Научная статья
УДК 621.052.08

Методика прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов технологических и технических систем стартового комплекса с дефектами типа трещин

Дмитрий Николаевич Гула, Виктор Михайлович Моторин

Аннотация. В статье предложена методика прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов систем заправки компонентами ракетного топлива, систем термостатирования, водоснабжения и отопления технологических и технических систем стартового комплекса с дефектами типа трещин, подвергающихся циклическим нагружениям внутренним давлением. В основе данной методики лежат основные положения теории упругости, а также процедуры прогнозирования роста трещин с помощью экспоненциального сглаживания данных временного ряда.

Ключевые слова: прогнозирование; остаточный ресурс; трубопровод; дефект; трещина
Для цитирования: Гула Д.Н., Моторин В.М. Методика прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов технологических и технических систем стартового комплекса с дефектами типа трещин // Вооружение и экономика. 2025. №2(72). С. 37-41.

Original article

Prediction Technique for Crack-Type Defect Pipelines Remaining Life Time of the Launch Complex Technological and Technical Systems

Dmitrii N. Gula, Viktor M. Motorin

Abstract. The article proposes a prediction method for the pipelines remainig life time of rocket fuel components refueling systems, thermostating systems, water and heating supply of launch complex technological and technical systems full of the crack-type defects that are subjected to cyclic loads by internal pressure. This technique is based on fundamental principles of the elasticity theory, as well as procedures for crack growth prediction by time series exponential data smoothing.

Keywords: prediction; remaining life time; pipeline; defect; crack
For citation: Gula D.N., Motorin V.M. Prediction Technique for Crack-Type Defect Pipelines Remaining Life Time of the Launch Complex Technological and Technical Systems. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2025;72(2): 37-41. (In Russ.).

Многообразие и высокая ответственность технологических и технических систем, используемых на космодромах для подготовки и проведения пусков ракет космического назначения, приводит к необходимости постоянного контроля их фактического технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса (ОР) [1; 2]. Опыт эксплуатации показывает, что интенсивность протекания деградационных процессов в металле трубопроводов отличается от интенсивности протекания в остальных элементах технологических и технических систем. Следовательно, работоспособность стартового комплекса может существенно ограничиваться ресурсом трубопроводов систем заправки компонентами ракетного топлива, систем термостатирования, водоснабжения и отопления, подвергающимся циклическим нагружениям внутренним давлением рабочих сред. Как правило, основным последствием взаимодействия деградационных процессов и циклических нагружений внутренним давлением трубопроводов являются дефекты типа трещин.

Исходными данными для прогнозирования ОР трубопроводов с дефектами типа трещин являются:

- результат однократного замера длины трещины l_h или значения временного ряда замеров размеров трещины подконтрольного участка трубопровода $l_1, l_2, \dots, l_t$;
- предел текучести материала трубопровода σ_m;
- толщина и радиус трубопровода;
- разность между наибольшим и наименьшим напряжениями в цикле нагружения;
- критическое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{1c};
- константы материала n, c.

Выходными данными являются величина ресурса элемента трубопровода с трещиной в виде числа циклов N_c, либо величина ресурса элемента трубопровода с трещиной N_c и прогнозируемые значения размеров трещины подконтрольного участка трубопровода на τ шагов вперед $\tilde{l}_\tau(t)$.

Теоретические положения и основные расчетные соотношения

Особенности эксплуатации трубопроводов технологических и технических систем в составе стартовых комплексов и интенсивность их использования по назначению определяют целесообразность прогнозирования ОР с точки зрения протекания деградационных процессов.

Среди всей номенклатуры материалов, из которых изготавливаются оборудование систем заправки компонентами ракетного топлива, систем термостатирования, систем водоснабжения и отопления, наиболее подвержены старению трубопроводы входящие в состав данного оборудования ракетно-космических комплексов.

Условие прочности для элементов трубопровода с трещиной имеет вид:

$$K_1 < K_{1C}, \tag{1}$$

где: K_1 – коэффициент интенсивности напряжений для случаев нормального отрыва, величина которого находится расчетным путем;
K_{1C} – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, определяемое на основе экспериментальных исследований [3].

В окрестности трещины величина коэффициента K_1 определяется по формуле

$$K_1 = \sigma\sqrt{\pi l} f_1, \tag{2}$$

где: σ – нормальное напряжение для трубопроводов, вычисляемое по формуле:

$$\sigma = p\frac{R}{\delta}, \tag{3}$$

где: R – радиус трубопровода;
δ – толщина стенки трубопровода;
p – внутреннее давление;
l – длина трещины;
f_1 – функция, учитывающая ограниченные размеры участка трубы, форму и расположение трещины, способ нагружения при расположении трещины вдоль оси трубы:

$$f_1 = \sqrt{1 + 1{,}61\frac{(l/2)^2}{R\delta}}. \tag{4}$$

Другие случаи расположения трещин в изделиях рассмотрены в [4].

