксплуатируется более 30 лет, и возникает проблема определения остаточного ресурса [1-4]. Нормативными документами выделяются следующие виды возможных разрушений: механическое повреждение от деятельности третьих лиц (акты вандализма, механические воздействия землеройной и транспортной техники, взрывы, удары и т.п.), повреждение от техногенных воздействий (при разрушении соседних газонефтепроводов, химических объектов, гидроузлов атомных станций и т.п.), повреждение от аэрогидродинамических и геодинамических воздействий (нарушения почв, природные оползни и др.), повреждение от сейсмических воздействий [5].

С увеличением сроков эксплуатации актуальной становится проблема учета следующих видов электрохимических коррозионных воздействий, в особенности, для участков подземных и морских продуктопроводов [6,7]:

- (1) почвенной коррозии,
- (2) коррозионной активности перекачиваемого продукта,
- (3) коррозии от электромагнитных воздействий блуждающими токами от источников постоянного и переменного токов в зоне «стекания»

блуждающих токов с поверхности трубопровода и (4) биологической коррозии, вызванной жизнедеятельностью микроорганизмов почвы и поверхностных вод (бактериальной и микологической) и др.,

которые проявляются при условии $i_{c.p.} < i_0$, $i_{c.p.}$ – плотность тока катодной защиты, i_0 – плотность предельного диффузионного тока по кислороду. Возникающие в результате этих воздействий дефекты классифицируются на следующие виды:

– коррозия пятнами (мейза-коррозия), образующаяся под отслоившейся изоляцией и при сквозных дефектах изоляции, при $d > t$ ($d = d(\tau)$ – средняя длина проекции дефекта на продольную ось участка, $t = t(\tau)$ – глубина дефекта по толщине участка δ), в т.ч. сплошная равномерная или неравномерная коррозия, характерная для почвенной коррозии и электрокоррозии;

– язвенная коррозия при $d \leq t$ (глубокие каверны), вызывающая разрушение по толщине стенки в виде свищей, характерное для углеродистых сталей магистральных трубопроводов в грунтах, вспучивание и расслоение;

– питтинг при $d \ll t$, характерный для биологической коррозии.

При одновременном воздействии эксплуатационного нагружения (максимальное окружное напряжение до 0.4 предела текучести материала) и коррозионной среды и условия $i_{c.p.} \geq 10i_0$ может иметь место стресс-коррозия (особенно, в областях сварных соединений с очагами в местах скопления неметаллических включений), которая ведет к образованию коррозионно-механических микро- и макротрещин вследствие анодного растворения металла и диффузионного проникновения положительно заряженных ионов водорода в объем материала. Стресс-коррозия относится к наиболее опасным видам разрушений последних лет [4].

Сформулируем критерий безопасности эксплуатации конструкции при переменном нагружении участка и возможных коррозионных разрушениях описанных видов.

Определение долговечности конструкции решается в вероятностной постановке: вводится функция распределения вероятности разрушения конструкции $Q = Q(\tau)$, $0 \leq Q \leq 1$, в момент времени τ , $\tau \in [0, t]$; предлагаются выражения для $Q = Q(\tau)$ через распределения вероятности разрушения k -тых участков от коррозионных воздействий $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j = 1, \dots, 5$, $k = 1, \dots, K$ [5,8]:

$$Q(\tau) = \sum_{k=1}^K \frac{Q_k(\tau)}{1 - Q_k(\tau)} \prod_{k=1}^K (1 - Q_k(\tau)),$$

$$Q_k(\tau) = \sum_{j=1}^5 \frac{Q_{k,j}(\tau)}{1 - Q_{k,j}(\tau)} \prod_{j=1}^5 (1 - Q_{k,j}(\tau))$$

При эксплуатационном нагружении в качестве функции распределения вероятности разрушения $Q_{k,j} = Q_{k,j}(\tau)$, $j = 1, \dots, 4$, выбирается распределение Пуассона (по первому разрушению) в таком виде [9]:

$$Q_{k,j}(\tau) = \varphi_{k,j}(\tau) e^{-\varphi_{k,j}(\tau)}, \quad \varphi_{k,j}(\tau) = \lambda_j l_k \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,j}(v_{k,j})} \tau,$$