При инженерной оценке прочности материала величину K_{1C} определяют при испытании образцов по нагрузке, вызывающей страгивание трещины с места. В таблице 1 приведены значения K_{1C} для некоторых применяемых в технике сталей и сплавов.

Вопрос о распространении усталостных трещин следует рассматривать как самостоятельную проблему, так как при наличии концентрации напряжений ресурс прочности определяется главным образом периодом распространения трещин [5]. Кроме того, большое значение имеет медленное подрастание готовых трещин, уже присутствующих в конструкциях и имеющих чаще всего технологическое происхождение (например, сварочные трещины). По данным исследований график изменения длины трещины l от числа циклов нагружения N имеет вид степенной зависимости [4].

Таблица 1 – Значения предела $\sigma_{0,2}$ и критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1C} для сталей, алюминиевых и титановых сплавов

№ п/п	Сталь (сплав)	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1C}, МН/м$^{3/2}$
1.	Сталь 3	300	27,9
2.	Сталь У8	900	18,0
3.	Сталь 25ХГСА	1000	71,3
4.	Сталь 38ХГМСФ	1500	45,0
5.	Сталь индукционно-вакуумного переплава (12% Ni + 5% Cr + 3% Mo)	1300	255,7
6.	Al + Cu + Mg	450	27,9
7.	Al + Zn + Mg	530	46,5
8.	Ti + 6% Al + 4% Va	1080	43,4
9.	Ti + 6% Al + 4% Zn + + 3% Mo	1050	124,0

Величину ресурса элемента трубопровода с трещиной в виде числа циклов N_C, необходимого для подрастания трещины до критических размеров, можно определить по широко известной зависимости Париса-Эрдогана:

$$N_C = \frac{2}{\pi^{n/2}(n-2)c\Delta\sigma^n f_1^n}\left(l_h^{(2-n)/2} - l_C^{(2-n)/2}\right), \quad (5)$$

где: n, c – константы материала;
$\Delta\sigma = \sigma_{y\,max} - \sigma_{y\,min}$ – разность между наибольшим и наименьшим напряжением в цикле нагружения;
l_H, l_C – размер трещины, обнаруженной при обследовании трубопровода, и критический размер трещины, определяющий достижение предельного состояния трубопровода.

Для большого числа испытанных материалов величина n меняется в пределах $2-8$, а c в пределах $10^{-8}-10^{-14}$. Наиболее часто $n \approx 4$, а для сталей $c = 10^{-8}-10^{-10}$.

Для определения критического размера трещины воспользуемся равенством (2):

$$K_{1C} = \sigma_m\sqrt{\pi l_C} f_1, \quad (6)$$

где: σ_m – предел текучести материала трубопровода.

Из этого уравнения получаем:

$$l_C = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{1C}}{\sigma_m f_1}\right)^2. \quad (7)$$

С учетом выражения (4) получаем кубическое уравнение:

$$\frac{0,4}{R\delta} l_C^3 + l_C = \pi\left(\frac{K_{1C}}{\sigma_m}\right)^2. \quad (8)$$

Используя полученное значение критического размера трещины, найденное из уравнения (8), можно определить величину ресурса N_C элемента трубопровода с трещиной по зависимости (5). Следует отметить, что результаты, получаемые по зависимости Париса-Эрдогана, носят ориентировочный характер. Это обусловлено тем, что величины n, c, строго говоря, не являются константами материала, а зависят от уровня циклической нагрузки и асимметрии цикла:

$$R_a = \frac{\sigma_{y\,min}}{\sigma_{y\,max}}.$$

Кроме того, применение величины коэффициента *c* в виде достаточно широкого диапазона приводит к сильному разбросу значений выходных данных, поэтому для обеспечения корректности расчета величину данного коэффициента следует считать равной 10^{-8}.

Более точные данные о величине ресурса N_C можно получить при систематическом наблюдении за ростом трещины. Данные об изменении длины трещины во времени можно представить в виде дискретного временного ряда – множества наблюдений, получаемых последовательно через дискретные промежутки времени. Значение члена ряда равно:

$$l_t = a_t + \varepsilon_t, \tag{9}$$

где: a_t – уровень ряда в момент времени t;
ε_t- шум, т.е. случайные отклонения, величину ε_t считают нормально распределенной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_ε.