где $j = 1$ учитывает развитие почвенной коррозии, $j = 2$ – коррозионную активность перекачиваемого продукта, $j = 3$ – электромагнитную коррозию, $j = 4$ – биологическую коррозию;

l_k – длина k -того участка; \tilde{t} – экономически и социально приемлемый срок службы конструкции, назначаемый нормами проектирования (например, для магистральных трубопроводов \tilde{t} находится в интервале 35–45 лет); $t_{f,k,j}$ – долговечность по достижению критической толщины k -того участка, которая определяется по теории предельных процессов нагружения [10] и теории усталостного масштабно-структурного разрушения [11]; λ_j , $j = 1, \dots, 4$ – коэффициенты интенсивности потока разрушений (достижения критических толщин участков) от соответствующего вида коррозии, известное по статистике при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях, $[\lambda_j] = [(км * год)^{-1}]$, (например, для газопроводов РФ выбираются значения $\lambda_j \leq 8.75 * 10^{-5}$, $j = 1, \dots, 4$); $v_{k,j} = v_{k,j}(\tau)$ – скорость развития соответствующих видов коррозии в процессе работы активной катодной защиты и пассивной защиты (работа защитных покрытий, изоляция, искусственной среды и т.п.) следующего вида:

$$v_{k,j}(\tau) = v_j \frac{(\tau - t_{a,k,j})(\tau - t_{p,k,j})}{\tau^2} h(\tau - t_{a,k,j}) h(\tau - t_{p,k,j}),$$

где под v_j понимаются средние скорости «свободного» изменения глубины дефекта, и, как следствие толщины стенки δ_k , $v_j = d\delta_k / d\tau$,

$t_{a,k,j}$ и $t_{p,k,j}$ – время работы активной (от разности потенциалов) и пассивной (изоляция, напыление и т.п.) защиты от соответствующих видов коррозии, $h = h(y)$ – функция Хевисайда. Действующими нормами ASME [12,13] регламентированы следующие значения допустимых глубины t_a и длины d_a коррозионного дефекта:

$$0.1\delta \leq t_a \leq 0.8\delta, \quad d_a = 1.12 \left(\left[\left(\frac{t_a / \delta}{1.1t_a / \delta - 0.15} \right)^2 - 1 \right] D\delta \right)^{1/2}$$

В реальных условиях ремонту подлежат участки магистральных трубопроводов, имеющие уменьшение толщины стенки до 30% [4]. Из анализа опытных данных по эксплуатации различных участков морских нефтегазовых сооружений следует, что максимальная глубина каверн составляет, в среднем, до 20% толщины стенки.

При эксплуатационном нагружении функции распределения вероятности разрушения от стресскоррозионных дефектов $Q_{k,5} = Q_{k,5}(\tau)$, $j = 5, \dots, 9$, представляются в таком виде [9]:

$$Q_{k,5}(\tau) = \varphi_{k,5}(\tau) e^{-\varphi_{k,5}(\tau)}, \quad \varphi_{k,5}(\tau) = \lambda_5 l_k \frac{\tilde{t}}{t_{f,k,5}} \tau,$$

где λ_5 – коэффициент интенсивности потока разрушений (достижение критических размеров стресскоррозионных дефектов), определяемый по статистике при эксплуатации аналогичных конструкций в аналогичных природно-климатических условиях, $t_{f,k,5}$ – долговечность k -того участка по стресскоррозионным дефектам, состоящее из времени формирования «колоний» макротрещин, их слияния до образования магистральной трещины-лидера и достижения ею критических размеров, которая определяется по теории предельных процессов нагружения, теории усталостного масштабно-структурного разрушения [10,11] и известным методам механики разрушения.

При сплошной поверхностной коррозии, которая приводит к уменьшению толщины стенки с равномерным снижением несущей способности, в уравнение для определения долговечности по теории предельных процессов входит скорость коррозии, и материальными кривыми являются кривые длительной $\sigma_{dl} = \sigma_{dl}(t)$ и усталостной $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\omega, t)$ прочности материала.

В случаях локальной коррозии (мейза-коррозии, язвенной коррозии, питтинга) и стресс-коррозии возникает концентрация напряжений, вызванная коррозионными процессами. В этих случаях в ка-

честве материальных функций теории предельных процессов нагружения рассматриваются кривые длительной $\sigma_{\text{дл}} = \sigma_{\text{дл}}(t, k_1, k_2, k_3)$ и циклической $\sigma_{-1} = \sigma_{-1}(\omega, t, k_1, k_2, k_3)$ прочности материала в зависимости от параметра k_1 , характеризующего вид и агрессивность окружающей среды, параметра k_2 , зависящего от пассивной защищенности, стабильности грунта и его электрического сопротивления и др., и параметра k_3 , определяющего распределение защитного потенциала [9]. Приведем некоторые зависимости для этих коэффициентов:

$$k_1 = e^{\alpha(T-T_*)^2} \sqrt{1 + \beta(pH - pH_*)^2} [(\alpha_1 pH + \alpha) E_h + \beta_1 pH + \beta_2],$$

$$k_3 = 50(D_e R_T)^{1/2} (\rho_T + 4)^{-3/4} (U \ln(L + 2))^{-1} k_3^{(2)} k_3^{(3)},$$

$$T = T(T_g, T_s); \quad 1 < k_i < 2, \quad i = 1, 2, 3,$$

где в общем случае случайные величины: T_g – средняя температура газа, T_s – средняя температура грунта, E_h – окислительно-восстановительный потенциал окружающей среды, pH – показатель кислотности почвы, ρ_T – удельное электрическое сопротивление грунта, R_T – продольное сопротивление участка, U – разность потенциалов труба-земля, вызванная током катодной поляризации. Коэффициент $k_3^{(2)}$ – коэффициент, отражающий наличие анодной защиты, $k_3^{(3)}$ – коэффициент, отражающий влияние блуждающих токов на коррозионные процессы, $\alpha, \beta, \alpha_1, \beta_1, \beta_2, T_*, pH_* = const$, D_e – внешний диаметр участка, L – расстояние от компрессорной станции до участка по ходу транспортируемого продукта. В настоящее время сверх 80% магистральных газопроводов ПАО «Газпром» эксплуатируется сверх нормативных сроков службы защитных покрытий, поэтому параметр k_2 является существенным параметром.

Критерий безопасности эксплуатации формулируется следующим образом: вероятность разрушения конструкции в течение срока ее безопасной эксплуатации не должна превышать социально и экономически приемлемого значения вероятности разрушения в течение социально и экономически приемлемого срока службы конструкции согласно проекта \tilde{Q} [5]:

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

откуда срок службы конструкции t_f с учетом взаимного влияния коррозионного и усталостного процесса разрушения предлагается находить как

решение такого уравнения:

$$Q(t_f) = \tilde{Q}.$$

В качестве примера приводятся результаты расчета проектных сроков безопасной эксплуатации подземного магистрального газопровода, состоящего из участков с типовыми элементами: основной металл с усталостной трещиной, кольцевое и продольное сварные соединения, отвод, переходник и днище с допустимыми дефектами, при переменном нагружении с учетом коррозионных воздействий.

1. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения// под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М.: Ленанд. 2018. 720 с.
2. Махутов Н.А. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М.: МГФ «Знание», 2018. 1016 с.
3. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. 1104 с.
4. Харниновский В.В. Газотранспортная система: исследования конструкций и технического состояния магистральных газопроводов// Вести газовой науки, 2 (44), 2020. с. 162-164.
5. 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.
6. Завойчинская Э.Б., Овчинникова Н.В. К оценке долговечности протяженных конструкций в сложных природно-климатических условиях// в сб. Материалы XXV Межд. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. М.: ООО «ГРП». Т.2. 2019. с. 163-171.
7. Баширзаде С.Р., Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Часть 3. Учет влияния коррозионного износа //Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5, 2017. с.1-16.
8. Завойчинская Э.Б. Оценка долговечности протяженных конструкций при эксплуатационном нагружении// в сб. Научные труды VI Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (ISBN 978-5-904282-08-0) 2019 М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2019. с. 174-176
9. Машиностроение. Энциклопедия. т. IV-3. Надежность машин. Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение. 2003. 585 с.
10. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов (теория, методы расчета, проектирование). М.: Недра, 1992. 271 с.
11. Zavoychinskaya E. Theory of Scale-Structural Fatigue and Structure Durability at Operational Loading, Understanding complex systems, Springer Nature Switzerland AG, 2021. p. 71-89.
12. Pipeline corrosion. Michael Baker Jr., Inc. 2008. 72 p.
13. Managing System Integrity of gas pipelines/ ASME B31.8S-2004-2005/ 61 p.