При наличии некоторого числа замеров длины трещины можно перейти к анализу модели прогнозирования – математической модели, аппроксимирующей закон эволюции уровня ряда a_t во времени [6].

Модель прогнозирования может быть представлена в виде:

$$\tilde{l}_\tau(t) = \tilde{a}_{t+1},$$

где: $\tilde{l}_\tau(t)$ – прогнозируемое на τ шагов значение длины трещины, полученное в момент времени t;
$\tilde{a}_{t+1}$ – оценка значения уровня a_{t+1}.

Несмотря на то, что зависимость длины трещины l от числа циклов нагружения N является степенной, для краткосрочного прогнозирования на несколько шагов вперед можно применить линейную модель изменения – модель линейного роста трещины.

Прогноз в этом случае может быть получен по уравнению:

$$\tilde{l}_t(t) = \tilde{a}_{t+1} + \tilde{b}_{t+1^\tau}, \tag{10}$$

где: $\tilde{a}_{t+1} + \tilde{b}_{t+1^\tau}$ – текущие оценки коэффициентов адаптивного полинома первого порядка.

Наиболее предпочтительной для практического использования является модель линейного роста Брауна, в которой оценки коэффициентов адаптивного полинома определяются следующим образом:

$$\begin{gathered} \tilde{a}_{t+1} = \tilde{a}_t + \tilde{b}_t + (1-\beta^2)e_t, \\ \tilde{b}_{t+1} = \tilde{b}_t + (1-\beta^2)e_t, \\ e_t = l_t - \tilde{l}_1(t-1), \end{gathered} \tag{11}$$

где: β – коэффициент дисконтирования, характеризующий снижение значимости наблюдений за единицу времени, $0 < \beta < 1$;
e_t – ошибка прогноза.

Оптимальное значение коэффициента дисконтирования β находится эмпирическим путем. Линейная модель распространения трещины достаточно проста для обработки и позволяет получить предварительные оценки длины трещины. При необходимости модель распространения можно уточнить.

Алгоритм оценивания технического состояния и остаточного ресурса

1. Задаемся исходными данными, которыми являются длина трещины l_h, а при наличии систематических наблюдений – значения временного ряда замеров длины трещины: $l_1, l_2, \dots, l_t$.

2. По формулам (3)-(7) определяем величины критического размера трещины l_C и ресурса элемента трубопровода с трещиной в виде числа циклов, необходимого для подрастания трещины до критических размеров N_C.

3. Если по данным систематических наблюдений в изменении размера трещины наблюдается рост, то переходим к прогнозированию значений временного ряда с использованием модели линейного роста. Получаем оценку длины трещины по уравнениям:

$$\tilde{l}_\tau(t) = \tilde{a}_{t+1} + \tilde{b}_{t+1}\tau,$$

$$\tilde{a}_{t+1} = \tilde{a}_t + \tilde{b}_t + (1-\beta^2)e_t,$$

$$\tilde{b}_{t+1} = \tilde{b}_t + (1-\beta^2)e_t,$$

$$e_t = l_t - \tilde{l}_1(t-1).$$

4. На основе сравнения оценки длины трещины с величиной критического размера трещины l_c и по тенденции изменения размеров трещины делаем заключение об остаточном ресурсе N_C подконтрольного элемента трубопровода.

Предложенная методика прогнозирования ОР трубопроводов с дефектами типа трещин и новый теоретический подход, в основе которого лежат результаты многочисленных исследований в области теории упругости, а также процедуры прогнозирования роста трещин с помощью экспоненциального сглаживания данных временного ряда позволит повысить расчетный прогноз времени достижения предельного состояния трубопроводов систем заправки компонентами ракетного топлива, систем термостатирования, водоснабжения и отопления технологических и технических систем стартовых комплексов.

Список источников

1. Миронов А.Н.Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. СПб.: ВИКУ им. А.Ф.Можайского, 2000. 420 с.
2. Клячкин В.Н., Крашенинников В.Р., Кувайскова Ю.Е. Прогнозирование и диагностика стабильности функционирования технических объектов: монография. М.: Русайнс, 2020. 199 с.
3. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. Л.: Машиностроение, 1984. 224 с.
4. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
5. Партон В.З. Механика разрушения. М.: Наука, 1990. 240 с.
6. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. М.: Статистика, 1979. 254 с.

Информация об авторах

Д.Н. Гула – кандидат технических наук, SPIN код автора 9147-9805.
В.М. Моторин – кандидат технических наук, доцент, SPIN код автора 6215-0267.